

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR

Spécialité : Robotique

Préparée à l'université d'Evry val d'Essonne, laboratoire IBISC

Présentée et soutenue publiquement

Par

Sébastien Delarue

Le 30 novembre 2007

**Contributions en vue de rendre plus naturelle l'interaction entre
une personne handicapée et son assistance robotisée.**

JURY

Rapporteur : Bruno Arnaldi, Centre de recherche INRIA, Rennes.

Rapporteur : Dominique Duhaut, Laboratoire VALORIA Université Bretagne Sud.

Examineur : Alain Pruski, Laboratoire L.A.S.C, Université de Metz.

Examineur : Daniel Mestre, Laboratoire CNRS, Université de Aix-Marseille.

Examineur : Philippe Hoppenot, co-encadrant, Laboratoire IBISC, Université d'Evry.

Examineur : Etienne Colle, Directeur de thèse, Laboratoire IBISC, Université d'Evry.

Table des matières

1. Introduction	6
2. Etat de l'art	8
2.1. Handicap.....	8
2.1.1. Aides techniques	8
2.1.2. Aide à la manipulation	10
2.2. Différentes approches pour la commande coordonnée d'un manipulateur mobile.....	14
2.2.1. Manipulabilité	14
2.2.2. Approche multi-agents	15
2.2.3. Systèmes Déformables	17
2.3. Science du virtuel	18
2.3.1. Réalité Virtuelle	19
2.3.1.1. Présentation	19
2.3.1.2. Applications	20
2.3.1.3. Caractéristiques principales des systèmes de RV	22
2.3.2. Réalité Augmentée	23
2.3.2.1. Présentation et applications.....	23
2.3.2.2. Techniques et cohérence:	26
2.3.3. Virtualité augmentée	27
2.3.4. Interaction entre objets	28
2.4. Conclusion.....	29
3. Présentation et évaluation de ARPH	31
3.1. Présentation de ARPH.....	31
3.1.1. Présentation générale.....	31
3.1.2. Interface de commande	32
3.1.3. Modes de commande.....	33
3.1.4. Architecture informatique	33
3.2. Evaluations du prototype ARPH	35
3.2.1. Hypothèse et mise en œuvre.....	35
3.2.2. Expérimentation en locaux aménagés	36
3.2.2.1. Pré requis : étude du bras MANUS	36
3.2.2.2. Protocole.....	38
3.2.2.3. Résultats	40
3.2.3. Expérimentation au domicile d'une personne.....	45
3.2.3.1. Pré requis : études des activités quotidiennes	45
3.2.3.2. Protocole.....	47
3.2.3.3. Résultats	49
3.2.4. Discussion	51
3.3. Conclusion.....	52
4. Commande coordonnée d'un bras manipulateur embarqué sur base mobile.....	54
4.1. Systèmes Multi-Agents	54
4.1.1. Agents réactifs du bras	55
4.1.1.1. Fonctionnement	55
4.1.1.2. Comparaison/simulation.....	58
4.1.1.3. Supervision de postures par réseau de neurones	59
4.1.1.4. Discussion	61

4.1.2. Agent cognitif de la base mobile.....	61
4.1.3. Discussion	63
4.2. Masses ressorts	64
4.2.1. Généralités.....	64
4.2.2. Modélisation modulaire de fonctions par « Boite MR » (ou « Boîte Masse Ressort »).....	65
4.2.2.1. Cube MRD	65
4.2.2.2. Cube MRR1 et MRR2.....	65
4.2.3. Modélisation complète du bras	66
4.2.4. Modélisation de la structure complète Bras/base mobile.....	68
4.2.5. Discussion	69
4.3. Serpentin répulsif à particules	69
4.3.1. Modélisation du bras	69
4.3.2. Algorithme	72
4.3.3. Discussion	72
4.4. Evaluations	73
4.4.1. Présentation	73
4.4.2. Simulations sans pannes.....	74
4.4.2.1. Déplacement en marche avant.....	74
4.4.2.2. Trajectoire de l'effecteur	75
4.4.2.3. Trajectoire de la base :	76
4.4.2.4. Quantité de mouvement Articulaire	77
4.4.2.5. Position Singulière	78
4.4.2.6. Déplacement vers la droite.....	78
4.4.2.7. Trajectoire de l'effecteur.....	79
4.4.2.8. Trajectoire de la base.....	80
4.4.2.9. Quantité de mouvement Articulaire	81
4.4.2.10. Discussion	82
4.4.3. Simulations avec pannes	82
4.4.3.1. Simulation avec panne de l'articulation 1	82
4.4.3.2. Trajectoire de l'effecteur	82
4.4.3.3. Trajectoire de la base.....	83
4.4.3.4. Simulations avec panne des articulations.....	84
4.4.3.5. Trajectoire de l'effecteur	84
4.4.3.6. Trajectoire de la base.....	85
4.4.3.7. Discussion	85
4.4.4. Conclusion.....	86
4.5. Expérimentations sur le système réel	87
4.5.1. Déplacement vers la droite sans panne	88
4.5.2. Déplacement vers la droite avec panne	89
4.6. Conclusion.....	89
5. Simulation, apprentissage et transfert de compétences	91
5.1. Présentation du simulateur ARPH.....	91
5.2. Validation du simulateur	94
5.2.1. Protocole.....	95
5.2.2. Résultats	96
5.2.2.1. Méthodes de traitement statistique.....	96
5.2.2.2. Données recueillies	97
5.2.2.3. Temps total en phase d'approche	98

5.2.2.4. Temps total en phase de saisie	99
5.2.2.5. Nombre d'arrêts en phase d'approche.....	99
5.2.2.6. Nombre d'arrêts en phase de saisie	99
5.2.2.7. Nombre de marches arrière en phase d'approche	100
5.2.2.8. Nombre de marches arrière en phase de saisie.....	100
5.2.2.9. Taux d'utilisation de la commande manuelle	100
5.2.2.10. 5 - Lissage des trajectoires	101
5.2.3. Discussion	101
5.3. Transfert de compétences.....	104
5.3.1. Le Transfert d'apprentissage : présentation générale.....	105
5.3.2. Protocole.....	110
5.3.3. Résultats	112
5.3.3.1. Données recueillies et méthodes de traitement statistique	112
5.3.3.2. Durée de la mission	112
5.3.3.3. Orientation du robot pour la saisie	113
5.3.3.4. Nombre d'arrêts durant la mission	113
5.3.3.5. Nombre de marches arrière durant la mission.....	114
5.3.4. Discussion	115
5.4. Conclusion.....	118
6. Conception Centrée Utilisateur	120
6.1. Démarches de conception et de développement	120
6.2. CCUSC (Conception Centrée Utilisateur pour Systèmes Complexes).....	124
6.2.1. Exigences	124
6.2.2. Présentation de la méthode.....	125
6.2.3. Avantages et conséquences	129
6.2.4. Contraintes et indices d'évaluations.....	131
6.2.4.1. Contraintes	131
6.2.4.2. Indicateurs d'avancement.....	132
6.2.5. Etude de cas, application au projet ARPH	133
6.2.5.1. Hypothèses	133
6.2.5.2. Solution	133
6.3. Conclusion.....	135
7. Conclusion.....	136
8. Références Bibliographiques.....	138
Annexe I – Données sauvegardées en simulation	146

Remerciements

« A ceux qui m'ont conçu, fabriqué, élevé et m'ont permis d'être ce que je suis aujourd'hui ... »

Je remercie tout d'abord messieurs Bruno Arnaldi et Dominique Duhaut pour avoir accepté de rapporter mon travail.

Je remercie ensuite chaleureusement (et par ordre chronologique) :

Daniel Benesby, mon cousin, qui est l'instigateur de mon inscription en DEA après 5 ans de bons et loyaux services dans l'industrie et donc à l'origine du changement de cap de ma vie professionnelle pendant ces 4 dernières années.

Florent Chavand, responsable du DEA RVMSC (Réalité Virtuelle et Maitrise des systèmes complexes), qui a accepté cette inscription.

Etienne Colle et Philippe Hoppenot, respectivement mon directeur de thèse et mon encadrant, pour m'avoir proposé cette thèse et pour leur confiance. Je les remercie aussi, pour l'aide et les conseils qu'ils m'ont apportés durant ces trois années.

J'adresse aussi mes remerciements à Jean-Pierre Gaillard, directeur du DESS psychologie du travail et ergonomie de l'université de Rennes avec qui nous avons collaboré pour mettre en places les expérimentations décrites dans ce mémoire.

Je remercie aussi Laurianne Closier, Gilles Deguillard, Sylvia Elie et Caroline Ballargeau pour le travail de stage et l'aide qu'ils m'ont apporté aux cours de ces expérimentations.

Je remercie Alban Rochel, ingénieur en informatique, pour le travail fourni dans le cadre de la refonte logicielle du système informatique de notre robot, permettant de mener les évaluations dans de bonnes conditions.

Je remercie ensuite tout le personnel de l'université et de l'IUP d'Evry (administratif et enseignant) qui m'ont permis d'effectuer cette thèse dans de bonnes conditions et en particulier pour le contrat de monitorat qui m'a accompagné durant ces 3 années.

Un grand merci à Christophe Luquin, technicien à l'IUP d'Evry, pour le prêt de matériel électronique et sa disponibilité qui ont permis de fiabiliser notre manipulateur mobile.

Enfin, j'adresse mes derniers remerciements à Nadjat Talbi qui fut ma compagne durant ces 3 années et avec qui j'ai passé les plus agréables moments de ma vie. En l'espérant ma femme pour le reste de mon existence ...

1. Introduction

Les recherches sur l'assistance technique aux personnes handicapées se sont beaucoup développées ces dernières années. Le projet ARPH (Assistance Robotique aux Personnes Handicapées) du laboratoire IBISC, débuté en 1994, consiste en un bras manipulateur embarqué sur une base mobile pour l'assistance à la saisie et la manipulation d'objets en vision directe ou indirecte. La télé opération de ARPH, par des personnes handicapées désireuses d'agir par elles-mêmes sur leur environnement et dont le handicap est variable d'un individu à l'autre, nécessite la mise en place d'une coopération homme robot efficace. Les évaluations menées dans le cadre de cette thèse, auprès de personnes handicapées tétraplégiques, ont montré que, même si elles ont l'usage d'un tel système, celui-ci mérite encore d'être amélioré du point de vue de la commande de la base mobile et du bras manipulateur et que l'organisation de telles expérimentations restent difficiles à mettre en œuvre (coûts, délais, disponibilité...).

Nous avons donc dans un premier temps travaillé à l'amélioration de la coopération homme-machine en proposant une commande coordonnée Base-Bras afin de diminuer l'effort cognitif et le stress de l'utilisateur qui, actuellement, pilote séparément la plate-forme mobile et le manipulateur. Nous avons cherché à explorer ou revisiter d'autres voies que celles proposées par l'approche classique (critère de manipulabilité) qui, par leurs avantages, pourraient concurrencer cette dernière. Nous les avons comparées à l'aide de critères objectifs et nous avons implémenté la plus prometteuse sur le système réel.

Dans un deuxième temps, devant les difficultés rencontrées durant les expérimentations qui nécessitaient un prototype fiable et sécurisé, des locaux spécifiquement aménagés pour le handicap et des ressources humaines importantes, nous nous sommes intéressés aux démarches de développement d'un produit avec pour objectif de réduire les délais de conception tout en satisfaisant au mieux l'utilisateur. Nous nous sommes basés sur une démarche de Conception Centrée Utilisateur (CCU) pour l'adapter au développement d'un système complexe et innovant, telle qu'une aide robotisée. Nous avons alors réfléchi à l'intérêt qu'il y avait à intégrer les techniques de Réalité Virtuelle (RV) dans une telle démarche. Dans cette optique, nous avons d'abord voulu vérifier si un transfert d'habiletés était possible entre un simulateur du système ARPH et le système réel, préalable à l'utilisation de ces techniques qui nous permettraient d'évaluer un système virtuel de manière fiable. Les résultats obtenus nous ont permis de proposer une CCU modifiée, utilisant la RV, adaptée à la conception de systèmes complexes et innovants. La concurrence induite par notre économie pousse les industriels à développer des produits de plus en plus performants et complexes avec des délais et des coûts réduits afin de satisfaire le plus grand nombre d'individus. La démarche ainsi proposée ne se limite alors plus au seul domaine du handicap mais s'élargit à tous ceux où l'homme est/devrait être au centre des préoccupations des concepteurs de produits.

Ce mémoire est organisé en 5 chapitres :

Le chapitre 2 présente l'état de l'art. Il traite tout d'abord du Handicap et plus particulièrement des aides techniques à la manipulation. Il expose ensuite diverses pistes dans l'optique d'une commande coordonnée d'un manipulateur mobile pour une meilleure coopération entre l'homme et la machine. Enfin, il décrit les techniques de Réalité Virtuelle qui seront mises en œuvre dans les chapitres 4 et 5.

Le chapitre 3 présente le robot ARPH (Aide Robotisée pour Personnes Handicapées). Il décrit sa structure matérielle, son interface de commande et ses différents modes de pilotage. Enfin

ce chapitre présente les évaluations du prototype existant en situation écologique auprès de personnes handicapées tétraplégiques.

Le chapitre 4 traite de la commande coordonnée du manipulateur mobile ARPH. Il expose différentes méthodes innovantes telles que masses ressorts, particules et multi-agents. A la fin du chapitre, des résultats de simulation permettent une comparaison des différentes approches. Des essais réels sur le prototype ARPH seront présentés.

Le chapitre 5 présente le simulateur en Réalité Virtuelle de ARPH développé au sein du laboratoire. Il décrit ensuite les évaluations menées en partenariat avec des psycho-ergonomes qui ont permis de valider un transfert de compétences positif entre une situation virtuelle et une situation réelle.

Enfin le chapitre 6 présente une démarche de conception originale basée sur les méthodes de Conception Centrée Utilisateur (CCU). Fondée sur les résultats positifs obtenus dans les évaluations précédentes et sur les besoins spécifiques de la conception de systèmes complexes, ce chapitre expose une méthode se basant sur les techniques de Réalité Virtuelle. On y trouvera un descriptif des démarches industrielles actuelles, les contraintes liées à la conception d'un système tel que ARPH, la présentation de la démarche et enfin une étude de cas.

2. Etat de l'art

L'objectif du chapitre est de dresser un état de l'art cadré des principaux domaines en interaction avec les travaux présentés dans ce mémoire.

Dans un premier temps le contexte applicatif « robotique au service de la personne handicapée moteur » est illustré au travers d'exemples de projets passés ou en cours. Dans ce cadre la robotique participe à la suppléance de deux fonctions motrices : la mobilité par le biais de fauteuils dits intelligents et la manipulation à l'aide d'un bras mobile ou non. Ce survol, limité à la manipulation, permet de se faire une idée de l'architecture de ces dispositifs, de l'apport de la robotique et des interactions entre l'homme et la machine

La section suivante aborde certaines approches permettant de résoudre le problème de la commande coordonnée du bras mobile redondant telle que l'aide technique développée dans le projet ARPH. Par rapport à une commande séparée des deux composantes, base mobile et bras, de l'aide robotisée c'est un apport indéniable au confort d'utilisation qui est une demande émanant des utilisateurs apparue au cours des évaluations du système. L'intérêt de chercher des alternatives aux méthodes classiques est d'obtenir des performances ou des caractéristiques mieux adaptées au contexte du handicap.

La dernière partie du chapitre présente les techniques de Réalité Virtuelle, de Réalité Augmentée et de Virtualité Augmentée qui seront mises en œuvre dans le cadre d'une méthodologie modifiée de Conception Centrée Utilisateur (CCU). L'objectif est d'apporter des réponses à la difficulté d'intégrer l'utilisateur à chaque itération de la conception d'un système complexe innovant. Complexe signifie que le système est non seulement difficile à cerner mais aussi formé de composantes matérielles et logicielles sortant ainsi des limites définies par la CCU classique à l'origine dédiée aux interfaces informatiques. Innovant souligne le fait que le système n'existe pas et qu'il est difficile de préciser finement dès le départ les besoins des utilisateurs. Ceux-ci vont se préciser au fur et à mesure du cycle de développement. La RV et ses dérivés permettent d'envisager des adaptations de la CCU classique aux exigences spécifiques d'une assistance complexe innovante.

2.1. Handicap

2.1.1. Aides techniques

Dans le cadre de notre étude, nous allons nous intéresser aux aides techniques pour personnes handicapées et particulièrement à l'assistance robotisée. Les chiffres présentés par la suite sont issus d'études réalisées en France entre 1999 et 2003 (population tous ages confondus). La Figure 2-1 montre que la demande en aides techniques est importante et que l'offre, encore insuffisante, est limitée à 25% des utilisateurs potentiels.

	0-19 ans	20-39 ans	40-59 ans	60-79 ans	80 ans et plus	Ensemble
Hommes	6 %	9 %	26 %	31 %	61 %	22 %
Femmes	3 %	12 %	17 %	35 %	71 %	25 %
Ensemble	5 % 178 000	10 % 410 400	22 % 1 269 900	33 % 1 269 900	68 % 1 118 700	24 % 5 275 300

Figure 2-1 : Usage d'une aide technique à domicile (prothèses incluses) selon l'âge et le sexe [ROUS2003]

La Figure 2-2 donne la répartition de l'usage des aides techniques selon les déficiences. Elle souligne le fait que souvent les personnes cumulent plusieurs déficiences physiques (personnes tétraplégiques, myopathes par exemple). Les Figure 2-1 et Figure 2-2 montrent que les besoins sont importants et à l'heure actuelle peu satisfaits. La conception d'aides techniques innovantes est donc essentielle à l'amélioration de la qualité de vie de ces personnes.

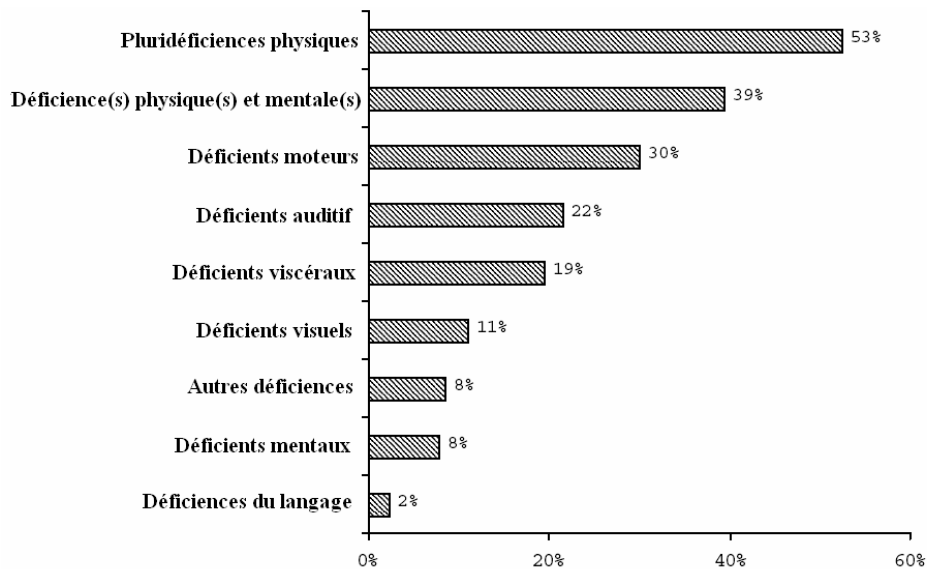


Figure 2-2 : Usage des aides techniques selon les déficiences [ROUS2003]

La Figure 2-3 présente le taux de couverture des besoins apportés par les aides techniques par grande fonction de la vie quotidienne. On remarque que la mobilité est bien couverte du fait de réels progrès ces dernières années, notamment pour les fauteuils roulants qu'ils soient manuels ou électriques. En termes de communication, les aides techniques ne sont satisfaisantes qu'à 45%. Pour la manipulation, seuls 35% des besoins sont couverts. Dans le paragraphe suivant, nous présentons les différents systèmes robotiques d'aide à la manipulation.

	Mobilité	Contenance	Communication	Traitement de maladies de longue durée	Transfert	Manipulation
Nombre d'utilisateurs	1 846 000	1 187 000	946 000	641 000	108 000	31 000
Proportion d'utilisateurs parmi la population vivant à domicile (en %)	3	2	1 ^e / 1 ^d	1	0	0
Taux de couverture par rapport aux besoins exprimés (en %)	90	86	45	97	44	35

Figure 2-3 : Aides techniques et taux de couverture des besoins par grande fonction [HAUE2001]

Dans le paragraphe suivant, nous présentons différents systèmes robotique d'aide à la manipulation.

2.1.2. Aide à la manipulation

Une assistance robotisée permet de suppléer la fonction manipulation afin d'aider une personne handicapée à interagir avec son environnement. Actuellement cette assistance se décline sous 3 formes :

- **Poste fixe** : On considère un bras manipulateur fixé à un endroit particulier de l'environnement fixe. Ce bras est capable d'effectuer des tâches automatiquement, rapidement et avec précision. Il a pour inconvénient un espace de travail limité et la nécessité d'avoir un environnement contrôlé, c'est à dire instrumenté. Parmi les projets exploitant cette configuration, nous trouverons MASTER-RAID I et II qui est un projet européen développé entre 1985 et 1999 (Figure 2-4). Le projet français AFMASTER est présenté en Figure 2-5. Ce dispositif a été commercialisé.



Figure 2-4 : MASTER/RAID



Figure 2-5 : AFMASTER

- **Bras embarqué sur fauteuil roulant** : Un bras manipulateur est fixé au fauteuil roulant de la personne handicapée. Ce système a pour avantage un espace de travail important. De plus, il est facilement transportable. En Hollande, la société Exact Dynamics commercialise le bras manipulateur à 6 degrés de liberté MANUS. Ce bras est contrôlé à l'aide d'un clavier qui permet de déplacer la pince de saisie selon les 3 axes du repère du bras (Figure 2-6). Le projet FRIEND (Figure 2-7) cherche à procurer à l'utilisateur des modes de contrôle plus avancés en proposant une bibliothèque d'actions préenregistrées à l'aide d'un système stéréoscopique à 2 caméras et d'un gant de données.



Figure 2-6 : Bras manipulateur MANUS embarqué sur fauteuil roulant

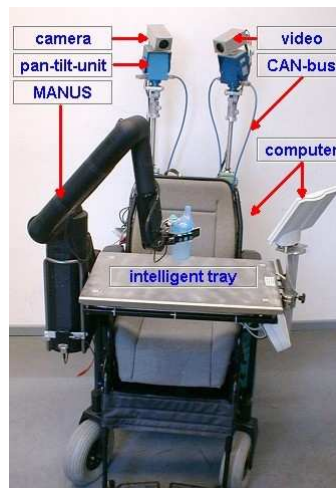


Figure 2-7 : FRIEND

Manipulateur mobile : En lieu et place d'embarquer le manipulateur sur un fauteuil, on préfère le fixer sur une plate-forme mobile indépendante. Ces systèmes sont téléopérés à distance. Bien qu'étant plus imposants (dédoublage du fauteuil roulant et donc de la fonction mobilité), l'utilisateur gagne en maniabilité car il n'est plus obligé de se déplacer avec le bras manipulateur. Une personne alitée ou désirant rester devant son poste de travail peut également téléopérer le système d'une autre pièce. Différents modes de commandes sont mis à la disposition de l'utilisateur, du téléopéré pur jusqu'à l'autonomie complète en passant par des variantes dans lesquelles la commande est partagée. De plus, le manipulateur offre des capacités de télésurveillance. Parmi les travaux en cours sur les manipulateurs mobiles on peut citer le projet européen MoveAid (1994 1997) présenté sur la Figure 2-8.

Avec les progrès technologiques commencent maintenant à apparaître les robots de type « compagnons ». Basés sur des plate-formes mobiles, équipées ou non d'un bras manipulateur, ces robots ne s'adressent plus simplement au handicap mais à tous les domaines. De plus en plus sophistiqués et dotés d'une autonomie énergétique de plusieurs heures, ils sont capables d'interagir efficacement avec l'homme. On trouve par exemple Oskar (Figure 2-9) de la société Opel qui renseigne les visiteurs dans un hall d'exposition de véhicule.

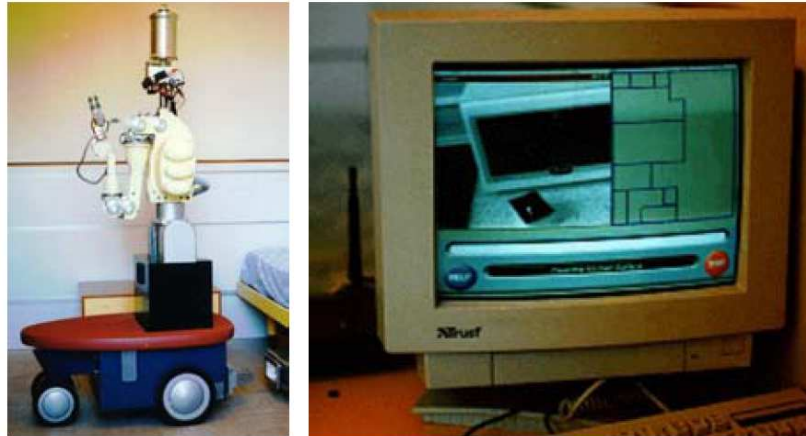


Figure 2-8 : Système MOVEAID



Figure 2-9 : Oscar

Le Care-O-bot II (Figure 2-10) de Fraunhofer IPA est équipé en plus d'un bras manipulateur. Lors d'un meeting à Stuttgart en 2002, il était capable de reconnaître une personne, de lui tendre une carte de visite et d'en attraper une autre en retour.

Une étude [DAUT2005] montre que les robots de type « compagnons » sont plutôt bien acceptés par la majorité des personnes. Leur aspect physique semble ne pas avoir d'incidence et l'on recherche plutôt chez eux une grande capacité à pouvoir communiquer et interagir avec l'être humain. Cette capacité à communiquer est à développer afin que le robot ne soit pas une gêne pour la personne en relation avec lui. Des travaux ont par exemple montré qu'un robot en phase d'approche vers une personne doit éviter de venir de face, que le sujet soit assis (derrière un bureau ou non) ou debout [DAUT2006]. L'approche par le côté doit être privilégiée. A l'heure actuelle, les robots ne savent effectuer que des tâches très ciblées. Un robot est, par exemple, capable de se déplacer dans un environnement encombré, de jouer aux dames, de saisir un objet, de reconnaître une personne, de dialoguer... mais aucun robot, à ce jour, n'implémente simultanément toutes ces fonctionnalités, chacune étant liée à une implémentation mécanique particulière. De plus, la capacité d'un robot à déterminer ce que désire son possesseur est encore très réduite. Cette capacité à choisir entre différentes actions reste une voie peu exploitée car elle relève non seulement des domaines de la robotique mais aussi de ceux de la psychologie et de l'intelligence artificielle.



Figure 2-10 : Care-O-bot II

Même si la recherche sur les robots « compagnons » peut s'appliquer sur certains points au domaine du handicap, il n'en reste pas moins vrai que l'approche concernant le contrôle même de la machine est autre. Plutôt que de rechercher le « tout automatique » des robots de type « compagnons », l'assistance robotisée pour personnes handicapées est plus concernée par des modes semi-automatiques. D'une part, les capacités d'interaction avec l'environnement (incapacité à parler, à faire des gestes) peuvent être limitées rendant ainsi d'autant plus difficile la détection automatique des désiratas du sujet concerné par le robot. D'autre part, les personnes handicapées, notamment les tétraplégiques, ont perdu la capacité à interagir avec le monde. Celles-ci ne désirent pas rester passives mais agir sur leur environnement par l'intermédiaire d'un robot. Elles doivent donc en rester maître pour retrouver ce pouvoir d'action sur le monde qui les entoure.

C'est dans cette optique que le projet ARPH (Assistance Robotisée pour Personne Handicapée), présenté sur la Figure 2-11, a vu le jour. Il est constitué d'une base mobile sur laquelle est fixé un bras manipulateur MANUS. Il est téléopéré à distance via une interface graphique communiquant avec le robot par l'intermédiaire d'un réseau Ethernet WIFI. Une vue de l'environnement est proposée à l'utilisateur par l'intermédiaire d'une caméra embarquée. Une ceinture ultrason permet d'éviter les obstacles. ARPH intègre différents modes de contrôle allant du manuel au « tout automatique ».



Figure 2-11 : ARPH (Assistant Robotisé pour Personnes Handicapées)

2.2. Différentes approches pour la commande coordonnée d'un manipulateur mobile

Nous présentons ici différentes approches pour réaliser la commande coordonnée d'un robot constitué d'une plate-forme mobile sur laquelle est embarqué un bras manipulateur. Ce type de système fait apparaître des redondances qui permettent, si elles sont prises en compte dans le schéma de contrôle du robot, de faciliter la saisie pour l'opérateur. Pour cela, la posture du système doit permettre un déplacement arbitraire en position ou en orientation de l'organe terminal.

Nous présentons tout d'abord une méthode classique basée sur la manipulabilité qui servira de référence au chapitre 4. Nous décrivons ensuite deux approches alternatives qui nous apparaissent intéressantes au regard des avantages potentiels qu'elles peuvent apporter : les systèmes multi-agents et les techniques basées sur les objets déformables.

2.2.1. Manipulabilité

Le concept de manipulabilité a été introduit par Yoshikawa ([YOSH1990], [YOSH1984] et [YOSH1985]) en développant une approche basée sur le concept d'ellipsoïde caractérisant la capacité de manipulation (Figure 2-12). Sa forme est liée à la capacité de l'organe terminal à se déplacer dans les différentes directions de l'espace opérationnel (grande vitesse sur l'axe majeur et petite vitesse sur l'axe mineur de l'ellipsoïde). Cette ellipsoïde est appelé « Ellipsoïde de manipulabilité ».

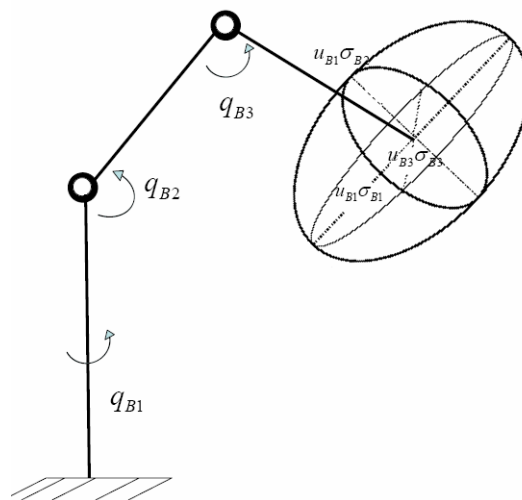


Figure 2-12 : Ellipsoïde de manipulabilité en 3D.

Il existe d'autres mesures de manipulabilité dérivées de ce concept d'ellipsoïde qui sont fonctions de différents critères :

- Volume de l'ellipsoïde.
- Rapport entre les longueurs du demi-petit axe et demi-grand axe de l'ellipsoïde ([SALIS1982], [BAYL2001A], [BAYL2001B]).
- Fonction des valeurs singulières de la matrice Jacobienne du système

Bayle [BAYL2001A] a défini une nouvelle mesure de manipulabilité en généralisant la notion d'excentricité d'une ellipse. Celle-ci, notée w_{B5} , donne des indications sur la forme de l'ellipsoïde de manipulabilité. Si w_{B5} tend vers 0, alors l'ellipse tend vers un cercle et l'organe terminal peut se déplacer sans direction préférentielle. Si w_{B5} tend vers 1, l'ellipse tend à s'aplatir et l'organe terminal possède alors des directions préférentielles de déplacement.

L'exemple de Figure 2-13 (tiré de [KHAL1999], [SCIA1996]) illustre l'évolution de ce critère pour un bras manipulateur plan à 2 liaisons rotoïdes.

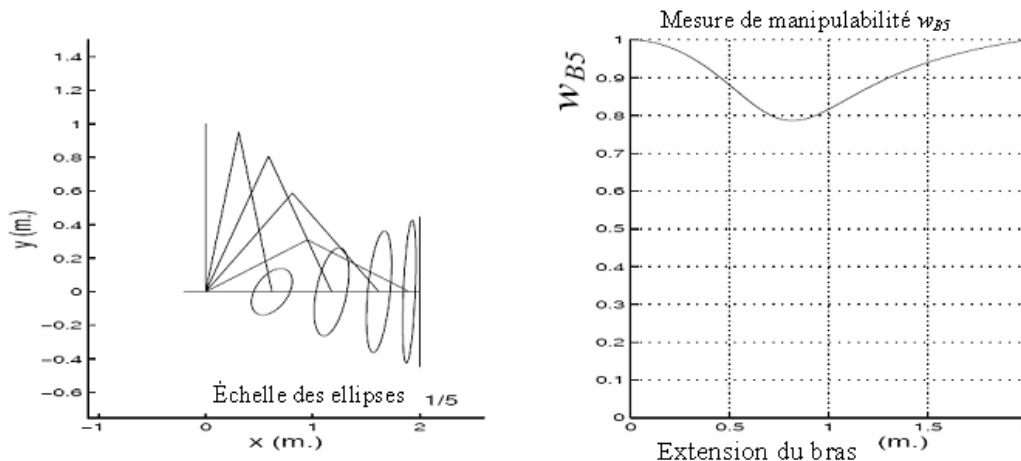


Figure 2-13 : Ellipses et mesure de manipulabilité d'un bras plan.

La mesure w_{B5} est égale à 1 lorsque l'ellipse est dégénérée (plate), ce qui correspond à des configurations singulières.

L'analyse de la manipulabilité a ensuite été étendue à la coordination de mouvement d'une plate-forme mobile et d'un bras manipulateur. [SERA1993] a montré la contribution des degrés de liberté de la plate-forme mobile dans le mouvement de l'organe terminal du bras manipulateur. Des travaux ont porté sur la génération de mouvements coordonnés entre les deux entités ([FOUL1998], [BAYL2001A]) ou la notion de manipulabilité a été étendue aux robots non holonomes. Le contrôle du système est alors basé sur l'optimisation des critères de manipulabilité associés à la plate-forme mobile et/ou au bras manipulateur.

Des travaux plus récents [NAIT2006] ont permis d'associer à ce critère de manipulabilité la direction de la tâche à effectuer par le manipulateur mobile. En effet, l'objectif n'est plus ici d'optimiser ce critère en fonction de sa position statique mais en fonction de la tâche opérationnelle désirée. Ainsi, la manipulabilité devient directionnelle.

En pratique, ces méthodes demandent une modélisation fine du système « plate-forme mobile - bras manipulateur ». Le critère de manipulabilité et son optimisation passe par le calcul de la pseudo inverse de la jacobienne du système.

2.2.2. Approche multi-agents

L'approche multi-agents, pour la commande coordonnée d'un manipulateur mobile, nous a semblé intéressante. Elle permet de simplifier les modèles mathématiques mis en œuvre tout en offrant la possibilité d'introduire facilement des comportements supplémentaires difficiles

à modéliser avec les lois classiques de la robotique. On parle souvent en robotique de Système « Multi-Agents » (SMA). Les SMA se découpent en deux grandes familles. D'un côté il y a les systèmes réactifs [LUCI2003] qui font appel à des entités réflexes dont la somme des comportements répond à un objectif de plus haut niveau. De l'autre côté, on trouve les SMA fondés sur des critères de satisfaction, d'altruisme et de coopération [LUCI2002] [DEPL1992] qui implémentent souvent un système sophistiqué de communication entre agents et une entité de haut niveau hiérarchique supervisant la tâche à accomplir. Le lecteur intéressé par la description détaillée des SMA pourra consulter l'excellent ouvrage de Jacques Ferber [FERB1995]. On trouve aussi quelques applications des SMA aux robots manipulateurs [DUHA1999] [DUHA1993] qui décrivent comment atteindre une position cartésienne sans utiliser les modèles mathématiques géométriques inverses. Ces méthodes, pour atteindre un objectif, désolidarisent membre par membre le manipulateur en partant de l'organe terminal. Elles ont pour inconvénient une mauvaise répartition du mouvement entre les différentes articulations. D'autres applications sont souvent liées à la notion de recherche de trajectoires (path planning) [OVER1994], avec ou sans évitement d'obstacles. Ces applications associent des méthodes de champs de potentiels et des algorithmes de simulation de vie artificielle [TOUR1992] [MITU1998]. On parle aussi souvent de multi-agents pour la commande à haut niveau d'un système complexe comme la détection de pannes [GUES1997] ou bien la fusion de données [CAME1993][BOHN1994] (vision, son, toucher) dont souvent, le principe est de trouver les informations les plus pertinentes à l'aide de réseaux neuronaux ou de systèmes à logique floue.

Un agent est défini [FERB1995] comme une entité physique ou virtuelle possédant les caractéristiques suivantes:

- Capable d'agir dans un environnement
- Capable de communiquer directement avec d'autres agents
- Mû par un ensemble de tendances (satisfaction, survie)
- Possédant ses propres ressources
- Capable de percevoir son environnement (même partiellement)
- Possédant des compétences et offrant des services
- Capable éventuellement de se reproduire
- Dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs
- Doté d'autonomie

En réaction à cette définition, notons que le terme agent est souvent employé alors que l'utilisation de « système expert » (Qui se suffit à lui même) serait plus adéquate.

L'informatique évolue d'une architecture centralisée (traitement séquentiel) vers une architecture distribuée (parallélisation des tâches). Ainsi, apparaissent les agents autonomes, capables de réaliser des tâches spécifiques sans aide externe. Les systèmes multi-agents [FERB1995] tentent de résoudre des problèmes plus complexes qui ne pourraient l'être par une entité unique d'intelligence limitée. Nous pouvons définir dans ce cas un agent comme une entité autonome et flexible [WEIS1999]. L'agent doit pouvoir répondre aux changements d'environnement. Il perçoit l'environnement, traite des informations et agit en retour. C'est la boucle sensori-motrice. Les stimuli peuvent venir de l'agent lui-même ou bien de son environnement. Ses actions sont alors effectuées sur lui-même (états internes) ou sur ce qui

l'entoure. Son comportement est le résultat de l'interaction entre lui-même et l'environnement. Il existe trois grandes familles d'agents: cognitifs, réactifs, hybrides.

La famille cognitive divise le traitement interne en trois parties: perception, planification et action. L'agent doit avoir sa propre connaissance du monde. Il peut analyser la situation, prévoir et planifier une action. Cette approche est limitée par le manque de rapidité et de flexibilité. Elle est également insatisfaisante dans le cas d'événements inattendus. Les agents réactifs, eux, perçoivent localement leur environnement (et leurs états internes) et en déduisent immédiatement les actions à effectuer en s'appuyant uniquement sur cette source d'information. Ce principe est basé sur l'action réflexe [ZAPA1992] [WOOL1999]. L'approche hybride fusionne ces deux approches: un comportement réactif de base avec un haut niveau cognitif permettant un arbitrage en cas de situation difficile. Le but est d'associer la réactivité des agents à la capacité de réflexion et d'organisation des systèmes cognitifs [BROO1986] [CHAI2001]. L'objectif des systèmes multi-agents (SAM) est donc de rassembler un ensemble d'agents pour les organiser afin d'atteindre un but de niveau plus élevé. Dans le cadre de l'utilisation d'agents réactifs, il est possible en donnant à chacun d'eux un comportement simple, de voir émerger un comportement social complexe (simulation de colonie de fourmis). C'est cette particularité que nous appliquerons dans le cas d'un manipulateur mobile.

2.2.3. Systèmes Déformables

La deuxième idée vient de l'observation des objets qui nous entourent et plus particulièrement de leur déformation. Pourquoi ne pas modéliser un bras manipulateur par une simple barre d'acier que l'on pourrait facilement tordre afin d'amener une des extrémités sur un point précis. Le domaine de la réalité virtuelle utilise beaucoup de techniques pour simuler la déformation des corps, que l'objectif soit une simulation physiquement réaliste ou non. Le lecteur intéressé pourra lire [NOCE2001] présentant bon nombre de techniques utilisées pour la modélisation de la déformation. La représentation intrinsèque de la matière [40] n'est pas chose aisée si l'on désire obtenir ce réalisme nécessaire pour les applications médicales par exemple ou pour la conception de structures architecturales (ponts, bâtiments). Les techniques de modélisation de déformations les plus physiquement réalistes s'appuient sur la méthode des éléments finis [NIKI2002]. Cette représentation nécessite un coût de calcul important et une mise en œuvre lourde pour la modélisation intrinsèque des objets. Pour pallier ces difficultés, plusieurs approches ont permis d'obtenir des comportements visuels suffisamment réalistes pour des applications non critiques. On trouve celles-ci l'utilisation des Masses Ressorts comme par exemple dans [LAUG2001] où l'auteur modélise l'épiderme. Ici, (Figure 2-14), l'objet à modéliser est discrétisé en masselottes de masse m reliées entre elles par des ressorts de raideur k et de longueur de repos l .

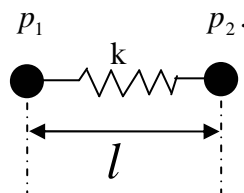


Figure 2-14 : Masse Ressort

Cette approche nous semble intéressante dans notre étude parce que simple à mettre en œuvre et possédant l'avantage de s'équilibrer rapidement, dans le cadre d'utilisation qui nous

intéresse ici (commande d'un bras manipulateur), vers des postures dites anthropomorphiques ou tout du moins visuellement acceptables pour un téléopérateur. C'est d'ailleurs dans le domaine de l'image de synthèse que ce modèle est particulièrement utilisé. Il permet par exemple la simulation, à moindre coût en terme de temps de calcul, du mouvement textile [PROV1995], ou d'animations faciales [PLAT1981]. La Figure 2-15 présente le rendu 3D d'un tricot sur un mannequin utilisant un réseau de masses ressorts.



Figure 2-15 : Rendu d'un textile

Le chapitre 4 propose une modélisation par système déformable d'un bras manipulateur mobile à l'aide de la méthode des Masses Ressorts. Une autre approche dans la modélisation de la déformation s'appuie sur les particules. Une particule est un objet possédant une masse et une vitesse. Elle est soumise à des forces internes qui représentent l'interaction entre particules et à des forces externes introduites par les collisions ou bien la gravité. L'utilisation de particules pour la modélisation, par exemple d'avalanche, est très complexe. Dans [SATO2000], la modélisation se fait à l'aide de la méthode des différences finies d'Euler et permet d'obtenir des simulations relativement génériques. L'auteur de [CHAU1997] utilise des particules dans le graphisme 3D pour la synthèse de paysages et de végétaux. Cette technique lui donne la possibilité d'intégrer dans les scènes un très grand nombre d'objets ayant des propriétés très réalistes que ce soit en termes d'aspect ou de propriétés vis à vis des sources lumineuses par exemple. Dans [LOMB1994], les auteurs créent un contour 3D de l'objet déformable désiré. Cet objet est ensuite rempli de particules. Celles-ci sont de masses différentes en fonction de leur éloignement du centre de l'objet qui, lui, est rempli de grosses particules dont la taille est réduite à proximité du contour pour en respecter, au mieux, la forme extérieure. Ce modèle à couche a l'avantage de limiter le nombre global de particules. Une mise en œuvre des systèmes à particules est appliquée à la commande coordonnée d'un bras manipulateur au chapitre 4.

2.3. Science du virtuel

En prévision de ce que nous allons présenter par la suite, nous supposerons le monde dans lequel l'homme vit comme étant la Réalité Réelle. Sans entrer dans des considérations philosophiques, nous supposerons qu'il existe un monde physique auquel l'homme appartient et avec lequel il interagit. Grâce à l'essor des technologies informatiques, il lui a été donné la possibilité de créer des mondes imaginaires, que nous pouvons qualifier de virtuels. De son interaction avec ces mondes est apparue la notion de Réalité Virtuelle (RV). Entre ces deux extrêmes, la technologie nous permet de faire cohabiter des entités réelles et virtuelles qui ne

composent alors plus qu'un seul monde, celui de la Réalité Mixte (RM). En fonction de la proportion de tel ou tel monde, on parlera de Réalité Augmentée (RA) ou de Virtualité Augmentée (VA). La Figure 2-16 présente le continuum Réalité Virtualité couramment décrit dans la littérature à ce sujet.



Figure 2-16 : Continuum RV

Nous commencerons tout d'abord par décrire la RV puis nous décrirons les techniques qui mixent réel et virtuel : la RA et la VA.

2.3.1. Réalité Virtuelle

2.3.1.1. Présentation

Le terme de Réalité virtuelle a été introduit en 1986 par Jaron Lanier. Il définit ce terme comme suit :

« Réalité synthétisée partageable avec d'autres personnes, que nous pouvons appréhender par nos sens, et avec laquelle nous pouvons interagir, le tout par l'intermédiaire d'artefacts informatisés » - Jaron Lanier (Heim, 1995)

Bien que de tous les auteurs soient d'accord sur le fait que la réalité virtuelle n'existe que si il y a interaction entre l'homme et la machine, nombres d'entre eux réduisent trop souvent cette science à la reproduction, la plus réaliste possible, de la stricte réalité. On pourrait d'ailleurs noter que malgré les progrès technologiques dans ce domaine, nous sommes encore loin de pouvoir reproduire la réalité avec un parfait réalisme. Il faudrait donc considérer qu'aucune des applications actuelles de la RV n'est capable en soi d'améliorer certaines tâches, ce qui est loin d'être le cas. Il est, de plus, intéressant de ne pas limiter la RV à la reproduction de la réalité, ce qui nous interdirait de vivre des expériences n'ayant pas de réalité physique. C'est pourquoi, on préférera parler d'environnement virtuel. Le plus simple des jeux vidéo est déjà une application de la RV puisqu'il propose à un utilisateur d'interagir avec un système mettant en scène un monde virtuel. Cet environnement virtuel n'est plus seulement représentatif de la réalité telle qu'on pourrait l'imaginer (qu'elle soit futuriste ou non, qu'elle modélise des objets qui existent ou qui n'existeront peut être jamais). Celui-ci peut en effet, par exemple, être purement symbolique (Windows...), textuel (MSN...). Il est aussi possible dans ces environnements de modifier les sens requis en fonction de l'utilisation désirée. La production d'un son strident à la place d'un message d'avertissement lors d'un danger par exemple permet de réduire la charge cognitive de l'utilisateur en faisant appel à ses fonctions réflexes lors d'une situation de stress.

La RV est donc composée d'autant de RV qu'il y a de personnes capables d'imaginer des environnements virtuels avec lesquels nous pourrions interagir. Le domaine du jeu vidéo en est une parfaite démonstration. Si nous considérons la RV comme exposée ci-dessus, nous pouvons assimiler tout système informatique offrant une interface de commande, une présentation de résultats et permettant une boucle perception action comme un système de RV.

Dans la suite de ce document, nous nous intéresserons plus particulièrement à la visualisation 3D des environnements virtuels. Nous distinguons ici la vision 3D de la vision en relief. Nous

considérons la vision 3D comme la projection d'entités 3D (réelles ou virtuelles) sur un plan, comme par exemple sur l'écran d'un ordinateur. La vision en relief fait appel à des technologies un peu moins grand public comme les Head Mounted Displays (HMD) (Figure 2-17) stéréoscopiques ou les lunettes à obturations qui permettent de reproduire l'effet de relief tel que notre organisme peut le percevoir.

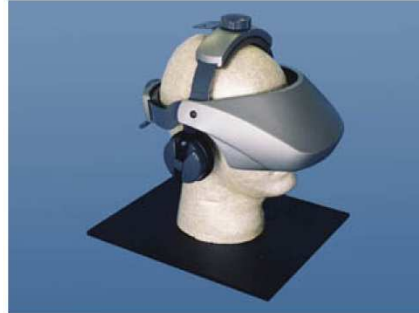


Figure 2-17 : HMD

2.3.1.2. Applications

Dans le domaine de la conception, la RV permet de présenter un produit pour vérifier s'il correspond bien aux attentes du client. Elle permet de vérifier la facilité de montage/démontage des pièces. Bien que la visualisation 3D de phénomènes physiques permette une meilleure compréhension des résultats obtenus en simulation, la puissance de calcul nécessaire est en général insuffisante pour l'obtenir en temps réel et n'entre donc pas encore à l'heure actuelle dans le cadre de la RV. À titre d'exemple, PSA Peugeot Citroën utilise la RV pour la conception et le prototypage de tableaux de bord (Figure 2-18). Cette conception vise à améliorer l'ergonomie et l'accessibilité aux divers éléments de la planche de bord.



Figure 2-18 : Prototypage de tableau de bord chez PSA

Rappelons que la RV nécessite une interaction avec l'utilisateur. Ce dernier, lorsqu'il visualise l'image virtuelle de sa « peut-être » future chaîne HiFi ne doit pas être simple spectateur. Il doit pouvoir interagir avec l'objet, changer la couleur, actionner les boutons. Ce n'est qu'à ce titre que nous pourrions parler de RV dans les phases de conception d'un produit.

La conception architecturale de nouveaux bâtiments tels qu'une pharmacie [FRIC2006] est largement facilitée par la RV. Il est possible d'y déplacer aisément les murs, le mobilier,

d'étudier l'impact de la lumière sur les objets exposés, d'insérer des avatars simulant les files d'attente ou de pointer les endroits stratégiques pour les produits phares.

On peut citer l'application VRShoe [VIGA2004] qui donne aux concepteurs la possibilité de créer de nouveaux designs de baskets. Bien que ces applications soient intéressantes dans le processus de conception au sein même de l'entreprise, il faut noter que l'utilisateur final reste exclu du cycle de conception du produit.

Dans le domaine de l'apprentissage pur, il a été montré l'apport de la RV dans des domaines où il est justement très difficile d'apprendre dans le monde réel pour des raisons de taille ou de danger des éléments manipulés (micro/macrosopique, mécanique...). Une étude menée auprès d'étudiants en mécanique [KAWA1999] montre que la RV pour l'apprentissage du fonctionnement d'une colonne de direction est plus efficace que les moyens mis en œuvre habituellement à l'aide d'un système mécanique réel. La RV offre en effet l'avantage de pouvoir observer le fonctionnement du système en ne présentant par exemple que les pièces mobiles. Il en est de même pour l'apprentissage de la géochimie [FUNG2000]. De surcroît, la RV permet de montrer les comportements physiques dans les cas limites sans risque.

Dans le domaine clinique, la RV a été utilisée pour le traitement des phobies [HODG1995], [NORT1996] et des troubles alimentaires [RIVA1998]. Confronter les patients à leur phobie semble apporter des résultats satisfaisants puisque 50% des personnes traitées ont vu leur phobie diminuer. Il n'en reste pas moins que les psychothérapeutes n'ont pu expliquer les 20% d'échec de la thérapie. De même, il n'est pas certain que ces thérapies comportementales n'entraînent pas un réaménagement psychique du patient pour un nouveau symptôme. Des études sur la RV sont aussi menées pour le traitement comportemental de troubles post-traumatiques (vétérans de guerre) ou sexuels (impuissance). La RV est aussi un outil de soutien pour les grands brûlés [HIT_WEB] et lors des soins palliatifs des cancers. Ce type de système permet d'immerger, par exemple, des patients dans des mondes enneigés et de leur proposer de se déplacer en volant. Les résultats montrent une élévation du seuil de tolérance à la douleur et une baisse de l'anxiété. C'est une méthode qui permet aussi de mieux diagnostiquer les troubles de l'autisme. L'enregistrement des manipulations et des données associées, la possibilité de « rejouer » la scène sont, pour les médecins, des atouts qui leur assurent une meilleure compréhension des troubles liés à la maladie et les conduisent vers une posologie mieux adaptée. Il reste néanmoins des questions sur le réel apport de ces technologies pour le traitement des patients. Même si la RV permet des mesures sur des critères précis (temps, type d'action), il n'en demeure pas moins vrai que l'être humain, dans sa complexité psychique et physiologique, ne peut être analysé aussi facilement. Ainsi, dans ces domaines, des liens forts doivent être tissés entre les ingénieurs et les médecins pour parfaire notre connaissance de l'être humain.

La recherche s'intéresse aux possibilités de transfert de connaissances dans la réalité après entraînement dans la RV. Les expériences menées en [WITM1996] [WALL1998] montrent que l'utilisation de la RV permet un transfert plus efficace de la connaissance d'un lieu qu'avec un plan ou une description verbale classique. On retrouve ces résultats dans [BLIS1997] qui présente une étude faite avec des sapeurs pompiers pour l'apprentissage de lieux avant intervention.

Il reste un domaine encore mal connu qui est en rapport non plus seulement avec l'apprentissage et le transfert de connaissance mais aussi avec le transfert de compétences. Nous entendons par « compétence » une connaissance à aspect dynamique. Connaître le rôle des leviers de commande d'un véhicule ne nous assure pas de savoir le conduire efficacement. À l'heure actuelle, Il est difficile de trouver des études montrant si, oui ou non, la RV permet

d'apprendre des comportements effectivement transposables par la suite dans la réalité. On peut penser que les travaux réalisés dans en l'aéronautique et en automobile en font état bien qu'ils soient restés confidentiels.

Dans le domaine de la conception, les concepteurs font encore trop confiance à leur système RV. L'utilisation d'un système RV, relevant d'une technologie encore émergente et par là même d'un interfaçage artificiel (au sens non naturel pour l'homme), ne prouve aucunement que les comportements utilisateurs, mesurés en situation virtuelle, sont ou seront ceux adoptés en situation réelle.

2.3.1.3. Caractéristiques principales des systèmes de RV

Nous pouvons déjà noter ici l'ambiguïté qu'implique la RV au niveau du risque et de sa réponse dans l'apprentissage et le transfert de connaissances/compétences dans la réalité. Il est bien évident que l'on doit, par exemple, permettre à des chercheurs de faire des assemblages moléculaires en RV dans le cadre de recherches thérapeutiques sans pour autant leur infliger une décharge électrique si cet assemblage est potentiellement dangereux pour la santé. Ces assemblages seront de toute façon validés ou non avant des essais sur l'être humain. Cela permet d'explorer d'autres assemblages qui à terme peuvent être bénéfiques. En est-il de même pour l'apprentissage de la conduite ? Faut-il ou non autoriser, au cours de l'apprentissage, une prise de risques qui pourraient amener à un transfert de connaissances dangereux pour l'utilisateur et ses semblables dans la réalité ? Il est a priori préférable dans ce cas de prévoir dans le système de RV une punition en réponse au risque afin que l'utilisateur prenne conscience des limites du système mais aussi de ses propres limites. Plutôt que d'éliminer ce risque, nous mettrons en place des scénarios d'apprentissage l'obligeant à explorer des solutions non réellement viables qui lui permettront effectivement d'en réaliser la dangerosité.

Que ce soit pour les jeux sur ordinateur ou l'apprentissage, il existe deux facteurs prépondérants à l'efficacité du système : l'immersion et la présence. L'immersion représente la qualité du système à rendre à nos sens leurs possibilités maximales de perception (un environnement en CAVE avec son spatial et retour kinesthésique est beaucoup plus immersif qu'un simple écran d'ordinateur). La présence est la capacité du système à impliquer l'utilisateur dans sa tâche. Même si le système propose un grand degré d'immersion, l'utilisateur, pour des raisons d'attention, de non cohérence de stimuli et d'interactions limitées ne pourrait avoir qu'un degré de présence très limité et être inefficace dans la tâche qu'il effectue. A fortiori, un grand degré de présence permet à l'utilisateur d'être pleinement concentré sur sa tâche. Cette notion de présence n'est pas simplement liée à l'immersion. Le meilleur exemple en est les premiers jeux vidéo ou malgré des graphismes et des interfaces simples (pong, tétis) les joueurs étaient « collés » à leur console, faisant preuve d'un très grand degré de présence pour un degré d'immersion quasiment nul. Même si à l'heure actuelle les périphériques de commandes (manettes vibrantes, manette à détection de mouvements) ont fait de réels progrès, il n'en demeure pas moins que le degré d'immersion avec les consoles reste minime alors que le degré de présence, lui, reste toujours très grand. La notion de présence est encore dans la littérature trop liée à la technologie comme le montre la Figure 2-19 [STAN1998] présentant les facteurs influant sur le degré de présence. De même, dans [RONA1997], [MILG1994A] et [MILG1994B], les critères liés à la présence et donc à l'efficacité du système à permettre à l'utilisateur de réaliser sa tâche ne prennent pas en compte la dimension humaine (état de l'opérateur, fatigue, stress, psychisme...).

Factors Contributing to Sense of Presence

Factor
Object Motion Lag
Distortions
• Temporal
• Spatial
• Intersensorily
• Unimodal
Navigation Mode
Feedback
• Visual
• Auditory
• Social
• Haptic/Tactile
Stereopsis (binocular depth cues)
Human Actors
Color Gamut
Scene Update Rate
Spatial Frequency
Duration of Exposure
Ergonomics of Gear
Realism (i.e., visual scene detail)
Vection
Field-of-View
Touch and Force Feedback
of Correlated Sensory Modalities

Figure 2-19 : critères assurant la présence

2.3.2. Réalité Augmentée

2.3.2.1. Présentation et applications

Comme nous l'avons précédemment dit, la réalité virtuelle n'est pas la simple reproduction de la réalité et nécessite une interaction avec l'utilisateur. La réalité augmentée consiste à ajouter des éléments virtuels ou même réels sur une vue de la réalité dans le but d'augmenter cette interactivité en donnant à l'utilisateur des informations supplémentaires qui vont l'aider à effectuer sa tâche plus efficacement. Que cette vue soit donnée par la vision, un retour kinesthésique [BAYA2006] ou l'un de nos autres sens ... on pourra y ajouter des éléments de différentes natures (objets 2D/3D réels ou virtuels, vibrations, symboles, textes ...). L'objectif est ici d'apporter à l'utilisateur des informations complémentaires utiles à sa tâche sur la vision qu'il a du monde réel.

De nombreuses applications existent mais nous n'en citerons que quelques-unes afin d'appréhender l'intérêt de cette technologie dans différents domaines.

On trouvera par exemple dans [COLB2005] une étude menée sur l'apport de la réalité augmentée pour les soldats d'infanterie (Figure 2-20). À travers différentes technologies, et notamment l'utilisation de HMD (Head Mounted Displays) à écrans semi transparent, le système permet de proposer des aides à l'orientation sur un parcours de 1200m (boussole, distance à l'objectif).



Figure 2-20 : RA pour l'infanterie

On trouve aussi le projet européen ARIS (Figure 2-21) qui permet, à partir d'une vue réelle d'un appartement, d'ajouter des objets virtuels et de tester ainsi l'ameublement d'une pièce avant d'effectuer ses achats [SIMO2002A][SIMO2002B].

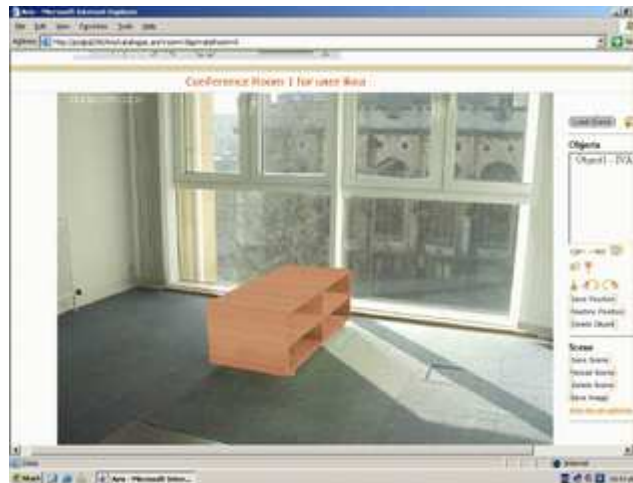


Figure 2-21 : Outil ARIS

On retrouve ce type d'application dans les étapes de conception où l'on cherche à insérer des produits virtuels sur des vidéos réelles afin de tester par exemple leur impact sur l'environnement (architecture) ou sur de potentiels futurs utilisateurs (voiture, ...).

Le système ARCHEOGUIDE (Figure 2-22) permet aux visiteurs de sites archéologiques d'admirer des monuments aujourd'hui disparus.



Figure 2-22 : Visite virtuelle de sites archéologiques avec ARCHEOGUIDE

Actuellement, l'industrie est très intéressée par le domaine de la RA pour le montage et la maintenance. Le projet KARMA [FEIN1993] (Figure 2-23) illustre bien ce domaine en offrant aux utilisateurs une assistance pour des opérations de maintenance simple sur une photocopieuse.



Figure 2-23 : maintenance en RA avec KARMA

Le projet national AMRA (Figure 2-24) [DIDI2005] est un système de Réalité Augmentée à usage mobile pour une utilisation en milieu industriel, et plus spécifiquement dans le domaine de la maintenance industrielle. Il permet d'apporter aux agents de maintenance une aide contextuelle sur site en présentant une documentation technique, des modes opératoires pour le montage/démontage de pièces et la possibilité de voir à l'intérieur d'un équipement avant démontage.

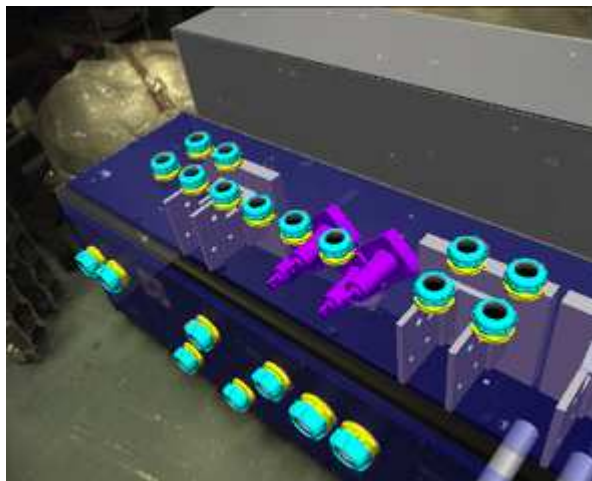


Figure 2-24 : RA et transparence pour la maintenance industrielle

En médecine, la RA est aussi source d'intérêt puisqu'elle permet aux chirurgiens de voir les organes internes du corps comme par exemple lors du guidage opératoire pendant des opérations de biopsie du sein. On trouve aussi des simulateurs d'accouchement où les étudiants peuvent visualiser, au travers d'un mannequin, les forceps utilisés pour attraper la tête du bébé [SIEL2004].

Dans le domaine de la conception, citons l'industrie du téléphone portable et des applications de RV développées autour, notamment au Japon. Les concepteurs de téléphones utilisent des MOD (maquettes plastiques) sur lesquelles sont affichés par système de vidéo projection les différents menus qui seront intégrés dans le futur téléphone, et ceci sans l'obligation de développer de système électronique particulier. Ces systèmes ne sont pas complètement réalistes car l'aspect kinesthésique n'est actuellement pas pris en compte si ce n'est de manière très simplifiée par l'ajout de micros contacts sur la maquette. Bien que des tests consommateurs soient réalisés et que les résultats soient utilisés pour la commercialisation,

aucune étude, à ce jour, ne montre que les résultats obtenus en RA sont applicables à la réalité.

Pour ne pas nous limiter à la vision augmentée, nous citerons ici des études menées sur l'haptique augmentée [BAYA2006]. A partir d'un stylet à retour d'efforts, le système TELEMAQUE (Figure 2-25), permet à des enfants d'apprendre le geste de l'écriture [PALL2007] en laissant plus ou moins libre la main au fur et à mesure de leur apprentissage et de leur dextérité.



Figure 2-25 : TELEMAQUE Aide à l'écriture Haptique

2.3.2.2. Techniques et cohérence:

Pour assurer une véritable cohérence entre le virtuel et le réel, les systèmes de RA doivent s'assurer au moins de la cohérence spatiale et temporelle et, si possible, de la cohérence photométrique.

En réalité augmentée se pose donc le problème du recalage d'objets virtuels sur un monde réel. Cette phase nécessite d'une part de localiser avec précision la caméra par rapport à l'environnement réel qu'elle filme (cohérence spatiale) et d'autre part d'effectuer cette localisation en temps réel et surtout en diminuant les temps de latence dus à la propagation des informations dans le système (Acquisition capteur, traitement de l'information, exploitation de l'information) (cohérence temporelle). De plus l'insertion d'objets virtuels nécessite a priori une modélisation, au moins partielle, de l'environnement si on désire pouvoir gérer les problèmes d'occlusion.

Concernant la mise en correspondance du monde réel et des objets virtuels, différentes techniques peuvent être utilisées tels que les capteurs magnétiques, inertiels ou les systèmes GPS. Pourtant la localisation par la vision est celle qui, actuellement, assure la meilleure précision en alignement. Nous allons donc nous intéresser spécifiquement aux techniques basées caméra. Que l'on utilise des techniques d'appariement sur des modèles 3D d'objets réels de la scène ou la détection d'amers, la superposition d'objets virtuels sur image réelle ne doit pas être une source de fatigue ou de gêne visuelle pour l'utilisateur. Certaines précautions doivent donc être prises afin d'obtenir une précision de l'ordre du mm pour la position et du centième de degré pour l'orientation (cas d'utilisation d'une caméra 1024*768 disposée à 2m de l'endroit où se réalise la tâche). Des expérimentations faites avec divers type de caméra et différentes techniques de calibration [VIGU2005] montrent que l'utilisation du modèle sténopé linéaire classique permet d'obtenir une bonne précision en position et en alignement

quelle que soit la qualité de la caméra et de son optique. Pourtant, pour obtenir ces résultats, la prise en compte des paramètres de distorsion radiale est essentielle afin de limiter les erreurs d'alignement et de position entre l'objet ajouté et le volume de mesure. L'utilisation de paramètres intrinsèques imprécis ne nuit pas de façon perceptible à l'alignement. Par contre, ces imprécisions se font sentir plus nettement en dehors du volume de mesure. La calibration à partir d'une seule image cadrée sur une mire est possible mais on préconise tout de même d'utiliser pour cette phase une séquence d'images afin d'améliorer la précision hors volume.

L'utilisation d'un système de localisation induit un temps de latence entre l'acquisition des données et leur exploitation dans le système de RA. Plusieurs causes sont à l'origine de ces retards comme la distance (réseau) ou les temps de traitement. On notera par exemple la difficulté de réduire ces temps dans les systèmes de RA nomades (augmentation de l'image d'un téléphone portable par exemple) due essentiellement aux temps de communication sur les différents réseaux utilisés. Nous n'aborderons pas ici cette problématique de RA sur de longues distances et nous nous intéresserons essentiellement aux applications en volume limité où la précision demandée est importante. Afin de ne pas occasionner de gêne chez l'utilisateur, la boucle acquisition/exploitation des données capteur ne doit pas être supérieure à 50ms [BERA1999]. Etant donné que, dans un système de RA basé sur la vision, on utilise couramment un rafraîchissement de l'image à 25Hz, soit toute les 40ms, le fait que la position réelle d'un objet ne soit pas répercutée sur l'image courante mais sur la suivante reste imperceptible à l'utilisateur (Par exemple, suivi de doigt sur le Tableau Magique [BERA2000]). On notera que dans des applications particulières nécessitant une vitesse de rafraîchissement plus rapide, on aura recours à des techniques d'estimation de trajectoire afin de faciliter par exemple la recherche des éléments de localisation dans l'image. Notons que dans le cadre de la vision, la vitesse de rafraîchissement n'occasionnant pas de gêne pour l'utilisateur est de 25Hz. Avec l'utilisation de systèmes haptiques, cette fréquence est de 1Khz.

Nous ne nous intéresserons pas particulièrement à la cohérence photométrique qui est plus prédominante d'un point de vue artistique comme par exemple dans la mise en situation de produits virtuels destinés à un jugement qualitatif de la part de l'utilisateur avant commercialisation. Notons cependant que dans le cadre de l'apprentissage (par exemple sur le système ARPH, Aide Robotisée au Personnes Handicapées), les effets de lumière et notamment les ombres sont des facteurs qui influent sur le comportement des utilisateurs. Tout comme pour les problèmes d'occultation, la modélisation de l'environnement est nécessaire là où devront se projeter les ombres ou des effets de lumière réalistes.

2.3.3. Virtualité augmentée

La virtualité augmentée consiste, à l'inverse de la RA, à augmenter un environnement virtuel de stimuli réels. Par exemple, les travaux menés dans [SIMS1997] consistent à plaquer des textures réelles sur des objets virtuels afin de leur donner plus de réalisme. On note la possibilité d'avoir des textures animées qui, par exemple, permettent d'inclure, dans un monde virtuel, un poste de télévision diffusant un programme télévisé réel. Dans le domaine de la collaboration à distance, le projet CAR/PE (Figure 2-26) [REGE2004] propose de réunir des participants dans un monde virtuel. La représentation de ces derniers est fournie par un flux vidéo réel. Une extension de ce système, grâce à l'avancée des technologies liée au traitement d'image, pourrait être l'incrustation d'avatars 3D réalistes de ces derniers.

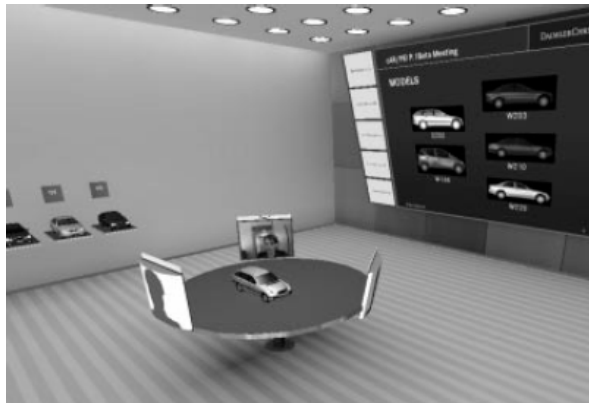


Figure 2-26 : CAR/PE collaboration a distance

En utilisant les mêmes techniques que précédemment, l'étude [RACK2005] propose de réaliser un simulateur d'avion. Ce simulateur est basé sur un monde virtuel construit à partir de données topographiques réelles. Dans un second temps, cette topographie simple est texturée à partir de photos aériennes. Dans le même ordre d'idée, on trouve maintenant des simulateurs d'aéromodélisme qui permettent de faire évoluer un modèle d'avion dans un environnement photo réaliste. Dans ce dernier cas, la tâche est simplifiée étant donné que le pilote se trouve à un point fixe au sol et qu'un simple panoramique à 360° suffit à donner l'illusion du monde réel.

La VA est donc principalement utilisée pour ajouter du réalisme à certaines scènes dont la complexité ne permettrait un rendu en temps réel. Pourtant, on peut penser que dans un avenir encore lointain, la puissance de calcul des machines sera telle qu'un rendu photo réaliste en temps réel sera possible. Un autre aspect de la VA, actuellement en essor, est l'introduction de phydgets. Ces derniers sont des contrôles physiques permettant d'agir par exemple sur un environnement virtuel. On trouve ainsi des « phydget cursor » qui contrôlent la table de mixage windows. Ces phydgets assurent une meilleure précision des contrôles en utilisant notre aptitude manuelle naturelle. Bien que le terme soit nouveau, la notion de phydget n'est pas récente. On pourra prendre comme exemple les musiciens qui lors d'une composition musicale sur ordinateur préfèrent utiliser des claviers maîtres midi plutôt que d'utiliser la souris standard.

2.3.4. Interaction entre objets

Construire un monde, fait d'entités réelles et/ou virtuelles, pose des problèmes de modélisation physique lorsque les objets ont un comportement dynamique. Mixer des entités virtuelles et réelles complique encore le problème. Au niveau de la vision, nous avons expliqué précédemment dans le cas de la RA la nécessité d'avoir une cohérence spatiale, temporelle, voire photométrique. Ces cohérences passent par la modélisation partielle de l'environnement physique. Mais ce n'est qu'un aspect de la difficulté ; en effet, les interactions entre les objets eux-mêmes ne sont pas à négliger. On voit d'ores et déjà certaines limites dans les applications qui pourraient être développées. Il est à priori difficile de pouvoir agir du virtuel sur le réel, à moins, d'instrumenter en grande partie l'environnement réel. Par contre, il est intéressant, à partir d'un objet réel que l'on déplace, de pouvoir agir sur l'environnement virtuel (quel que soit le dispositif d'interface utilisé : souris, phantom, déplacement d'un amer...). Cela n'est bien sûr possible que si l'on utilise des objets physiques rigides puisqu'un objet réel ne peut être soumis aux déformations induites par son contact

avec une entité virtuelle (à moins bien sûr, comme précisé ci-dessus, d'instrumenter l'objet physique pour lui donner la possibilité de se déformer).

Dans tous les cas, ces interactions nécessitent des algorithmes de détection de collision qui sont gourmands en temps de calcul et ne permettent pas toujours un calcul temps réel si ceux-ci ne sont pas optimisés. Outre cette détection, le calcul des forces de contact et des mouvements induits passe par des modélisations physiques réalistes nécessitant elles aussi une grande puissance de calcul pour atteindre le temps réel. En réalité, les applications usent de subterfuges et d'algorithmes spécialisés pour des tâches bien particulières. À titre d'exemple, dans [DORF2001], on utilise un gant de données (gant instrumenté capable de retourner des informations sur la position de la main et la courbure des doigts) pour jouer aux échecs contre l'ordinateur (Figure 2-27).



Figure 2-27 : Jeu d'échecs en RA

Pourtant, ce système a ses propres limites. Comment, par exemple, reproduire le mouvement du roi qui se couche et roule sur la table en cas d'échec et mat si ce n'est par des artefacts algorithmiques ? De même, si l'utilisateur pousse malencontreusement une pièce en en déplaçant une autre, celle-ci devrait bouger. Ce n'est peut être pas souhaitable dans ce type d'application mais cela montre bien les problèmes qui peuvent se poser lors de la conception de ce type d'application.

La modélisation dynamique physiquement réaliste de tout un monde virtuel en temps réel n'est actuellement pas encore à la portée de notre technologie.

2.4. Conclusion

Le premier objectif de ce chapitre était de souligner les spécificités du domaine de l'assistance robotisée à la personne handicapée. Il apparaît clairement qu'il convient d'aborder la recherche portant sur l'aide robotisée innovante sous différents angles. Du point de vue du roboticien il s'agit de construire un système capable de suppléer une fonction tout en restant « pilotable » par une personne qui, de par son handicap, possède des capacités dégradées. L'objectif de la robotique est de simplifier la tâche en dotant le système de capacités autonomes mais, cependant, pas à n'importe quel prix. Cette contrainte forte est due au fait que la personne désire être active lors du contrôle de son environnement par l'intermédiaire d'un robot. Elle doit donc rester maître du robot pour retrouver ce pouvoir d'action sur le

monde qui l'entoure. Le concept de semi-autonomie apporte une réponse adaptée à cette attente. Il en découle que la recherche doit s'intéresser, en parallèle de celle menée en robotique, à la coopération entre l'homme et la machine.

Nous avons adopté, comme cadre de nos recherches sur l'aide robotisée innovante, les travaux en psychologie de Jean Piaget [PIAG1936][PIAG1978]. Piaget distingue deux processus fondamentaux mis en œuvre pour l'acquisition ou l'appropriation d'une nouvelle connaissance :

- L'assimilation, considère que l'effort cognitif est réduit à la simple intégration d'une situation nouvelle à un ensemble de situations proches auxquelles une conduite est déjà appliquée. Ici, la conduite (ou l'opération ou le mode de raisonnement) ne change pas fondamentalement. Ce qui change, c'est l'étendue d'un champ de connaissances.
- L'accommodation est, par contre, la transformation d'une conduite (ou d'une opération ou d'un mode de raisonnement) déjà existante, en réaction au milieu (ou au nouveau problème à traiter). Cette transformation est rendue nécessaire car les façons de faire habituelles ne suffisent plus pour résoudre le problème. Il est nécessaire de s'adapter. En résumé, afin de diminuer l'effort cognitif de l'utilisateur, le système doit être conçu de manière à ce que le contrôle de la machine tende au maximum vers des processus d'assimilation.

Ainsi, nous cherchons à agir à deux niveaux :

- La commande coordonnée qui se rapproche d'un comportement plus humain et donc correspond à un comportement connu qu'il faut adapter au cas du robot. C'est l'objet du chapitre 4.
- Le processus de conception de l'aide qui doit impliquer le plus possible les utilisateurs. C'est la raison pour laquelle nous avons cherché au chapitre 6 à adapter les démarches de conception centrée utilisateur au contexte spécifique de l'application. Cette adaptation ne peut être menée sans les techniques issues de la Réalité virtuelle présentées dans ce chapitre.

Néanmoins quel que soient nos efforts, le robot reste un système complexe et le processus d'accommodation une réalité. Il est nécessaire de prévoir des outils d'apprentissage facilitant une prise en main progressive de l'aide robotisée, c'est-à-dire le processus d'accommodation. Là encore la RV ou plus précisément la simulation peut être un outil efficace encore faut-il être sûr qu'il y ait transfert de compétences dans le passage du système simulé au système réel. Ce point est abordé au chapitre 5.

3. Présentation et évaluation de ARPH

Après plusieurs années de développement, il était nécessaire de confronter le prototype ARPH aux utilisateurs finaux pour définir les futures orientations du projet. Une campagne d'évaluation du prototype auprès de personnes handicapées placées en situation écologique a été menée en collaboration avec l'AFM (Association Française contre les Myopathies) qui a assuré la logistique tout en participant à l'élaboration du protocole expérimental, et l'Université Paris VIII qui a réalisé l'évaluation en partenariat avec le laboratoire IBISC. Les résultats des évaluations nous ont amenés à suivre, au cours de cette thèse, deux directions de recherche pour faciliter l'appropriation (telle que définie au chapitre 2) de l'aide robotisée par la personne handicapée

Dans ce chapitre, nous allons, dans un premier temps, présenter le prototype de manipulateur mobile ARPH. Nous commencerons par décrire le système global, son interface de contrôle utilisateur, les différents modes de commande implantés et enfin l'architecture logicielle nécessaire à son fonctionnement. Dans un deuxième temps, nous présenterons les évaluations : pré-requis, protocoles expérimentaux, résultats et analyses, qui justifieront en conclusion, les orientations prises par le projet et qui seront développées dans les chapitres suivants.

3.1. Présentation de ARPH

3.1.1. Présentation générale

ARPH (Assistance Robotisée pour Personnes Handicapées) est un robot mobile d'assistance aux personnes handicapées (Figure 3-1).



Figure 3-1 : Robot ARPH

Il est composé d'une plate-forme mobile, à deux roues motrices, équipée d'un bras manipulateur MANUS à 6 degrés de liberté. Il possède de plus une pince permettant la préhension d'objets jusqu'à 1Kg. À de la plate-forme se situe une ceinture de capteurs

ultrasons permettant de se situer par rapport aux obstacles et de les éviter. ARPH est pilotable en vue et hors vue. Pour cela, il est équipé d'une caméra orientable en site et en azimuth. Le système embarque un ordinateur PC P4 3Ghz Wifi qui lui permet d'être commandé à distance. Deux batteries de voiture 12V 44Ah lui assurent une autonomie d'environ 3 heures.

La Figure 3-2 présente les dimensions de la base mobile du prototype actuel.

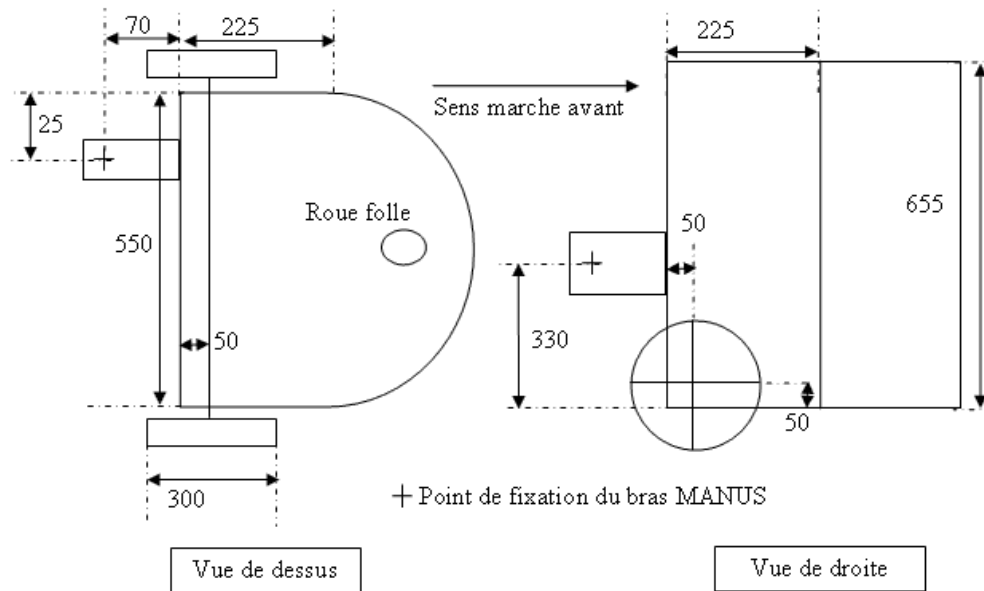


Figure 3-2 : Description de la base mobile (dimensions en mm)

3.1.2. Interface de commande

Via la liaison Wifi, ARPH est contrôlé à distance à l'aide d'une interface homme machine présentée sur la Figure 3-3 qui autorise la visualisation du flux vidéo en provenance de la caméra embarquée.

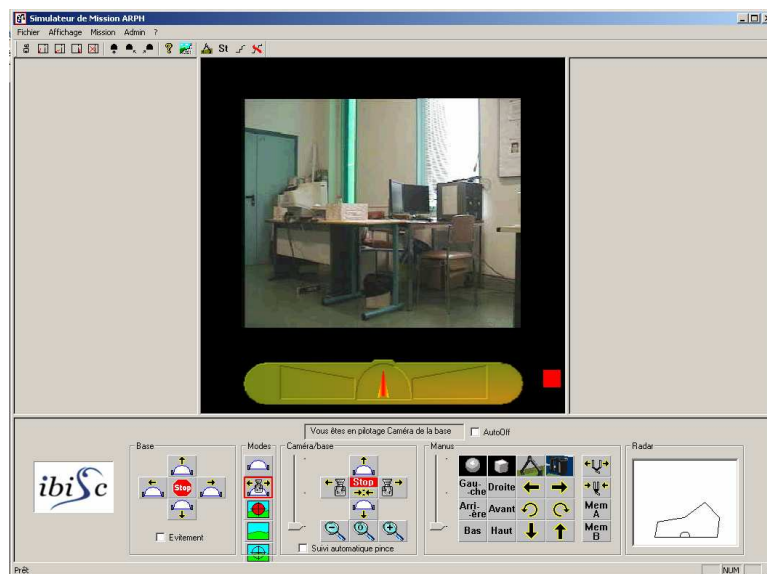


Figure 3-3 : Interface de commande de ARPH

De plus, elle affiche un radar qui visualise la distance aux obstacles. Elle possède un ensemble de boutons de contrôle permettant le pilotage du bras et de la base ainsi que l'orientation de la caméra. L'interface permet en outre de visualiser l'image issue de la caméra embarquée ainsi qu'un diagramme d'état de l'environnement issu des informations données par les capteurs ultrasons. Il est aussi possible de sélectionner des modes de fonctionnement particuliers qui sont exposés dans le paragraphe suivant.

3.1.3. Modes de commande

Parmi ces modes, on trouve :

- Pilotage Manuel

L'utilisateur pilote simplement la base à l'aide de boutons avant-arrière-gauche-droite.

- Pilotage Caméra

Des études [RYBA2004A], [RYBA2004B] ont montré que l'orientation de la tête lors de la conduite dépend de la trajectoire voulue. Ainsi, lors par exemple d'un virage à gauche, le conducteur tourne la tête vers la gauche en pointant une région particulière à l'intérieur du virage. Cette idée a été transposée et implémentée sur ARPH. Dans le mode pilotage caméra, l'utilisateur devra faire pivoter la caméra en azimuth (gauche-droite) pour que le robot tourne. La vitesse de rotation du robot dépendra alors de l'angle d'azimut à un instant donné. Les contrôles «marche avant et marche arrière» sont identiques au mode manuel. Notons simplement qu'en mode manuel, un bouton stop permet d'arrêter la plate-forme mobile. En mode Pilotage Caméra, le bouton stop annule la vitesse linéaire du robot (mouvement avant-arrière) et un bouton supplémentaire de « recentrage caméra » permet de recentrer la caméra et donc d'arrêter la rotation de la plate-forme. Ce mode de pilotage est intuitif et permet d'avoir des trajectoires plus lissées qu'en mode Pilotage Manuel.

- Pilotage Suivi de caméra

C'est un mode de pilotage automatique. L'utilisateur sélectionne une cible de couleur particulière et la plate-forme mobile la suivra automatiquement sans autre commande. Ce mode peut être utilisé par exemple pour que ARPH suive la personne handicapée dans son fauteuil lors de ses déplacements. Il met en œuvre la fonction de suivi de couleur implémentée en interne dans la caméra.

- Suivi de pince

Dans ce mode, la caméra suit automatique la pince du manipulateur, ce qui évite à l'utilisateur d'avoir à orienter par lui-même la caméra. Ce mode a été ajouté suite aux évaluations décrites au paragraphe 3.2.

À tous modes de commande peut s'ajouter l'évitement d'obstacle. Ainsi, à l'aide de la ceinture ultrason, la plate-forme mobile peut contourner les obstacles tout en gardant pour objectif principal la direction imposée par l'utilisateur. Ce mode est particulièrement utile pour les déplacements dans les couloirs afin de ne pas entrer en collision avec les murs. Dans cette configuration, l'utilisateur demande une simple marche avant et la plate-forme mobile se déplace en restant automatiquement au milieu du couloir.

3.1.4. Architecture informatique

L'architecture de ARPH (Figure 3-4) est basée sur un système client serveur inspiré du projet ARITI [OTMA2000] qui permet la télémanipulation d'un robot via internet. Le logiciel a été,

au cours de ma thèse, restructuré et réécrit en langage objet C++ (encadrement d'un ingénieur informatique en CDD de 4 mois). Cette nouvelle structure a permis d'assurer de bonnes performances en termes de fiabilité et de sécurité lors des évaluations avec les utilisateurs finaux.

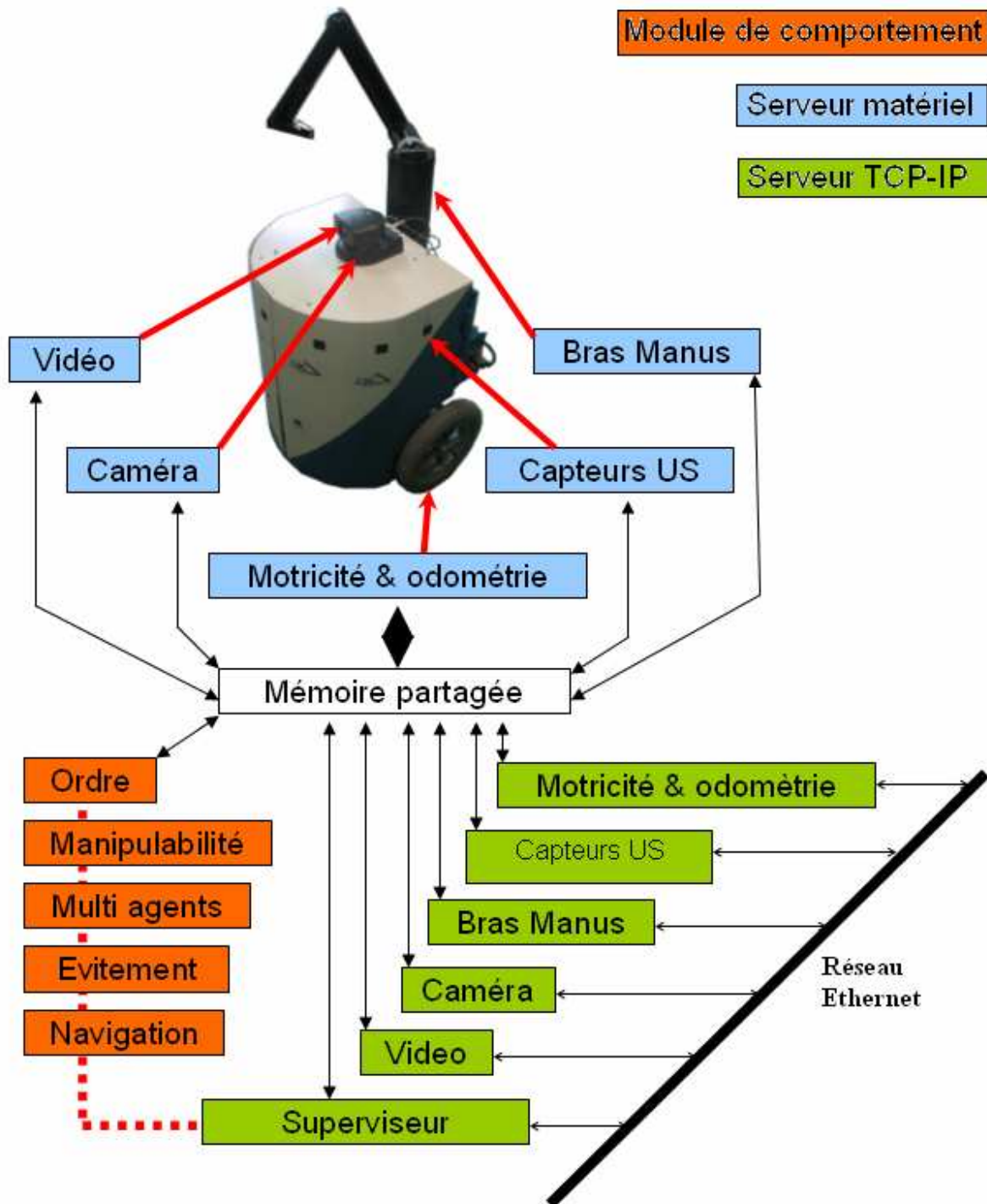


Figure 3-4 : Architecture logicielle de ARPH

On trouve un ensemble de serveurs matériels directement connectés aux différents organes matériels de ARPH. Ces serveurs reçoivent des ordres par l'intermédiaire d'une mémoire partagée. Un ensemble de serveurs TCP/IP reçoit des ordres via le réseau Ethernet qui sont

transférés en mémoire partagée à destination des serveurs matériels. A chaque serveur matériel correspond un serveur TCP/IP. Cette architecture distribuée permet de faire fonctionner ARPH en mode dégradé si une panne survient sur l'un des modules sans affecter les autres. Afin de pouvoir gérer les différents modes de commandes, un serveur TCP/IP SUPERVISEUR a été ajouté. Celui-ci a pour rôle d'agencer temporellement des Modules de comportement basiques pour obtenir des modes de commande avancés. On y trouve par exemple les comportements « mode de navigation » et « évitement » qui permettent d'obtenir par exemple le mode complexe « Pilotage Caméra avec évitement d'obstacle ». L'implémentation de ce superviseur a fait l'objet de l'encadrement d'un stagiaire ingénieur IIE 2^{ème} année. Le système embarque un OS Linux, Mandrake 9.2 ou sont implémentés en C++ l'ensemble des codes. La complexité du système nous a amené à introduire des normes de codage strictes permettant de générer automatiquement de la documentation et d'assurer ainsi un développement plus rapide et plus fiable de nouveaux comportements.

Malgré une interface logicielle fiable, l'hétérogénéité des composants matériels et donc des protocoles propriétaires de communications, le système était encore difficilement utilisable pour des évaluations. La motorisation, basée sur un système DXKEY, utilisé pour la commande des moteurs de fauteuils roulants a été avantageusement remplacée par des variateurs de modélisme contrôlés par une carte à microcontrôleur. Des codeurs incrémentaux montés sur chaque moteur ont permis un asservissement en vitesse et un calcul odométrique fiable. La robustesse a été améliorée lors de l'encadrement d'un stage INSA Rennes 1^{ère} année. Nous avons, de plus, implanté des capteurs de courant sur chaque moteur. En effet, le prototype actuel est lourd et volumineux. A la vitesse de 0,6m/s, il représente un danger potentiel pour un enfant qui ne serait pas détecté par la ceinture ultrason par exemple. Le contrôle du courant permet de limiter le couple moteur et donc d'améliorer notablement la sécurité.

3.2. Evaluations du prototype ARPH

Nous avons évalué, pour la première fois dans sa globalité, l'usage du prototype ARPH lors d'un stage Master 2 de l'université Paris VIII en partenariat avec l'AFM (Association Française contre les Myopathies) à Evry. Nous présenterons tout d'abord les évaluations effectuées en milieu écologique dans les locaux de l'AFM, puis les évaluations menées au domicile même d'une personne tétraplégique. Dans ces deux parties, nous présenterons les protocoles de tests, les résultats et leur analyse ; issus d'un stage effectué par Caroline Ballargeau, Sylvia Elie [BAEL2006]. Enfin, nous terminerons en présentant les apports d'un tel système et les recommandations de conception qui en ont découlées.

3.2.1. Hypothèse et mise en œuvre

Nous pensons que l'utilisation de ARPH permet aux personnes ayant une capacité motrice très réduite, quelle que soit la pathologie, de retrouver une autonomie dans certaines activités de la vie quotidienne telles que boire, saisir, manipuler, aller chercher et ramener les objets. Afin de valider cette hypothèse, nous avons mis en place deux expérimentations complémentaires.

- Une expérimentation s'est déroulée dans des locaux aménagés avec des utilisateurs ayant une capacité motrice très limitée. Elle consistait à « construire un ou plusieurs scénarios de tâches représentatives des situations réelles d'utilisation, contextualisées de façon la plus réaliste possible » [SPER2004].

- Une expérimentation a eu lieu chez un utilisateur potentiel du robot. Nous lui avons proposé de choisir les tâches qu'il souhaitait accomplir. En effet, « en ce qui concerne l'évaluation des aides techniques, il faut tenir compte des opinions et préférences du sujet pour le choix des tâches et le choix des critères d'évaluation » [SPER2002].

3.2.2. Expérimentation en locaux aménagés

3.2.2.1. Pré requis : étude du bras MANUS

La rencontre préalable avec un utilisateur du bras MANUS embarqué sur son fauteuil a permis d'initier ces évaluations en établissant les activités de la vie quotidienne qu'il effectuait. Le Tableau 3-1 récapitule les activités réalisées puis abandonnées, celles accomplies quotidiennement celles découvertes après utilisation du bras. Sur 9 activités qu'il pensait réaliser au départ, 5 ont été abandonnées et 2 nouvelles ont été découvertes : 6 activités sont donc réalisées actuellement.

Activités que l'utilisateur pensait réaliser avec Manus	Activités que l'utilisateur a réalisé avec Manus puis a abandonné	Activités que l'utilisateur réalise avec Manus	Activités non prévues et réalisées avec Manus
Décrocher le téléphone	Décrocher le téléphone		
Appuyer sur le bouton de l'ascenseur			
Manger	Manger		
Introduire une disquette ou un CD	Introduire une disquette ou un CD		
Allumer la télévision	Allumer la télévision		
Se verser à boire		Se verser à boire	
Saisir un verre		Saisir un verre	
Boire		Boire	
Saisir la télécommande		Saisir la télécommande	
			Prendre sa main gauche pour la poser sur la souris
			Mettre l'embout de l'appareil respiratoire dans sa bouche

Tableau 3-1: Activités pensées, réalisées, abandonnées par l'utilisateur de Manus

Ces informations recueillies, la méthode de Défaillances et de Substitutions des Ressources (MDSR) a permis d'étudier le bras MANUS. Cette méthode permet d'identifier les instruments et plus généralement les ressources qui peuvent se substituer totalement ou partiellement à l'instrument, ainsi que les conséquences de cette substitution sur l'activité du sujet [RABA2005]. Dans une situation de travail, elle permet d'identifier les instruments utilisés pour réaliser l'activité et de référencer les ressources de substitution en cas de défaillance. La méthode s'adapte à l'étude de situations de handicap, en effet, le handicap moteur induit une défaillance fonctionnelle chez les personnes. Elles ont recours à des aides

techniques pour pallier cette défaillance. La méthode nous a permis de faire une analyse de l'aide technique Manus, utilisée comme ressource de substitution à des fonctions motrices défaillantes.

Le Tableau 3-2 représente les fonctions à substituer car défaillantes à cause de la maladie, et les ressources de substitution disponibles, de même que l'évaluation concernant la valeur de substitution de Manus.

Fonctions à substituer	Ressources de substitution au sujet	Fonction substituable par Manus	Importance	Valeur de substitution de Manus	Conditions de substitution de Manus
Manger	L'aide humaine et Manus	Oui	Tous les jours, vitale	Pas efficace, trop de manipulations	
Verser à boire				Utile	Avoir la bouteille débouchée au préalable, avoir Manus embarqué sur le fauteuil
Boire				100 % utile, donne de l'autonomie	
Mettre l'embout de l'appareil respiratoire dans sa bouche				Très utile, donne de l'autonomie	Avoir Manus embarqué sur le fauteuil, à condition que l'appareil respiratoire soit en veille
Prendre sa main gauche pour la poser sur la souris				Très souvent	Très utile, donne de l'autonomie
Appuyer sur le bouton de l'ascenseur	L'aide humaine	Non	Tous les jours au travail	Pas efficace	Manus est trop encombrant et ne peut se déplier dans l'ascenseur
Décrocher le téléphone pour répondre à un appel			Tous les jours	Pas pratique	Pour le décrocher il faut un doigt sur Manus
Appuyer sur le bouton de la télévision			Régulier	Pas pratique, le bouton de la télévision est trop dur à enfoncer.	

Tableau 3-2 : fonctions substituables ou non par Manus

L'aide Humaine est la première ressource de substitution car elle est toujours efficace tandis que MANUS ne se substitue qu'à cinq fonctions. Il n'est pas efficace pour la fonction manger car il nécessite trop de manipulations. Nous remarquons que la fonction appuyer sur le bouton de l'ascenseur n'est pas réalisable du fait de l'étroitesse de l'ascenseur et de la taille du Manus. La fonction appuyer sur le bouton de la télévision n'est pas substituable par Manus car il n'a pas assez de force. Le Tableau 3-3 résume les 9 fonctions à substituer, le nombre de ressources disponibles ainsi que la substitution possible ou non par MANUS.

Numéro des fonctions à substituer	Fonctions à substituer	Nombre de ressources de substitutions actuelles	Fonction substituable par Manus
1	Manger	2	Oui
2	Verser à boire	2	Oui
3	Boire	2	Oui
4	Mettre l'embout de l'appareil respiratoire dans sa bouche	2	Oui
5	Prendre sa main gauche pour la poser sur la souris	2	Oui
6	Appuyer sur le bouton de l'ascenseur	1	Non
7	Introduire une disquette ou un CD dans le lecteur	2	Oui
8	Décrocher le téléphone pour répondre à un appel	1	Non
9	Appuyer sur le bouton de la télévision	1	Non

Tableau 3-3 : Distribution des fonctions à substituer

Pour l'utilisateur, Manus est une ressource de substitution pour six fonctions. Cependant, la valeur de substitution n'est pas efficace pour deux fonctions (manger et mettre le CD), l'utilisation est contraignante, nécessitant trop d'énergie. Les avantages de l'utilisation de Manus permettent à son utilisateur d'être autonome pour boire, mettre l'embout de son appareil respiratoire et prendre sa main gauche pour la poser sur la souris. En utilisant Manus, il a trouvé une compensation pour agir lui-même sur son corps. Les problèmes rencontrés avec Manus, comme sa taille, empêche l'utilisateur d'entrer dans l'ascenseur. De plus, manger et introduire un CD avec Manus nécessite trop de manipulations, il faudrait donc implémenter des fonctions automatiques. Selon l'utilisateur fixer Manus sur une base mobile ne résoudrait pas ces problèmes. L'utilisateur trouve cependant son utilité au robot ARPH, dans le fait qu'il lui éviterait un déplacement dès lors qu'il serait devant son ordinateur et qu'il aurait besoin de quelque chose placé derrière lui ou dans une autre pièce. Cette méthode a permis de découvrir les avantages et les inconvénients de Manus, de comprendre l'utilisation que la personne en fait et les activités qui lui sont possibles d'effectuer avec lui. Ces constatations ont orienté le choix des scénarios pour l'évaluation du robot mobile.

3.2.2.2. Protocole

Les utilisateurs étaient tous volontaires. Ils avaient également pour caractéristiques d'être dépendants d'un fauteuil roulant électrique, ne pouvant pas utiliser leur bras ou très peu, possédant des capacités pour contrôler un périphérique et des capacités cognitives pour apprendre à utiliser le robot et le manipuler. Les utilisateurs étaient tous des hommes, âgés de 16 à 35 ans. L'un d'entre eux avait eu un accident vasculo-cérébral, les six autres étant myopathes. Nous avons aussi rencontré une Technicienne d'Insertion travaillant auprès des familles des personnes à capacités motrices réduites. Son rôle est de rendre leur autonomie aux familles en les mettant en contact avec des professionnels susceptibles de les aider. Elle leur propose des moyens de compensation tels que des aménagements de logement, des aides techniques et les accompagne dans leurs projets. Ses remarques, concernant les rapports entretenus entre les personnes handicapées motrices et les aides techniques de même que leurs difficultés à les accepter, nous ont été d'une grande utilité. En nous renseignant sur la vie des personnes handicapées motrices qui peuvent, notamment, demeurer sans boire pour ne pas

demander et peuvent rester des heures à attendre l'arrivée d'une tierce personne qui pourrait leur remettre un objet devenu inaccessible, faute d'avoir été remis à sa place, son aide nous a, encore une fois, été très précieuse. Ainsi, nous avons constitué plusieurs scénarios proposant diverses conditions de saisie d'objets de la vie quotidienne tels qu'un verre, une bouteille d'eau (sachant que le bras ne peut pas porter plus d'un litre) et un paquet de cookies. L'objectif étant de préparer la table dans le cadre d'une invitation à goûter.

Les tâches à réaliser lors de l'évaluation sont les suivantes (sachant que chaque individu ne les passera pas dans le même ordre afin d'éviter un effet d'ordre):

- Tâche 1: l'utilisateur doit piloter le robot pour aller chercher le verre visible en face de lui, le ramener et le poser sur le set de table. L'objectif de la tâche étant de saisir un objet que l'utilisateur peut voir.
- Tâche 2: l'utilisateur doit piloter le robot pour aller chercher la bouteille d'eau de 0,5L remplie et placée sur l'étagère derrière lui, la ramener pour la déposer sur le set de table. L'objectif de la tâche est de saisir un objet situé en hauteur derrière la personne. Cependant, lors de la saisie, celle-ci a la possibilité de tourner son fauteuil pour voir les positions du robot et de l'objet.
- Tâche 3: l'utilisateur doit piloter le robot pour aller chercher un paquet de cookies situé sur un meuble dans le couloir, le ramener et le poser sur le set de table. L'objectif de la tâche est d'aller chercher un objet dans une autre pièce (hors vue).

Notons ici que la préparation de l'expérience a exigé la refonte totale de l'ancienne interface qui nécessitait trop de déplacements du curseur pour contrôler le robot. L'ancienne interface disposait de plusieurs onglets qui permettaient le contrôle séparé de la base ou du bras. Tous les boutons ont été disposés sur une seule et même page et leur taille réduite afin de limiter les déplacements du curseur nécessaires à la commande du robot (déplacements impliquant une fatigue importante chez les patients)

Ces informations nous ont aidées à la réalisation de notre scénario. Afin d'effectuer notre évaluation, nous avons aménagé un bureau (Figure 3-5) des locaux du service Technothon de l'AFM de la façon la plus semblable possible à une pièce d'appartement.



Figure 3-5 : Pièce utilisée pour l'évaluation

Avant d'exécuter les trois tâches, la consigne donnée aux personnes était « Vous attendez votre invité et vous préparez la table afin de le recevoir. Vous devez déposer sur le set de

table, devant vous : un verre, une bouteille d'eau et un paquet de cookies ». Le robot partait du même point fixe en gardant toujours la même position de départ. Cela permettait à l'utilisateur de faire une pause entre les différentes tâches.

La première tâche s'effectuait « en vue » (le système ARPH était devant). Le sujet pouvait observer le robot en vision directe. La deuxième phase était orientée « hors vue » mais le sujet pouvait éventuellement se déplacer pour regarder dans quelle configuration était le robot. La dernière tâche était complètement « hors vue ». Le sujet devait effectuer un passage de porte avant de pouvoir atteindre le paquet de gâteau.

Avant d'effectuer ces tâches, le sujet était soumis à un questionnaire semi-dirigé. S'en suivait une phase d'apprentissage ou après explication du fonctionnement de l'interface, le sujet pouvait manipuler à volonté le robot jusqu'à ce qu'il se sente prêt à commencer. Cette phase durait entre 30mn et 45mn. La tâche à réaliser pouvait alors être proposée. À la fin de l'expérience, un nouveau questionnaire était proposé.

La commande de l'interface se faisait de différentes manières en fonction de la pathologie. La plupart des personnes étaient capables d'utiliser la souris. Celles qui ne pouvaient se permettre de grands mouvements ont préféré la TrackBall. Enfin, un des sujets qui n'avait pas l'usage des mains a utilisé un dispositif de tracking qui analysait les mouvements d'une pastille argentée disposée sur son front. L'utilisation d'un tel système a nécessité des adaptations de l'interface du fait de l'absence d'événements du type : « Appuyer bouton souris » ou « Relâcher bouton souris ».

3.2.2.3. Résultats

Durant la phase de familiarisation, nous avons constaté que les utilisateurs avaient réalisé des actions orientées vers autrui. En effet, trois d'entre eux ont spontanément apporté une bouteille d'eau à l'une des expérimentatrices et l'ont fait boire. Un autre a porté un paquet de cookies à une amie et le dernier a tenté de déposer le chapeau de son frère sur la tête de celui-ci. De même, lors des activités citées durant la phase d'évaluation, une personne souhaite donner à manger à son chat avec le robot. Nous avons observé également des actions qu'ils réalisaient pour eux. Une personne s'est versée à boire avec succès, cependant l'eau a débordé. Une autre a appuyé sur l'interrupteur et a tenté d'ouvrir la porte. Une troisième personne a essayé de ramasser une bouteille au sol « ...parce qu'il lui arrive souvent de faire tomber des objets ». Nous avons également observé un utilisateur qui a tenté d'ouvrir une bouteille d'eau en utilisant la base comme outil pour la coincer contre le bureau (Figure 3-6). La bouteille était neuve et Manus n'avait pas suffisamment de force pour débloquer le bouchon. Il a fallu « pré-ouvrir » manuellement la bouteille auparavant.



Figure 3-6 : Ouverture de la bouteille

Cette personne nous a cité d'autres activités qu'elle souhaiterait réaliser avec le robot comme se gratter le dos, mettre une chaussette. On peut noter que le robot est détourné de sa fonction première de déplacement et de saisie. En effet, il est utilisé comme un outil pour coincer et se gratter. Les observations lors de la phase de familiarisation nous indiquent que les personnes ont réalisé trois types d'activité :

- Des activités orientées vers autrui, le robot leur permet de retrouver l'autonomie du don.
- Des activités orientées vers soi, le robot leur permet de retrouver un pouvoir d'agir sur leur corps et le don pour soi (le plaisir de faire pour soi).
- Des activités orientées vers les objets, le robot leur permet de retrouver un pouvoir d'agir sur le monde physique.

Pour la phase d'évaluation, afin de rendre compte de l'utilité et de l'utilisabilité du prototype, nous avons pris en compte la réussite aux différentes tâches (efficacité), le temps pour les exécuter (efficacité), la satisfaction et les commentaires après la manipulation du robot. Ici, les utilisateurs n'ont utilisé que le mode manuel parce qu'au moment de la familiarisation, le mode pilotage caméra était difficile à manier et peu fiable. Avant la manipulation du robot, cinq personnes estimaient que ce système leur serait utile dans les activités de la vie quotidienne telles que :

- Saisir un objet (téléphone, livre, télécommande, feuille de papier)
- Ramasser un objet tombé au sol
- Porter le téléphone à l'oreille
- Ouvrir le réfrigérateur
- Ouvrir les portes
- Manger
- Boire
- Prendre un objet dans une autre pièce

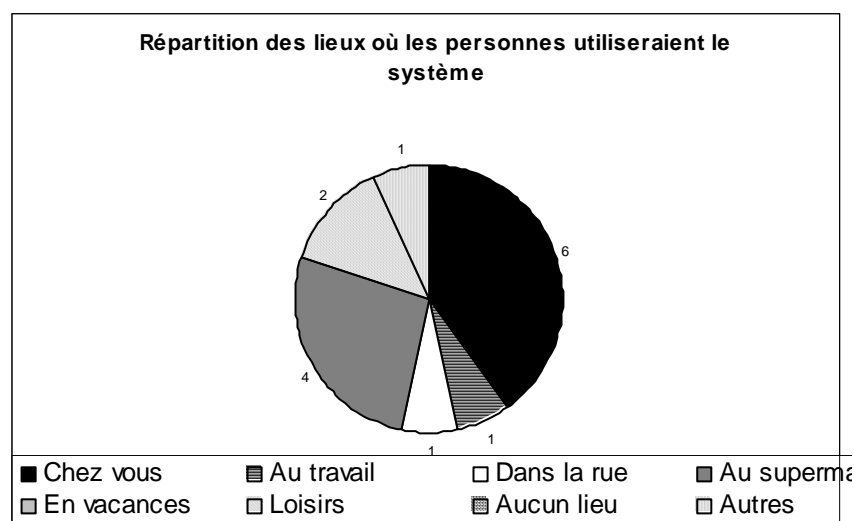


Figure 3-7 : Répartition des lieux où les personnes utiliseraient le système.

L'une d'entre elles ignorait si le système pouvait lui être utile, ne s'imaginant pas ce qu'elle pouvait en faire. Après la manipulation, l'utilité du système faisait l'unanimité. La Figure 3-7 décrit la répartition des lieux dans lesquels les personnes penseraient utiliser le robot.

Nous remarquons qu'en majorité les utilisateurs utiliseraient le système chez eux. Quatre personnes souhaiteraient l'utiliser au supermarché, deux pour leurs loisirs, une au travail et une autre encore dans la rue. Un utilisateur propose de l'utiliser dans le bus pour appuyer sur les boutons (ouverture/fermeture des portes, demander l'arrêt). En ce qui concerne l'utilité de fixer le bras Manus sur un support, quatre utilisateurs sur six pensent qu'il est plus intéressant de le fixer sur le fauteuil roulant, l'un estime qu'il est intéressant de le fixer à la fois sur la base mobile et le fauteuil tandis qu'un autre préférerait le voir installé uniquement sur la base mobile. Tous nous ont indiqué que la base mobile est utile dès lors qu'ils sont installés dans leurs lits et s'aperçoivent avoir oublié quelque chose. Tous, encore, pensaient n'utiliser le robot que seuls chez eux. En présence d'une tierce personne, ils préféreraient lui demander de prendre un objet plutôt que d'utiliser le robot car : « elles ont l'habitude de demander et c'est plus rapide ».

Après la manipulation (phase de familiarisation et phase d'évaluation), les utilisateurs ont cité de nouvelles activités qu'ils pourraient réaliser avec le robot :

- Mettre la table
- Donner à mon chat des croquettes
- Allumer l'ordinateur
- Appuyer sur un interrupteur
- Se gratter le dos
- Ouvrir une porte

En résumé, quatre personnes sur six sont satisfaites du robot, une personne est très satisfaite et la dernière est plus ou moins satisfaite. La manipulation du robot leur a permis de découvrir d'autres utilisations possibles. En ce qui concerne l'utilisabilité, les utilisateurs ont réalisé avec succès les tâches, seul le nombre de tentatives de saisies diffère (Figure 3-8).

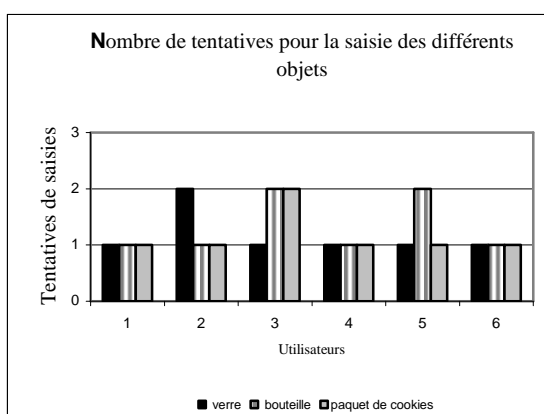


Figure 3-8 : Nombre de tentatives pour la saisie

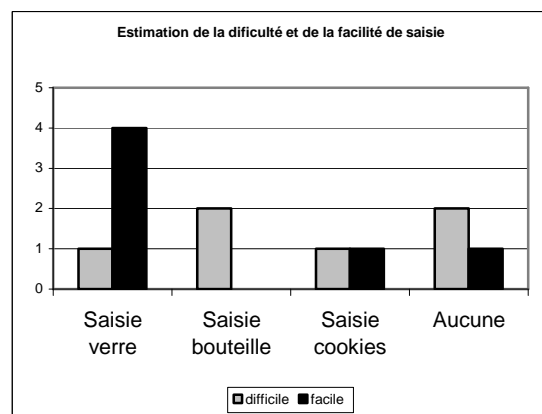


Figure 3-9 : Estimation de la difficulté

D'après la Figure 3-8, concernant la saisie du verre, cinq utilisateurs sur six ont réussi dès la première tentative (soit un taux de 83%) et le sixième a réussi la saisie à la seconde tentative (soit un taux de 17%). Pour la saisie de la bouteille quatre utilisateurs sur six ont réussi dès la

première tentative (soit un taux de 67%) et, les deux autres, à la deuxième tentative (soit un taux de 33%). Enfin, pour la saisie du paquet de cookies, cinq utilisateurs sur six ont réussi dès la première tentative (soit un taux de 83%), et le sixième à deuxième tentative (soit un taux de 17%).

D'après la Figure 3-9, nous remarquons que la saisie du verre a été estimée par quatre personnes comme étant la saisie la plus facile. Une personne l'a néanmoins trouvée la plus difficile parce qu'elle ne savait pas comment le saisir en raison de sa forme et la peur de le casser. Deux personnes ont dit que la bouteille était la plus difficile à saisir. La difficulté résidait, selon elles, dans le fait que la bouteille était en hauteur (sur une étagère derrière elles à 1m06cm du sol) et que par conséquent le retour d'image sur écran n'était pas suffisant et donnait une représentation erronée de la situation. Elles avaient également du mal à localiser le robot par rapport à l'objet à saisir. Une personne a indiqué que le bras « était limité », c'est-à-dire pas assez long. L'utilisateur estimant la saisie du paquet de cookies comme la plus difficile, a expliqué la situation par le fait qu'il ne voyait pas le robot dans la pièce à côté. Il a éprouvé des difficultés à repérer la base par rapport à l'objet à saisir, il avait peur de casser quelque chose en manipulant mal le bras. Une personne a trouvé la saisie du paquet de cookies comme étant la plus facile, selon elle, grâce à sa forme. Deux personnes ont estimé que les tâches ni trop faciles ni trop difficiles. La Figure 3-10 rend compte de la facilité de manipulation du système dans son ensemble.

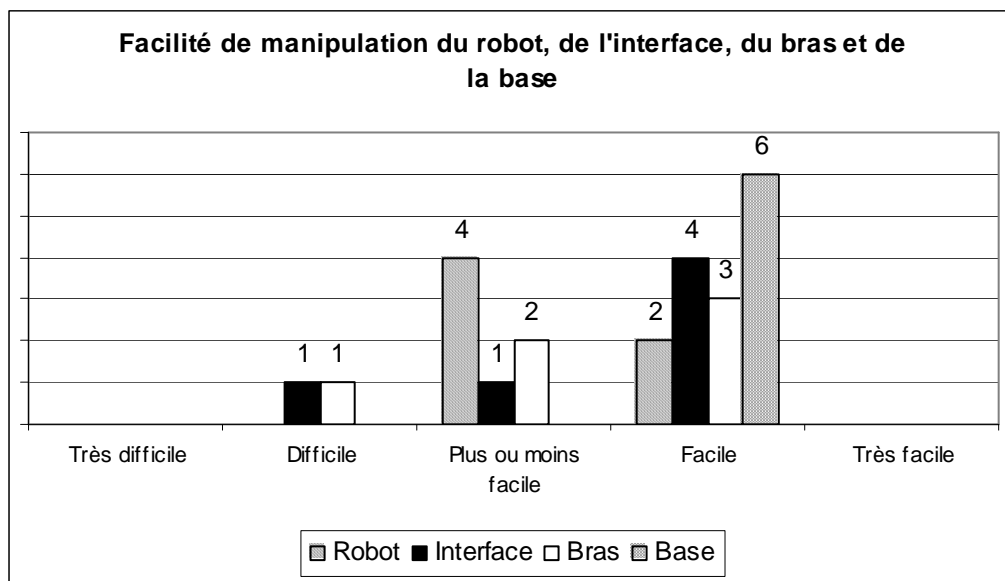


Figure 3-10 : Facilité de manipulation du robot, de l'interface, du bras et de la base.

Nous observons que quatre utilisateurs estiment la manipulation du robot plus ou moins facile et deux la jugent facile. Concernant l'interface, une personne l'a trouvée difficile à manipuler, une autre plus ou moins facile et les quatre autres facile. Un utilisateur a trouvé l'utilisation du bras difficile, deux l'ont trouvée plus ou moins facile et trois facile. Les problèmes souvent évoqués sont de l'ordre de la sécurité avec la peur de détériorer le matériel. L'interface posait des problèmes pour la manipulation du bras et de la pince. En effet, les symboles utilisés sur les boutons n'étaient pas assez intuitifs. Des améliorations devront y être apportées. Enfin, les utilisateurs sont unanimes pour dire que la base est facile à diriger parce que les icônes de contrôle sur l'interface sont intuitives pour eux. Même si cinq utilisateurs sur six ont estimé que l'interface n'était pas un frein dans l'utilisation du système, ils pensent que des

améliorations peuvent y être apportées ainsi qu'au robot. Trois utilisateurs ont trouvé le retour caméra insuffisant, ils l'expliquent par le fait que ce ne sont pas leurs yeux et qu'ils ne connaissent pas les lieux. Les trois autres l'ont trouvé suffisant.

La Figure 3-11 représente leur estimation de la difficulté et de la facilité de pilotage du robot mobile.

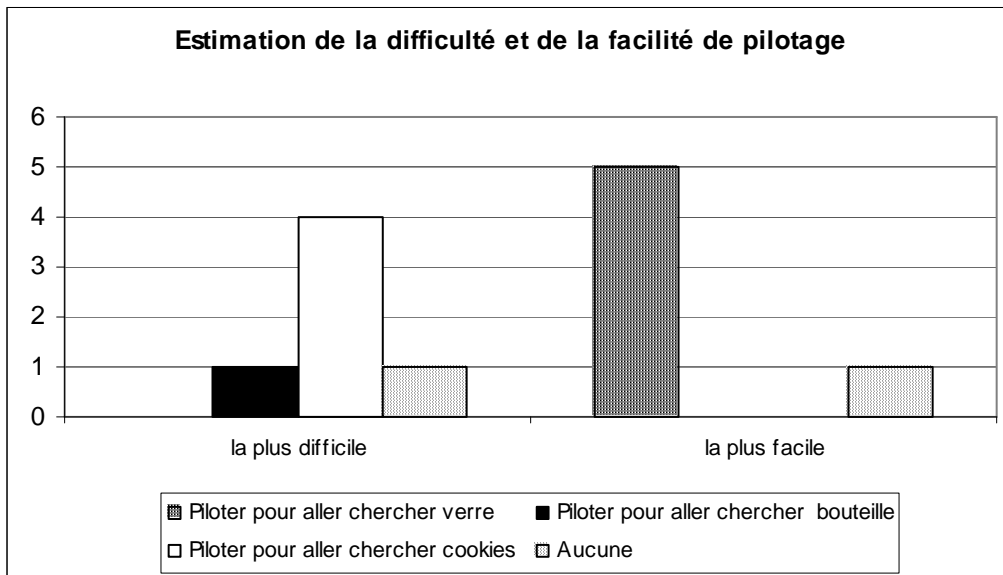


Figure 3-11: Estimation de la difficulté et de la facilité de pilotage

Nous observons que quatre utilisateurs sur six ont trouvé que piloter le robot pour aller chercher le paquet de cookies était la tâche la plus difficile. Selon eux, une fois passé dans le couloir, il est difficile d'estimer la position de la base dans l'espace, il manquerait des repères (« *J'arrivais pas à me repérer, je me suis perdu* »). Ils expliquent également cette difficulté par le champ de vision réduit de la caméra, « *Ce ne sont pas mes yeux* ». Cinq utilisateurs sur six ont estimé que piloter le système pour aller chercher le verre était le plus facile parce que celui-ci était situé face à eux. Quelles que soient les tâches, une personne a estimé que piloter n'est ni difficile ni facile. Une autre a trouvé que la tâche la plus difficile était de piloter le robot pour aller chercher la bouteille parce qu'elle avait du mal à se représenter ce qui était derrière elle. L'utilisabilité du système est difficile lorsque le robot est hors vue. Le système ne donne pas assez d'informations à l'utilisateur pour pouvoir le repérer dans l'espace.

La Figure 3-12 représente l'estimation de la fatigue des utilisateurs lors de la réalisation des tâches. Les utilisateurs n'ont pas trouvé du tout fatigant d'aller chercher le verre. Il en est de même pour quatre d'entre eux concernant la bouteille et trois pour le paquet de cookies. Un individu a trouvé fatigant d'aller chercher le paquet de cookies. Deux, pour le paquet de cookies et deux, pour la bouteille, ont ressenti un peu de fatigue en allant les chercher. De manière générale, la manipulation n'a pas été jugée fatigante mais plutôt contraignante de par le grand nombre de manipulations et la lenteur consécutive à la réalisation des actions : « *...mais c'est chiant* ». « *Je trouve que dans le principe avoir un bras robotisé c'est plutôt bien, dans l'utilisation c'est assez lent. C'est plus contraignant que de demander à quelqu'un.* ». L'utilisation du robot demande de nombreuses manipulations qui nécessiteraient d'ajouter de nouvelles fonctions automatiques.

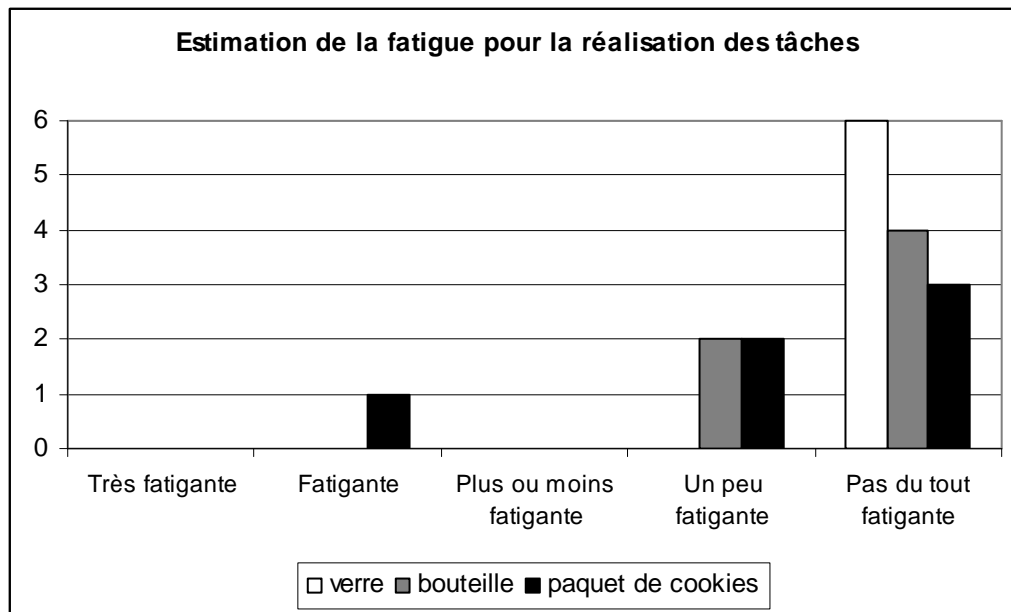


Figure 3-12 : Estimation de la fatigue pour la réalisation des tâches

3.2.3. Expérimentation au domicile d'une personne

3.2.3.1. Pré requis : études des activités quotidiennes

Une personne atteinte de myopathie travaillant à l'AFM a accepté de travailler avec nous à son domicile. Elle a déjà utilisé Manus mais elle ne le possède pas. La méthode des MSDR a de nouveaux été appliquée afin de découvrir ses activités quotidiennes. La méthode nous a permis de dresser une liste des fonctions à substituer et de voir avec l'utilisateur si le robot pouvait servir de ressource de substitution.

La réalisation de la MDSR s'est déroulée au cours d'entretiens. Lors de ces derniers, nous lui avons demandé de nous parler des ses activités de la vie quotidienne et des situations problématiques qu'elle pouvait rencontrer. Le Tableau 3-4 représente les fonctions à substituer.

Fonction à substituer	Ressources de substitution au sujet	Fonction substituable par le robot mobile	Importance	Valeur de substitution	Conditions de substitution
S'habiller	L'aide humaine	Non	Tous les jours, vitale	Efficace	
Aller aux toilettes	Auxiliaire de Vie (ADV)	oui			
Se laver					
Manger					
Boire					
Chercher, rapprocher un objet	L'aide humaine Auxiliaire de Vie (ADV)			Tous les jours	
Retirer de l'argent au distributeur (insérer la carte, faire le code et prendre l'argent)	L'aide humaine	non	Occasionnel	Très efficace	Il faut que ce soit une personne de confiance
Faire les courses	L'aide humaine - ADV		Une fois par mois	Efficace pour porter les courses, pour payer et ranger, mais coût monétaire important	Prévoir le transport, prendre RDV avec l'ADV, la payer, donner le code de la CB.
	Internet			Très efficace, paiement sur Internet par carte bleue	Avoir un ordinateur, une TrackBall, Internet, connaître le site de courses à domicile
Payer les commerçants	L'aide humaine				Régulièrement

Tableau 3-4: Ressources de substitution des fonctions

D'après le Tableau 3-4, nous avons pu établir une liste de dix fonctions à substituer, l'aide humaine est la première ressource de substitution. Pour la fonction « faire des courses », cette aide a été remplacée par Internet, car moins onéreux. Le Tableau 3-5 suivant représente les

fonctions à substituer et le nombre de ressources disponibles. Il présente aussi le désir de l'utilisateur de les voir substituées ou non par le robot.

Numéro des fonctions à substituer	Fonctions à substituer	Nombre de ressources de substitution actuelle	Désir que la fonction soit substituable par le robot
1	S'habiller	1	Non
2	Aller aux toilettes	1	Non
3	Se laver	1	Non
4	Manger	1	Oui
5	Boire	1	Oui
6	Chercher un objet	1	Oui
7	Rapprocher un objet	1	Oui
8	Retirer de l'argent au distributeur	1	Non
9	Faire les courses	2	Non
10	Payer les commerçants	1	Non

Tableau 3-5 : Distribution des fonctions à substituer

Nous remarquons que neuf fonctions sur dix n'ont qu'une seule ressource de substitution, l'aide humaine. Du fait de sa maladie, l'aide humaine est une ressource de substitution primordiale. Pour l'utilisateur quatre fonctions pourraient être substituées par le robot. La liste des fonctions à substituer n'est pas exhaustive, la méthode étant longue à appliquer. Cette étude a permis de choisir les activités à mettre en place pour les évaluations, au domicile de cette personne.

3.2.3.2. Protocole

Le robot fut transporté au domicile de la personne qui a pu se familiariser avec en allant chercher une bouteille d'eau située sur une table placée derrière elle (Figure 3-13). La phase de familiarisation a duré 30 minutes, l'utilisateur nous a indiqué lorsqu'il s'est senti prêt à débiter l'expérience. A partir de ce moment nous avons filmé son activité.



Figure 3-13 : phase de familiarisation au domicile de la personne

Le choix des activités était laissé au gré de l'utilisateur. La première activité que cette personne souhaita réaliser fut d'amener sa tasse de thé chaud, posée à côté d'elle, sur le bureau, jusqu'à sa bouche pour boire (Figure 3-14). Il s'agit d'une activité vitale pour la personne concernée et l'une des tâches qui lui tient à cœur de pouvoir réaliser sans aide humaine. Elle a réalisé cette activité deux fois.

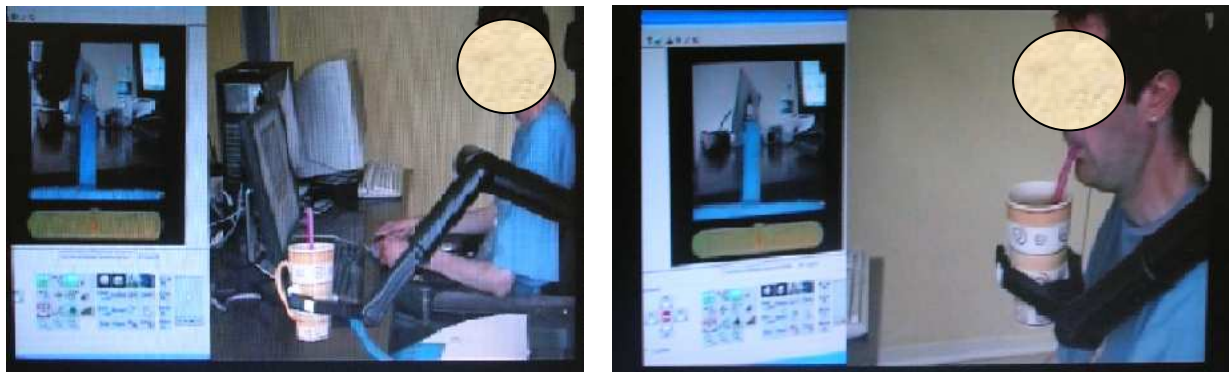


Figure 3-14 : Tâche saisir une tasse et boire à la paille

La deuxième activité fut d'aller chercher l'essuie-tout dans sa cuisine (Figure 3-15), ce qui n'était pas prévue au départ. Son idée était d'aller chercher un objet dans une autre pièce tout en restant devant son ordinateur. Cette activité a également été réalisée deux fois : réussite la première fois, échec la seconde.



Figure 3-15 : saisie de l'essuie-tout

Pendant l'activité avec le robot, nous lui avons, d'une part, demandé de verbaliser ses actions et, d'autre part, nous avons filmé son activité avec deux caméscopes afin d'avoir un enregistrement vidéo pour procéder à une auto confrontation future. Le premier caméscope filmait l'interface, le second enregistrait l'utilisateur et le robot lors de la première activité (amener la tasse de thé à la bouche), et le uniquement le robot lors de la seconde tâche (aller chercher le rouleau de papier essuie-tout, seconde tentative). Nous avons réalisé un montage des deux films d'une durée de vingt minutes afin de les visionner simultanément à l'écran. L'objectif était de permettre à l'utilisateur de visionner ultérieurement son activité avec le robot pour nous la commenter.

L'auto confrontation est un travail d'analyse produit par l'utilisateur à partir de son activité. Il doit pouvoir justifier et expliquer ses décisions. Cela lui permet de se remémorer ce qu'il s'est

vu faire et ce qu'il a réellement fait. L'auto confrontation joue un rôle de déclencheur dans le processus de prise de conscience, celle-ci s'est déroulée une semaine après la manipulation. Nous avons placé l'utilisateur devant le film et lui avons précisé qu'il pouvait l'interrompre à tout moment. Nous lui demandions, à partir de son commentaire, de préciser sa pensée lorsque nous voulions davantage d'informations. Nos critères d'observation étaient : l'utilité, l'utilisabilité, la satisfaction et la sécurité. L'entretien de l'auto confrontation était lui-même enregistré avec un dictaphone en vue d'une analyse plus fine.

3.2.3.3. Résultats

Nous avons identifié, avec l'utilisateur, les différentes actions réalisées avec le robot lors de la première tâche:

- Déplacer le bras dans la bonne position avant la saisie de la tasse.
- Saisir la tasse et la lever, à partir du moment où il ouvre la pince.
- Porter la tasse à la bouche.
- Déposer la tasse et ouvrir la pince.

La durée globale de l'activité, saisir une tasse pour boire, était de 10 minutes 8 secondes à la première tentative et de 6 minutes 28 secondes à la deuxième tentative (**Figure 3-16**). Nous observons une amélioration du temps général pour la réalisation de l'activité.

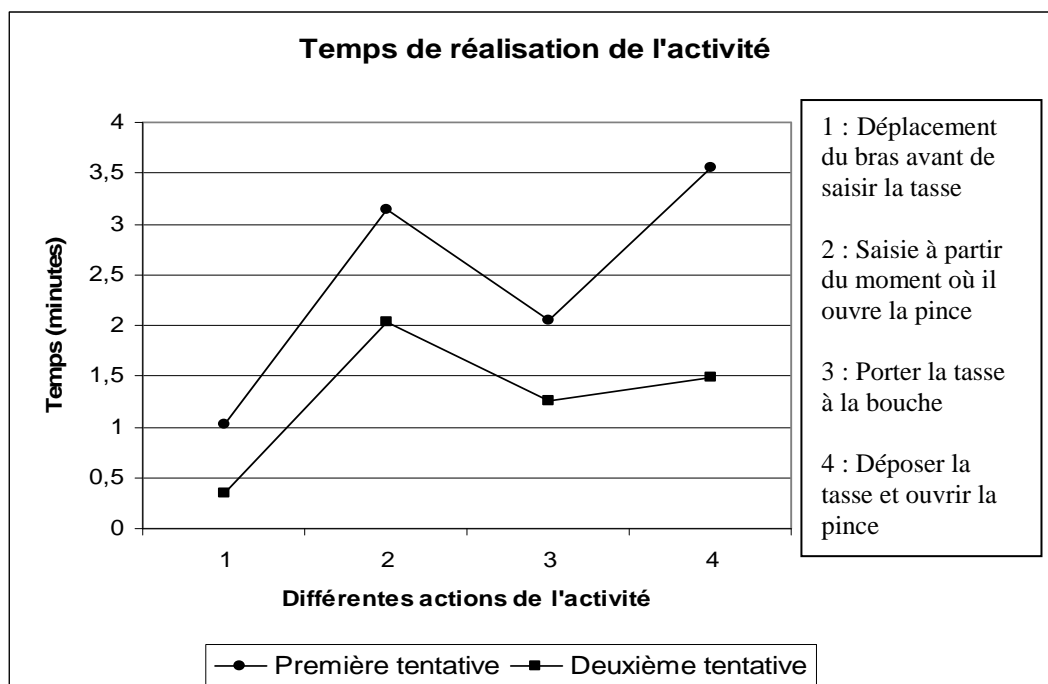


Figure 3-16 : Répartition des actions dans le temps (en minutes)

Nous pouvons aussi noter une amélioration du temps de réalisation de chaque action notamment pour déposer la tasse et ouvrir la pince. La familiarisation semble rapide pour cet utilisateur.

Lors de l'auto confrontation l'utilisateur pensait réaliser la tâche « porter la tasse à la bouche pour boire » en quatre phases : tendre le bras, écartier la pince, fermer la pince et remonter à la bouche. Parmi les réflexions recueillies, les suivantes relatent bien le ressenti de la personne.

« ...en fait on anticipe le mouvement tu vois....la réalité est autre. » Citation 3-1

« et puis à un moment donné, tu ne te concentres plus, tu fais que des conneries, t'appuies sur....tu vois là j'remonte, j'redescends, je sais plus ce que je fais tellement . » Citation 3-2

« ouais franchement j'avais tout, mais finalement c'était pas si simple que ça. » Citation 3-3
Citation 3-4

Nous remarquons, d'après le discours de l'utilisateur, que le robot lui demande beaucoup de manipulations pour atteindre son objectif. Les différentes étapes qu'il s'était imaginé pour saisir la tasse et la porter à la bouche devaient s'effectuer en un minimum d'actions. Finalement, selon lui, il effectue trop de manipulations qui lui demandent une concentration importante entraînant des erreurs de manipulation. Le robot ne répond pas à ses attentes sur la façon d'interagir avec le système. Il serait plus intéressant d'automatiser la fonction de préhension du robot.

L'un des critères le plus important pour les aides techniques est leur caractère « non dangereux » [SPER2004]. Nous avons pu noter beaucoup de références à la peur et au stress dus à l'utilisation du robot. Parmi les réflexions recueillies, nous avons noté les suivantes :

« Ça te fais une drôle de sensation quand tu resserres, t'as peur que ça tombe...ça te fait des sensations, c'est qu'une tasse tu imagines »

« Il faudrait une sensation de...que tu ressentes quand tu le resserres ou un petit contacteur un truc qui dit maximum ou un retour tactile tu vois au moins ça te sécurise. Parce que là tu vois quand ça penche j'me dis oh la la ça va tomber »

« le thé au moment de la pose peut-être, comment dire, peur de mal le poser,...en plus j'y tiens à cette tasse alors si je l'avais cassé, ça m'aurait détruit c'est un cadeau en plus »

« T'as des sensations, je sais pas comment t'expliquer, le fait que t'as l'impression de pas contrôler ton mouvement (...) tu te fais des sensations, mais des hauts le cœur et tout,... »

« Une fois que c'est fini, t'as un soulagement »

Le discours de l'utilisateur montre que la réalisation de l'activité lui a procuré de nombreuses frayeurs. Il avait peur de détériorer sa tasse qui avait une valeur sentimentale pour lui. Cependant, il n'a pas eu peur pour sa propre sécurité. En effet, il ne craignait ni de renverser le thé sur lui, ni de voir le bras manipulateur s'approcher de lui. Toutes les frayeurs sont observées à la saisie et au dépôt de la tasse. Elles ont été provoquées par la difficulté à manipuler la pince sur l'interface, liée d'une part aux symboles des boutons qui n'étaient pour lui pas assez explicites et d'autre part au retour inexistant d'informations kinesthésiques telles que la pression de la pince sur l'objet à saisir ou bien son poids. La manipulation de la base a été jugée facile.

« Ouais celui là ça va il n'y a pas de problème, c'est nickel par contre pour déplier les... ».

L'efficacité est liée à la réussite de la tâche, c'est-à-dire l'atteinte ou non des objectifs. L'utilisateur a réussi par deux fois à se donner à boire. Par contre, pour aller chercher l'essuie-tout, il a réussi la première fois et échoué la seconde. Il a expliqué son échec par le manque de repères qu'il a eu dans la cuisine. Il n'arrivait pas à évaluer la distance par rapport à la table. Sa stratégie était de se repérer par rapport au bras. Il ne s'est pas rendu compte de la distance disponible entre le robot et la table parce qu'il avait fixé son attention sur le bras afin de le voir sur l'écran. Il a manipulé de nombreuses fois la caméra pour se repérer dans l'espace et repérer le bras manipulateur. Une fois le bras repéré, il a commencé à vouloir saisir l'essuie-

tout sans se rendre compte qu'il était trop loin de la table. Il s'en est finalement aperçu et a avancé la base. Il a tenté à nouveau de saisir le rouleau de papier, mais il ne s'est pas rendu compte que la pince n'était pas assez écartée, l'essuie-tout est tombé sur la table. Il a alors tenté de le saisir différemment, mais n'a pas réussi : d'une part, parce que le retour caméra était insuffisant et, d'autre part du fait d'un décalage (latence) entre ce qu'il voyait à l'écran et ce qui était réalisé par le robot. Le repère donné par la caméra n'est pas suffisant pour repérer le robot dans la cuisine.

En ce qui concerne la satisfaction, l'utilisateur a considéré la manipulation comme un jeu auquel il a pris du plaisir. Cependant, il a trouvé l'utilisation frustrante, car elle ne permettait pas de reproduire le schéma qu'il avait en tête.

Le robot lui a aussi permis, privé de ses fonctions musculaires et ayant un pouvoir d'actions très limité sur les choses, de recouvrer une action sur le monde sans se déplacer.

« Que c'était moi qui faisait l'action mais sans me déplacer en fait, je sais pas si tu vois ».

Le pouvoir d'agir se définit, d'un point de vue intrinsèque, par référence aux objets de l'activité du sujet, aux situations et domaines dans lesquels il se développe. Sur un plan fonctionnel, il s'agit des résultats, des transformations du monde, des événements que le sujet est capable de faire advenir. Au plan structurel, il concerne « l'ensemble des ressources du sujet et de leur organisation : instruments, compétences, conceptualisations, schèmes et représentations associées ainsi que les capacités fonctionnelles du corps... » [FOLC2004]. Le robot transforme le pouvoir sur les choses et la représentation du monde. L'utilisateur s'approprie le bras manipulateur lorsqu'il dit :

« Je m'approche, j'hésite et tout tu vois, moi ce que je voulais faire c'est arriver, écarter le bras quoi...la main resserrer monter et mettre à ma bouche », «spontanément euh à la base tu tends le bras et hop tu écarter les doigts, tu le pincas tu remontes à la bouche... »

L'utilisateur fait référence au bras manipulateur comme une partie intégrante de son corps et souhaite qu'il soit plus humain, tant dans ses fonctionnalités que dans son apparence

« ... le bras faut qu'il soit plus souple, que les articulations soient plus...on va dire plus humain, que le bras soit plus humain ».

L'utilisateur voit l'avantage de fixer le bras sur la base mobile. L'inconvénient, à ce jour, est une taille trop massive.

3.2.4. Discussion

Nous avons observé que les utilisateurs trouvent tous un intérêt à fixer le bras sur une base mobile. Celle-ci devra avoir des dimensions raisonnables afin d'être manipulable dans tout type d'habitat. Le bras est à améliorer par l'utilisation de matériaux de construction plus légers. Il est certain que les utilisateurs ont trouvé le robot mobile utile mais il ne répond qu'en partie à leurs attentes.

La façon dont les personnes ont utilisé ou souhaité utiliser le prototype c'est-à-dire donner quelque chose à quelqu'un, saisir des objets ou se verser à boire, les amène à avoir une interaction avec le monde, et en conséquence, restitue l'autonomie du don, l'autonomie du pouvoir d'agir sur soi et sur le monde physique.

La « non automatisation » de la fonction de saisie amène les utilisateurs à faire de nombreuses manipulations nécessitant de la concentration, entraînant une lassitude. La fonction de saisie devra être automatisée et l'utilisateur devra avoir la possibilité d'alterner la fonction

automatique avec la fonction « non automatique ». De plus, lorsque le robot est dans l'autre pièce, l'activité de saisie implique un repérage uniquement grâce à la caméra. Celui-ci ne permet pas de connaître la position du bras par rapport à la base mobile. L'utilisateur a alors des difficultés à appliquer sa stratégie qui consiste, à partir de la connaissance de la position du bras par rapport à la base mobile, à effectuer les mouvements nécessaires au déplacement du robot ou à la saisie d'un objet. Le seul repère indiqué par la caméra pour localiser la base mobile et le bras dans l'espace lorsque le robot est dans l'autre pièce est insuffisant et par conséquent la tâche est difficile à effectuer. Cela implique d'intégrer des modes de repères supplémentaires. L'une des stratégies consistant à se repérer par rapport au bras, il faudrait y ajouter une caméra et/ou des capteurs pour ainsi repérer sur l'interface sa position par rapport à la base mobile. Notons que les utilisateurs, lors du second entretien, ont tous parlé de l'intérêt qu'il y avait à percevoir l'ombre de la pince sur le mobilier et les objets qui leur permettaient de mieux évaluer les distances. L'analyse met aussi le doigt sur l'utilisation du robot comme vecteur de lien social (don) qui ne permet pas uniquement de saisir des objets mais aussi de les transmettre ou de les soulever près du corps ou du visage. Des améliorations devront donc être apportées pour répondre à ces différents modes d'utilisation en termes de sécurité des biens et des personnes. Par exemple, lorsque le robot approche d'un mur ou d'une personne, il serait intéressant qu'il s'arrête en douceur, de même pour le bras lorsqu'il s'approche d'une personne ou d'un objet. Il faut que le robot puisse s'arrêter automatiquement face à un obstacle ou en cas d'erreur de manipulation.

L'interface, mal adaptée à la manipulation de la pince (icônes pas assez intuitives), amène les utilisateurs à faire des erreurs qui entraînent une perte de confiance en la machine et une peur de détériorer le matériel ou son environnement.

Le public visé ayant des caractéristiques hétérogènes, il faut que l'interface et le robot soient modulaires dans leurs fonctionnalités pour s'adapter non seulement au handicap et à son évolution dans le temps mais aussi à l'individu (âge, capacités cognitives, habileté). Par exemple, l'interface de commande doit pouvoir s'adapter aux différents périphériques utilisés (souris, tracker visuel, joystick...).

Une personne a employé le robot comme un outil afin d'ouvrir une bouteille. En termes de perspectives d'actions, il faudrait adapter le robot à cette fonctionnalité : par exemple, mettre de la mousse autour de la base qui épouserait la forme de l'objet.

3.3. Conclusion

La confrontation du système avec des utilisateurs finaux est riche d'enseignements. C'est la première évaluation du système global, qui jusqu'à présent, n'avait été testé que par partie. On peut regrouper ces enseignements en deux catégories principales : l'interaction homme-machine et la méthodologie de conception de l'aide robotisée.

En ce qui concerne l'interaction homme-machine, de nombreuses remarques ont porté sur l'ergonomie de l'interface notamment la commande du bras et le retour d'information. Des utilisateurs aimeraient que le bras manipulateur joue le rôle de leur propre bras et que la caméra offre un angle de vision comparable à leurs yeux. C'est principalement un problème technologique. La « conscience de la situation » est autre point très discuté dans la communauté de l'interaction homme-robot car elle est très difficile à formaliser. La finalité de « savoir ce qui se passe pour savoir quoi faire » et la fonction anticipatrice « être devant l'action » sont révélatrices de la hantise des utilisateurs d'échouer dans l'ajustement de leur activité au dynamisme de la situation faute de ne pas disposer du temps nécessaire pour

anticiper sur les événements [VALO1996]. Beaucoup de remarques ont trait à cet aspect, c'est-à-dire à la mise à jour, à faible coût, du cadre de référence commun. Ils notent la difficulté de situer la base mobile dans l'espace, la base mobile par rapport aux meubles, le bras par rapport à la base, l'objet par rapport au bras... La coopération homme-machine a été abordée par l'utilisateur à son domicile qui a souligné que, du fait de la dissociation des commandes bras-base, la manipulation du robot requerrait de nombreuses manipulations. L'utilisateur n'arrive pas à reproduire le schéma qu'il a prévu pour réaliser sa tâche.

En ce qui concerne la méthodologie de conception, il est apparu que l'utilisateur est essentiel dans le processus. L'évaluation a fait apparaître au cours des phases d'apprentissage libres des détournements d'usages comme l'ouverture d'une bouteille, qui impliquent des adaptations sur le robot. L'utilisateur peut aussi apporter des éléments de solution en exposant son avis sur la façon dont il aurait aimé que l'expérience se déroule. Toutes ces considérations prouvent, s'il était nécessaire, que l'utilisateur doit être au centre du processus de conception (CCU). Cependant, l'évaluation au cours du processus de CCU des prototypes intermédiaires est une problématique à part entière. La CCU a été définie pour le développement de produits à forte composante logicielle, cibles de la norme ISO 13407. La concrétisation des solutions peut se faire grâce à des méthodes simples. La principale difficulté réside dans l'application directe de la CCU à la réalisation de prototypes intermédiaires mi-logiciel et mi-matériel. D'un côté, on se trouve en présence d'un objet complexe en cours de développement qu'il faut fiabiliser pour deux raisons, éviter le rejet par l'utilisateur du système et surtout assurer sa sécurité. Pour obtenir des résultats jugés valables statistiquement dans des limites temporelles et de coût acceptables, il faudrait pouvoir disposer de plusieurs prototypes. De l'autre côté, il y a l'utilisateur handicapé, souvent peu disponible pour des raisons de santé et dont les caractéristiques sont très variables d'un individu à l'autre.

Parmi toutes les questions soulevées par cette évaluation, il a été décidé d'apporter des éléments de réponse sur deux points :

- La coopération homme-machine en développant une commande coordonnée de la base mobile et du bras manipulateur. On a pu s'apercevoir que malgré une bonne acceptation du robot par les utilisateurs, le déplacement simultané de la base mobile et du bras manipulateur durant les phases de saisie oblige à un effort cognitif important, source de fatigue, de stress et d'erreurs de manipulation. Dans le chapitre 4, nous proposerons et comparerons différentes méthodes pour mettre en œuvre un mode de commande coordonnée.
- L'adaptation de la CCU au développement d'une aide robotisée par nature complexe et innovante. Nous exposerons dans le chapitre 6 une méthode de conception centrée utilisateur utilisant les avantages de la réalité virtuelle dans le cycle de développement. Mais auparavant, nous présenterons, dans le chapitre 5, une étude portant sur le transfert d'habiletés acquises sur un simulateur du système ARPH vers le système réel, préalable à l'utilisation de la réalité virtuelle dans les phases d'évaluation et d'apprentissage du prototype de la CCU modifiée.

4. Commande coordonnée d'un bras manipulateur embarqué sur base mobile

L'ensemble robotique que nous désirons commander est constitué d'une plate-forme mobile non holonome se déplaçant sur un plan et sur laquelle est fixé un bras manipulateur MANUS à six degrés de liberté. (Pour plus de précision, se rapporter au paragraphe 3.1). On étudie ici plusieurs méthodes, l'objectif étant de réaliser une tâche dans le repère global en utilisant la/les redondance(s) de l'architecture matérielle. Notons d'ores et déjà que nos critères d'évaluation ne sont pas ceux des robots industriels. Nous ne cherchons pas ici de grandes cadences ni même une grande précision. L'objectif est un système aisément manipulable par un opérateur humain. Notre domaine d'utilisation est de la « téléopération assistée ».

Alors que, dans l'industrie on sait bien commander des bras manipulateurs pour des opérations particulières, il n'en est pas de même lorsque ceux-ci sont fixés sur une base mobile et que la tâche qu'ils ont à effectuer n'est ni connue à l'avance ni répétitive. La méthode générale passe par le calcul de modèles mathématiques statiques et dynamiques du robot [JOUK1992]. Ainsi, à partir d'une position $p(x, y, z)^T$ que l'on désire atteindre avec l'effecteur du bras, on est capable de déduire les vitesses articulaires que devront prendre les différentes articulations pour atteindre cette position. Une première difficulté est la prise en compte de la redondance. En effet, il existe plusieurs configurations possibles pour atteindre une position donnée. Le problème est d'autant plus complexe lorsque le bras est fixé sur une base, elle-même capable de se déplacer ; faut-il déplier le bras ou bien faire avancer la base ? Il est possible de conserver le formalisme précédent en incluant dans le système la plate-forme mobile et en travaillant sur des indices de manipulabilité. On pourra retrouver ce type de réflexion dans le travail de Kiar NAIT CHABANE [NAIT2006] qui commande un bras 3 axes sur base mobile en tentant de conserver le maximum de manipulabilité de l'organe terminal. Notons aussi que ce type de modèle n'est pas résistant aux pannes à moins d'y ajouter des traitements spécifiques pour y pallier. Il est aussi très difficile d'inclure dans ces méthodes des critères basés sur des facteurs humains (posture anthropomorphique). Nous entrons ici dans le domaine de la téléopération décrit par Yves Rybarczyk dans son travail sur la coopération homme machine [RYBA2004A], [RYBA2004A] et notamment dans les processus d'adaptation et d'assimilation [PIAG1936]. Ces notions sont très importantes dans le cadre de mon travail qui s'adresse en particulier aux personnes handicapées. Dans ce chapitre, trois approches originales proposent une alternative aux méthodes classiques citées précédemment :

- Approche Multi-Agents
- Approche par systèmes déformables (Masse Ressort et particules)
- Systèmes de Contraintes

Nous présentons ensuite des simulations et un tableau comparatif des approches multi-agents, masses-ressorts et par critère de manipulabilité. Enfin, nous présentons deux expérimentations réelles sur le prototype du robot ARPH à l'aide de l'approche multi-agents.

4.1. Systèmes Multi-Agents

Nous allons décrire ici la modélisation d'une base mobile associée à un bras manipulateur. La Figure 4-1 présente le synoptique général du système qui comporte deux parties très

distinctes. La première présente un système multi-agents composé d'agents réactifs pour les différentes articulations du bras manipulateur et d'un agent cognitif pour la base mobile. Le premier objectif est ici d'obtenir une grande robustesse vis à vis des pannes moteurs grâce à des agents travaillant chacun localement à la résolution d'une tâche (minimisation de la distance entre l'effecteur du manipulateur et l'objectif à atteindre). La seconde partie représente une supervision qui, dans le cadre de la télé manipulation, va permettre à l'utilisateur de s'appropriier le système plus facilement. Cette supervision peut aider à l'obtention d'une posture humanoïde par exemple. Dans l'étude qui suit, elle sera implémentée à l'aide d'un réseau de neurones.

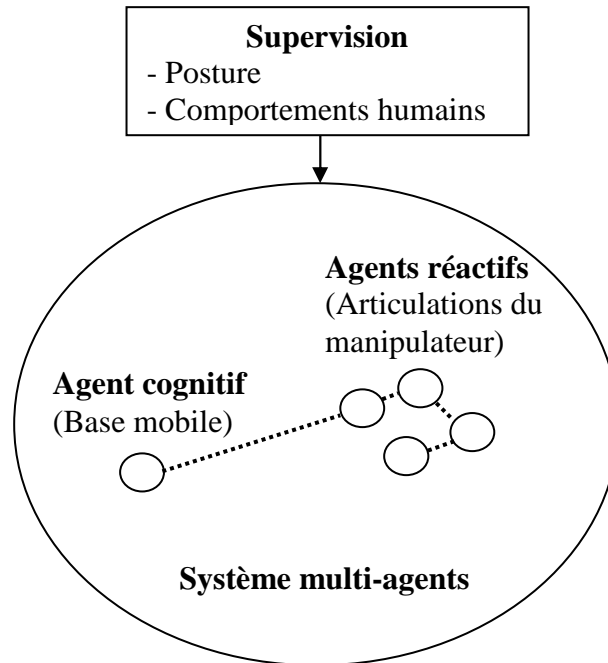


Figure 4-1 : Synoptique de la commande coordonnée par agents

Commençons par traiter le bras seul à l'aide d'agents réactifs. Nous comparerons sa modélisation à celle proposée par Dominique Duhaut [DUHA1993]. Nous étudierons l'intérêt d'associer un réseau de neurones à cette approche. Enfin nous présenterons l'agent hybride (comportement réactif et cognitif) utilisé pour la base mobile.

4.1.1. Agents réactifs du bras

4.1.1.1. Fonctionnement

Les agents réactifs réagissent à des stimuli externes (et agissent en conséquence). Leur comportement cognitif est limité et ils n'ont connaissance que d'un objectif local à atteindre. Nous recherchons ici, en associant plusieurs de ces agents, un comportement émergent qui permette de satisfaire un objectif de plus haut niveau. Pour cela, il nous a semblé intéressant de modéliser un bras manipulateur en associant à chaque membre articulé un agent prédictif réactif.

Nous allons tout d'abord expliciter le fonctionnement de ces agents sur un manipulateur plan. Prenons tout d'abord l'exemple d'un seul de ces agents (Figure 4-2). Celui-ci est capable de

calculer la position du bout de son membre ($P_{Effecteur}$) en fonction de la valeur articulaire qui lui est associée. Sa tâche est de placer l'effecteur au plus près d'une position désignée comme objectif ($P_{Objectif}$).

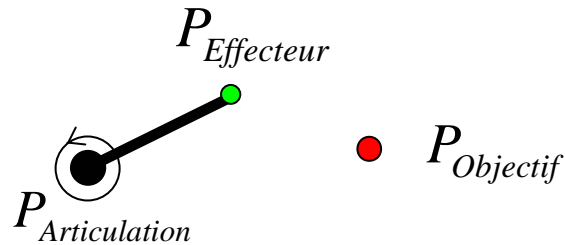


Figure 4-2 : Agent d'articulation en situation initiale

La Figure 4-3 illustre les différentes étapes du processus.

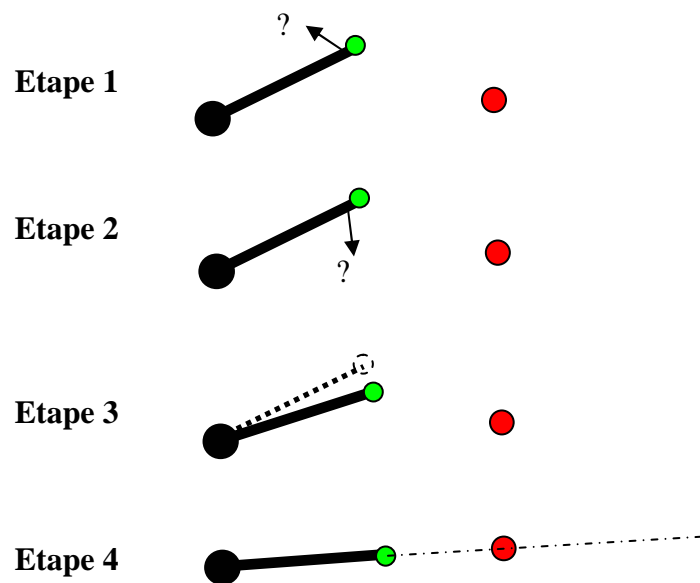


Figure 4-3 : Etapes de résolution avec 1 agent

Etape 1 : L'agent se demande si en effectuant une petite rotation vers le haut il sera capable de rapprocher $P_{Effecteur}$ de $P_{Objectif}$. Pour cela il va (virtuellement) effectuer cette rotation et calculer sa nouvelle position $P_{Effecteur}$. Dans ce cas, la distance $P_{Effecteur} - P_{Objectif}$ a augmenté. L'agent ne va donc pas réaliser l'action virtuelle qu'il avait projetée.

Etape 2 : De la même manière, l'agent se demande si il est capable de rapprocher $P_{Effecteur}$ de $P_{Objectif}$ en effectuant une rotation vers le bas. Dans ce cas, la distance $P_{Effecteur} - P_{Objectif}$ diminue.

Etape 3 : L'agent effectue alors réellement la rotation qui lui a permis de diminuer la distance $P_{Effecteur} - P_{Objectif}$.

En répétant les étapes 1, 2 et 3 le vecteur $\overrightarrow{P_{Articulation}P_{Effecteur}}$ va s'aligner sur le vecteur $\overrightarrow{P_{Articulation}P_{Objectif}}$. Cette position finale est celle où l'effecteur est au plus proche de l'objectif.

On peut étendre ce comportement à n agents. La Figure 4-4 illustre le principe pour quatre agents.

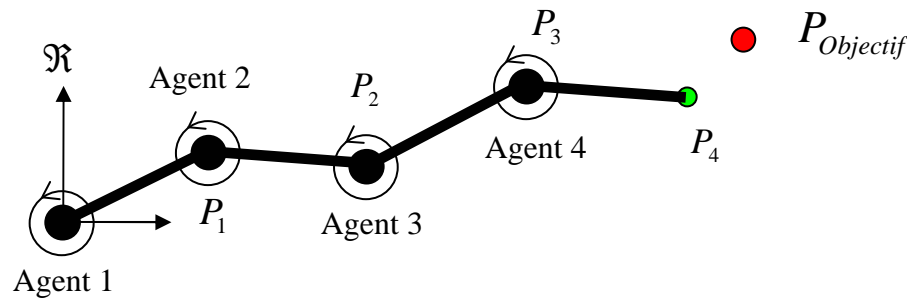


Figure 4-4 : Extension à quatre agents

Dans ce cas, la tâche de chaque agent est de réduire la distance entre P_4 et $P_{Objectif}$. Pour cela, il est nécessaire que chaque agent connaisse la position P_4 en fonction de son mouvement. Il existe alors trois approches pour obtenir cette position.

- Chaque agent stocke sa position articulaire dans un espace commun, couramment appelé blackboard. Ainsi, étant en mesure d'accéder à l'ensemble des valeurs articulaires, chaque agent peut calculer P_4 en utilisant le modèle géométrique direct (MGD) du manipulateur.
- On suppose que le MGD est inconnu mais que chaque articulation connaît la longueur du membre qu'elle commande et son orientation initiale par rapport au membre précédent. Ainsi, L'agent 1 connaît la position P_1 . En instanciant un système de communication entre agents, l'agent 2 peut interroger l'agent 1 pour obtenir la position P_1 et en déduire la position P_2 . En continuant la chaîne, l'agent 4 peut calculer P_4 . L'information peut ensuite être rétro propagée dans la chaîne afin que chaque agent ait la connaissance de cette position P_4 .
- On suppose que l'on n'a aucune connaissance de dimensionnement du système. Dans ce cas, il est possible d'utiliser un système de localisation externe. On pourrait par exemple placer un amer sur l'effecteur qui serait vu par une caméra. Un traitement informatique permettrait alors de déduire la position P_4 dans \mathcal{R} et de la transmettre à chaque articulation.

La première approche, bien que nécessitant la construction du MGD, est la plus simple à mettre en œuvre. La deuxième approche ne nécessite plus la construction du MGD mais tout de même une connaissance dimensionnelle du système. Ces deux méthodes nécessitent des capteurs articulaires fonctionnels. La troisième approche ne nécessite ni MGD, ni connaissances dimensionnelles et aucun capteur articulaire. Sa mise en œuvre est toutefois plus complexe avec l'adjonction d'une caméra dans le système.

Notons que dans ce dernier cas, sans connaissance du MGD, un agent ne peut pas effectuer de rotation virtuelle comme décrite dans l'étape 1 de son algorithme. Il faudra alors à l'agent réaliser une rotation réelle (même si ce n'est pas dans la bonne direction). Si cette rotation n'a pas rapprochée l'organe terminal de son objectif, il devra effectuer une rotation dans le sens inverse. L'algorithme est alors modifié de la manière suivante :

Etape d'initialisation : $N=h$ (h signifie rotation vers le Haut et b signifie rotation vers le Bas).

Etape 1 : L'agent effectue une petite rotation vers N .

Etape 2 : Si la distance $P_{\text{Effecteur}} - P_{\text{Objectif}}$ a augmenté alors on complémente N (Si $N=h$ alors $N=b$ sinon $N=h$).

En répétant les étapes 1 et 2, le vecteur $\overrightarrow{P_{\text{Articulation}} P_{\text{Effecteur}}}$ va s'aligner sur le vecteur $\overrightarrow{P_{\text{Articulation}} P_{\text{Objectif}}}$ comme précédemment. Cette position finale est celle où l'effecteur est au plus proche de l'objectif. Dans cet algorithme, chaque agent peut commettre une erreur sur le sens de rotation. Cette erreur sera alors rectifiée lors des pas de traitement suivants.

4.1.1.2. Comparaison/simulation

Nous allons maintenant présenter quelques simulations et comparaisons. Nous noterons notre approche MSMA. La deuxième approche utilisée est celle présentée par Dominique Duhaut dans [DUHA1993] et notée MD. La Figure 4-5 présente une simulation de dépliement pour un bras plan à 5 articulations. Sur la gauche, on observe la méthode MSMA et sur la droite la MD. Le dépliement y est présenté en 3 étapes.

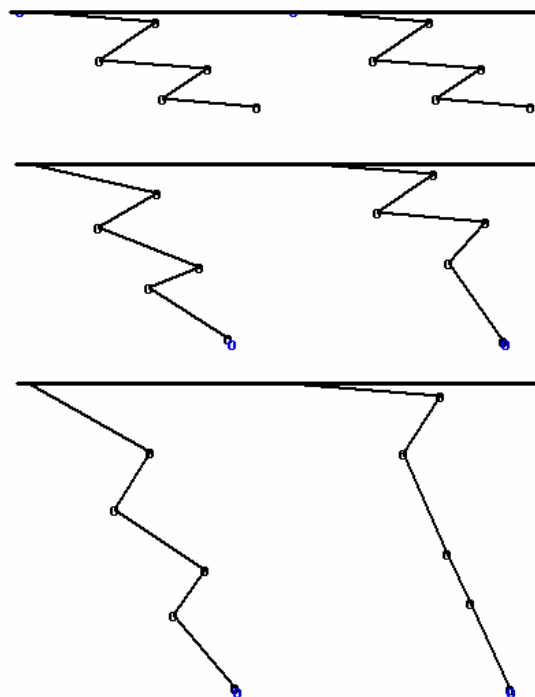


Figure 4-5 : Méthode MSMA et MD

On observe bien que, lors de l'extension, la méthode MD tente de déplier uniquement la partie finale du bras. Le système MSMA est beaucoup plus homogène et n'induit aucune configuration singulière à l'étape 3. L'aspect visuel pour l'utilisateur est aussi plus naturel.

La Figure 4-6 montre un repliement par rapport à la dernière étape de la Figure 4-5. On peut remarquer que le MSMA permet d'éviter les croisements non désirés.

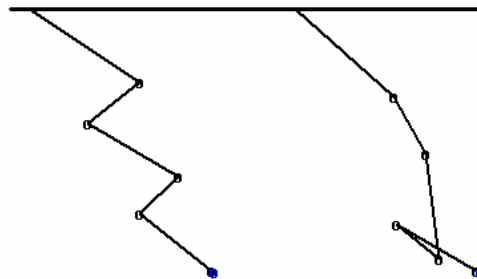


Figure 4-6 : Repliement

La Figure 4-7 présente une simulation avec pannes des articulations 2 et 3. Ces pannes sont représentées par des carrés et les membres associés sont en pointillés. L'espace délimité par deux demi-cercles représente le domaine atteignable par le manipulateur en prenant en compte les pannes articulaires citées précédemment. Chaque point est une position testée en simulation avec l'approche MSMA. Trois configurations finales du bras y sont représentées, l'objectif étant alors le cercle confondu avec l'organe terminal du bras.

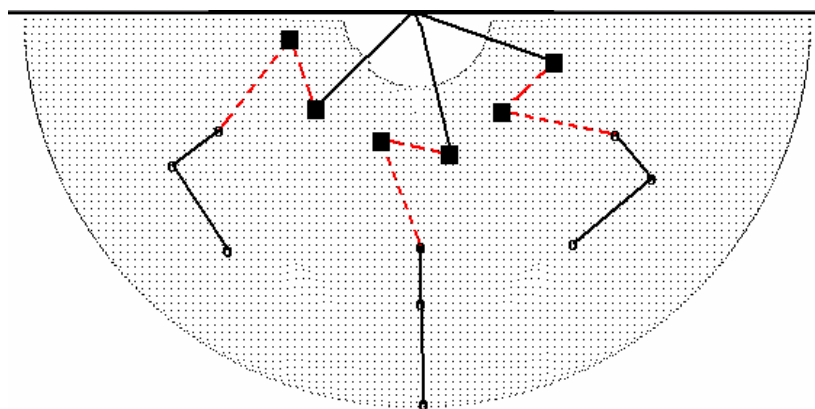


Figure 4-7 : simulation de pannes avec MSMA

Dans cette simulation, tous les points du domaine atteignable ont été atteints. On observe de la part de l'approche MSMA une robustesse aux pannes moteur et ceci malgré un bras opérationnel à seulement 60%.

4.1.1.3. Supervision de postures par réseau de neurones

Rappelons que le bras sera utilisé le plus souvent en mode téléopéré. Afin que l'utilisateur ne rejette pas le système, des études ont montré qu'il est préférable que la posture du bras lui semble naturelle et, dans l'idéal, identique à la posture que son propre bras prendrait pour accomplir cette tâche. Nous avons donc intégré un réseau de neurones capable de prédéfinir dans un premier temps une posture générale du bras. Le système MSMA prend ensuite la

commande pour s'assurer que l'objectif est atteint avec précision en tenant compte des pannes que le RN n'identifie pas.

Nous avons utilisé un RN très simple : une couche d'entrée à 2 neurones, une couche cachée à 4 neurones et une couche de sortie à 5 neurones (Figure 4-8). Chaque neurone a pour fonction

$$d'activation f_a = \frac{1}{1 + e^{\sum_{i=0}^n out_i * w_i}} .$$

n nombre de neurones de la couche précédente

avec out_i valeur du $i^{ème}$ neurone de la couche précédente

w_i poids du $i^{ème}$ neurone de la couche précédente

On présente en entrée une position (x, y) à atteindre et, en sortie, le RN donne les valeurs angulaires des 5 articulations. Sur les simulations qui suivent, l'apprentissage a été effectué avec un algorithme de rétro propagation du gradient sur une base de 49 exemples représentant un quadrillage de l'espace. Le lecteur intéressé par la mise en œuvre de RN pourra consulter l'ouvrage « Réseaux de neurones : Méthodologies et applications » [DREY2004].

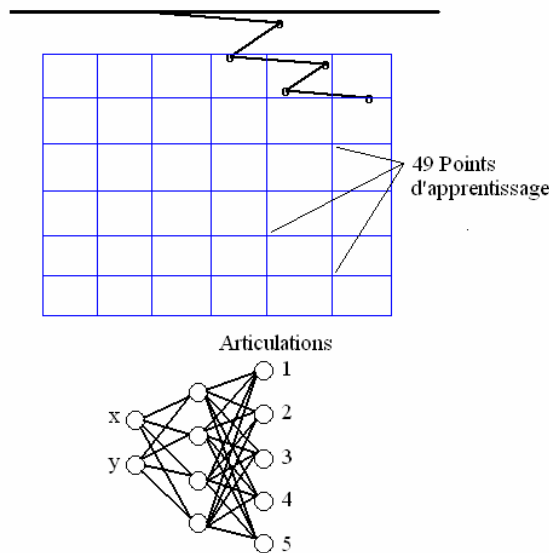


Figure 4-8 : Apprentissage par RN

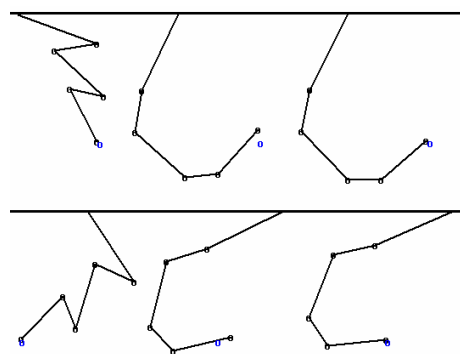


Figure 4-9 : Comparaison MSMA, RN, RN+MSMA

Sur la gauche de la Figure 4-9, on peut voir un exemple de positionnement obtenu à l'aide de MSMA. Cette configuration n'est pas la seule possible, elle dépend des configurations précédentes. Au centre, la posture affichée est celle qui est retournée par le RN, dépendant uniquement de l'objectif (représenté par le point) fourni en entrée du réseau. Sur la droite, on observe la posture précédente corrigée par MSMA pour atteindre avec précision l'objectif désiré. On remarque bien que la réunion des deux méthodes donne d'excellents résultats. Le RN apporte au système une posture anthropomorphique et le MSMA assure la précision.

Cette méthode a été implémentée avec succès sur le bras manipulateur MANUS après un passage en 3D. Le RN utilisé possède maintenant 3 entrées (x, y et z) et 6 sorties (3 variables articulaires pour positionner le bras et 3 pour orienter le poignet). La méthode « BootStrap » a été utilisée pour l'apprentissage. En intégrant le poignet, nous avons aussi étendu la notion de posture en l'associant à une tâche de haut niveau que l'utilisateur désire effectuer. Il est ainsi possible de commuter entre plusieurs RN en vue de saisir un objet de différentes manières: par le dessus, par le dessous, de côté ... On remarque la méthode RN n'est pas tolérante aux pannes. Si une articulation fait défaut la position de l'organe terminal sera très éloignée de son objectif. Dans ce cas, le SMAS, en corrigeant la position de l'effecteur ne pourra pas assurer la même position anthropomorphique. L'utilisation du RN impose donc certaines limites :

- On ne l'utilise qu'en mode non dégradé
- On définit un RN pour chaque mode dégradé. En cas de panne d'un moteur (panne qui doit être détectée) le système utilise le RN correspondant au mode dégradé détecté. Le nombre de RN à instancier est de $2^{\text{nombre d'articulations}}$. Ces RN peuvent être calculés simplement et automatiquement même avec un nombre élevé d'articulations. Par exemple, pour un bras complexe de 8 articulations, il faudra calculer 256 RN ce qui, au pire, ne nécessitera que quelques minutes de calculs et quelques kilo-octets de mémoire.

4.1.1.4. Discussion

Nous avons ici présenté une méthode basée sur des agents réactifs pour contrôler un bras manipulateur. Dans ce système, tous les agents travaillent en parallèle. Il n'y a pas de synchronisation et certains peuvent être plus lents ou plus rapides (voir même inactifs) que d'autres. Dans tous les cas où l'on est capable de déterminer la position de l'effecteur, que ce soit à l'aide du MGD, des données de dimensionnement du manipulateur ou d'un système de localisation externe, si l'objectif est atteignable, celui sera atteint. Le système n'est donc pas sensible aux pannes moteur. Ceci s'explique par le fait que les agents n'interagissent jamais entre eux dans le but de partager leurs compétences pour atteindre leur objectif ce qui nécessiterait une supervision pour traiter les cas de fonctionnement dégradé. Si l'un d'eux ne fonctionne plus, les autres cherchent indépendamment à satisfaire l'objectif qui est d'approcher l'effecteur de la position désirée.

En associant un premier positionnement basé sur une posture désirée à l'aide d'un réseau de neurones au système multi-agents, le système est capable d'atteindre un objectif de façon contrôlée en fonction de critères particuliers à définir dans l'application cible. Parmi ces critères, on pourra trouver des facteurs humains ou plus simplement la volonté de conserver une posture particulière pour une tâche précise.

4.1.2. Agent cognitif de la base mobile

L'agent utilisé pour la base mobile est en réalité un pseudo agent à état. Il est globalement réactif mais capable de se placer dans des états de secours particuliers pendant un certain

temps, notamment pour éviter les situations où base mobile et bras manipulateur seraient en rotation simultanée et alors incapables de se stabiliser sur l'objectif.

Cet agent a un comportement intelligent car il est capable de gérer l'orientation de la base en fonction de singularités extrêmes détectées sur le bras manipulateur. De plus, la base mobile utilisée possède une ceinture ultrasonique sur l'avant et c'est donc le sens de déplacement que devra privilégier l'agent utilisé. Pourtant, il peut arriver que l'utilisateur désire prendre un objet en hauteur qui ne soit pas atteignable avec la base orientée de cette façon du fait d'un obstacle qui l'empêche d'avancer. L'agent base devra donc se réorienter « en marche arrière » pour permettre la saisie de l'objet.

Les différentes recherches effectuées sont essentiellement basées sur des simulations virtuelles. Nous avons développé un simulateur de la base mobile équipée du bras MANUS et c'est empiriquement que nous avons amélioré le fonctionnement de l'agent de la base.

Les données utilisées sont présentées sur la Figure 4-10. Ces dernières ainsi que les variables internes nécessaires à l'algorithme implémenté pour l'agent de la base mobile sont décrites dans le Tableau 4-1:

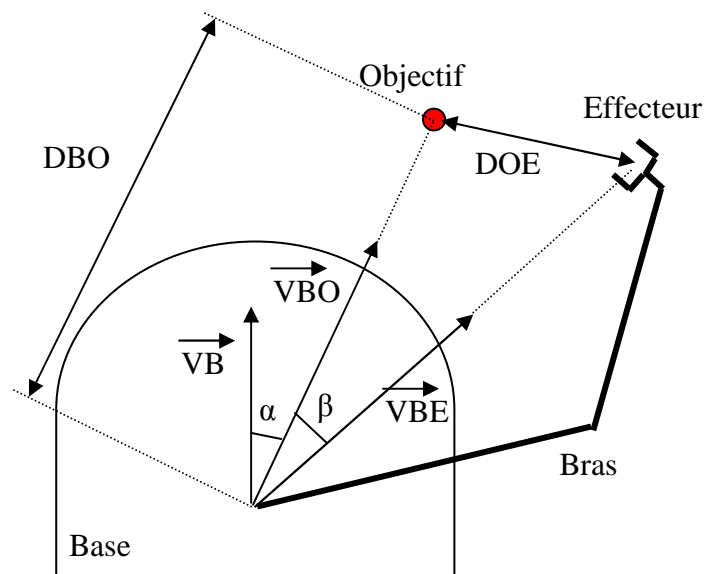


Figure 4-10 : Variables utilisées par l'agent de la base

DBO	Distance entre le centre de la base et l'objectif à atteindre
DOE	Distance entre l'effecteur et l'objectif à atteindre
VB	Vecteur de direction de la base en marche avant
VBO	Vecteur Base-Objectif
VBE	Vecteur Base-Effecteur
Smax	Seuil de manipulabilité Maximum (Smax=0,55m)
Smin	Seuil de manipulabilité Minimum (Smin=0,3m)
VL	vitesse linéaire à appliquer à la base
VA	vitesse angulaire à appliquer à la base
k1,k2	Coefficients d'adaptation des vitesses (k1=20, k2=10)

Tableau 4-1 : Description des variables

L'algorithme utilisé pour l'agent de la base est le suivant :

Répéter

VL=0

VA=0

Si (DBO>Smax)

VL=(DBO-Smax)

Fin si

Si (DBO<Smin)

VL=(DBO-Smin)

Fin si

Si ($\beta > 5^\circ$)

VA=k1* β

Si (DBO>1m)

VL=0

Fin si

Fin si

Si ($\alpha > 30^\circ$)

VA= k2 * α

Si (DBO>1m)

VL=0

Fin si

Si (VA non nulle et non diminution de DOE)

Ne rien faire pendant 30 cycles

Fin Si

Si (VL nulle et non diminution de DOE)

VL=k2*DOE pendant 10 cycles

Fin Si

Limiter VL à 0,6m/s

Limiter VA à 0,3rad/s

Appliquer VL et VA au bloc de commande des moteurs

Fin répéter

4.1.3. Discussion

Nous avons présenté une approche multi-agents pour le contrôle d'un bras manipulateur mobile. Cette approche permet au système d'atteindre une position même en conditions dégradées et ceci sans modifications d'algorithmes et sans système superviseur de gestion de pannes. De plus, cette méthode évite l'utilisation du modèle géométrique inverse. Avec l'utilisation d'un système externe de localisation de l'effecteur, la connaissance du dimensionnement, et donc du modèle du système, n'est plus nécessaire. L'utilisation d'un réseau de neurones permet, en plus, de satisfaire à des exigences de postures. L'agent cognitif utilisé pour la base mobile garantit un comportement adapté à la conception mécanique du système (privilégier le déplacement en avant, faciliter les saisies difficiles ...). Les résultats de simulations du système dans sa totalité seront présentés dans le paragraphe 4.4.

4.2. Masses ressorts

Dans cette partie, nous modélisons le manipulateur mobile à l'aide d'un système de masses ressorts. Les masses représentent la structure physique et un ensemble de ressorts assure les liens entre elles, représentatifs de la raideur de la matière en différents points. Après avoir présenté quelques généralités sur les masses ressorts, nous modéliserons les fonctions articulaires de base avant d'en arriver à une représentation complète du bras manipulateur et de la base mobile.

4.2.1. Généralités

Ce type de système est caractérisé par un ensemble de particules liées entre elles par des ressorts. Les particules sont définies par une position initiale dans l'espace cartésien $P^T [x \ y \ z]$ et par une masse m . Les ressorts sont définis par une longueur de repos l et une raideur k . En outre, chaque ressort est lié à 2 particules p_1 et p_2 .

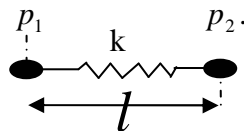


Figure 4-11 : Masse Ressort

Pour chaque ressort du système, on va calculer les forces f_1 et f_2 qui sont générées sur les deux masses à ses extrémités.

$$d = \text{distance}(p_1, p_2)$$

$$v = \overrightarrow{p_1 p_2}$$

$$f_1 = v \frac{k(d-l)}{d}$$

$$f_2 = -f_1$$

Ensuite, on calcule les déplacements des masses induits par ces forces à chaque pas temps t .

$$a = \frac{f}{m}$$

$$v = at$$

$$p^t = p^{t-1} + vt$$

a Accélération d'une masse m soumise à une force f

v Vitesse de cette masse pendant un temps t

p^t Nouvelle position de la masse

p^{t-1} Position de la masse au pas de temps précédent

Afin de stabiliser le système, on utilise une force de frottement visqueux qui fera office

d'amortissement. Cette force viendra s'opposer aux forces f_1 et f_2 calculées précédemment.

$$f_{vis} = -\lambda v$$

Avec :

f_{vis} Force d'amortissement

λ Coefficient d'amortissement

On applique ensuite ces principes à un maillage plus complexe (Figure 4-12). Dans notre cas, nous allons ajouter des contraintes à certaines particules. Comme nous modélisons un bras manipulateur, il nous faut annuler les forces appliquées aux particules représentatives du « socle » de notre robot afin que leurs positions initiales demeurent inchangées. Nous allons aussi choisir une particule qui sera notre effecteur et nous lui appliquerons une force artificielle proportionnelle à la distance qui la sépare de l'objectif à atteindre. Ensuite, par calcul itératif, le système se stabilisera. La figure ci-dessous montre le principe dans son ensemble.

Figure 4-12 : Initialisation - stabilisation du système MR

4.2.2. Modélisation modulaire de fonctions par « Boite MR » (ou « Boîte Masse Ressort »)

Pour instancier le bras manipulateur, la méthode innovante retenue ici passe par une étape de modélisation de « Cube MR ». Ces cubes sont les briques de base nécessaires à l'élaboration d'une structure complète puisqu'ils représentent les différentes déformations possibles de la matière dont est composé notre bras manipulateur (solide, déformable en rotation). Nous allons ici en décrire 3 types qui seront ceux utilisés par la suite dans les simulations.

4.2.2.1. Cube MRD

La première fonction est la matière « dure », c'est à dire non déformable. Elle est représentée par 8 particules qui correspondent aux sommets d'un cube. Ces particules sont liées 2 à 2 par des ressorts d'une raideur infinie. Le cube MRD sera l'élément constituant des parties entre les axes du système.

4.2.2.2. Cube MRR1 et MRR2

Ces deux fonctions assurent une rotation entre deux autres « Cube MR ». Ces configurations ont été choisies en fonction de leur positionnement dans le système à modéliser. Le cube MRR1 (Figure 4-13) est composé de 9 particules alors que le cube MRR2 (Figure 4-14) n'en possède que 8. MRR1 est une rotation centrée sur le cube qui sera utilisée pour modéliser l'articulation de la base du bras. MRR2 est une rotation décentrée contenant moins de ressorts et donc plus souple. Elle sera utilisée pour modéliser les segments du bras manipulateur.

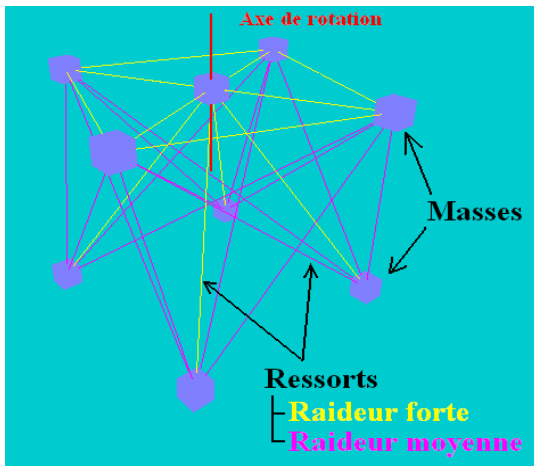


Figure 4-13 : Cube MRR1 (Rotation)

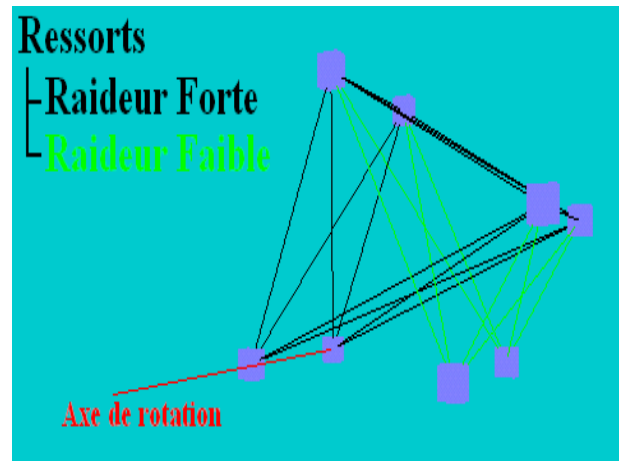


Figure 4-14 : Cube MRR2 (Rotation)

4.2.3. Modélisation complète du bras

Nous avons testé deux approches de modélisation différentes en utilisant les cubes MR présentés ci-dessus.

Dans un premier temps, nous avons supposé que le bras était composé d'une matière déformable dans son ensemble. Nous n'avons donc pas utilisé de cube MRD hormis pour le socle et l'effecteur. Cette modélisation est présentée en Figure 4-15. Ce bras souple va permettre de répartir tous les efforts appliqués à l'effecteur sur l'ensemble du bras. Sur cette figure, le bras est composé de 11 MRRs. Ainsi, la répartition des efforts dans ces 11 MRRs permet le contrôle d'un manipulateur possédant 11 articulations réelles tout en homogénéisant la posture finale.

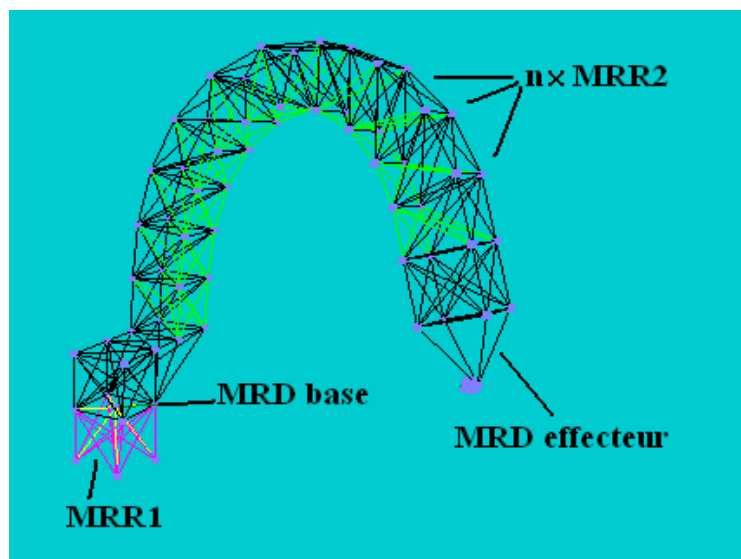


Figure 4-15 : Modélisation souple d'un bras manipulateur

Pourtant, la plupart des manipulateurs ne comportent que 3 articulations sur le bras. On va donc, à partir de la position d'équilibre précédente, rigidifier certains cubes MRR2 en les faisant évoluer dans le temps vers un type MRD solide. La Figure 4-16 présente une simulation de rigidification du bras présenté en Figure 4-15. En partie gauche, on observe une étape de la phase de stabilisation et en partie droite le système en phase d'équilibre.

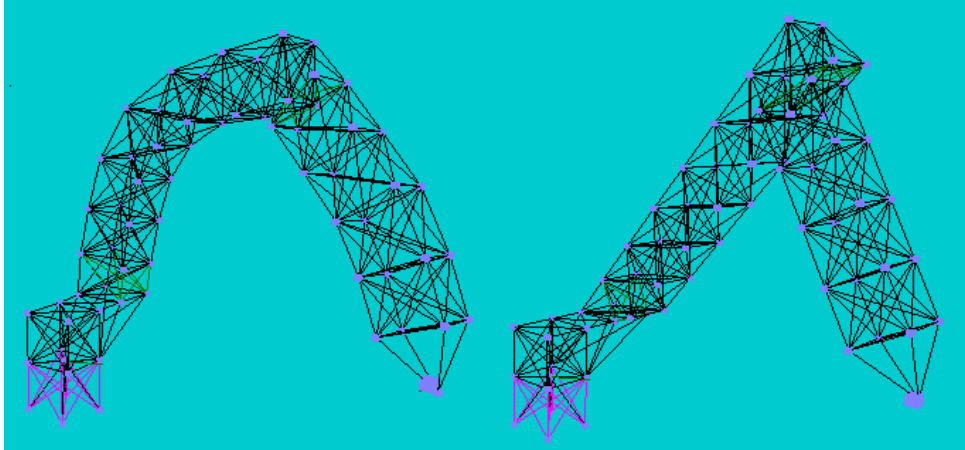


Figure 4-16 : Adaptation dynamique -1) phase de stabilisation -2) phase d'équilibre

Dans cette simulation, on peut observer que la phase de stabilisation induit de grandes amplitudes autour de la position d'équilibre à atteindre. En réalité, cette méthode s'adapte mal à ce type de robot car on a peu d'articulations sur le bras lui-même. Elle sera plutôt utilisée sur des robots hautement redondant permettant ainsi une stabilisation rapide et un équilibre global donnant au robot à la fois une posture visuelle naturelle et mathématiquement intéressante puisqu'elle tend à s'éloigner des configurations singulières (non alignement de segments) comme le montre la Figure 4-17 qui simule une rigidification pour un bras à 4 articulations.

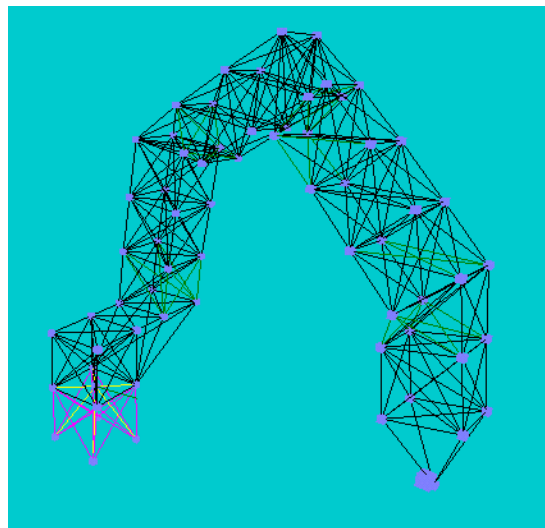


Figure 4-17 : Rigidification -bras à 4 articulations

La deuxième approche consiste à modéliser la structure au départ telle qu'elle est dans la réalité afin d'éviter les oscillations de la phase de stabilisation observée précédemment lors de la rigidification du bras. Notons aussi que l'intégration de nombreux cubes MRDs inutiles rend le modèle plus complexe.

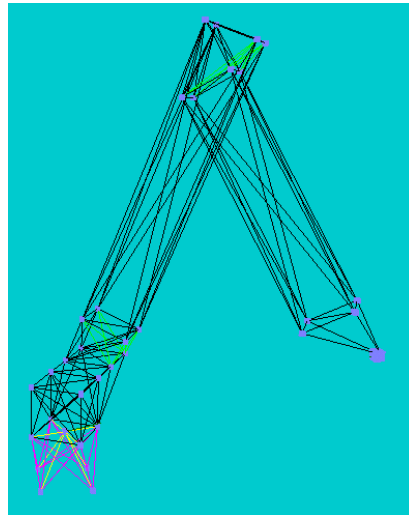


Figure 4-18 : Modélisation optimisée pour le MANUS

Pour un manipulateur standard, on préférera optimiser le modèle en créant des blocs MRDs de dimensions adéquates. La Figure 4-18 montre la modélisation du bras robot MANUS, tel qu'il sera utilisé dans les simulations futures. On remarque que seulement 3 cubes MRRs ont été utilisés pour modéliser les 3 articulations réelles du bras manipulateur.

4.2.4. Modélisation de la structure complète Bras/base mobile

Le principe de modélisation de la base mobile retenu ici est très simple. Il consiste à tendre entre l'effecteur et l'articulation MMR1 de base du bras un ressort de rappel externe dont la longueur de repos est fixée approximativement comme le montre la Figure 4-19. Cette longueur est fixée empiriquement, l'objectif étant d'avoir une posture du bras « naturelle » tout en gardant une manipulabilité correcte.

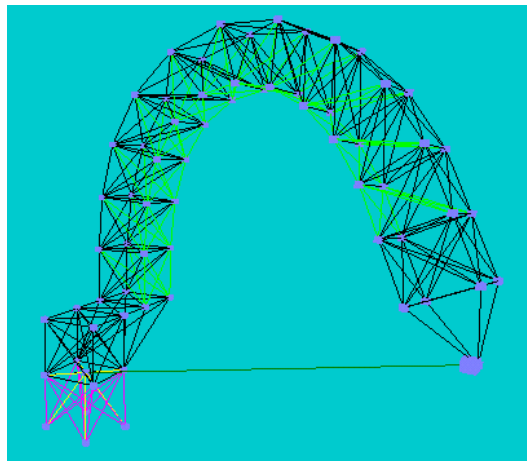


Figure 4-19 : Modélisation du Bras + Base mobile

Ainsi, lorsque ce ressort s'éloignera de sa longueur de repos, il induira une force sur son point d'accrochage. Cette force sera directement convertie en vitesse linéaire et angulaire pour être appliquée à la commande de la base mobile.

4.2.5. Discussion

L'approche masses ressorts a permis de modéliser un bras manipulateur mobile. Cette modélisation reste simple mais nécessite de connaître le dimensionnement du système. Le fonctionnement en mode dégradé n'est possible qu'en rigidifiant les articulations ayant une panne moteur. Cette modélisation implique donc d'être informé des articulations qui sont en pannes. Les résultats de simulation seront présentés dans le chapitre 04.4.

4.3. Serpentin répulsif à particules

Le serpentín répulsif est une autre méthode de modélisation d'un bras manipulateur. Nous nous limiterons dans ce qui va suivre à une modélisation 2D car, même si le principe est intéressant et certainement applicable à des bras hautement redondants, il n'a pas été retenu dans notre étude pour les simulations futures. Après une brève description du principe de fonctionnement, nous illustrerons certains comportements par des simulations et nous exposerons l'algorithme utilisé. Enfin, nous conclurons en décrivant l'intérêt de la méthode dans d'autres cas d'utilisation.

4.3.1. Modélisation du bras

La modélisation est ici extrêmement simple. Les seules entités du système sont des « boules » toutes caractérisées par un diamètre d . Dans la phase initiale, toutes ces particules sont collées les unes aux autres pour former un serpentín comme le montre la Figure 4-20.



Figure 4-20 : Initialisation du serpentín

On va ensuite déplacer une des particules aux extrémités (la boule pleine). Suite à ce mouvement, cette particule se verra décollée du reste du serpentín. L'objectif est donc de résoudre le système de manière à retrouver un état où toutes les particules seront à nouveau collées. La méthode de résolution devra en outre s'assurer qu'il n'y a pas d'interpénétration entre les particules. La Figure 4-21 illustre la manière dont le système réagit dans le temps à l'aide de l'algorithme qui sera exposé dans le paragraphe suivant :

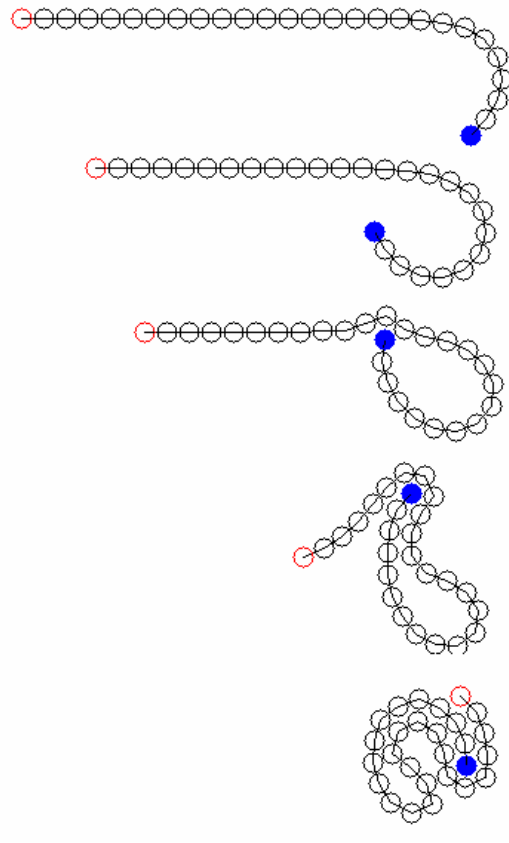


Figure 4-21 : 5 phases du mouvement du serpent

De la même manière que précédemment, nous allons maintenant fixer la particule représentant la base du robot (particule avec une croix sur la Figure 4-22) et toujours déplacer l'effecteur (boule pleine). La Figure 4-22 illustre le principe en présentant 4 configurations au cours du temps. L'algorithme de traitement est le même que précédemment hormis le fait que la particule de base n'est pas autorisée à se déplacer.

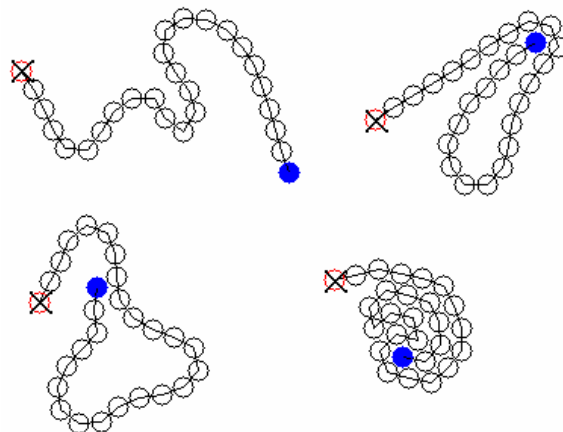


Figure 4-22 : Serpentin avec particule de base fixée en (0,0)

Notons aussi un autre comportement intéressant. Nous pouvons fixer par exemple les deux particules des extrémités comme le montre la Figure 4-23 et ordonner un mouvement à une

particule intermédiaire. La Figure 4-23 en montre trois exemples de configuration. La particule pleine étant toujours la particule effecteur.

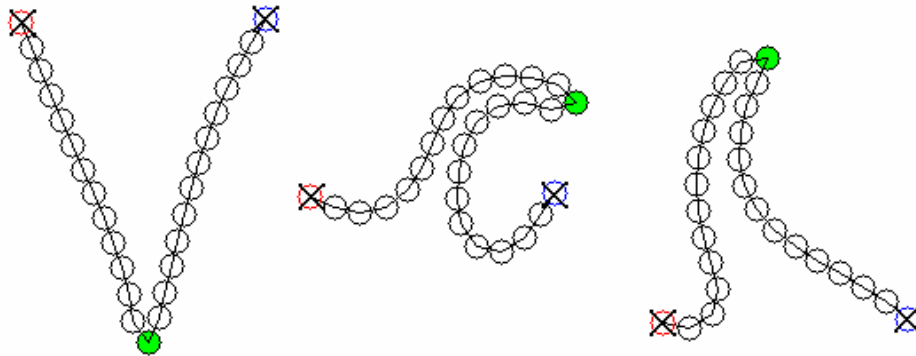


Figure 4-23 : Serpentin à 2 chaînes

Ce principe est extensible à de nombreux autres cas. On peut par exemple avoir un effecteur lié par n chaînes. Il serait possible aussi de laisser libre les deux particules extrêmes et de modéliser ainsi des robots mobiles avec traînes. En insérant des chaînes intermédiaires, on peut satisfaire à des contraintes géométriques.

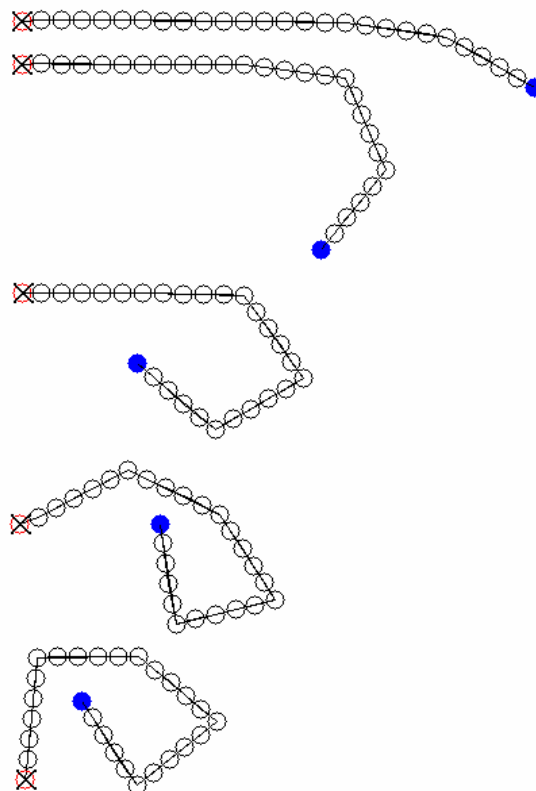


Figure 4-24 : Serpentin rigide et répulsif

Nous allons maintenant étendre ce principe à des manipulateurs plus classiques. Pour cela, comme nous l'avons fait pour les masses ressorts, une étape de rigidification est nécessaire. Nous allons donc contraindre certaines particules à s'aligner entre elles afin d'obtenir le même comportement qu'avec le système masses ressorts: la modélisation de la matière solide

entre les articulations réellement présentes sur le bras manipulateur. Ce comportement est présenté sur la Figure 4-24. La rigidification de certains sous-ensembles de particules permet de modéliser un bras à 5 articulations. En plus de la contrainte d'alignement de sous-groupes, les particules articulations se repoussent entre elles afin d'éviter croisements et collisions.

4.3.2. Algorithme

L'algorithme utilisé est itératif. Il fonctionne sur le principe suivant :

Répéter jusqu'à la précision désirée

Pour chaque sous-groupe de particules devant s'aligner :

Calculer la droite moyenne passant par celles ci.

Effectuer un petit déplacement de chaque particule vers cette droite.

Pour chaque particule en partant de la particule effecteur jusqu'à la particule fixe :

Se rapprocher des particules en liaison avec elle pour les tangenter.

Pour chaque particule en partant de la particule fixe vers la particule effecteur :

Se rapprocher des particules en liaison avec elle pour les tangenter.

Pour toutes les particules 2 à 2 :

S'éloigner d'une situation d'interpénétration éventuelle.

Pour toutes les particules articulations 2 à 2 :

Appliquer un facteur de répulsion.

Fin Répéter

Cet algorithme représente une vague allant d'une extrémité à l'autre du serpent en essayant de satisfaire au passage les contraintes de proximité de chaque particule. Plusieurs passages sont nécessaires pour atteindre une configuration finale stable. Le nombre de répétitions de cette boucle est fixée soit par des critères de satisfaction de contraintes, soit arbitrairement. Nous n'étudions pas ici ces critères. L'algorithme utilisé répète actuellement 26 fois les traitements pour arriver à une situation correspondant aux objectifs dans tous les cas de simulations présentés. Notons aussi une limite de l'algorithme dans le cas de déplacements très importants de la boule commandée. Le déplacement demandé à cette dernière doit être à chaque pas inférieur au rayon des boules pour éviter des sauts de chaîne qui aboutissent à des croisements non résolus par notre algorithme.

4.3.3. Discussion

Cette méthode bien qu'intéressante ne se prête pas au type de robot manipulateur que nous désirons commander et elle ne satisfait pas à la résolution de nos critères de manipulabilité. En effet, cette méthode n'empêche aucunement les positions singulières. Pourtant, elle est très intéressante pour des robots serpents à une ou plusieurs chaînes avec points fixes ou non. Elle a aussi l'avantage d'empêcher naturellement les collisions entre segments ce qui n'est pas inclus par défaut dans les modèles mathématiques classiques. Par contre, l'étape de modélisation 3D et son algorithme sont beaucoup plus complexes. Ces contraintes font que nous n'avons pas poussé notre étude plus loin.

4.4. Evaluations

Dans ce paragraphe, après avoir présenté brièvement le système utilisé, nous présentons les résultats comparatifs de simulation obtenus à l'aide des trois approches décrites précédemment.

- Approche par critère de manipulabilité notée MI (approche classique présentée au chapitre 2.2.1).
- Approche multi-agents notée MSMA.
- Approche masses ressorts notée MMR.

Les premières simulations illustrent un fonctionnement normal et les secondes un fonctionnement en mode dégradé avec pannes des actionneurs des articulations.

Dans ces simulations, nous allons évaluer plusieurs critères :

- Précision de suivie de trajectoire par l'effecteur
- Trajectoire de la base mobile
- Consommation énergétique (mesurée par la somme des mouvements articulaires)
- Distance aux configurations singulières

4.4.1. Présentation

La Figure 4-25 rappelle que le système simulé est constitué d'une base mobile non holonome sur laquelle est fixé un bras manipulateur à 6 degrés de liberté (pour plus d'information, se reporter au paragraphe 3.1).

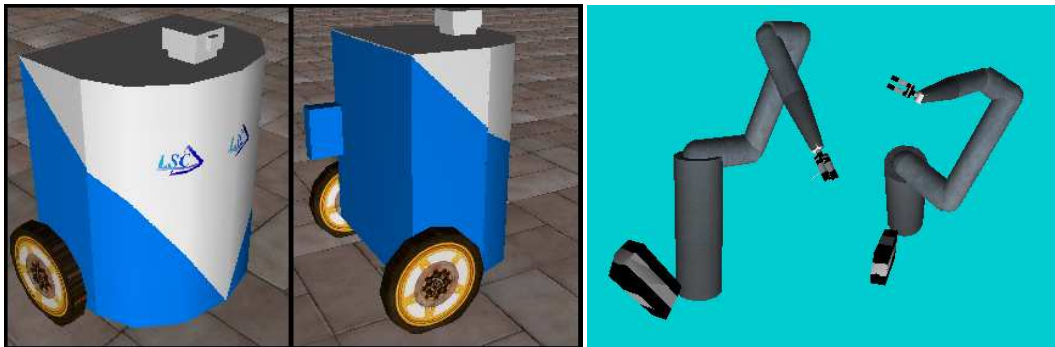


Figure 4-25 : Base mobile et bras manipulateur utilisés en simulation

La Figure 4-26 présente le domaine atteignable du système ARPH. Le disque hachuré croisé est l'espace atteignable par le bras seul. L'union des deux disques est l'espace atteignable par le manipulateur monté sur la base mobile. Ce résultat est obtenu en annulant la vitesse linéaire de la base pour ne conserver que la vitesse angulaire, c'est à dire seulement sa capacité d'orientation. La « non concentricité » des disques s'explique par le fait que le manipulateur n'est pas fixé au centre de la base mobile. Ce résultat théorique a été corroboré expérimentalement par une simulation systématique avec l'approche MSMA.

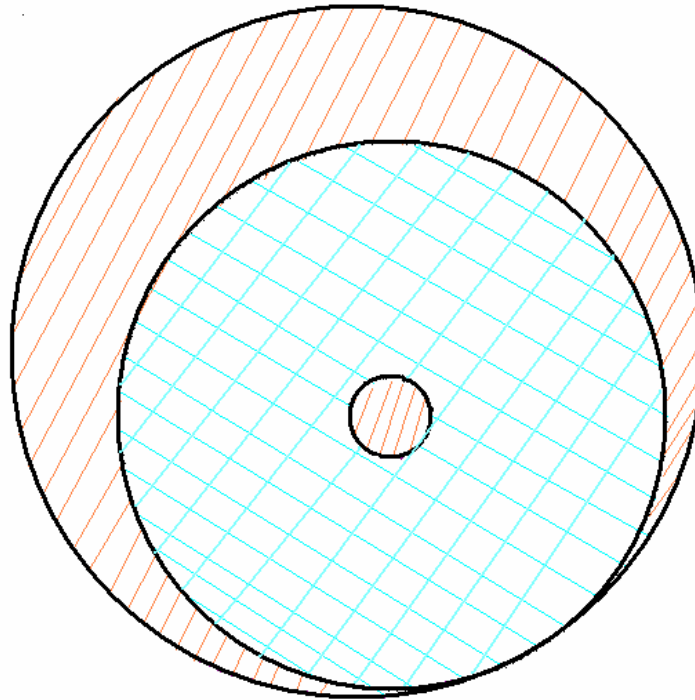


Figure 4-26 : Domaines atteignables (MANUS en hachuré croisé, MANUS+BASE en hachuré simple + hachuré croisé)

4.4.2. Simulations sans pannes

Pour les simulations qui vont suivre, nous allons travailler en 3 dimensions dans un repère cartésien (x,y,z) comme présenté sur la Figure 4-27. Pour chacune, la base mobile est positionnée au centre de ce repère. Toutes les mesures que l'on observera sur les courbes sont donc relatives au repère du monde. Toutes les mesures seront exprimées en cm pour les positions et en degrés pour les valeurs angulaires.

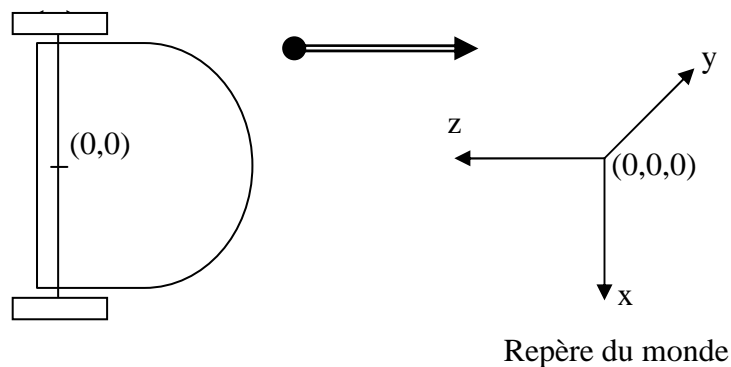


Figure 4-27 : Repères de simulations

4.4.2.1. Déplacement en marche avant

Cette simulation présente un déplacement en ligne droite. L'objectif est de faire suivre à la pince du manipulateur un point qui se déplace le long de l'axe z . Les conditions initiales sont présentées dans les tableaux qui suivent. La Figure 4-28 illustre ces dernières ainsi que la

trajectoire désirée. Les résultats présentent la trajectoire suivie par l'effecteur puis celle de la base mobile.

Objet	Valeur initiale
Base Mobile	(0,0,0) en cm
Articulation 1 du MANUS	270 degrés
Articulation 2 du MANUS	132.11 degrés
Articulation 3 du MANUS	-65.48 degrés
Position effecteur	(18.5,92.1,6)
Nombre de pas de simulation	200
Echantillonnage	60ms
Déplacement désiré par pas de temps	(0,0,-0.7) en cm
Durée totale	12 secondes
Type de simulation	MI, MSMA, MMR

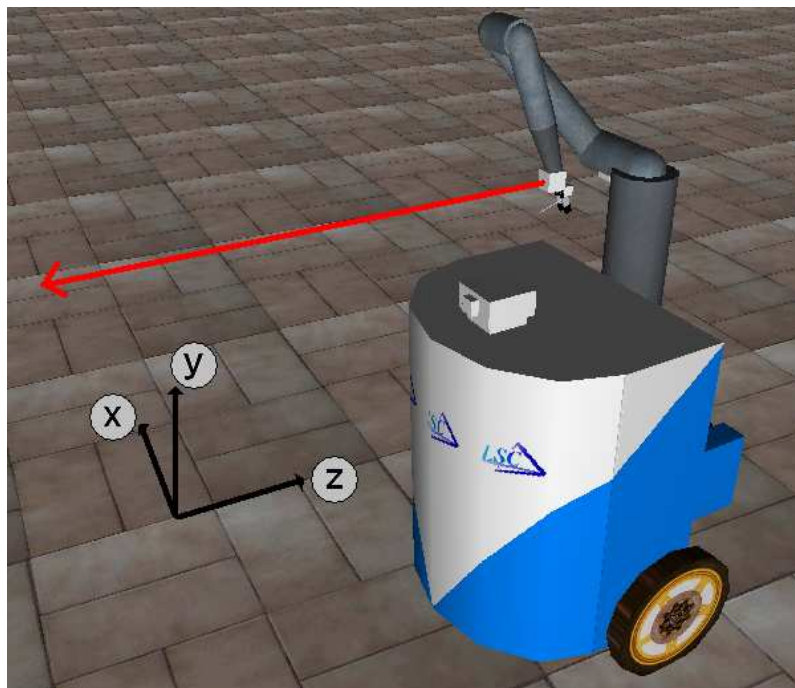


Figure 4-28 : Déplacement en avant

4.4.2.2. Trajectoire de l'effecteur

Nous présentons sur la Figure 4-29 le suivi de trajectoire de l'effecteur selon l'axe z . La trajectoire idéale est en pointillés larges. Le suivi de trajectoire est fidèle pour les trois modèles. Notons simplement que le MMR se stabilise légèrement en avance, le MI légèrement en retard alors que le MSMA colle bien à la trajectoire.

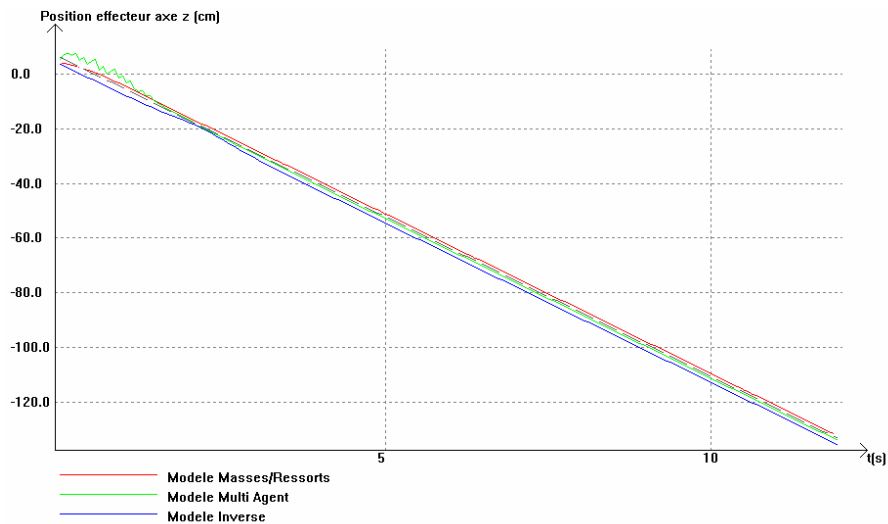


Figure 4-29 : trajectoire effecteur sur l'axe z

4.4.2.3. Trajectoire de la base :

La trajectoire de la base est quasi équivalente (à quelques cm près) pour les 3 approches.

La Figure 4-30 en illustre plus particulièrement le départ pour les 3 approches. La position initiale est représentée par la pastille.

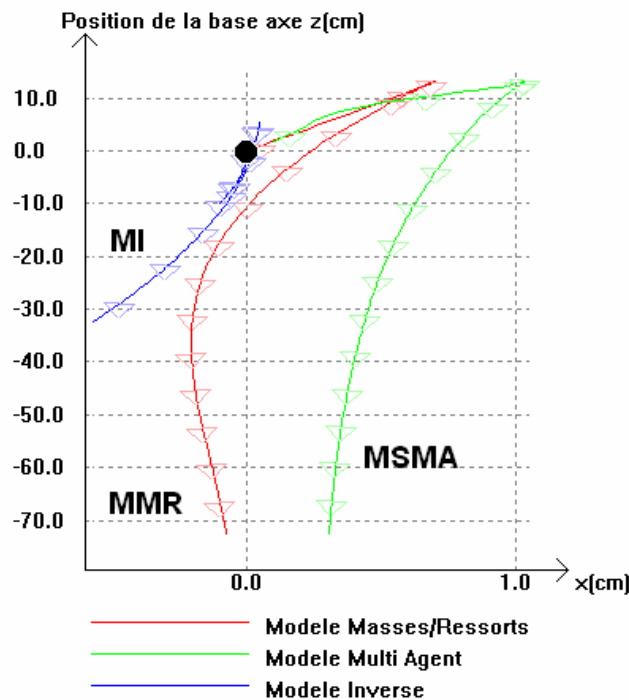


Figure 4-30 : Position base simulation 1

On remarque que les MSMA et MMR induisent un déplacement en « marche arrière » plus important. Ceci est dû au fait que les conditions initiales concernant le bras lui impose d'être replié sur lui-même (Figure 4-28) et donc dans une position éloignée de sa configuration de

repos. Ces deux modèles étant très réactifs, on a une réaction brusque simultanée du bras et de la base pour atteindre une posture correcte du bras.

4.4.2.4. Quantité de mouvement Articulaires

Nous allons maintenant comparer les 3 méthodes par rapports à la quantité de mouvement induite. Nous allons donc présenter respectivement les quantités cumulées de rotation des roues de la base mobile et des articulations du bras sur la Figure 4-31 et la Figure 4-32.

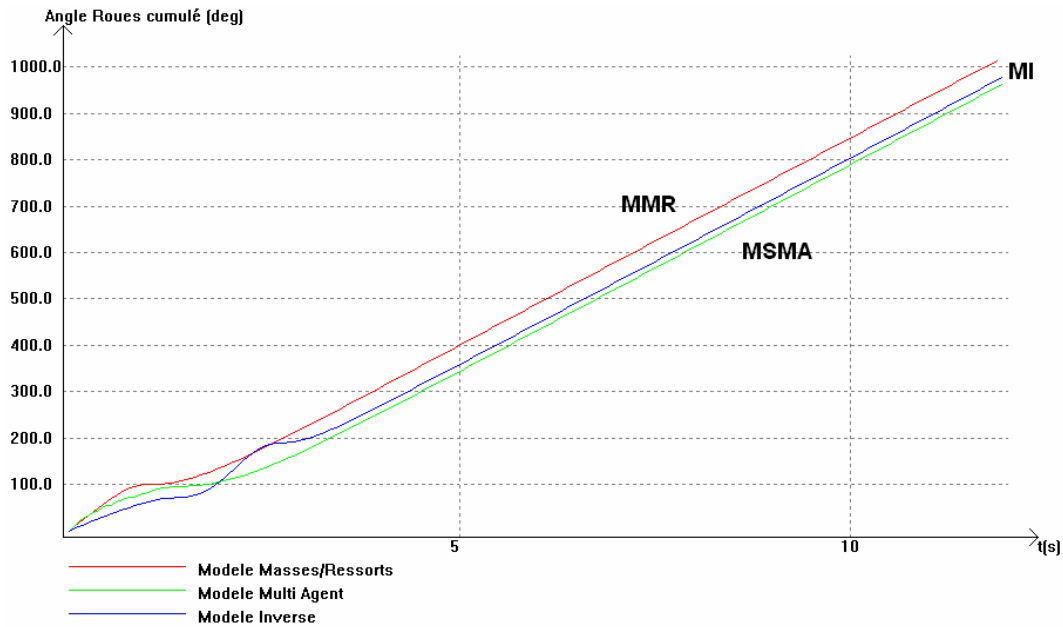


Figure 4-31 : Rotations cumulées de la bas mobile

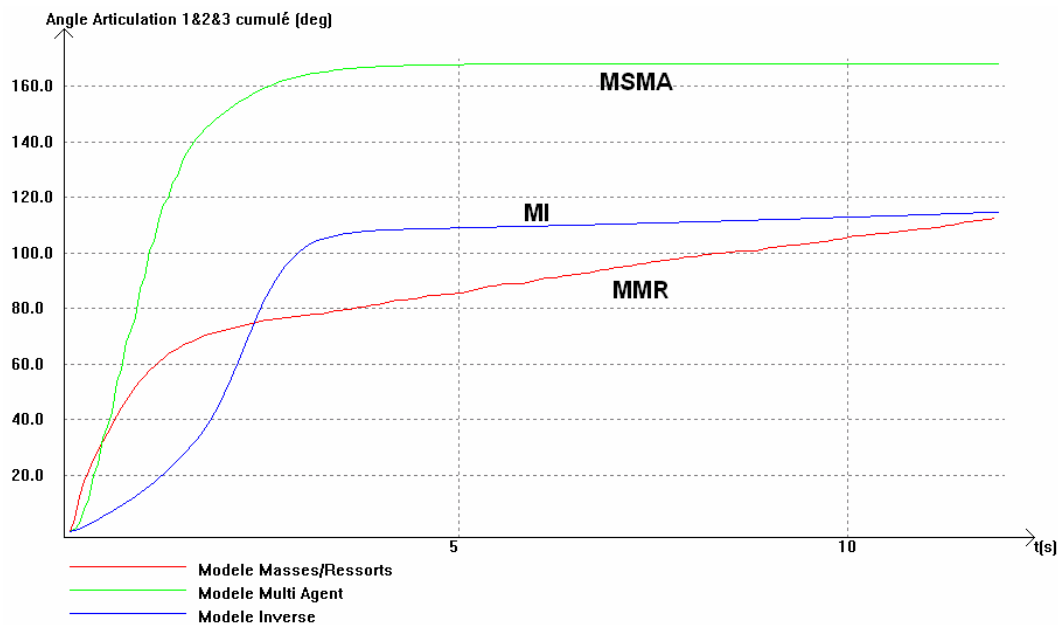


Figure 4-32 : Rotation cumulé des articulation 1,2 et 3 du bras

On voit ici que le déplacement global de la base est quasiment équivalent. Le modèle MMR est un peu moins performant du fait de sa grande réactivité au départ, observation en relation avec la Figure 4-30 représentant la trajectoire de la base. Le modèle MSMA est le plus performant. En ce qui concerne les articulations du bras, on voit ici que le modèle MSMA est moins performant car il dépense plus d'énergie pour se stabiliser.

4.4.2.5. Position Singulière

La figure qui suit présente la capacité du modèle à s'éloigner de la position singulière «bras tendu», représentée par un angle cumulé des articulations 2 et 3 du manipulateur de 360°. Plus la courbe d'un modèle est loin de cette valeur, moins le bras est tendu.

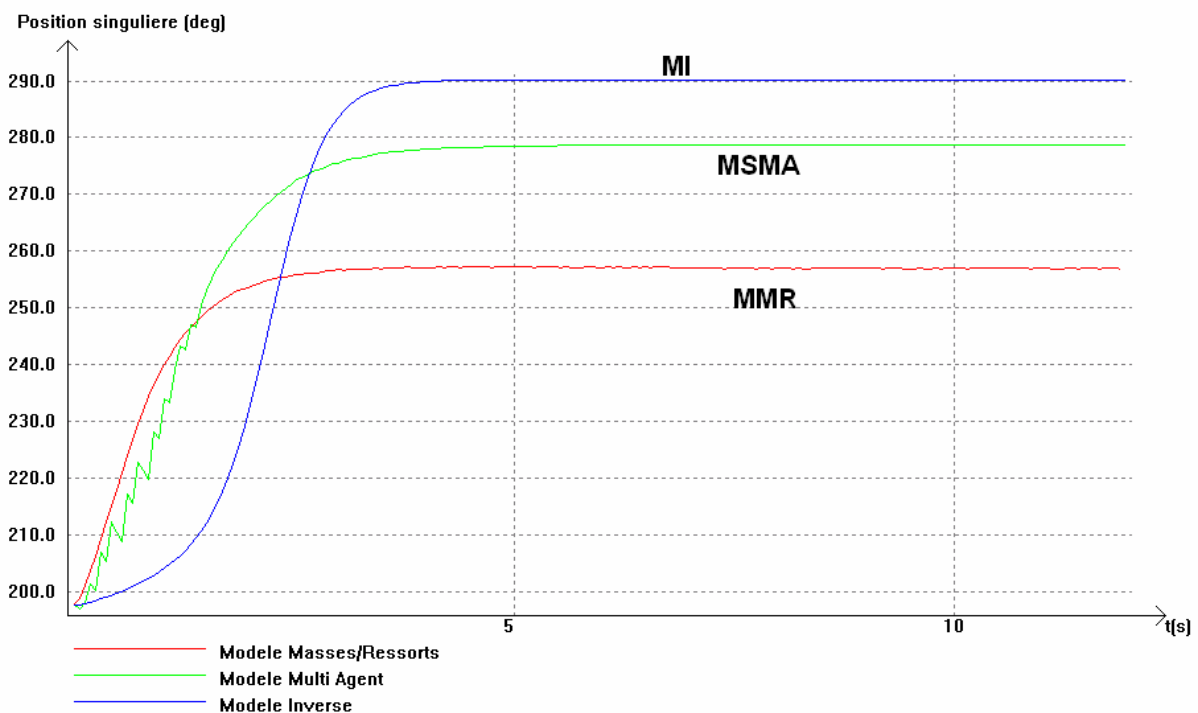


Figure 4-33 : Configuration singulière

On observe ici un comportement plus intéressant pour les modèles MSMA et MMR que pour le MI. Pour le modèle MMR, l'éloignement aux positions singulières est lié au ressort de rappel fixé entre l'effecteur et la base mobile. La longueur de repos de ce ressort est aisément modifiable et la somme des articulations 2 et 3 peut donc être réglée à une valeur quelconque désirée.

4.4.2.6. Déplacement vers la droite

Cette simulation présente un déplacement sur la droite de l'effecteur. Les conditions initiales sont présentées dans les tableaux qui suivent et illustrées par la Figure 4-34. Les résultats présentent la trajectoire suivie par l'effecteur puis celle de la base mobile.

Objet	Valeur initiale
Base Mobile	(0,0,0) cm
Articulation 1 du MANUS	270 degrés
Articulation 2 du MANUS	120 degrés
Articulation 3 du MANUS	-125 degrés
Position effecteur	(18,105,-20) cm

Nombre de pas de simulation	400
Echantillonnage	60ms
Déplacement désiré par pas de temps	(0.42,0.12,0) cm
Durée totale	24 secondes
Type de simulation	MI, MMR, MSMA

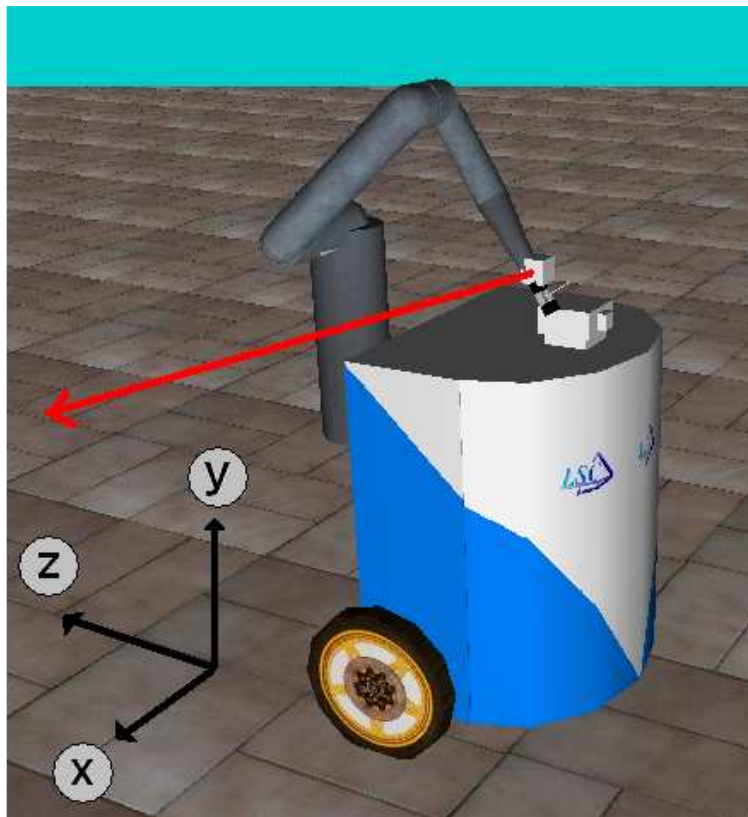


Figure 4-34 : Déplacement à droite

4.4.2.7. Trajectoire de l'effecteur

La Figure 4-35 présente la trajectoire de l'effecteur selon l'axe z . La trajectoire idéale y est représentée en pointillés. On observe pour les trois approches des comportements différents. Le MSMA suit bien la trajectoire avec de très légères oscillations. Le MI oscille de manière plus importante sur la trajectoire. Le MMR est de performances égales au MI pour la première moitié de la simulation. Sa dérive dans la seconde partie de la simulation s'explique par le fait que la trajectoire désirée est une droite non pas horizontale, mais légèrement pentue. En fin de simulation, le bras se rapproche d'une configuration « bras tendu » vers le haut. Dans le cas du MMR, on s'éloigne alors des valeurs de repos des ressorts utilisés et ce modèle « souple » se déforme anormalement dans les positions extrêmes.

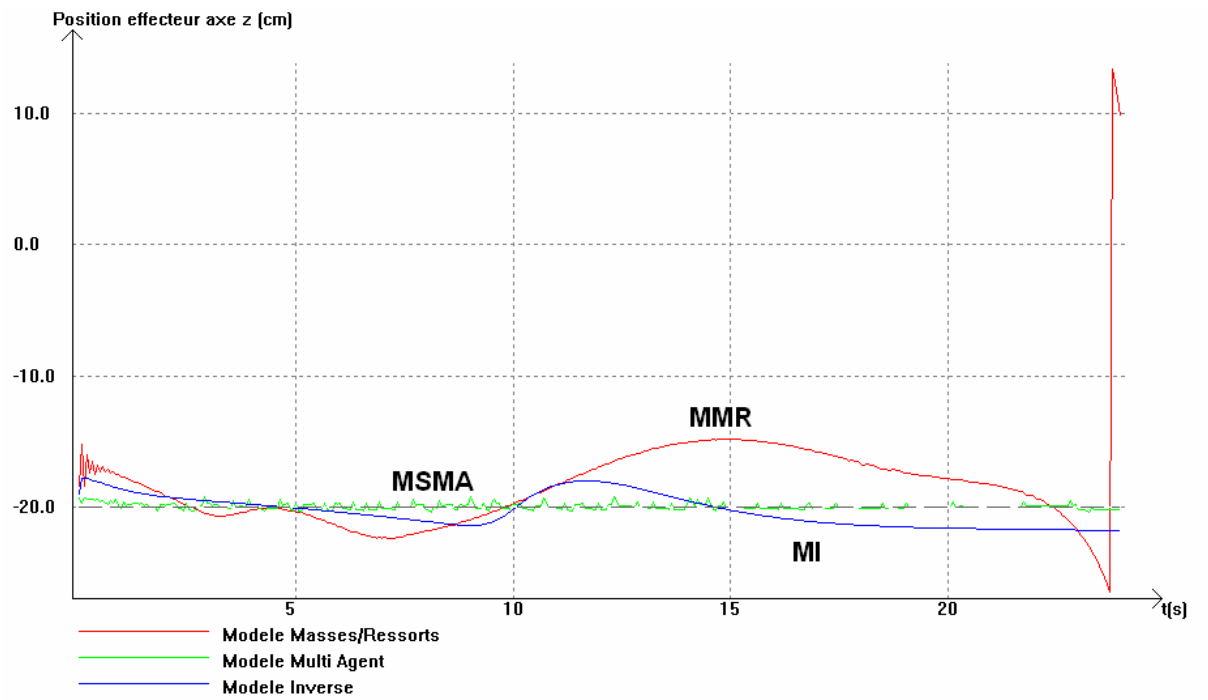


Figure 4-35 : Trajectoire effecteur axe z

4.4.2.8. Trajectoire de la base

La Figure 4-36 illustre la trajectoire de la base mobile pour les trois approches. Le point de départ y est représenté par la pastille pleine. Les triangles représentent l'orientation de la base durant la simulation.

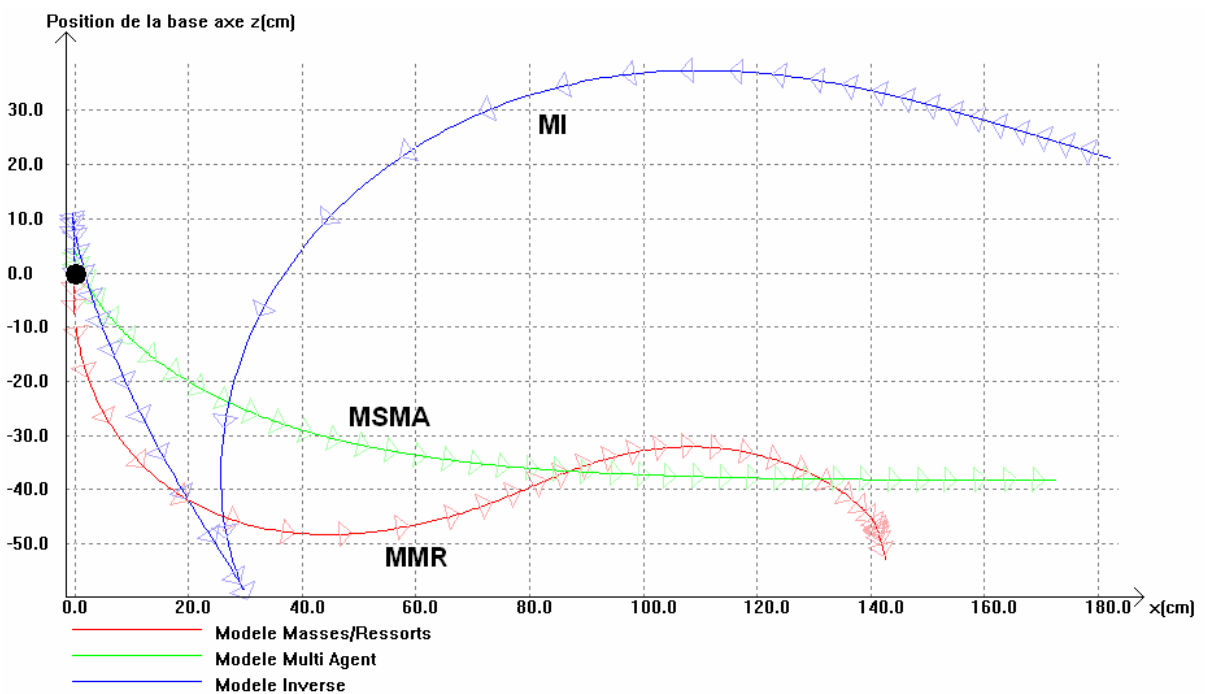


Figure 4-36 : Position de la base

On observe, pour cette simulation, des comportements très différents. On peut voir que le MSMA réagit d'une façon très saine, il tourne doucement sur la droite et enfin suit une trajectoire rectiligne jusqu'à la fin. Le MMR, quant à lui, tend à osciller, ceci étant dû aux ressorts du modèle qui tendent à stabiliser le mouvement plus lentement. Enfin, on observe avec le MI un retournement de la base. Après être partie en marche avant, la base se retourne et continue sa mission en marche arrière, ce qui explique les oscillations de la pince autour de la trajectoire rectiligne désirée.

4.4.2.9. Quantité de mouvement Articulaire

La Figure 4-37 et la Figure 4-38 représentent respectivement le mouvement cumulé des roues de la base mobile et des 3 articulations du manipulateur.

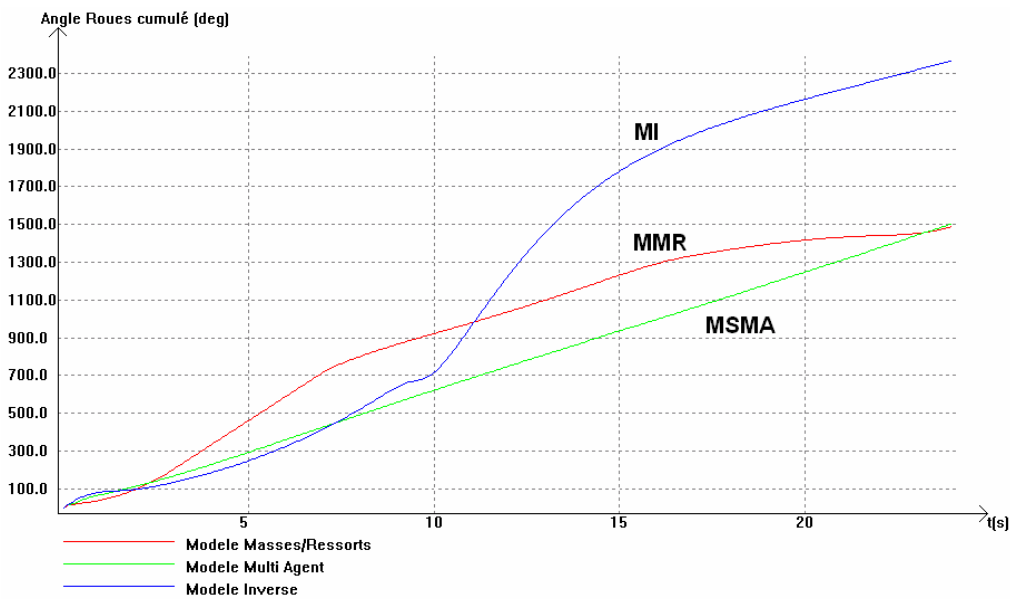


Figure 4-37 : Rotation cumulée des roues

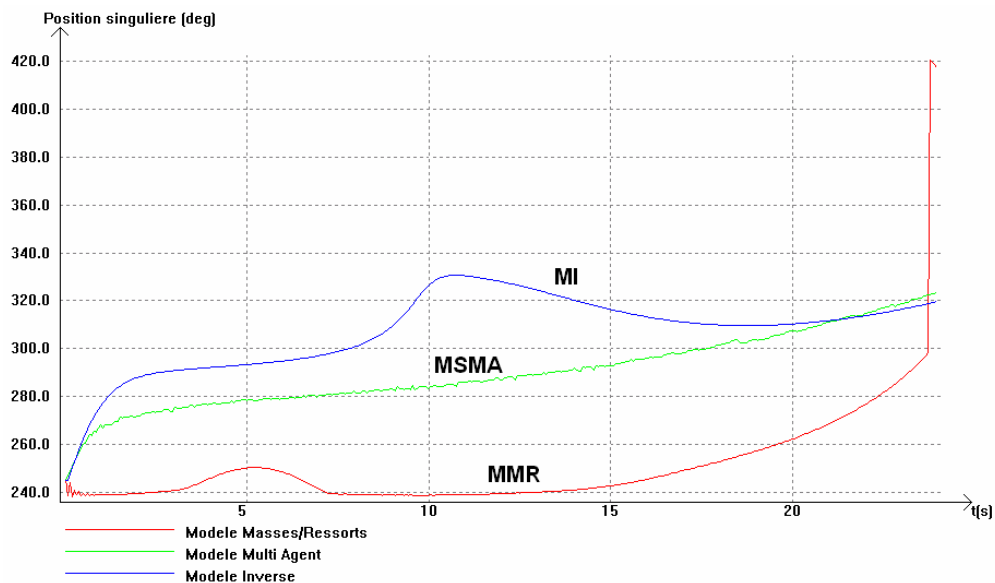


Figure 4-38 : Rotation cumulée articulations 1,2 et 3

Dans le cas de la base mobile, on observe une quantité d'énergie nécessaire moindre pour les approches MSMA et MMR. Ce résultat est corroboré par le paragraphe précédent dans lequel cette approche montre une trajectoire sans retournements. Le mouvement cumulé des articulations du manipulateur est quasi identique pour les approches MI et MSMA. On observe un léger avantage pour le modèle MMR.

4.4.2.10. Discussion

Nous avons présenté ici des résultats comparatifs de simulation sans pannes entre 3 approches : MI, MSMA et MRR. L'approche MSMA permet de suivre la trajectoire désirée avec une bonne précision dans les deux cas présentés. On obtient aussi une précision correcte avec MMR tant que la déformation du modèle n'oblige pas les ressorts utilisés à trop s'éloigner de leurs positions de repos. Le modèle MI, bien qu'étant précis dans le premier cas, n'a pas permis de réaliser la deuxième tâche avec succès puisqu'il y a eu un retournement de la base mobile. Le retournement de la base et les oscillations des modèles MI et MMR donne l'avantage au MSMA en terme de quantité d'énergie nécessaire. Les 3 modèles permettent au manipulateur de s'éloigner de la configuration singulière « bras tendu ».

4.4.3. Simulations avec pannes

4.4.3.1. Simulation avec panne de l'articulation 1

Nous allons reprendre ici les conditions initiales de la simulation décrite dans le paragraphe 4.4.2 en générant une panne de l'articulation 1 du manipulateur (Figure 4-39). La simulation durant 24 secondes, on simule une panne avec blocage de l'articulation à $t=6$ secondes. Nous présentons ici les trajectoires suivies par l'effecteur et la base mobile.

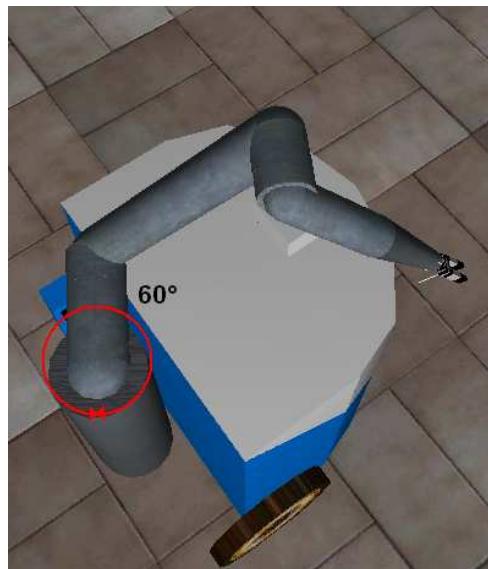


Figure 4-39 : Articulation 1 de ARPH

4.4.3.2. Trajectoire de l'effecteur

La Figure 4-40 présente la trajectoire suivie par l'effecteur avec les trois approches. Le trait vertical à $t=6s$ est l'instant où apparaît la panne motrice de l'articulation 1 du manipulateur.

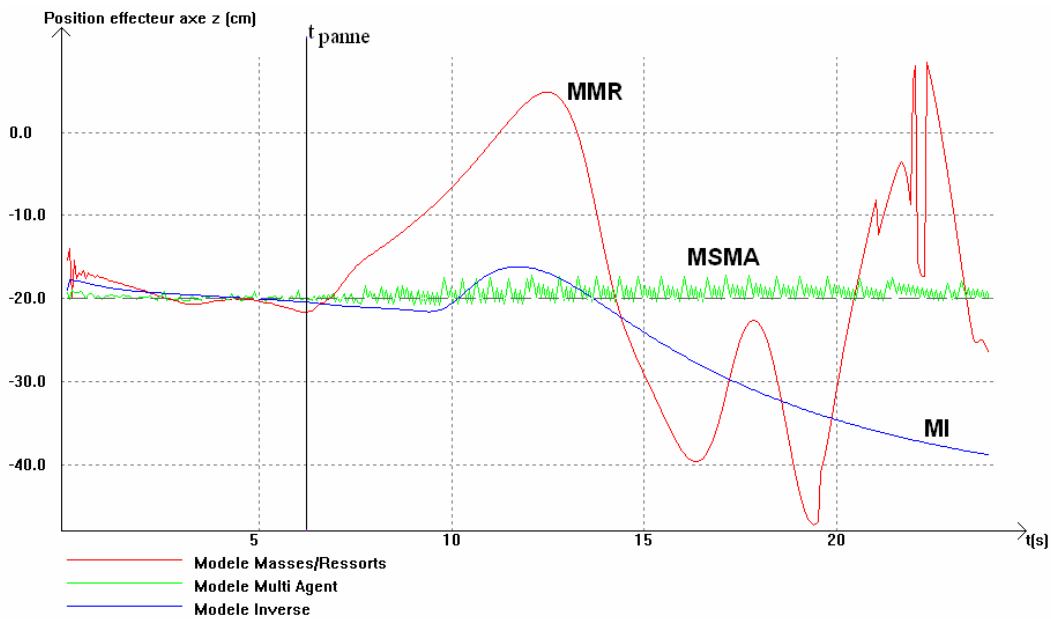


Figure 4-40 : trajectoire effecteur sur l'axe z

Pas de surprise du côté du MI, celui-ci calculant une configuration à partir d'un modèle mathématique ne prenant pas en compte des pannes éventuelles, la trajectoire de l'effecteur est erronée. De même, le MMR n'arrive pas à suivre l'objectif désiré. En effet, comme expliqué au paragraphe 0, la vitesse angulaire de la base mobile est calculée à partir de la valeur angulaire de l'articulation 1. Lorsque cette articulation est en panne, la base se met à tourner à une vitesse proportionnelle à sa valeur angulaire au moment de la panne ce qui explique cette trajectoire circulaire. Par contre, le MSMA reste très précis et continue à suivre sa trajectoire avec précision malgré la panne.

4.4.3.3. Trajectoire de la base

La Figure 4-41 présente la trajectoire suivie par la base avec les trois approches.

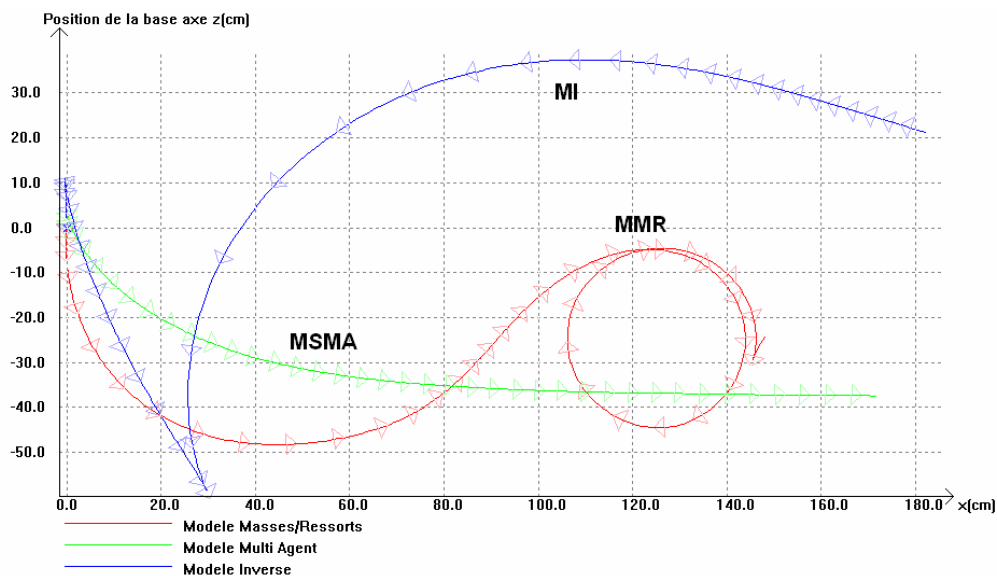


Figure 4-41 : Position base

Pas de surprise du côté du MI, celui-ci calculant une configuration à partir d'un modèle mathématique ne prenant pas en compte des pannes éventuelles, sa trajectoire est identique à la simulation précédente. Le MSMA conserve lui aussi une trajectoire analogue (mais légèrement différente). Quant au MMR, à un certain moment de la simulation, le bras va se tendre très fortement, les valeurs articulaires déduites en deviendront erronées et la base mobile va effectuer un mouvement de rotation non désiré.

4.4.3.4. Simulations avec panne des articulations

Le paragraphe précédent a montré que les approches MI et MMR n'étaient pas tolérantes aux pannes. Nous allons donc maintenant observer uniquement le MSMA en activant 3 types de pannes dès le début de la simulation. La trajectoire à suivre par l'effecteur est identique à celle de la simulation présentée dans le paragraphe 4.4.2. Nous allons étudier un blocage de l'articulation 1 à 60° puis à 30° et enfin une panne de l'articulation 2 à 125° . La Figure 4-42 illustre visuellement les pannes qui sont simulées.

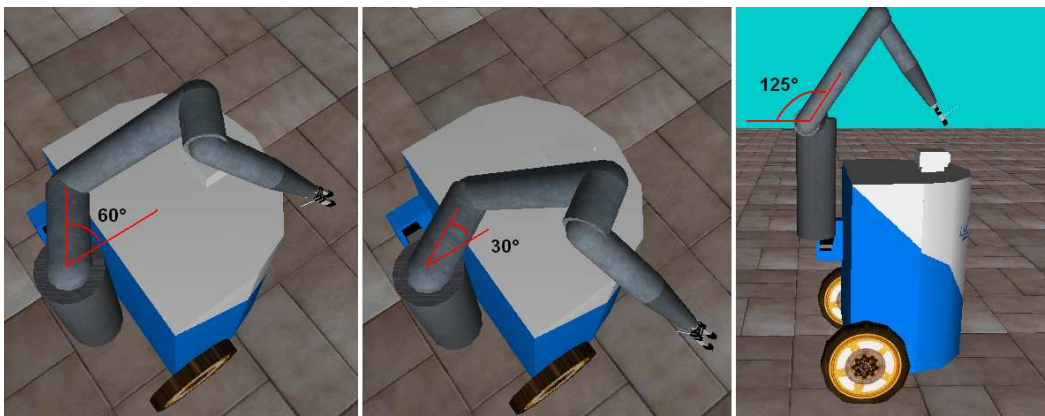


Figure 4-42 : 3 cas de pannes étudiées

4.4.3.5. Trajectoire de l'effecteur

La Figure 4-43 présente la trajectoire de l'effecteur dans les 3 cas de pannes. Malgré quelques oscillations, on peut observer que la trajectoire est suivie avec une bonne précision dans chacune des simulations.

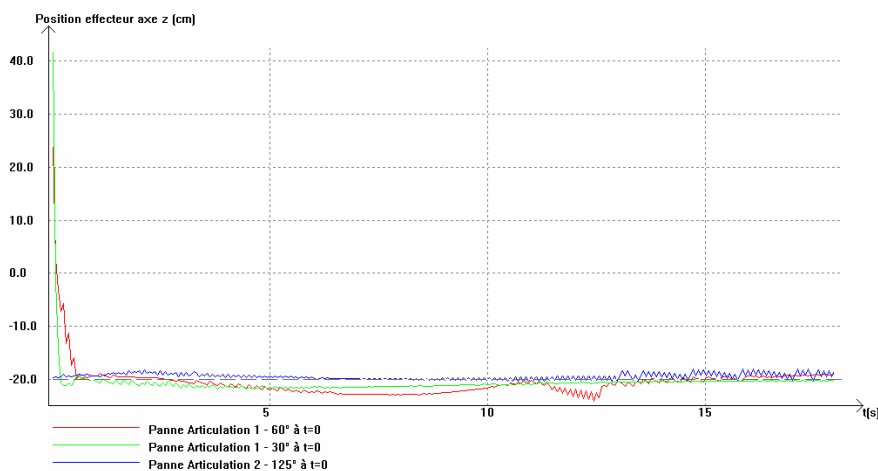


Figure 4-43 : Trajectoire de l'effecteur

4.4.3.6. Trajectoire de la base

La Figure 4-44 présente la trajectoire de la base mobile. Cette dernière conserve une direction de déplacement en marche avant. On ne perçoit ni retournement, ni oscillations dans cette simulation.

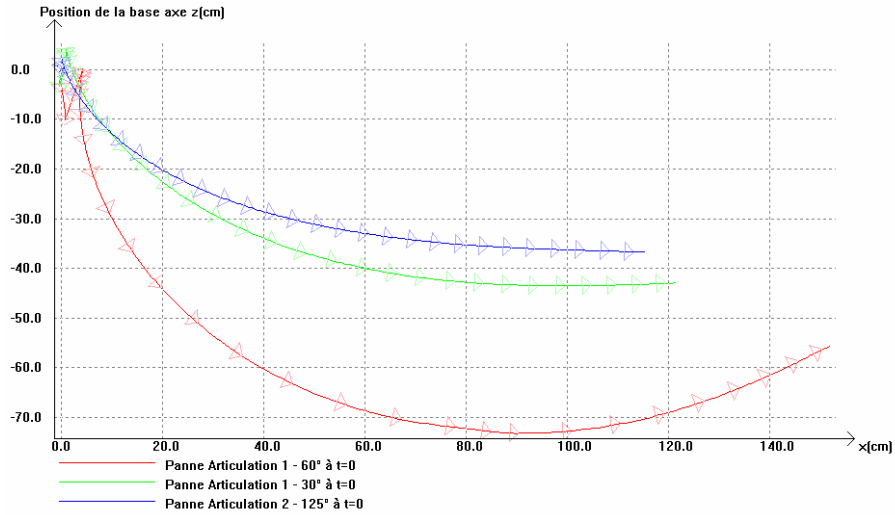


Figure 4-44 : Trajectoire de la base

4.4.3.7. Discussion

Ces simulations avec pannes montrent que seule l'approche MSMA est tolérante aux pannes si la redondance du système le permet. Cette tolérance n'influe ni sur la précision de la trajectoire de l'effecteur ni sur le sens de déplacement de la base mobile. Soulignons que ce modèle n'a aucune information sur son état interne (en termes de panne) et reste apte à suivre la trajectoire désirée.

4.4.4. Conclusion

Nous allons maintenant tirer plusieurs observations de ces différentes simulations. Tout est récapitulé dans le tableau suivant. Nous classerons chaque critère comparé à l'aide d'* (de 0 à 5). Plus le nombre en est élevé, plus la méthode donne de bons résultats. Certains critères sont jugés empiriquement (Evitement de configuration bras tendu, temps d'implantation).

	MI	MMR	MSMA
Précision	** selon la trajectoire	** en fonction de la configuration initiale et des nombreux paramètres internes du modèle (raideurs, viscosité, géométrie ...)	****
Résistance aux pannes	Nécessite une adaptation du modèle en fonction de la panne	Nécessite une adaptation de l'algorithme de calcul des vitesses linéaire et angulaire de la base mobile	*****
Trajectoire de la base	** Rotations non désirées de la base/ passage en marche arrière	** Oscillante	****
Distance parcourue par la base	**** sauf si retournement en cours de trajectoire	**	***
Quantité de mouvement articulaire du bras	**	**	***
Evitement de la configuration bras tendu	****	****	*****
Temps d'exécution	****	calculs longs	****
Implantation (modélisation et algorithmie)	**	**	*****
* - peu adaptée pour satisfaire le critère ***** - adapté au critère			

Précision : L'approche MSMA assure une bonne précision dans tous les cas présentés. La précision de l'approche MI est dépendante de la trajectoire de la base mobile. Pour le modèle MMR, la précision est bonne dans le domaine proche des longueurs de repos des ressorts utilisés lors de la modélisation.

Résistance aux pannes : L'approche MSMA est tolérante aux pannes sans modifications des algorithmes utilisés. Les approches MI et MMR nécessitent l'étude de cas dégradés pour satisfaire un suivi de trajectoire correct par l'effecteur.

Trajectoire de la base mobile : L'approche MSMA assure de bonne trajectoire et évite les retournements de la base mobile ce qui n'est pas le cas de l'approche MI. Le modèle MMR est quant à lui très oscillant.

Distance parcourue par la base : Sur ce point, le modèle MI a un net avantage. Pourtant, ce dernier perd cet avantage lorsqu'il y a retournement de la base mobile. L'approche MSMA devient alors plus intéressante.

Évitement de la configuration « bras tendu » : Chacun des 3 modèles est capable de s'éloigner de cette configuration. L'approche MSMA possède un léger avantage puisque ce comportement peut être intégré simplement dans l'agent de la base mobile sans avoir à minimiser un critère mathématique comme dans l'approche MI.

Temps d'exécution : L'approche MSMA est la plus rapide, ne faisant appel qu'au modèle géométrique du manipulateur. L'approche MI nécessite une inversion de matrice mais reste efficace en temps de calcul. La méthode MMR nécessite des calculs longs pour se stabiliser ce qui ne la rend pas temps réel si l'on désire une bonne précision.

Implantation : La méthode MSMA est la plus rapide à implanter. Elle ne nécessite que la connaissance du MGD du manipulateur. L'approche MI implique une réflexion pour implémenter le modèle géométrique inverse (MGI). L'approche MMR est rapide à implémenter dès lors que l'on dispose des briques de base pour la modélisation du système. Pourtant, les algorithmes permettant la stabilisation du système nécessitent un paramétrage important, ce qui en fait une méthode difficile à mettre en œuvre.

Le MSMA est une bonne alternative au MI. Il est en effet extrêmement robuste vis à vis des pannes et reste malgré tout très précis. De plus, l'intelligence d'un agent base mobile permet de conserver un sens de déplacement normal (marche avant).

L'ajout de comportements plus sophistiqués rend le MSMA évolutif et particulièrement souple dans le développement d'algorithmes aptes à répondre à des situations variées. Il est capable d'intégrer l'évitement de configurations singulières particulières sachant qu'il n'impose pas de choix parmi différentes solutions contrairement au MI sur des robots redondants.

L'implantation du MSMA est simple. Les calculs sont rapides et en temps réel. En évitant les retournements, Ce modèle optimise naturellement la quantité de mouvement effectué par la base mobile, facteur important dans notre application sachant que ce type de robot mobile est alimenté par des batteries et qu'il doit fonctionner dans un milieu encombré (appartement, maison ...).

On peut remarquer que le MMR ne donne pas les meilleurs résultats sur les simulations présentées. Il faut comprendre que ce modèle n'est pas adapté au bras MANUS utilisé. Il est recommandé pour des entités fortement redondantes et prouvera alors son efficacité dans l'équilibre de la posture du bras comme il a été montré dans le paragraphe 4.2 consacré au MMR.

4.5. Expérimentations sur le système réel

Ce paragraphe présente les résultats obtenus sur le système réel à l'aide du système multi-agents. Nous présentons ici deux expérimentations. La première illustre un déplacement en ligne droite sans panne moteur et la seconde avec panne de l'articulation 1 (épaule) du bras manipulateur.

4.5.1. Déplacement vers la droite sans panne

La Figure 4-45 présente les conditions initiales. La trajectoire désirée de l'effecteur est une ligne droite sur l'axe y. Le robot est totalement opérationnel.

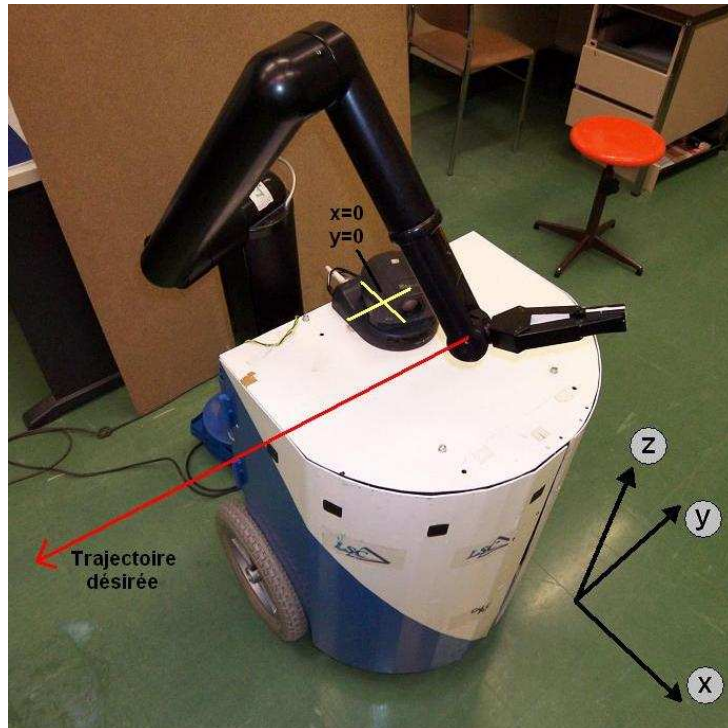


Figure 4-45 : Conditions initiales

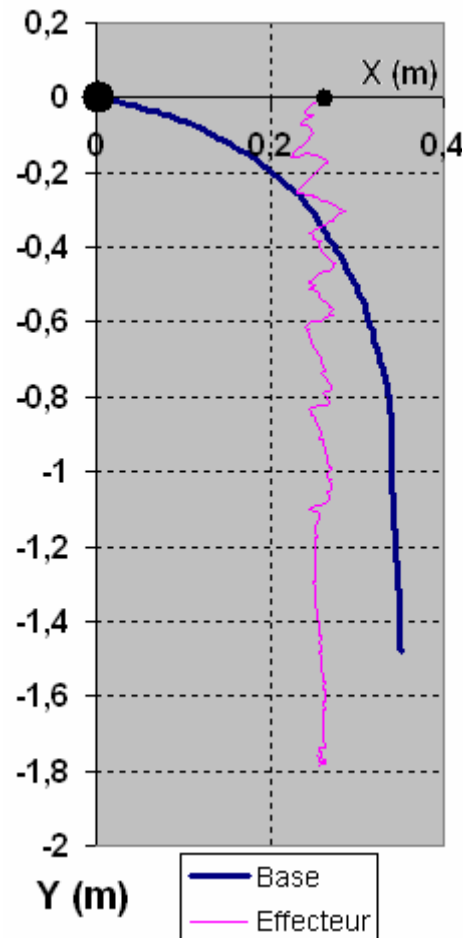


Figure 4-46 : Trajectoire de la base et de l'effecteur en réel

La Figure 4-46 présente les résultats obtenus. La courbe épaisse illustre la trajectoire de la base mobile et la courbe fine celle de l'effecteur. Les deux pastilles sont les points de départ. Bien que la trajectoire de l'effecteur oscille autour de la celle désirée de plus ou moins 3cm, elle reste satisfaisante. Cette oscillation est particulièrement visible lorsque la base mobile effectue un déplacement dans une direction différente de celle de l'effecteur. En fin de trajectoire, les oscillations sont très réduites. Ces perturbations s'expliquent tout d'abord par la discrétisation de la commande du bras Manus. Dans ces expérimentations, la commande des articulations s'effectuait en flottant. En réel, la commande s'échelonne entre 0 et 10 par pas de 1. Dans cette expérimentations, seuls les pas 0 et 1 (réciproquement 0 rad/s et 0,03 rad/s) ont été utilisés. De plus, le système est asynchrone. Les informations odométriques de la base et articulaires du bras manipulateurs sont disponibles à des pas de temps différents. Ainsi, les mesures utilisées à un instant donné ne sont pas obligatoirement l'exacte réalité.

4.5.2. Déplacement vers la droite avec panne

La Figure 4-47 présente les conditions initiales. La trajectoire désirée de l'effecteur est une ligne droite sur l'axe y. L'articulation 1 du bras manipulateur est en panne.

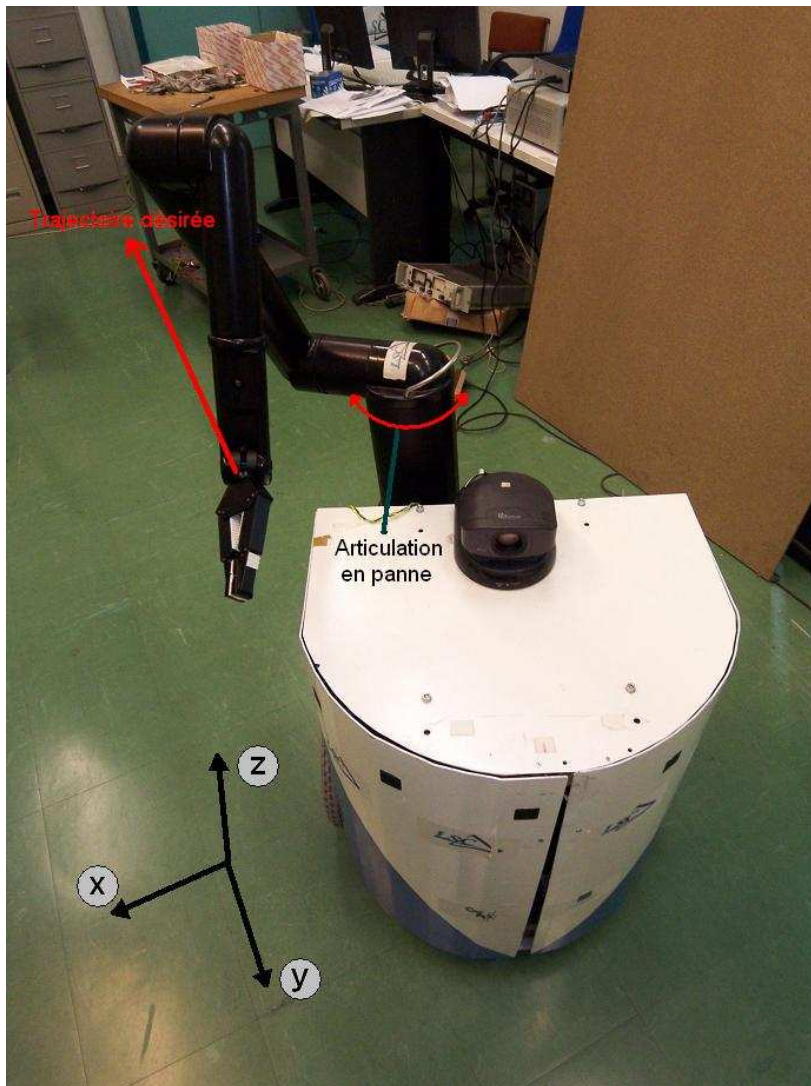


Figure 4-47 : Conditions initiales avec panne de l'articulation 1

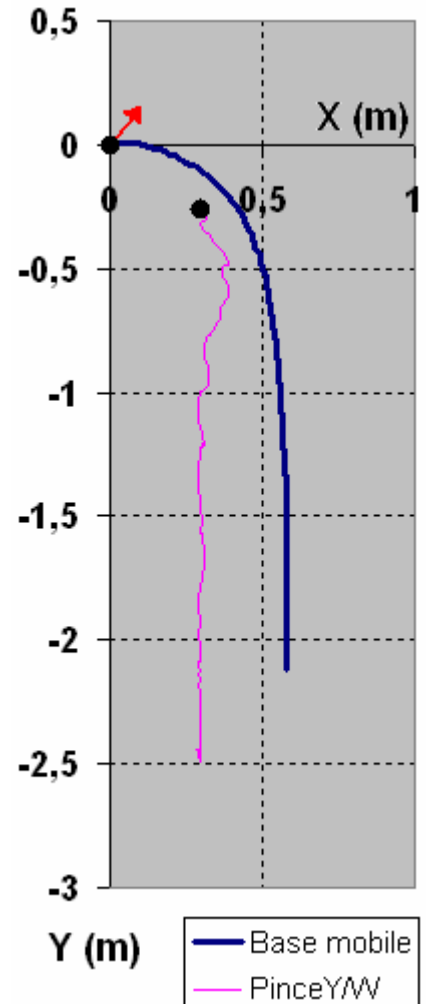


Figure 4-48 : Trajectoire de la base et de l'effecteur en réel avec panne

La Figure 4-48 présente les résultats obtenus. La courbe épaisse illustre la trajectoire de la base mobile et la courbe fine celle de l'effecteur. Les deux pastilles sont les points de départ. La flèche représente l'orientation initiale de la base au départ. Comme dans l'exemple, précédent, la trajectoire de l'effecteur oscille autour de la celle désirée de quelques centimètres au départ et finit par se stabiliser par la suite. Même avec une panne de l'articulation 1 du bras, la trajectoire est satisfaisante et suit efficacement la consigne.

4.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre plusieurs approches pour la commande coordonnée d'un bras manipulateur embarqué sur une base mobile. Après les avoir comparées, nous avons

testé l'approche multi-agents sur le robot réel ARPH (sans et avec panne d'une articulation). Les résultats obtenus sont satisfaisants et la méthode permet de suivre efficacement la trajectoire désirée, dans les deux cas, validant ainsi l'étude théorique précédente.

5. Simulation, apprentissage et transfert de compétences

Suite à la conclusion du chapitre 3, nous avons retenu deux orientations à suivre. La première portait sur le développement d'une commande coordonnée originale plus intuitive, objet du chapitre 4. Les chapitres 5 et 6 s'intéressent plus particulièrement à impliquer davantage la personne dans le processus de conception de l'aide qui lui est destinée. Nous exposerons, dans le chapitre 6, une adaptation de la démarche de conception centrée utilisateur (CCU) en utilisant les avantages de la réalité virtuelle. Ce chapitre, quant à lui, a pour objectif d'étudier le transfert d'habiletés acquises sur un simulateur du système ARPH vers le système réel, préalable à l'utilisation des techniques de réalité virtuelle dans le cycle de développement d'un produit manufacturé.

Nous présentons tout d'abord le simulateur de ARPH. Une première expérimentation a eu pour but de comparer le comportement d'utilisateurs entre une situation virtuelle et une situation réelle. Elle nous a permis d'améliorer le simulateur. À partir de cette nouvelle version, l'évaluation suivante a visé à vérifier l'existence d'un transfert de connaissances/compétences entre les situations virtuelles et réelles. Ce travail a fait l'objet d'une collaboration avec le laboratoire de psychologie expérimentale de Rennes 2 et de stages de Master 1 en ergonomie.

5.1. Présentation du simulateur ARPH

J'ai développé dans le cadre de ma thèse un simulateur du système ARPH. Ce simulateur est un outil qui intègre toutes les fonctionnalités du système réel. L'interface de commande est identique à celle utilisée pour ce dernier. Nous insistons ici sur le fait que notre objectif est de disposer d'un système portable à faible coût. Nous avons donc retenu une solution dont le degré d'immersion est faible. Toutefois, nous émettons l'hypothèse que le degré de présence est suffisant pour mener à bien les expériences sur le transfert de compétences.

Dans ce simulateur, le robot ARPH et son environnement extérieur nécessaire à son évaluation ont été modélisés. Il a été développé sous Visual C++ en utilisant la bibliothèque graphique OpenGL. Les différents objets de la scène ont été modélisés avec 3DSMax et Milkshape3D, ce qui garantit un format standard et la possibilité d'intégrer de nouveaux objets/environnements rapidement. Des fichiers de configuration hiérarchisés permettent la modification de la scène sans recompilation du programme. Le réalisme de l'application se limite à la modélisation de mobiliers aux formes géométriques simples sur lesquels sont mappées des textures prises à partir d'un appareil photo numérique. Un algorithme simple permet d'ajouter, ici et là, quelques ombres pour améliorer la qualité visuelle. La modélisation dynamique de ARPH a été très simplifiée et ne prend pas du tout en compte les phénomènes inertiels. Toutefois, les courbes d'accélération et de freinage du système réel ont été modélisées de manière simplifiée. Une architecture logicielle objet est implémentée pour le moteur de gestion des objets et de la scène 3D. Cette structure a permis d'intégrer simplement une gestion des collisions basée sur les bounding sphere, bounding box et face par face. Ce simulateur fonctionne sur un P4 3Ghz sans avoir nécessité beaucoup d'optimisation, hormis pour la gestion des collisions dont le temps de calcul est important. La fréquence de rafraîchissement de la scène a été volontairement limitée à 12Hz ce qui correspond au taux observé sur le système réel.

Au simulateur a été ajouté un système de missions qui consiste à décrire une tâche à effectuer par un utilisateur. Cette tâche est stockée sous la forme de positions et d'orientations initiales d'objets et d'objectifs. Dans le cadre de ARPH, ces derniers sont eux aussi des positions et des orientations à atteindre : déplacement de la base d'un point à un autre, préparation à la saisie avec une certaine orientation de la pince). Lors de l'exécution de la mission par un opérateur, un nombre important [Annexe I] de paramètres sont enregistrés, permettant une analyse approfondie de la mission.

Le simulateur offre à l'utilisateur la possibilité d'utiliser non seulement la caméra embarquée mais aussi un ensemble de caméras que l'on peut positionner à divers endroits pour visualiser la scène comme on le ferait en situation réelle. La Figure 5-1 montre le simulateur. On y trouve la même représentation que pour le système réel hormis la visualisation.

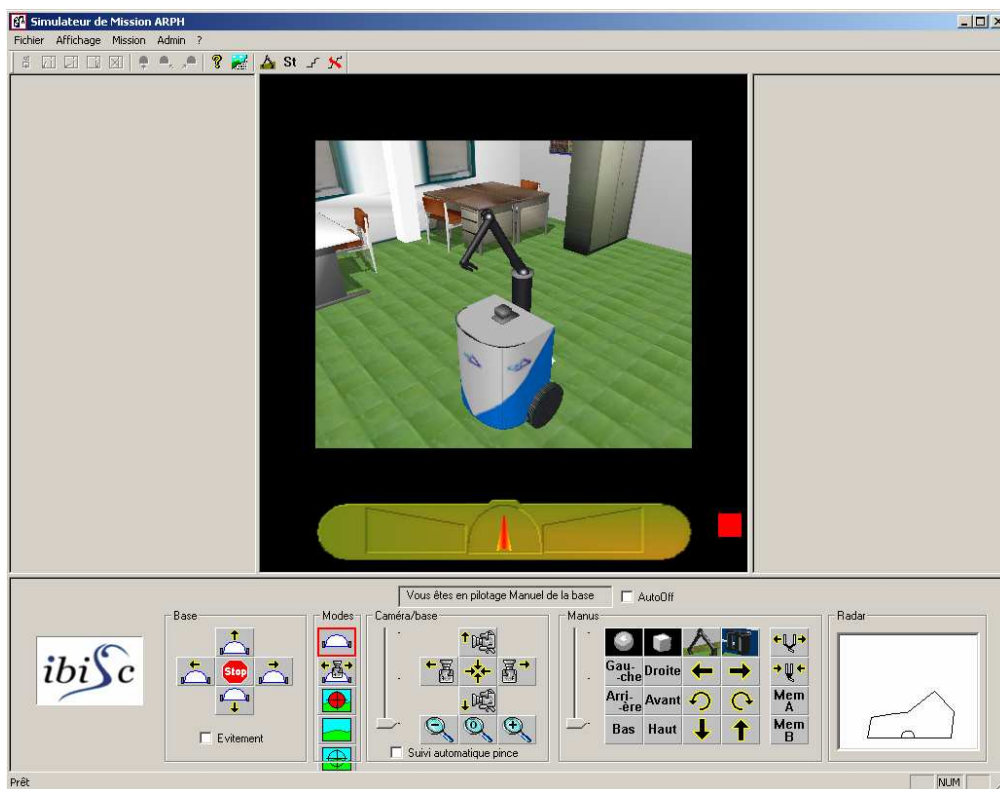


Figure 5-1 : Interface du simulateur

La Figure 5-2 montre différents points de vue obtenus avec le simulateur. Les paramètres de la caméra virtuelle ont été adaptés pour correspondre approximativement à ceux de la caméra réelle hormis les distorsions qui n'existent que sur le système réel. La Figure 5-3 montre une vue réelle en comparaison d'une vue virtuelle. On peut noter que l'utilisateur peut parfaitement identifier les deux scènes comme étant la même. On voit sur ces images que la position du mobilier n'est pas identique, ce qui ne nuit aucunement à la compréhension. De plus, étant donnée l'architecture logicielle développée, il serait aisé de faire correspondre avec exactitude les deux scènes.

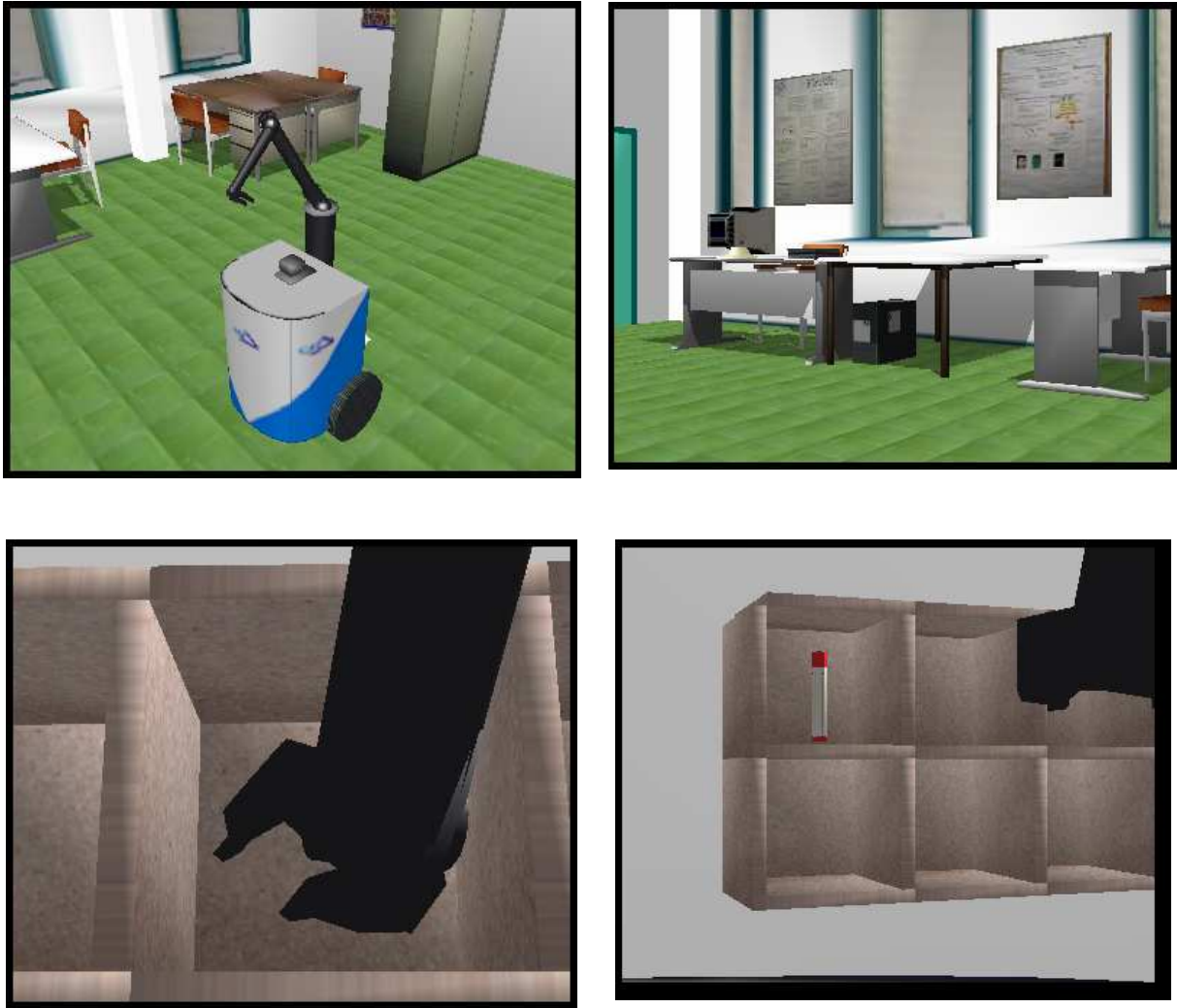


Figure 5-2 : Différents points de vue dans le simulateur



Figure 5-3 : Vue réelle et vue simulée

Que ce soit sur le système réel ou le simulateur, nous sommes capables d'enregistrer en temps réel un ensemble d'informations sur l'utilisation de ARPH. Nous stockons les vitesses, les positions, les orientations (base, bras, caméra), le rayon de courbure de la trajectoire, les modes de commandes utilisés et les actions sur l'interface.

5.2. Validation du simulateur

L'intérêt de l'entraînement sur simulateur réside dans la similarité de l'activité du stagiaire avec la situation réelle de travail. Cette notion de similarité est traduite dans le langage de la simulation par le terme de fidélité. On distingue plusieurs types de fidélité :

- La fidélité physique concerne la présentation de l'information et des moyens de contrôle et de conduite. Elle intéresse donc la partie interface homme machine du simulateur.
- La fidélité fonctionnelle peut être définie comme la similarité entre le comportement de l'élève lors d'une tâche sur simulateur (sur le plan de la perception, de la motricité et de l'activité cognitive) avec la tâche en situation réelle.
- La fidélité psychologique est la mesure selon laquelle le simulateur produit un comportement semblable à celui exigé dans la situation réelle [LEPL1997].

Contrairement aux idées reçues, toutes les études expérimentales montrent que le degré de réalisme de la représentation visuelle d'une simulation (ce que l'on voit à l'écran) n'a pas d'effet sur l'apprentissage. C'est la « fidélité psychologique » qui est déterminante. Dans le simulateur, l'utilisateur doit être en mesure de retrouver les informations sur lesquelles il se fonde dans la réalité et doit pouvoir agir d'une façon analogue au réel [CHAR2004].

La question centrale de la fidélité des simulateurs est inséparable de la question de l'évaluation de la validité des résultats obtenus en simulation. Le terme « validité », appliqué au simulateur de formation, traduit la capacité d'exploitation des compétences acquises sur simulateur, en situation réelle. Cette notion de validité est donc affectée par la fidélité du simulateur mais également par la qualité du processus de formation (méthodes pédagogiques, compétences de l'instructeur...). On ne peut pas parler de la validité d'un dispositif de formation sans évoquer la notion de transfert. Le transfert de formation mesure l'influence de la formation sur simulateur sur la durée totale d'entraînement nécessaire à l'acquisition des compétences opérationnelles. Les études en psychologie et en ergonomie révèlent qu'un aspect important de l'efficacité de la simulation pour l'apprentissage et le transfert réside dans l'identification et la transposition des indices des tâches qui permettent de développer une activité similaire à celle développée en situation réelle [BURK2003A].

Dans ce paragraphe, nous désirons valider un simulateur de téléopération. L'expérience réalisée examine les similitudes et les différences entre les comportements des opérateurs effectuant les mêmes tâches sur le robot d'assistance ARPH. Deux groupes indépendants de sujets se sont soumis, chacun à l'une des deux conditions expérimentales : la condition réelle (avec le robot) et la condition virtuelle (avec le simulateur). Nous faisons l'hypothèse que si les comportements entre les sujets effectuant la manipulation avec le robot réel et ceux l'effectuant avec le simulateur sont proches, alors le simulateur reproduit fidèlement la réalité et il pourra dès lors être validé. L'expérience réalisée va donc nous permettre de juger de l'efficacité d'un simulateur de téléopération grâce à une comparaison des résultats obtenus en réel (avec le robot) et en virtuel (avec le simulateur). Les expérimentations et résultats présentés sont issus du stage de Lauriane Closier [CLOS2006].

5.2.1. Protocole

Une population de 19 étudiants ou membres du laboratoire IBISC, âgés de 21 à 34 ans, ont participé à la manipulation. Tous ont des connaissances techniques mais étaient naïfs quant au but de l'expérimentation. Selon les sujets, l'expérience a duré de 1h15 à 2h00. Chaque sujet devait réaliser dix essais en « phase d'approche » (but : approcher d'un objet avec la base mobile du robot) et dix essais en « phase de saisie » (but : saisir un objet à l'aide du bras et de la pince du robot). Pour chacun des essais, la performance a été évaluée à partir du temps d'exécution du parcours, du nombre d'arrêts, du nombre de marches arrière et d'un indice permettant d'estimer la régularité des trajectoires. Le temps d'utilisation de la commande manuelle par rapport à la commande caméra a également été mesuré. Il y avait deux conditions expérimentales différentes.

- Une première condition, dite « virtuelle », pour laquelle les sujets ont manipulé le robot virtuel ARPH grâce au simulateur.
- Une seconde condition, dite « réelle », où les sujets manœuvraient le système réel.

Deux groupes indépendants de 10 et 7 sujets ont participé à l'une ou l'autre des deux conditions expérimentales.

Dans les deux conditions, tous les sujets étaient placés en situation de téléopération, c'est-à-dire qu'ils n'avaient qu'une vision indirecte de l'environnement où évoluait le robot, via l'interface. Chaque sujet avait pour consigne de réaliser dix essais en phase d'approche puis dix autres en phase de saisie.

- La phase d'approche (Figure 5-4) implique exclusivement le déplacement de la base mobile du robot ; le but étant de s'approcher d'un objet situé dans une pièce avec le robot qui lui partait d'un couloir. Pour cela le sujet dispose, au choix, des deux types de commande : manuelle et/ou caméra (voir paragraphe 0). Le trajet est effectué depuis deux points de départ différents d'un essai à l'autre, afin d'éviter que l'opérateur ne développe trop facilement une stratégie de navigation stéréotypée.

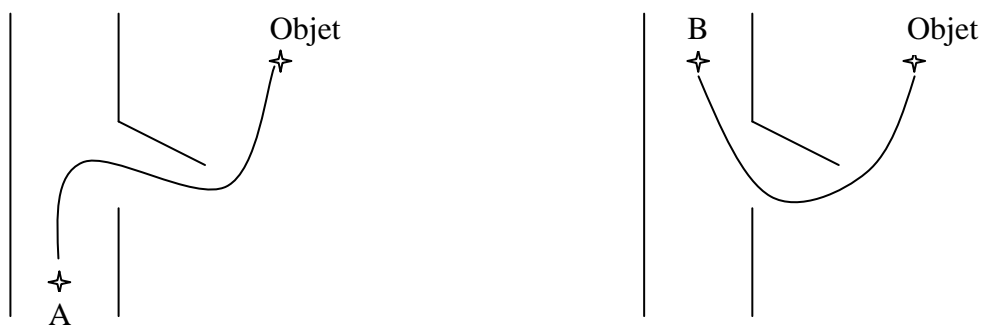


Figure 5-4 : représentation schématique du trajet que l'opérateur doit effectuer avec le robot mobile depuis deux points de départ différents

Dans un premier temps, une consigne orale est donnée au sujet, lui permettant d'effectuer cette phase d'approche. Il réalise alors une période d'entraînement afin de se familiariser avec les différents modes de commande du robot. Les conditions d'entraînement imposées aux sujets sont identiques pour chaque condition. Il est interrompu lorsque le sujet se sent prêt. A ce moment, il démarre les dix missions d'approche en alternant entre les missions A et B.

- La phase de saisie (Figure 5-5) nécessite, à la fois, l'utilisation de la base mobile, du bras et de la pince du robot ; le but étant de saisir un objet situé dans un casier. Celui-ci est placé à trois endroits différents également pour éviter toute stéréotypie.

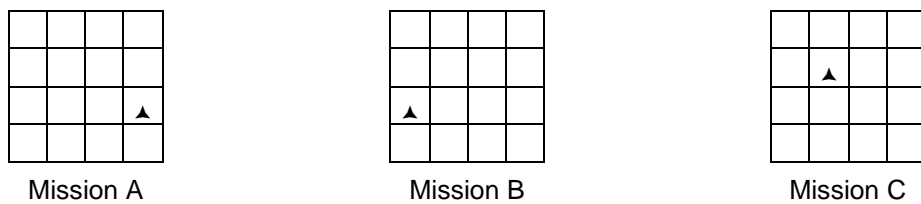


Figure 5-5 : représentation schématique de la disposition de l'objet à saisir dans un casier

Des indications supplémentaires sont donc fournies au sujet lui permettant d'effectuer la saisie de l'objet. Ensuite, une période d'entraînement à ce nouvel exercice lui est imposée. Dès qu'il le souhaite, il démarre les dix missions en alternant entre la A, la B et la C. Nous pouvons résumer le déroulement de l'expérience selon la Figure 5-6.

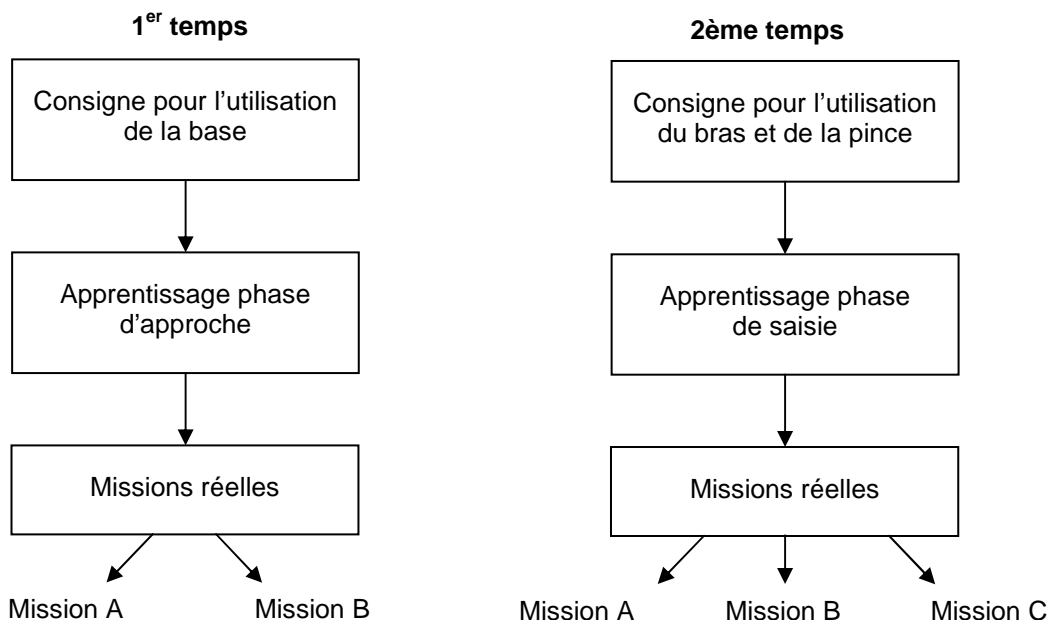


Figure 5-6 : schématisation du déroulement de l'expérience

Pour chacun des essais, la performance a été évaluée à partir du temps d'exécution du trajet, du nombre d'arrêts, du nombre de marches arrière et d'un indice permettant d'estimer la régularité des trajectoires. Le temps d'utilisation de la commande manuelle par rapport à la commande caméra a également été mesuré.

5.2.2. Résultats

5.2.2.1. Méthodes de traitement statistique

Il est courant dans ce type d'expérience d'utiliser l'ANOVA, méthode basée sur l'analyse de la variance. Elle s'applique sur des données dont la distribution doit suivre une loi normale. Si ces données ne respectent pas cette contrainte, il existe une méthode basée sur les BIC (Bayesian Information Criterion) faisant des hypothèses de distribution et de lien différentes.

Le BIC est un indice qui prend en compte deux aspects dans l'évaluation de la qualité d'un modèle : sa qualité d'ajustement aux données (mesurée par la vraisemblance) et sa complexité (mesurée par son nombre de paramètres inconnus). Ainsi, le BIC est grand quand la vraisemblance est faible et/ou quand le nombre de paramètres est élevé ; et il est petit quand la vraisemblance (ou l'ajustement) est bon et le nombre de paramètres peu élevé. De plusieurs modèles concurrents, nous retiendrons donc celui dont le BIC est le plus faible. Dans l'approche de validation de modèle par le critère BIC, il n'y a plus de valeur p (comme on a l'habitude de le rencontrer lorsqu'on effectue une analyse de variance) puisque aucun modèle ne sert de référence parfaite pour la construire. Alors que le p nous donnait la probabilité que les données d'un modèle soient vraies, avec les BIC c'est l'inverse ; ils nous donnent la probabilité que le modèle soit faux. Le BIC détecte le modèle qui est le plus probablement vrai. On choisit donc simplement le meilleur modèle au sens du BIC.

5.2.2.2. Données recueillies

Les données recueillies afin d'évaluer les performances des sujets au cours de ces essais sont, pour chaque mission, les temps mis pour réaliser la tâche, le nombre d'arrêts et le nombre de marche arrière, le taux d'utilisation de la commande manuelle par rapport au mode caméra et le lissage des trajectoires (rayons de courbure).

Dans un premier temps, nous avons testé si les données suivaient une loi normale afin de déterminer la méthode d'analyse appropriée (BIC ou ANOVA). Le Tableau 5-1 récapitule les résultats obtenus. Pour la méthode BIC, nous précisons la loi représentant le mieux la distribution.

Donnée/phase	Phase d'approche	Phase de saisie
Durée	BIC - Loi Gamma	BIC – Loi Gamma
Nombre d'arrêts	ANOVA	ANOVA
Nombre de marche arrière	ANOVA	BIC – Loi Gamma
Taux d'utilisation de la commande manuelle	BIC – Loi Binomiale	-
Petit rayon de courbure	ANOVA	-
Grand rayon de courbure	BIC – Loi Gamma	-

Tableau 5-1 : Méthodes d'analyse

Pour les données analysées avec la méthode BIC, nous allons tester plusieurs modèles :

- Un modèle constant M_0 qui suppose des comportements identiques pour les deux conditions expérimentales.
- Un modèle M_1 qui indique un effet d'apprentissage au cours des essais, identique pour les deux conditions.
- Un modèle M_2 qui montre un effet d'apprentissage différent selon les conditions. Dans ce modèle, la différence est supposée purement additive.
- Un modèle M_3 complètement individuel qui suppose que l'effet l'apprentissage n'est pas réductible à un effet global de la condition.

Pour chacune des données analysées avec la méthode BIC, nous testerons trois fonctions de régressions différentes : linéaire, inverse et exponentielle.

5.2.2.3. Temps total en phase d'approche

Voici le tableau des BIC correspondant à la variable « temps » pour la phase d'approche :

		Modèle de relation entre VI et VD		
		Linéaire	Inverse	Exponentielle
Modèle de distribution	M0	1896	1896	2052
	M1	1869	1870	1869
	M2	1821	1819	1815
	M3	1828	1826	1825

Tableau 5-2 : valeurs des BIC pour la variable « temps » en phase d'approche

La relation VD/VI (Variable Dépendante/Variable Indépendante) est mieux représentée par la fonction exponentielle. Le BIC le plus faible (1815) correspond au modèle M2 qui dit que l'apprentissage est différent selon la condition, de façon simplement additive ; c'est-à-dire que la vitesse d'apprentissage est la même dans les deux conditions. Nous pouvons noter que le BIC du modèle M1 était déjà de 1869 donc beaucoup plus faible que celui du modèle constant M0 (2052). Cela montre déjà qu'il existe un effet d'apprentissage au cours des essais quelle que soit la condition. Cet effet de sessions montre que les opérateurs sont plus rapides avec l'entraînement. Le BIC du modèle M2 étant encore plus faible, il indique que l'effet de l'apprentissage des sujets est différent selon la condition. Les sujets en condition virtuelle sont plus rapide que les sujets en condition réelle. La Figure 5-7 présente les courbes de régressions du modèle. La courbe supérieure correspond à la condition réelle et la courbe inférieure à la condition virtuelle. Chaque point est la moyenne des temps impartis aux sujets pour chaque condition et pour un essai donné.

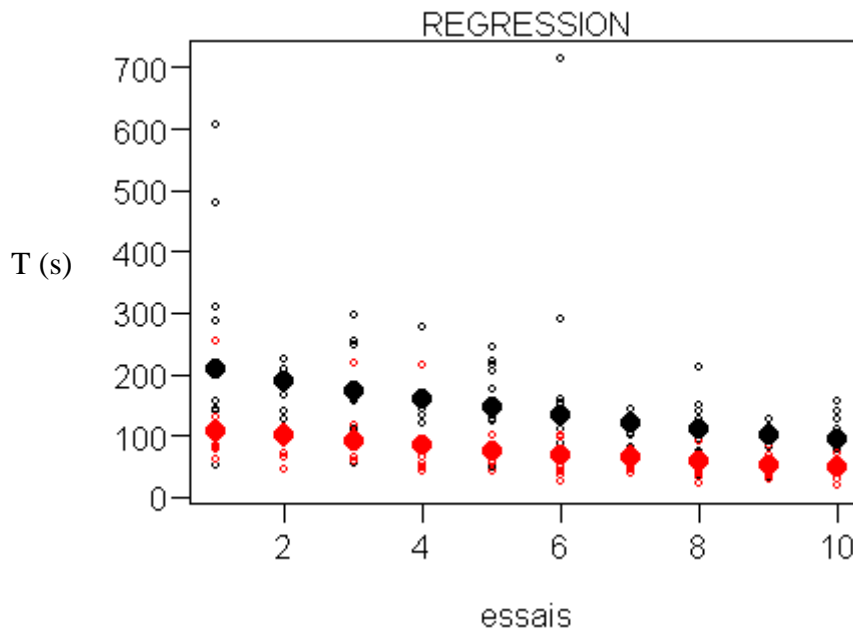


Figure 5-7 : courbes de régression du modèle M2 (variable « temps » - phase d'approche)

5.2.2.4. Temps total en phase de saisie

Concernant le temps total en phase de saisie, le meilleur modèle est à nouveau le modèle M2 qui dit qu'il y a un effet d'apprentissage différent selon la condition de façon purement additive. De même que pour la phase d'approche, un effet d'apprentissage au cours des essais montre que les opérateurs, quelle que soit la condition, sont plus rapides avec l'entraînement. Cependant, les sujets en condition virtuelle sont, là encore, plus rapides que ceux placés en condition réelle. En revanche, contrairement à la phase d'approche, la relation VD/VI est mieux modélisée par la fonction linéaire. Ainsi, quel que soit l'essai, les sujets de la condition virtuelle mettent, en moyenne, 50 secondes de moins pour effectuer la saisie par rapport à ceux de la condition réelle. La Figure 5-8 présente les courbes de régressions du modèle. La courbe supérieure correspond à la condition réelle et la courbe inférieure à la condition virtuelle. Chaque point est la moyenne des temps des sujets pour chaque condition et pour un essai donné.

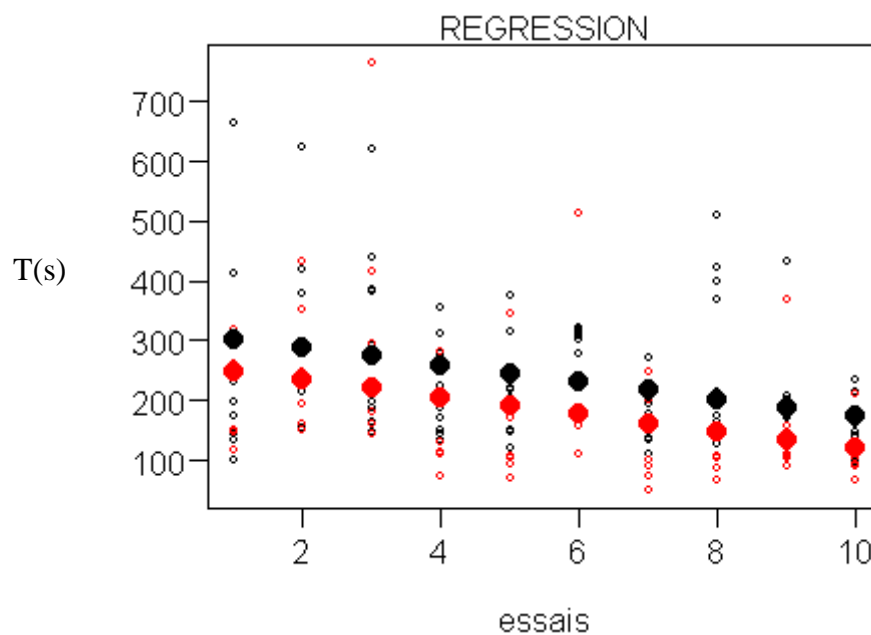


Figure 5-8 : courbes de régression du modèle M2 (variable « temps » - phase de saisie)

5.2.2.5. Nombre d'arrêts en phase d'approche

Le nombre d'arrêts n'est pas significativement différent dans les deux conditions, réelle et virtuelle, même si le nombre moyen d'arrêts est de 22 en condition réelle, et de 16 en condition virtuelle. Malgré une tendance générale de diminution du nombre d'arrêts au cours des sessions, celle-ci n'apparaît pas comme significative.

5.2.2.6. Nombre d'arrêts en phase de saisie

Nous observons une différence significative du nombre d'arrêts effectués entre les deux conditions. En effet, en condition réelle l'opérateur arrête moins souvent le robot qu'en condition virtuelle. Le nombre d'arrêts moyen est de 6 pour la condition réelle contre 10 pour l'autre condition. En revanche, comme pour la phase d'approche nous ne notons pas de diminution significative du nombre d'arrêts au fur et à mesure des sessions.

5.2.2.7. Nombre de marches arrière en phase d'approche

Nous n'observons pas de différence significative entre les deux conditions expérimentales, même si les sujets en condition virtuelle ont tendance à utiliser d'avantage la fonction « marche arrière » (environ 2 marches arrière en réel et 3,5 en virtuel). La encore, nous ne notons pas de diminution significative du nombre de marche arrière au cours des essais.

5.2.2.8. Nombre de marches arrière en phase de saisie

Concernant le nombre de marche arrière durant la phase de saisie, les données ne suivent pas une loi normale. Nous avons donc utilisé la méthode BIC. Le meilleur modèle est à nouveau le modèle M2 qui dit qu'il y a un effet d'apprentissage différent selon la condition de façon purement additive. Les sujets en condition virtuelle ont tendance à reculer davantage, c'est à dire à rectifier leurs trajectoires plus souvent, que ceux placés en condition réelle. Plus précisément, le nombre de marches arrière moyen durant la phase de saisie, pour réaliser un essai, est de 1 en condition réelle et de 3,5 en condition virtuelle.

5.2.2.9. Taux d'utilisation de la commande manuelle

Concernant le taux d'utilisation de la commande manuelle par rapport à la commande caméra, la distribution est ici mieux modélisée par une loi binomiale et la relation VD/VI par la fonction exponentielle. Le meilleur modèle est le modèle constant M0 qui indique qu'il n'y a pas de différence d'utilisation entre les conditions. La Figure 5-9 présente les courbes de régressions du modèle. Chaque point est la moyenne des taux d'utilisation de la commande manuelle des sujets pour chaque condition et pour un essai donné. Les courbes relatives aux deux conditions sont confondues. Les sujets utilisent autant la commande manuelle en situation réelle qu'en situation virtuelle.

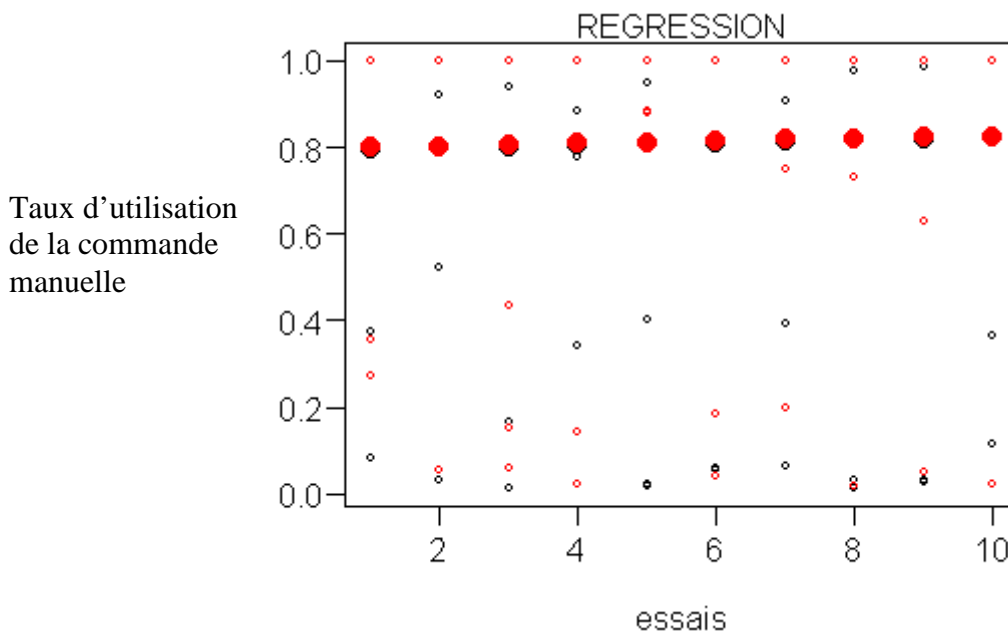


Figure 5-9 : Taux d'utilisation de la commande manuelle dans les deux conditions expérimentales

Nous pouvons observer un effet de préférence de la part des individus. En effet, si nous traçons une droite horizontale à 0,5 sur l'axe des ordonnées, nous remarquons un

regroupement des points au dessus et en dessous de cette droite. Il y a bien deux groupes différenciés de sujets, chacun se spécialisant dans l'un ou l'autre des modes. Qu'ils choisissent le mode manuel ou le mode caméra, les sujets le conservent au cours des dix essais. Mais globalement, il est clair que la plupart choisissent le mode manuel. Plus exactement, 81,2% des opérateurs utilisent ce mode en condition virtuelle et 80,9% en condition réelle.

5.2.2.10. 5 - Lissage des trajectoires

Lorsque nous observons les trajectoires décrites par le robot, nous constatons que leur caractère segmenté correspond à des changements de direction alors que la base mobile est à l'arrêt. Inversement, leur caractère lissé correspond à un changement de direction pendant que la base se déplace. Une manière de quantifier ce lissage est de calculer le rayon de courbure instantané de chaque trajectoire. Le rayon de courbure (r) est calculé comme le rapport de la vitesse linéaire instantanée (v) sur la vitesse angulaire instantanée (ω), selon la formule suivante :

$$r(m) = \frac{v(m/s)}{\omega(rad/s)}$$

Afin de distinguer les trajectoires lissées des trajectoires segmentées, nous avons classé en trois catégories les rayons de courbures. Nous considérons que les rayons entre 0 et 5 radians sont de petits rayons de courbure, ceux situés entre 5 et 30 radians des rayons de courbure moyens et enfin, ceux de 30 radians et plus, de grands rayons de courbure. Nous ne nous intéresserons qu'à la première et à la troisième catégorie.

La loi normale est acceptée pour les données concernant les petits rayons de courbure. Nous pouvons donc réaliser une ANOVA. Nous ne constatons pas de différences significatives entre les deux conditions expérimentales.

Pour les grands rayons de courbure, la loi normale étant rejetée, nous avons utilisée la méthode BIC. La distribution est mieux modélisée par une loi gamma et la relation VD/VI par la fonction exponentielle. Le meilleur modèle est le modèle M4 qui indique un effet complètement individuel et qui suppose que l'effet d'apprentissage n'est pas réductible à un effet global de la condition. Nous ne pouvons pas dire qu'il y ait de différence entre les conditions expérimentales. Il y a une très grande variabilité interindividuelle que le facteur condition n'explique pas. En moyenne, environ 57 % des sujets en condition réelle réalisent des trajectoires plus lissées contre 48 % en condition virtuelle.

5.2.3. Discussion

Cette expérience a permis d'étudier la validité du simulateur de ARPH. Pour cela une condition réelle a été comparée à une condition virtuelle au cours de deux phases expérimentales de dix essais.

Apprentissage :

Pour l'ensemble des conditions, une tendance générale a été observée quant à l'amélioration de la performance au fil des sessions. Nous remarquons un net effet d'apprentissage dans les deux conditions. Ce résultat témoigne d'une intégration relativement rapide, de la part des sujets, des propriétés dynamiques du véhicule téléopéré. Autrement dit, que ce soit en condition réelle ou en simulation, les sujets s'approprient rapidement les fonctions de

déplacement du robot. En revanche, l'effet d'apprentissage ne s'est pas avéré significatif pour les variables « arrêts » en phase d'approche et de saisie et « marche arrière » en phase d'approche. Seule la variable « marche arrière » en phase de saisie montre qu'il y a effet d'apprentissage dans les deux conditions. On peut donc penser que, au fur et à mesure des essais, les sujets apprennent à se positionner plus efficacement pour faciliter la tâche de saisie.

Prise de risque :

L'analyse statistique fait ressortir une différence significative entre les deux conditions dans la durée de réalisation du parcours. Certes, il y a un effet d'apprentissage dans chaque condition mais les sujets en condition réelle mettent plus de temps à réaliser leurs essais. Concernant cette variable, il semble donc que les sujets n'aient pas les mêmes comportements en réel et en simulation. Une interprétation possible serait que les sujets sur le simulateur prennent plus de risques par rapport à la condition réelle. En effet, on remarque une tendance à l'apprentissage par essais et erreurs dans la condition virtuelle; c'est-à-dire que l'opérateur produit des comportements plus ou moins au hasard (les essais), puis graduellement, il élimine ceux qui ne mènent pas au but (les erreurs) pour ne reproduire que ceux qui y conduisent. Ainsi, les opérateurs gagnent en temps d'exécution sur le parcours mais sont moins prudents que les sujets en condition réelle. Ils prennent plus de risques. Ce manque de prudence vient certainement du fait que le simulateur ne représente aucun « danger » pour le robot aux yeux de son utilisateur. Même s'il cogne contre un obstacle, le choc reste virtuel. Or, en situation réelle, les sujets ont adopté des comportements différents. Ils prenaient plus de précautions pour ne pas heurter les bords du casier. En simulation, il est arrivé souvent que l'opérateur, manquant d'informations visuelles pour savoir si la pince était bien placée par rapport à l'objet, avance le bras d'un coup à vitesse maximale plutôt que de l'engager progressivement comme on a pu l'observer en situation réelle. Il apparaît ainsi un manque de fidélité psychologique du simulateur. En effet, selon la condition, les opérateurs n'adoptent pas les mêmes comportements. Si l'on désire que le simulateur soit réaliste, il faut faire en sorte que les sujets en situation virtuelle appréhendent le robot de la même façon qu'en situation réelle. Cependant, le fait d'être plus rapide en simulation permet peut être d'apprendre plus vite qu'en réel. Dans l'aviation, il est courant que les pilotes de ligne s'entraînent sur un simulateur. L'immersion totale multimodale fait que le pilote ne pense pas être en environnement virtuel. En revanche, le coût d'un tel simulateur n'est pas envisageable dans notre contexte applicatif et n'est d'ailleurs peut être pas souhaitable. Il faut trouver un compromis entre le degré de présence et la complexité. Des solutions simples doivent être testées comme, par exemple, le port d'un casque audio lors de l'utilisation du simulateur. Lorsque le robot heurte un obstacle, un signal sonore ou une alarme légère pourrait se déclencher et inciter l'utilisateur à plus de prudence. Il est évident que l'instructeur, avant la manipulation sur simulateur, doit rappeler à l'utilisateur d'éviter les collisions. Une autre raison peut expliquer la grande prudence avec laquelle les opérateurs manipulent le robot réel. Dans cette condition, les utilisateurs, placés en situation de téléopération, n'avaient qu'une vision indirecte de l'environnement. Pourtant, ils étaient installés dans la même pièce que l'objet à saisir. Or, s'ils ne pouvaient voir directement le robot, ils utilisaient en contre partie la modalité auditive. Le robot émettant un signal (bip) toutes les secondes environ, les sujets savaient quand le robot se trouvait devant la porte. Or, connaissant la difficulté qu'était le franchissement du seuil, ils redoublaient donc d'attention à ce moment précis. Il apparaît donc un manque de fidélité fonctionnelle du simulateur car les sujets ne bénéficient pas des mêmes modalités perceptives selon la situation.

Mode de commande :

En ce qui concerne le choix de la commande, les utilisateurs manifestent une large préférence pour la commande manuelle. En effet, environ 80% la choisissent par rapport à la commande caméra quelle que soit la condition. Rappelons la différence entre ces deux modes de commande : dans le mode « manuel » l'opérateur commande directement la base du robot alors que dans le mode « caméra », il va commander la direction de la caméra. Ce deuxième mode de commande n'a pas été très utilisé. Pourtant, si l'on observe de plus près les données, on peut se rendre compte que les personnes utilisant la commande caméra (20% des individus) ont tendance à avoir une meilleure trajectoire. Cependant, les sujets la trouvent plus complexe, ou plutôt, ils jugent l'utilisation de la commande manuelle plus simple. Il se pose alors la question de l'efficacité de ce mode de commande. Les commentaires des utilisateurs amèneraient à remettre en cause au moins l'utilisabilité de l'interface. L'utilisabilité concerne le niveau de facilité avec laquelle l'utilisateur emploie l'interface pour réaliser son activité. Il s'agit donc de s'assurer que le produit final correspond bien aux attentes de l'opérateur. Nielsen [NIEL1993] a défini l'utilisabilité comme dérivant de l'application de trois critères : l'efficacité, l'efficience et la satisfaction. Une interface sera donc d'autant plus utilisable qu'elle facilitera la réalisation d'une activité, à la fois dans les buts poursuivis (efficacité) que dans la manière d'y parvenir (efficience) tout en procurant un sentiment de plaisir et de confort (satisfaction) à l'utilisateur. Or, avec la commande caméra, les sujets semblent réaliser de meilleures trajectoires, elle aurait donc une bonne *efficacité*. Mais il faut quand même souligner que les utilisateurs de ce mode mettent, du point de vue des données et par l'observation des comportements, plus de temps à réaliser le parcours demandé. Ainsi cela peut réduire la *satisfaction* des personnes vis-à-vis de ce mode. Ils préfèrent utiliser un mode où ils sont plus rapides et font moins d'erreurs. D'ailleurs on a pu observer que les rares sujets ayant testé la commande caméra après avoir effectué quelques essais, avec la commande manuelle, reprenaient immédiatement leur choix initial. Ils étaient donc insatisfaits du second. En revanche, les rares utilisateurs qui débutent en mode caméra ont tendance à le conserver au cours des dix essais. Cela signifie, qu'avec l'entraînement, cette commande est appréciée. Or il faut rappeler que les sujets avaient le choix d'utiliser l'une ou l'autre des commandes. Certains n'ont pas choisi une seule fois le mode caméra lors des essais. Ceci montre que les opérateurs avant même de réaliser les essais, donc lors de la phase d'entraînement, savaient déjà comment ils comptaient manipuler le robot. Il est à noter que pendant cette phase d'entraînement, identique pour tous, chacun a pu tester la commande caméra. Il est possible que ce mode demande une mobilisation trop importante de ressources cognitives. Il est vrai que, concernant la commande manuelle, le pavé de boutons est simple et intuitif. Il est courant dans notre quotidien de rencontrer ce type de pavé en croix. Il respecte en quelque sorte l'activité naturelle de la personne. Cognitivement, cette activité est simple et les sujets n'ont pas besoin de réfléchir. À l'inverse, la commande caméra n'était pas intuitive car l'emplacement des boutons ne respectait pas ce schéma en croix. Il aurait été préférable de disposer les boutons de la même manière que pour la commande manuelle. De plus, la commande caméra possède deux boutons pour stopper les mouvements du robot. Le premier permet d'annuler la vitesse linéaire et le second de recentrer la caméra (et donc d'annuler la vitesse angulaire). Cela augmente la charge mentale de l'opérateur qui en cas d'urgence doit appuyer sur deux boutons pour arrêter complètement le robot. Cette commande est donc plus riche, mais plus complexe d'où la préférence des utilisateurs à choisir la commande manuelle. Pour rendre plus accessible la commande caméra, il faudrait modifier l'interface et peut-être envisager un entraînement plus ciblé qui pousserait l'utilisateur à mieux appréhender ce mode de commande.

Manœuvres :

Concernant les manœuvres faites avec la base mobile lors de la phase de saisie, les sujets en condition virtuelle ont tendance à plus utiliser la marche arrière que ceux en condition réelle. Cela se justifie par le fait que l'opérateur change de direction. Or, lors de cette phase de saisie, le robot est placé à environ trois mètres, face au casier contenant l'objet à saisir. Il n'y a pas obligatoirement lieu de modifier sa trajectoire (pour les trois types de saisies A, B et C, l'objet est atteignable sans bouger la base mais c'est plus difficile). Or, si en condition virtuelle, les opérateurs font en moyenne 3,5 marches arrière, c'est qu'ils décident de reculer la base mobile du robot afin de mieux la positionner pour une prise plus aisée de l'objet. Cette stratégie paraît plus efficace. En effet, il est plus facile pour l'opérateur et pour le bras mobile de saisir un objet face à lui plutôt que de tendre le bras sur la gauche ou sur la droite avec une vision dégradée. Or, si les sujets en condition réelle n'utilisent pas cette même stratégie, c'est parce que, là encore, ils agissent avec plus de prudence. Ils préfèrent avancer la base mobile jusqu'au casier (trajectoire rectiligne), puis, ne plus y toucher pour se consacrer à la manipulation du bras. Ils écartent donc tout risque pour le robot mais n'utilisent peut-être pas la meilleure stratégie. Dans la condition virtuelle, ils n'hésitent pas à manoeuvrer pour mettre le robot dans le bon axe. De même, on observe une différence significative du nombre d'arrêt entre les deux conditions. Là encore, les sujets de la condition virtuelle utilisent plus cette fonction car ils réalisent davantage de manoeuvres. Les opérateurs semblent donc avoir des comportements différents en phase de saisie. Rappelons également qu'en virtuel, ils mettent environ 50 secondes de moins à réaliser un essai qu'en réel, pour un temps total moyen de 200 secondes.

Bilan :

Les différents résultats de cette étude ne permettent pas objectivement de valider le simulateur ARPH. Une explication générale traduit les différences observées entre la simulation et la situation réelle : c'est la moins grande prudence des opérateurs en condition virtuelle. En effet, face à l'écran, ils prennent cela comme une sorte de « jeu », avec souvent des prises de risque pour arriver plus rapidement au but. Au contraire, en condition réelle, les opérateurs adoptent des comportements beaucoup plus mesurés et prennent le moins de risques possibles. Localement (phase d'approche), ils optent pour la méthode sûre (prescrite) mais qui au final sera plus « coûteuse » (cognitivement) car la difficulté de saisie en sera augmentée. Les sujets de la condition virtuelle, quant à eux, choisissent la méthode « économique » mais plus dangereuse. Notons également, qu'en condition virtuelle, nous avons eu quatre abandons lors de la phase de saisie. Cela peut s'expliquer à nouveau par le fait qu'en réel, les sujets s'impliquent d'avantage dans la tâche, sont plus patients, et mènent jusqu'au bout leur action. A l'inverse, les opérateurs en condition de simulation, ont tendance à se décourager. Ce qu'ils percevaient comme un « jeu » n'en est plus un du fait d'un temps d'exécution important.

Ces évaluations nous ont montré que le simulateur, en l'état, n'était pas suffisamment fidèle à la réalité. Dans les évaluations suivantes, certains points ont été corrigés afin de rendre la notion de risque plus décourageante en simulation virtuelle. Un signal sonore a été ajouté pour signaler une collision entre le robot et son environnement. De plus, lors des manipulations, l'expérimentateur précisait bien qu'il ne fallait pas entrer en contact avec l'environnement. Le <bip>, dû au système d'alimentation de notre prototype, a été supprimé. La plupart des utilisateurs ont fait part de la difficulté à garder la pince dans le champ de vision de la caméra. En effet, la caméra ne suivait pas automatiquement la pince et les utilisateurs devaient alors corriger son orientation. Nous avons donc ajouté un mode « suivi de pince automatique » qui permet de garder la pince au centre de l'image caméra.

5.3. Transfert de compétences

L'objectif de cette évaluation est de mettre en évidence un transfert d'apprentissage entre une situation de simulation et l'utilisation réelle d'un robot d'assistance aux personnes handicapées. Ceci permettrait alors de justifier d'un apprentissage préalable avec le simulateur avant d'utiliser le robot réel. Les expérimentations et résultats présentés sont issus du stage de Gilles Deguillard [DEGU2007].

5.3.1. Le Transfert d'apprentissage : présentation générale

La littérature concernant le transfert d'apprentissage nous montre que les auteurs s'accordent sur une même définition. D'une manière générale, il est considéré comme un effet d'un apprentissage antérieur lors d'un nouvel apprentissage, ou d'une situation nouvelle, qui présente des similitudes avec l'apprentissage initial. Il s'agit de l'utilisation de connaissances, ou d'habiletés, précédemment acquises lors d'un premier apprentissage qui entraîne un effet pour l'apprentissage ou l'exécution d'une activité similaire. Cette similarité peut porter sur des critères de ressemblance matérielle, mais également de ressemblance dans la structure des relations. Le transfert d'apprentissage est un processus relativement important d'un point de vue adaptatif, « car il est rare que l'on trouve dans la vie une activité qui est exactement celle qui a été apprise à l'école » [LIEU2004]. Pourtant, sa mise en œuvre est souvent difficile. « Les connaissances sont souvent tellement liées au contexte de leur acquisition que les individus éprouvent de grandes difficultés à les utiliser dans des contextes différents » [ROUL2006].

C'est Thorndike qui, dès le début du XX^{ème} siècle, « a mis l'accent sur l'importance de la similitude des tâches dans l'apprentissage » [GINE1991]. Le transfert est alors d'abord considéré comme une généralisation dans un conditionnement. Thorndike se base sur des faits expérimentaux. En 1901, Thorndike et Woodworth, avec la théorie des éléments identiques, supposent que « l'importance du transfert entre deux tâches A et B dépend du nombre d'éléments communs à A et B, et donc de la similitude entre les deux tâches ». Deux expériences de Yum (cités dans [OLER1964]) montrent qu'il y a un effet de transfert positif lorsque deux situations présentent des stimuli différents ou similaires et qu'elles entraînent des réponses identiques. La première expérience consiste en un apprentissage de couples de syllabes dépourvues de sens, la seconde, des couples de dessins. Pour ces deux expériences, la situation de transfert présente des stimuli plus ou moins similaires à ceux de la situation d'apprentissage. Il fait varier le degré de similitude et montre d'une part un transfert positif, d'autre part que celui-ci est « d'autant plus élevé que le taux de similitude est plus fort ». Ces expériences valident les théories de Wylie et d'Osgood. Wylie fait la distinction entre le rôle des stimuli et celui des réponses dans le transfert. Pour lui, il y a transfert positif quand une ancienne réponse (d'une première tâche) est associée à un nouveau stimulus dans une épreuve de transfert, et il y a transfert négatif lorsqu'un ancien stimulus (d'une tâche préalable) doit être associé à une nouvelle réponse. Osgood propose le modèle de surface de transfert et de rétroaction. Ce modèle utilise une représentation tridimensionnelle : un premier axe indique le taux de transfert, un second axe indique le degré de similitude des stimuli, le dernier axe indique le degré de similitude des réponses. Ce modèle « suppose que pour des stimuli identiques dans les deux tâches, l'effet de transfert doit être positif, lorsque les réponses sont très semblables, puis devenir négatif lorsque cette similitude des réponses décroît » [OLER1964].

A l'heure du behaviorisme, l'idée est qu'un stimulus va entraîner une réponse. On observe que, dans une situation différente, un stimulus qui présente les mêmes caractéristiques que le précédent entraînera la même réponse. Les études du transfert d'apprentissage sont restées orientées par les théories behavioristes jusque dans les années 1970 et l'arrivée des théories

cognitivistes. L'intérêt s'est alors tourné vers le transfert d'habiletés cognitives (Transfer of Cognitive Skills). Les chercheurs se sont alors interrogés sur « comment passer d'un type de traitement de texte à un autre, d'un ordinateur à un autre, d'un simulateur de vol à un avion véritable, d'un instrument de musique à un autre. Autant de situations différentes dans lesquelles les transferts ne sont plus simplement des transferts de réponses mais des transferts de processus souvent de haut niveau » [GINE1991].

Le processus de transfert est une hypothèse implicite faite par les individus. Si une situation nouvelle possède le même but, ou un but relativement similaire, à des situations rencontrées auparavant, alors on peut utiliser la procédure qui a été efficace dans celles-ci pour résoudre la tâche de la nouvelle situation. Hoc [HOC2000] « souligne que la planification d'une tâche se fait très fréquemment à partir de l'adaptation de procédures connues pour des problèmes voisins ». Richelle et al. [RICHE1994] notent que « cette hypothèse n'est pas toujours adéquate, mais quand elle l'est, ce qui est le cas le plus fréquent, elle assure un gain de temps considérable dans l'exécution et une automatisation dans la mise en œuvre, d'où une réduction massive de la charge mentale ». Plutôt que de parler d'une hypothèse implicite qui consisterait à transférer une procédure, on pourrait également parler, comme le fait Montpellier [OLER1994], d'une attitude de réponse. Ce qui serait alors transféré serait « une manière de voir la même espèce de solution pour différents problèmes » ; il s'agirait alors d'utiliser une même solution pour des situations similaires et donc d'appliquer une solution déjà utilisée et qui a été efficace pour un problème, pour un nouveau problème qui s'en rapproche.

Selon Gineste [GINE1997], lorsqu'un individu rencontre une situation nouvelle, il se crée une représentation mentale transitoire de celle-ci qu'il inscrit dans un réseau propositionnel afin de la modéliser. Ceci va lui permettre ensuite de rechercher en mémoire à long terme des connaissances qui ressemblent à la nouvelle cible. Bien que l'analogie, c'est-à-dire les ressemblances de la structure des relations, soit jugée comme plus solide, ce sont les similitudes matérielles, les ressemblances de surface, qui guident le plus souvent les individus. « Une fois ces ressemblances détectées en début de traitement, les caractéristiques et les propriétés de ce qui est bien connu sont étendues à ce qui est nouveau et en cours de traitement » [GINE1997]. Le processus de transfert correspond donc à une construction de la représentation du problème suivi d'un processus de recherche de solution au problème. L'individu va alors activer un schéma préexistant en mémoire à long terme et, de ce fait, il va proposer une solution au problème.

On constate donc, en situation de transfert, qu'il existe une dichotomie entre une structure de connaissances durable, les modèles cognitifs existants en mémoire à long terme, et une structure de connaissances éphémères, correspondant aux modèles mentaux. Ces derniers « sont considérés comme des structures dynamiques qui se créent dans le moment du problème à résoudre ou de la connaissance à acquérir. Par le qualificatif de dynamique, on indique qu'ils évoluent au cours même du traitement de la situation particulière » [GINE1997]. Cependant, ils ne sont pas indépendants des modèles cognitifs. Au contraire, ils sont élaborés « à partir des structures conceptuelles, immense base de données représentant le monde » [GINE1997] : les représentations transitoires des modèles mentaux incluent nécessairement des représentations anciennes stockées en mémoire à long terme qui sont activées au moment du traitement. À partir des connaissances des situations anciennes, proches de la situation nouvelle, et des procédures qui y ont été appliquées avec succès, l'individu se crée une structure de buts qui va lui permettre de résoudre la tâche. Ces procédures fournissent une organisation de sous-butts que l'individu va mettre en œuvre, tant qu'ils peuvent l'être, dans la situation nouvelle. Ainsi, les buts et sous-butts deviennent les

nouvelles données du problème. Richelle [RICHE1994] distingue deux types de buts : « les buts positifs, comme « faire telle action » ou « obtenir tel résultat » et les buts négatifs, comme « ne pas faire telle action » ». Ces buts vont donc guider l'individu pour savoir ce qu'il doit et ce qu'il ne doit pas faire dans telle situation. Il n'est cependant pas toujours possible pour lui d'appliquer exactement la même procédure. Il aura alors à élaborer, pour chacun des sous-buts, une procédure acceptable dans le nouveau contexte.

Nous pouvons noter qu'il existe sur ce point une différence entre des individus experts et des novices. En effet, les experts, lorsqu'ils rencontrent une situation nouvelle proche de situations dont ils connaissent les solutions, possèdent déjà des structures de buts adaptées à celles-ci. Ils vont alors agir dans cette nouvelle situation en utilisant de manière automatique les buts et sous-buts de ces structures, en adaptant les procédures si besoin. Au contraire, les novices ne possèdent pas de structures pour répondre à la situation. Ils sont alors dans une situation de recherche de résolution de problème. Dans l'éventualité où ils possèderaient une structure de buts, celle-ci n'est pas forcément adaptée à la situation à laquelle ils sont confrontés. Ils vont alors tenter d'y répondre en se basant sur la similarité des critères matériels plutôt que sur la similarité des buts et procédures de résolution [BOUR1996].

Il s'agit donc, pour l'individu, de mobiliser les connaissances, ou les habiletés, pertinentes, acquises antérieurement, afin de réaliser la tâche nouvelle qu'il rencontre. « Pour qu'il y ait transfert, il faut donc que le sujet puisse effectivement avoir accès aux connaissances antérieures dont il dispose pour traiter les nouvelles données et que celles-ci soient assimilables par lui, c'est-à-dire qu'elles soient présentées dans une forme appropriée et qu'elles suscitent un engagement actif de sa part pour leur traitement » [BOUR1996].

Le transfert suppose alors que, lors de l'apprentissage, l'individu possède une structure d'accueil au niveau cognitif, afin d'acquérir des connaissances qui soient ensuite disponibles lors d'une situation nouvelle. Afin de favoriser cette acquisition, l'apprentissage se doit de présenter à l'individu des situations contextualisées. Il doit lui permettre de rencontrer des données à traiter qui soient complexes, afin de les analyser de manière contrôlée pour favoriser la prise de conscience des traitements et donc d'élaborer des méta connaissances, et variées, afin de se construire un schéma de la situation. Ce qui va être à l'origine du transfert n'est pas simplement le fait d'avoir ces connaissances. En effet, celles-ci, bien que nécessaires, ne permettent pas directement le transfert, mais c'est plutôt l'attitude qui consiste à chercher, pendant l'apprentissage, à trouver un principe, un schéma, pour répondre au problème. Ainsi le montre une expérience de Kittel (cité dans [OLER1964]) qui consiste à choisir des mots dans une liste de mots présentés simultanément. Un groupe contrôle ne recevait aucune information avant l'épreuve, et deux groupes expérimentaux recevaient, l'un totalement, l'autre partiellement, des informations concernant les principes permettant d'effectuer le bon choix des mots. Un entraînement a permis d'amener les trois groupes au même niveau de réussite avant l'épreuve de transfert. Lors de cette dernière, Kittel constate que le groupe qui n'a reçu que des informations partielles est le plus efficace, le groupe n'ayant reçu aucune information l'étant le moins. Il en déduit que les individus du groupe intermédiaire ont cherché les principes qu'ils n'avaient que partiellement, contrairement à ceux qui les avaient déjà totalement et qui se sont alors contentés de les appliquer. Cette expérience nous amène également au point suivant : les individus du groupe n'ayant reçu les informations que de manière partielle n'avaient qu'à compléter les principes qui leurs avaient été indiqués, contrairement aux individus du groupe contrôle qui devaient chercher par eux-mêmes les principes dans leur totalité. On constate donc que la présence d'un tiers peut être un support à la recherche et l'acquisition des principes, tel un médiateur, afin de permettre à l'individu d'élaborer des connaissances dont les fonctions et les conditions d'applicabilités

sont apprises. On peut distinguer trois sortes de connaissances : « les connaissances déclaratives (savoir ce qu'il faut faire), des connaissances procédurales (savoir comment le faire) et des connaissances conditionnelles (savoir dans quelles conditions mettre en œuvre cette stratégie) » [BOUR1996]. Enfin, les processus motivationnels favorisent le transfert car ils suscitent un engagement actif de la part de l'individu dans le traitement des informations, les rendant ainsi disponibles et mobilisables. Cependant, la structure d'accueil n'est pas l'unique condition qui permet le transfert. Il faut aussi que les données rencontrées lors d'une nouvelle situation soient assimilables par l'individu.

L'acquisition des connaissances pendant l'apprentissage est également déterminée par la mémoire. D'une part il existe des mécanismes de mémorisation de nature automatique comme l'apprentissage par essais et erreurs ou la loi de l'effet qui établit qu'une réponse est plus susceptible d'être reproduite si elle entraîne une satisfaction pour l'organisme et d'être abandonnée s'il en résulte une insatisfaction (Thorndike) ; d'autre part, on trouve des mécanismes de nature intentionnelle, c'est-à-dire lorsque l'individu s'attend à être confronté à nouveau à la situation, qui favorisent la mémorisation des états critiques. Ce sont des états qui constituent des étapes importantes vers la solution du problème. Ils pourront être pris pour sous buts, ceux conduisant à des impasses ne devront, eux, ne pas être reproduits. La mémorisation permet alors de sélectionner les événements saillants et d'orienter son attention vers les informations utiles afin de trouver les relations et propriétés importantes de la situation.

Cette première définition générale est axée sur l'idée que le transfert est, comme nous avons pu le voir, l'utilisation de connaissances acquises dans une situation d'apprentissage pour effectuer une tâche dans une situation nouvelle. Cependant il existe différents types et niveaux de transfert qu'il ne faut pas occulter lorsque l'on s'intéresse à cette notion. Louis Toupin dans son ouvrage *De la formation au métier* [TOUP1995] en a fait l'inventaire :

- Transferts positif, négatif et neutre : Ces trois types de transferts correspondent au degré de transfert d'une situation à une autre. On parle de transfert positif lorsque l'effet de connaissances antérieures acquises dans une première situation est une amélioration de l'efficacité dans une seconde situation. Cette meilleure efficacité peut se traduire par exemple, en fonction du type de situations, par une diminution du nombre d'erreurs, une diminution du temps d'exécution, ou encore une augmentation du nombre de bonnes réponses. On parle alors de facilitation proactive. Au contraire, il y a transfert négatif lorsqu'il y a diminution de l'efficacité dans la seconde tâche. On parle ici d'inhibition ou d'interférence proactive. Les effets neutres sont quant à eux, soit une absence de transfert, soit, comme souligné dans [OLER1964], « le résultat d'un équilibre entre des effets positifs et des effets négatifs ».
- Transferts vertical et latéral : Cette distinction est faite par Gagné (cité dans [TOUP1995]). On parle de transfert vertical « lorsqu'une habileté ou une connaissance contribue directement à l'acquisition d'une habileté ou d'une connaissance d'ordre supérieur ». Ce type de transfert suppose que certaines connaissances plus générales ne sont accessibles que par l'acquisition préalable de connaissances spécifiques. Quand au transfert latéral, il correspond à une généralisation de la connaissance d'une situation à des situations de même niveau de complexité. Ces deux types de transferts impliquent une hiérarchisation des connaissances.
- Transferts spécifique et général : Le transfert spécifique s'effectue entre une situation d'apprentissage et une situation de transfert, impliquant une similitude entre les données

de ces deux situations. Ce type de transfert dépend alors des données des deux situations. Au contraire, le transfert général va se jouer indépendamment de ces données, comme par exemple, lors d'un apprentissage d'une « liste de mots associés, il se peut que les apprenants développent une habilité générale de l'apprentissage de listes qui n'a rien à voir avec le contenu, comme tel, des listes apprises » [TOUP1995].

- Transferts littéral et analogique : Ces deux types de transferts sont définis par Royer (cité dans [TOUP1995]) et correspondent, pour le premier, à l'application telle quelle d'une connaissance ou d'une habilité d'une situation à une autre, et ce de manière relativement automatique lorsque l'on rencontre une situation nouvelle dont les données renvoient à celles d'une situation déjà rencontrée ; pour le second, à l'utilisation des connaissances, des représentations, d'une situation, afin de raisonner, voire d'agir, à propos d'une situation dont on ne possède aucune connaissance. Il s'agit alors de décontextualiser, d'abstraire, de manière consciente, un principe qui sera ensuite transféré dans une autre situation. L'exemple classique étant l'analogie entre le jeu d'échecs et les stratégies militaires.
- Transferts court et long : Lorsqu'une situation de transfert est semblable à la situation d'apprentissage, on parle de transfert court. C'est le cas par exemple pour un apprentissage sur un simulateur de vol et le transfert des habilités qui y sont acquises une fois en situation de pilotage d'un véritable avion. À contrario, lorsque la situation de transfert est différente de la situation d'apprentissage, on parle de transfert long.

« Le transfert d'entraînement est un concept inhérent à la problématique de la formation : les connaissances apprises doivent pouvoir être utilisées en situation réelle » [GRAU1998]. Lors d'une situation d'apprentissage, il s'agit, comme nous avons pu le voir, d'acquérir des connaissances, des habilités. Cette acquisition peut être vérifiée par des examens ou des questionnaires par exemple. Cependant, une fois acquises, ces connaissances ou habilités doivent être utilisées correctement dans les situations qui les nécessitent et qui ne sont pas tout à fait celles dans lesquelles elles ont été apprises. Il faut donc qu'elles soient transférées de la situation d'apprentissage à la situation dite de transfert. Pour cela, il est nécessaire de proposer des situations d'apprentissages qui vont permettre d'acquérir des connaissances et des habilités qui pourront être utilisées en situation de transfert.

L'utilisation d'un simulateur est une situation sensori-motrice répondant aux critères décrits par Yum qui entraînent un effet de transfert positif. En effet, l'environnement simulé est similaire à l'environnement réel, et l'on doit agir de la même manière dans les deux cas. Il y a donc des stimuli semblables et des réponses identiques. C'est ce que nous confirment les résultats d'une expérience de Patrick qui note un gain de 50% de temps de vol sur un avion réel lorsqu'une formation préalable sur un simulateur de vol a été effectuée (cité dans [GRAU1998]). On a bien ici un transfert positif entre la formation en virtuel et l'utilisation en réel des habilités préalablement acquises.

S'intéresser au transfert lors de l'élaboration d'une formation préalable permet de connaître les modalités susceptibles d'entraîner un transfert positif, celles qui vont faciliter l'acquisition des habilités et connaissances, mais également connaître les modalités pouvant entraîner un transfert négatif et donc gêner l'opérateur lors de son passage en situation de transfert, et qui peuvent induire des comportements inadaptés voire dangereux en situation réelle. Si on remarque un transfert négatif, c'est que la formation n'est sans doute pas adaptée et donc qu'elle nécessitera d'être améliorée, voire modifiée.

5.3.2. Protocole

L'expérience a porté sur trois groupes de 10 sujets dont un a été recruté à l'université de Rennes II, et les deux autres au laboratoire IBISC. Notre objectif étant de montrer un transfert d'apprentissage, il nous a paru important que les sujets soient « naïfs » quant à la manipulation du robot ARPH. De même, tout en sachant que ce robot peut être susceptible d'être utilisé par tout type de population, il ne nous a pas semblé nécessaire d'effectuer d'échantillonnage, notamment concernant le sexe, l'âge ou encore les compétences de chacun. Nous avons donc une population hétérogène. Les sujets n'étaient pas informés de l'objectif de l'expérience.

Nous avons deux situations, l'une en réelle, l'autre en virtuelle. La première situation correspond à l'utilisation du robot ARPH dans l'environnement réel. La seconde situation correspond à une situation de simulation de la situation réelle. L'interface de commande du robot est la même pour ces deux situations, avec pour seule différence l'image de retour vidéo. En situation réelle l'image est celle renvoyée par la caméra embarquée du robot réel, c'est donc une vue de l'environnement réel dans lequel il se trouve. En situation virtuelle, c'est la vue de la caméra virtuelle, on a donc une image de l'environnement virtuel. Les sujets avaient à réaliser des missions consistant à déplacer et manipuler le robot, placé à 3 mètres des casiers, afin de saisir un stylo posé dans ces derniers. La pince en simulation ne pouvant être ni ouverte ni fermée, il s'agissait alors de la positionner autour du stylo. La même contrainte a été donnée aux sujets en situation réelle. Il y avait trois missions différentes correspondant à trois positions du stylo dans les casiers. Ces missions sont présentées sur les Figure 5-10 et Figure 5-11.

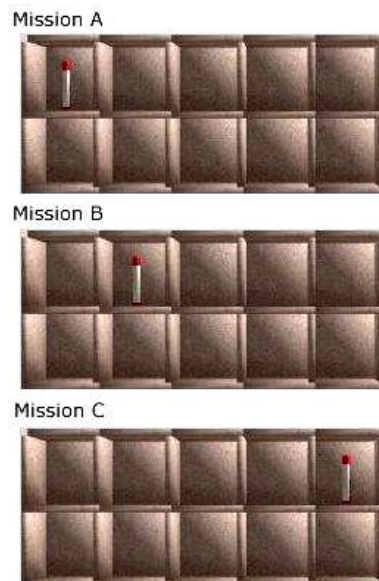


Figure 5-10 : Les 3 missions



Figure 5-11 : Situation réelle

Ces différentes positions du stylo ont été choisies afin d'obliger les sujets à effectuer des déplacements latéraux. Le robot était placé face à la position du stylo pour la mission C, soit face au côté droit du casier, et, du fait de la position du bras sur la droite du robot, se contenter d'aller tout droit et de manipuler le bras pour aller saisir l'objet n'était pas possible pour les missions A et B. L'ordre des missions durant les passations a été décidé selon un carré latin afin d'éviter un effet d'ordre et de série. Chacun des sujets effectuait quatre fois chaque mission, mais selon six ordres différents possibles.

Les 30 sujets étaient répartis en trois groupes : un groupe expérimental, et deux groupes contrôle. Il y a alors trois conditions :

- Les conditions Virtuel-Virtuel (V-V) et Réel-Réel (R-R) correspondent aux deux groupes contrôle. Le groupe V-V doit effectuer 6 missions en situation virtuelle, puis 6 autres missions dans cette même situation. Le groupe R-R doit effectuer 6 missions en situation réelle, puis 6 autres missions dans cette situation.
- La condition Virtuel-Réel (V-R) correspond au groupe expérimental, il s'agit ici d'effectuer 6 missions en situation virtuelle, puis 6 missions en situation réelle. Les sujets étaient informés qu'après les six missions sur le simulateur, ils effectueraient six nouvelles missions avec le robot réel.

Les passations étaient précédées d'une explication concernant le robot et son utilisation, d'une courte présentation vidéo, ainsi que d'une démonstration (en fonction de la condition, celle-ci se faisait soit avec le robot réel, soit avec le simulateur, respectivement pour la condition R-R et pour les conditions V-V et V-R). L'expérience se déroulait ensuite en deux phases : une phase d'apprentissage de six missions et une phase d'utilisation autonome de la part des sujets durant six missions supplémentaires. Lors de la phase d'apprentissage, l'expérimentateur répondait aux questions éventuelles, rappelait l'utilité de certains boutons si les sujets étaient hésitants ou s'ils semblaient perdus. À partir de la septième mission, c'est-à-dire lorsque commençait la seconde phase, l'expérimentateur ne disait plus rien et laissait les sujets utiliser le robot de manière tout à fait autonome.

5.3.3. Résultats

5.3.3.1. Données recueillies et méthodes de traitement statistique

Les données recueillies afin d'évaluer les performances des sujets au cours des essais sont : la durée mise pour réaliser chaque mission, le nombre d'arrêts effectués ainsi que le nombre de marches arrière, et enfin l'orientation finale du robot, c'est-à-dire une fois que le robot est prêt pour la saisie et qu'il n'est plus déplacé.

Les données ne suivant pas une loi normale, nous avons utilisé la méthode BIC (voir paragraphe 5.2.2.1). Le Tableau 5-3 précise les lois représentant le mieux la distribution.

Durée	BIC - Loi Gamma
Nombre d'arrêts	BIC – Loi de poisson
Nombre de marche arrière	BIC – Loi de Poisson
Orientation finale	BIC – Loi Binomiale

Tableau 5-3 : Méthodes d'analyse

Les modèles utilisés pour la durée, le nombre d'arrêts et de marche arrière sont les suivants :

- Le modèle M0 suppose qu'il n'y a pas d'effet d'apprentissage ;
- Le modèle M1 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage qui est le même pour tous les sujets ;
- Le modèle M2 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage différent entre ceux qui ont appris en virtuel (les groupes V-V et V-R) et ceux qui ont appris en réel (le groupe R-R) ;
- Le modèle M3 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage différent pour chaque groupe ;
- Le modèle M4 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage différent pour chaque groupe, avec un effet de rupture entre les six premiers et les six derniers essais.

Pour l'orientation, Nous avons préféré utiliser :

- Le modèle O0 suppose qu'il n'y a pas d'effet d'apprentissage ;
- Le modèle O1 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage qui est le même pour tous les sujets ;
- Le modèle O2 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage différent pour chaque groupe ;
- Le modèle O3 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage qui est le même pour tous les sujets, mais qui est différent entre les deux phases ;
- Le modèle O4 suppose qu'il y a un effet d'apprentissage différent pour chaque groupe, avec un effet de rupture entre les six premiers et les six derniers essais.

5.3.3.2. Durée de la mission

Concernant la durée de la mission, le modèle le plus approprié est le modèle M4 selon une fonction inverse ce qui suppose un effet d'apprentissage différent selon les groupes avec un effet de rupture entre les deux phases. Nous pouvons voir sur la Figure 5-12 que l'apprentissage ne se fait pas de la même manière pour les trois groupes. Pour la première

phase, lors des deux premiers essais, le groupe V-R est plus rapide que les deux autres, ensuite les groupes V-V et V-R font les mêmes temps et sont tous les deux plus rapides que le groupe R-R. À noter, qu'au premier essai, le groupe V-V présente un temps proche, mais légèrement plus faible, de celui du groupe R-R à ce même essai. On constate que la pente de la courbe de régression pour le groupe V-V est plus importante. Entre les deux phases il y a un effet de rupture, que l'on remarque notamment pour le groupe V-R qui était le groupe le plus rapide pendant la première phase et qui réalise des temps proches de ceux du groupe R-R lors de la seconde phase. Pour les deux autres groupes il y a également une légère augmentation du temps en début de deuxième phase. Ensuite les temps diminuent pour tous les groupes, moins rapidement cependant que lors de la première phase. On observe sur cette courbe qu'au début de la seconde phase le groupe V-R est un tout petit peu plus rapide que le groupe R-R et que leurs temps sont quasiment identiques au 12ème essai.

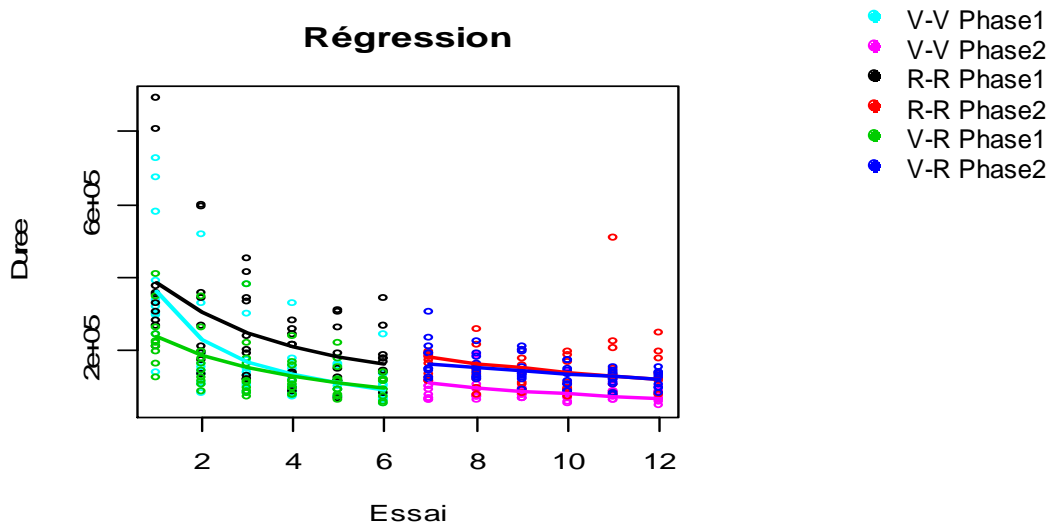


Figure 5-12 : Courbe de régression pour la variable « Durée » (en ms)

5.3.3.3. Orientation du robot pour la saisie

L'orientation est mesurée en radian. L'orientation initiale du robot est de 0. Celui-ci étant dirigé face aux casiers, la meilleure orientation pour la saisie est donc la valeur 0. Elle peut être positive ou négative en fonction du côté vers lequel est orienté le robot. Le modèle retenu est donc le modèle O0, qui suppose l'absence d'un effet d'apprentissage.

5.3.3.4. Nombre d'arrêts durant la mission

Le modèle le plus probablement vrai est le modèle S3. En ce qui concerne le nombre de stops, il y a donc un effet d'apprentissage différent selon le groupe.

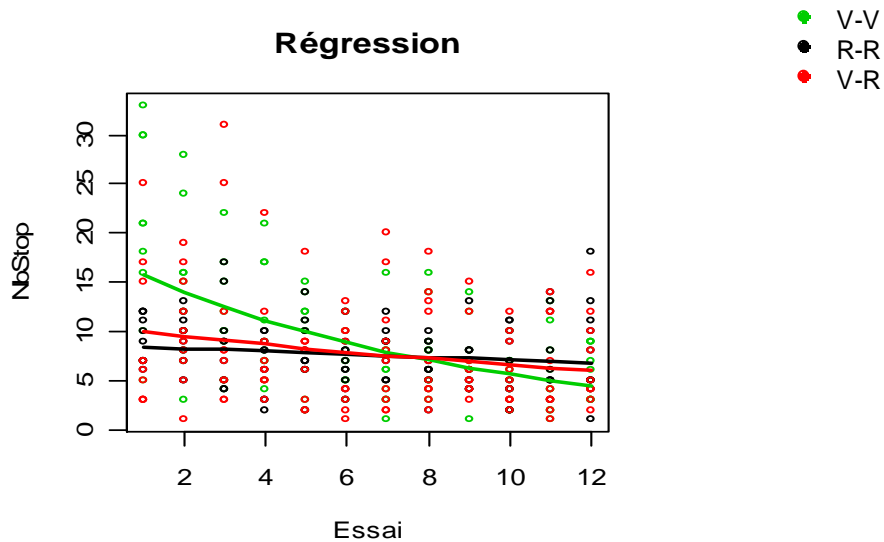


Figure 5-13 : Courbe de régression pour la variable « Nombre de stops ».

L'observation de la courbe de régression de la Figure 5-13 montre que le groupe V-V effectue un plus grand nombre d'arrêts lors des premiers essais, nombre qui diminue au fur et à mesure des essais pour finalement être moins élevé aux derniers que pour les deux autres groupes. Les groupes R-R et V-R sont relativement équivalents, le nombre de stops du groupe V-R étant légèrement supérieur au départ, pour être un peu moins élevé à la fin des 12 essais.

5.3.3.5. Nombre de marches arrière durant la mission

Le modèle retenu ici est le modèle A3 qui suppose que l'apprentissage se fait de manière différente selon les groupes (Figure 5-14).

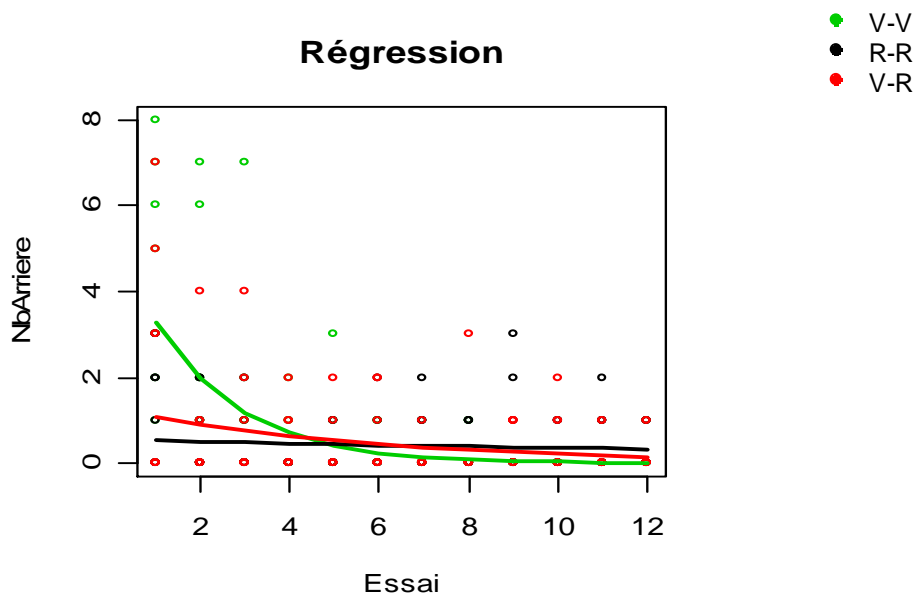


Figure 5-14 : Courbe de régression pour la variable « Nombre de marches arrière ».

Le groupe V-V présente un nombre de marches arrière plus important lors des premiers essais, que les groupes R-R et V-R, ce dernier étant très peu supérieur au groupe R-R. Puis, au fil des essais, c'est le groupe V-V qui présente le nombre de marches arrière le plus faible des

trois groupes, avec un nombre d'arrêts quasiment nul. Pour le groupe R-R on observe que le nombre d'arrêts est relativement identique tout au long de l'expérience, la courbe ne présente en effet qu'une très légère pente. Enfin le groupe V-R effectue un nombre d'arrêts un peu supérieur au groupe R-R en début d'expérience, nombre qui va en décroissant au cours du temps, pour finir légèrement inférieur au groupe R-R.

5.3.4. Discussion

L'objectif de notre expérience était de montrer un effet de transfert d'apprentissage entre la simulation du robot ARPH et son utilisation réelle.

L'évaluation du simulateur réalisée précédemment sur le simulateur du robot ne permettait pas de le valider. Les comportements observés en réel et en virtuel n'étaient pas les mêmes du fait d'une plus grande prudence des utilisateurs en réel. Des améliorations ont alors été apportées au simulateur : un son a été ajouté lorsque le robot heurte un obstacle; le pavé de commande caméra a été modifié; un mode de suivi automatique de la pince a été ajouté.

De plus, en virtuel comme en réel, lors de la présentation de l'expérience, l'expérimentateur, conseillait fortement d'éviter les chocs, et insistait pendant la démonstration sur les indices permettant de savoir si l'on est trop près ou non de l'obstacle. La position des objets à saisir ainsi que celle du robot ont également été modifiées. En effet, pour l'expérience précédente, une trajectoire rectiligne jusqu'aux casiers permettait de saisir les objets, ce qui semblait avoir joué sur les résultats obtenus. Ici, nous avons fait en sorte que ce ne soit pas le cas. Seule la mission C le permet, les autres missions obligent les opérateurs à déplacer le robot de manière latérale.

Concernant la variable « Durée », les résultats du groupe expérimental V-R montrent que les opérateurs, lorsqu'ils passent en situation réelle après six essais en situation virtuelle, mettent plus de temps que lors de la première phase, mais ils sont cependant plus rapides que ceux du groupe R-R lors de leur premier essai. Or, lors de la seconde phase, les opérateurs du groupe expérimental sont novices pour la situation réelle, tout comme l'étaient les opérateurs du groupe R-R en début d'expérience. Tout ceci va dans le sens de notre hypothèse, les temps étant améliorés en situation réelle par la formation en virtuel. On peut donc dire qu'il y a effectivement un effet de transfert d'apprentissage positif. De plus, le groupe V-R est aussi rapide que le groupe R-R lors de la seconde phase. Ces résultats nous indiquent que les individus du groupe V-R sont aussi bons que des utilisateurs considérés comme experts, puisque le groupe R-R a effectué six essais de plus dans cette situation. On observe donc ici un gain de temps considérable pour l'exécution d'une mission en réel suite à un apprentissage sur le simulateur du robot, et l'atteinte d'un niveau équivalent à celui d'un « expert » en situation réelle. La simulation permet aux opérateurs de développer des structures de buts [BOUR1996], qu'ils vont pouvoir utiliser de manière adéquate lors de la manipulation du véritable robot, sans avoir à mettre en place des processus de résolution de problème. Ce qui est transféré ici est une attitude de réponse (Montpellier, cité par Oléron, 1964) qui consiste à appliquer la solution efficace en situation virtuelle à la situation réelle qui lui est similaire.

L'apprentissage sur simulateur semble donc permettre aux opérateurs d'acquérir des habiletés quant à l'utilisation du robot qu'ils ont pu transférer lorsqu'ils sont passés en situation réelle. Ils ont alors les capacités nécessaires pour utiliser le robot dès leur premier essai en réel aussi bien que des opérateurs ayant déjà une certaine expérience. La formation en situation virtuelle leur permet d'être efficaces dès le départ avec le robot réel.

Comme les opérateurs du groupe V-R ont des temps, en situation réelle, équivalents à ceux du groupe R-R, ils ne semblent pas prendre plus de risques que ces derniers.

Cette première variable nous amène à faire plusieurs remarques. En effet, les résultats du groupe V-V nous montrent des temps qui ne vont pas dans le sens des performances attendues. Celles-ci auraient dû, lors la première phase, être équivalentes à celles du groupe V-R, étant donné que ces deux groupes commençaient en situation virtuelle. Or on constate qu'aux premiers essais, le groupe V-V met plus de temps pour accomplir les missions que le groupe V-R. Nous avons supposé que cette différence pouvait s'expliquer par la population des groupes. Les 10 sujets du groupe V-V étaient des étudiants de l'université de Rennes II, suivant un cursus de Psychologie tandis que les groupes V-R et R-R appartenaient au laboratoire IBISC. Les deux derniers groupes, de part leur formation dans des domaines relativement proches de celui dans lequel est développé ARPH, ont certainement des facilités comparés aux étudiants en psychologie de Rennes. Ils ont acquis des connaissances (en informatique, en réalité virtuelle) qui sont stockées en mémoire à long terme, et qui, lors de la confrontation à une situation nouvelle telle que la téléopération d'un robot, vont être sélectionnées pour résoudre un nouveau problème [GINE1997]. De plus, les étudiants du laboratoire IBISC se trouvaient dans la pièce utilisée et modélisé dans le simulateur. Ils avaient donc l'avantage d'une connaissance réelle de l'environnement.

Cependant, comme nous l'avons noté, tous les sujets étaient égaux par rapport à la manipulation du robot, ils devaient donc tous à apprendre à l'utiliser. On observe que les premiers essais sont plus difficiles pour le groupe V-V car ils sont confrontés à un type de situation totalement nouveau. Malgré tout, la prise en main est assez rapide et l'apprentissage se fait aisément, au point d'atteindre un niveau équivalent au groupe V-R dès le troisième essai.

Une autre remarque est à apporter concernant le radar. Celui-ci ne fonctionnait pas, ou mal, en situation réelle. Il a alors fallu mettre en place un autre moyen d'évaluation de la distance. Des franges en plastique dépassant de 20cm devant le robot ont été installées. Celles-ci se pliaient lorsqu'on arrivait trop près d'un l'obstacle et indiquaient ainsi que le robot s'en trouvait à un peu moins de 20cm. Grâce à ce stratagème, les sujets pouvaient estimer la proximité des casiers et avançaient petit à petit jusqu'à ce qu'ils estiment en être suffisamment proche. Cette différence entre situation virtuelle et situation réelle aurait pu poser problème au groupe V-R lors de leur passage de la situation virtuelle à la situation réelle. En effet la source d'information concernant la proximité aux casiers n'était plus la même. On avait donc ici un même indice (la proximité) pour deux sources d'information différentes (le radar et les franges). Cependant, les résultats nous montrent que le groupe V-R met le même temps que le groupe R-R lors de la seconde phase, alors que ces derniers n'ont eu que les franges comme source d'information. Les sujets du groupe V-R ont donc su s'adapter à cette source d'information différente afin d'évaluer la proximité du robot par rapport aux casiers. Cette remarque nous permet alors de noter que cette proximité est un indice pertinent pour la mission, car il permet de savoir si l'on est assez près pour manipuler le bras et aller saisir l'objet. L'observation des comportements des sujets nous permet de constater qu'ils amènent le robot à proximité des casiers, puis, se basant sur l'information fournie, en virtuel par le radar et en réel par les franges, ils avancent par à-coups jusqu'à être à une distance qu'ils estiment correcte pour saisir le stylo. Un exemple particulier d'un sujet en situation virtuelle nous le confirme : afin d'évaluer la proximité, plutôt que d'utiliser l'information donnée par le radar, il plaçait le bras légèrement en avant du robot sans pour autant le tendre complètement et l'abaissait devant lui pour voir si le bras touchait ou non le bord du casier. S'il n'y avait pas contact, le sujet faisait avancer de nouveau le robot

lentement, et ainsi de suite. Quand le bras touchait le bord du casier, le sujet ne manipulait plus que celui-ci pour aller saisir le stylo. Cet indice informe donc sur le bon positionnement du robot en fonction de la proximité de l'objectif. On peut alors en déduire que l'habilité à positionner le robot de manière pertinente pour la saisie d'un objet peut être acquise lors de l'apprentissage sur le simulateur et être transférée en situation réelle, même si la source d'information de l'indice est différente. Selon [GRAU1998], si ce transfert d'habileté n'avait pas lieu, l'opérateur en situation réelle serait gêné par ce qu'il a appris avec le simulateur. On observerait alors une diminution de l'efficacité, qui serait caractérisée dans le cadre de la variable « Durée » par une augmentation des temps, on parlerait alors d'inhibition proactive, donc de transfert négatif [TOUP1995]. Or les résultats obtenus montrent bien un transfert positif entre la situation virtuelle et la situation réelle. Le simulateur permet donc effectivement d'acquérir l'habilité nécessaire pour placer le robot à proximité des casiers. Celle-ci est transférable en situation réelle même si certains indices sont différents entre les deux conditions.

Une dernière remarque concerne le retour vidéo, qui présentait un temps de latence (de 100 à 200ms) en situation réelle qu'il n'y avait pas en situation virtuelle. Comme nous l'avons vu concernant le problème avec le radar, cela aurait pu poser problème pour le groupe V-R lors de son passage de la situation virtuelle en situation réelle. Les performances de temps étant équivalentes à celles du groupe R-R semblent indiquer que les sujets ont su s'adapter à cette contrainte.

Pour ce qui est de la variable « Orientation », les résultats nous indiquent qu'il n'y a pas d'effet d'apprentissage. Pour tous les sujets, quel que soit le groupe, il n'y a pas de différence statistique quant à l'orientation du robot pour la saisie. Il semble donc que de manière « naturelle » les sujets positionnent le robot face aux casiers. Contrairement à notre hypothèse, les opérateurs ayant reçu une formation sur le simulateur ne sont pas mieux orientés en situation réelle que des opérateurs qui n'ont manipulé que le robot réel. Puisque l'orientation est relativement identique pour tous tout au long des essais, il n'y a donc pas d'amélioration des performances ni d'apprentissage [TOUP1995].

Pour la variable « Nombre de stops », on ne peut pas non plus parler de transfert d'apprentissage positif. En effet, la différence entre les groupes V-R et R-R n'est pas significative. On observe ici un effet d'apprentissage, au fur et à mesure des essais, qui est relatif à chaque groupe. L'efficacité n'étant ni améliorée ni diminuée, les effets de l'apprentissage avec le simulateur sur l'utilisation du robot réel sont neutres [TOUP1995]. À noter un nombre plus important d'arrêts de la part des sujets du groupe V-V jusqu'au 7^{ème} essai. Cette différence peut s'expliquer par la même raison invoquée pour la variable « Durée » concernant les temps supérieurs de ce même groupe lors de la première phase. En effet, la difficulté en début d'expérience semble plus importante pour le groupe V-V dont la population a une formation différente que celle des deux autres groupes qui est relativement proche du domaine de notre étude. Enfin, pour ce qui est de la variable « Nombre de marches arrière », on peut également dire qu'il y a une absence de transfert puisque l'apprentissage est différent selon les groupes. L'hypothèse pour cette variable, qui était que les opérateurs ayant effectué un apprentissage avec le simulateur devraient faire moins de marches arrière que des opérateurs qui n'ont utilisé le robot qu'en situation réelle, n'est pas vérifiée.

Ces résultats nous permettent de constater un effet de transfert positif d'apprentissage entre la formation en simulation et l'utilisation réelle du robot, mais uniquement en ce qui concerne le temps. La simulation permet aux opérateurs d'acquérir les habilités requises à l'utilisation du robot, ainsi que de les transférer lors de son utilisation réelle. Les opérateurs ont appris à

manipuler le robot, à utiliser l'interface de commande et à y trouver les indices pertinents pour une bonne utilisation du robot, et ce, comme nous avons pu le voir concernant le radar, alors que les sources d'informations de l'indice « proximité » étaient différentes entre les deux situations. Les résultats montrent bien que la simulation permet d'apprendre aussi bien qu'en situation réelle et de savoir le manipuler sans pour autant prendre plus de risques.

En effet, seulement six essais en situation virtuelle ont permis aux sujets d'être aussi efficaces, en terme de temps, lors de leur première utilisation du robot en réel que des sujets en étant déjà à leur septième essai ; et ce aussi bien en ce qui concerne le temps pour lequel on observe un transfert d'apprentissage positif qui semble relativement important, que pour le nombre de marches arrière, le nombre d'arrêts et l'orientation du robot, variables pour lesquelles on observe une absence de transfert mais des performances équivalentes.

5.4. Conclusion

L'objectif de ce chapitre était d'évaluer le simulateur du robot d'assistance ARPH.

Deux aspects dépendants ont été traités. Dans un premier temps, nous avons comparé le comportement d'utilisateurs entre une situation virtuelle et une situation réelle. Les résultats montrent que l'opérateur est plus rapide en situation virtuelle mais qu'il prend plus de risques impliquant un plus grand nombre de collisions entre le robot et l'environnement. Il est intéressant que l'opérateur aille plus vite dans le cadre de l'apprentissage. Mais ce gain ne doit pas se faire au détriment de la sécurité. A l'issue de cette première évaluation, nous avons proposé une amélioration du simulateur. Pour limiter le nombre de collisions, nous avons ajouté un retour sonore en cas de choc avec l'environnement et donné la consigne de réduire au minimum le nombre de collisions. Le signal sonore renforce la sensation de présence.

Dans un second temps, la première évaluation ayant conduit à apporter certaines modifications au simulateur pour en améliorer les fidélités fonctionnelles et psychologiques, nous avons montré qu'il y avait un transfert d'apprentissage effectif et positif entre situations simulée et réelle.

Ce résultat permet d'envisager un apprentissage de l'usage de ARPH via l'utilisation du simulateur. Un tel outil permet de:

- Varier les situations et proposer des cas limites.
- Eliminer le danger pour la personne, son environnement et le robot
- Procéder à un processus itératif de type essai-erreur-correction et, cela, sans nuire à la confiance de l'utilisateur dans ses capacités à contrôler le système réel.
- Apporter un niveau d'expertise équivalent avec un temps d'apprentissage nettement inférieur comparé au réel.
- Simplifier la logistique car le simulateur s'exécute sur un ordinateur standard et il n'y a donc pas lieu de déplacer la personne ou le robot pour les évaluations.
- Augmenter la validité statistique des résultats en déployant le simulateur à grande échelle.
- Evaluer le degré d'utilité de l'aide avant une prescription effective du système réel par le thérapeute.

L'apprentissage est un élément important. Quel que soit son objectif, un utilisateur humain en situation de coopération avec une machine, dans notre cas le robot, a besoin d'acquérir certaines connaissances technologiques nécessaires à la construction d'une représentation du robot et de sa commande. Ce degré de connaissance a un effet sur son degré de confiance dans ses capacités à maîtriser ou non l'aide technique [GAIL2002]. Ceci a été vérifié par [GAIL1979A] dans le cas de la commande d'une téléthèse par une personne tétraplégique. Le programme d'apprentissage comportait une première phase de présentation de photos et schémas du matériel utilisé au domicile de la personne. Ensuite, l'évaluateur donnait des explications techniques portant sur le fonctionnement de la téléthèse. Un protocole d'apprentissage systématique a été construit, visant une formation progressive et simultanée des notions théoriques de base et des mouvements nécessaires à la commande de la téléthèse. A l'issue de 17 heures d'apprentissage, le sujet pouvait contrôler et commander la téléthèse sans difficulté pour exécuter des tâches de précision [GAIL2002].

L'effet de transfert que nous avons observé pourrait encore être amélioré. Au début de l'évaluation, l'expérimentateur ne faisait qu'expliquer comment manipuler le robot grâce à l'interface, sans jamais donner de conseils. Or, comme nous l'avons vu, la présence d'un formateur peut faciliter l'acquisition des habilités et des connaissances, en indiquant quels indices chercher, quelles sont les informations pertinentes, en donnant des conseils aux opérateurs. Cela permettrait, lors de la formation en simulation, d'acquérir plus rapidement les habilités requises, et seulement celles-ci, pour l'utilisation du robot en situation réelle.

Le transfert de compétences avéré entre situations réelles et virtuelles permet de considérer l'utilisation du simulateur dans un processus de conception itératif de certaines classes de systèmes complexes innovants. L'assistance robotisée, dont la conception est soumise à des contraintes spécifiques, en est un exemple. C'est l'objet du chapitre suivant qui propose une adaptation de la CCU. [GAIL1979B] a montré que le rapport entre le bénéfice et le coût de l'utilisation d'une aide technique détermine son acceptation ou son rejet. Faire participer l'utilisateur le plus tôt dans le processus de conception est un moyen de répondre au mieux aux attentes de l'utilisateur et d'augmenter son degré de satisfaction. Ce critère est considéré par les ergonomes, avec l'efficacité et l'efficience, comme l'un des trois critères de l'acceptabilité. L'utilisation d'un simulateur est un élément de réponse à l'un des problèmes principaux de la mise en œuvre de la CCU, à savoir l'évaluation d'un prototype à chaque itération du cycle de développement.

6. Conception Centrée Utilisateur

Les résultats obtenus au chapitre précédent ont permis de valider le simulateur ARPH. Les comportements sont similaires en condition virtuelle et en condition réelle. De plus les résultats montrent un transfert de compétences positif entre les deux conditions. Cette propriété nous a permis de revisiter la conception centrée utilisateur en tenant compte des contraintes spécifiques de l'objet conçu, innovant et complexe, et du cadre applicatif du handicap, personnes peu disponibles et donc difficilement mobilisables pour effectuer des évaluations longues et répétitives.

Dans ce chapitre, nous présenterons tout d'abord les méthodes de conception les plus utilisées dans l'industrie en décrivant leurs avantages et leurs limites. Dans un second temps, nous détaillerons les exigences à satisfaire dans le cadre de la conception d'un produit complexe et innovant. Enfin, nous présenterons une adaptation Conception Centrée Utilisateur répondant au mieux à ces contraintes (CCUSC : Conception Centrée Utilisateur pour Systèmes Complexes).

6.1. Démarches de conception et de développement

Le premier cycle de développement utilisé fut le cycle en cascade (Figure 6-1). Ce cycle formalisé en 1970 nous vient du bâtiment qui prenait pour hypothèse le fait qu'on ne pouvait construire la toiture avant les fondations. Ce cycle se découpe en étapes. On ne passe à l'étape suivante que lorsque la précédente est terminée. À chaque étape peuvent être associées une production et une responsabilité humaine. L'inconvénient de ce cycle de développement est la grande difficulté de faire marche arrière. Si une erreur a été commise en amont, il faut alors revenir à l'étape mise en cause et refaire toutes les suivantes. Ce cycle définit clairement le calendrier du projet en imposant des livrables à des dates précises pour chaque étape.

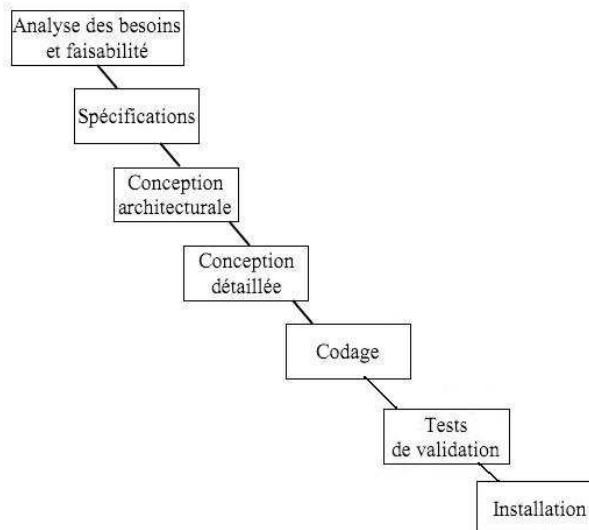


Figure 6-1 : Cycle en cascade

Pour éviter d'avoir à remonter toutes les étapes, le cycle en V (Figure 6-2) est introduit en 1980. Il a la particularité de commencer à prévoir ce que seront les étapes finales dès les étapes en amont. Les phases montantes de test sont « parallélisées » aux étapes descendantes de conception. Ceci a pour avantage de permettre une détection de défaut et la possibilité de

correction d'erreurs bien plus tôt qu'avec le cycle en cascade. Ce cycle est couramment utilisé dans l'industrie lourde (création d'un prototype, de moule) ou sur de grands projets. En effet, étant donné les coûts et les ressources mises en jeu, on préfère s'assurer avec soin que les étapes descendantes sont validées avant le codage/réalisation proprement dit.

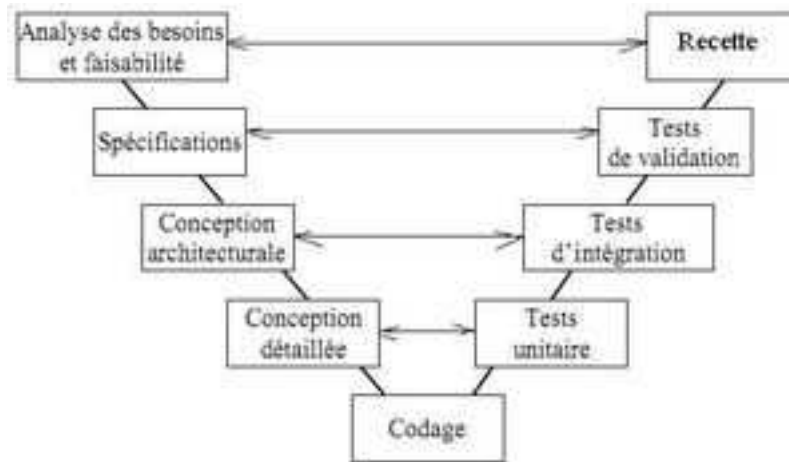


Figure 6-2 : Cycle en V

Le cycle de développement en spirale (Figure 6-3) a été introduit en 1988 par B. Boehm [BOEH1988]. Il introduit un élément important pour les projets à haut risque en introduisant la notion d'analyse de risque.

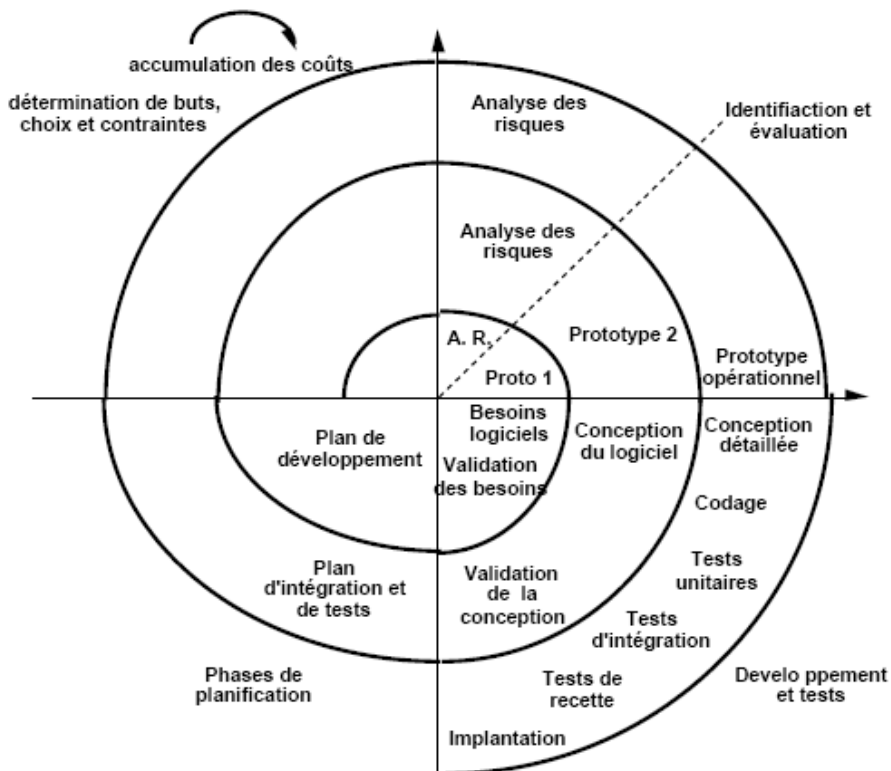


Figure 6-3 : Cycle en spirale

Ce cycle de développement se greffe autour d'un modèle en cascade ou en V. La figure Figure 6-3 présente les trois itérations nécessaires à la bonne conduite d'un projet logiciel. La première itération consiste en une analyse des besoins et sa validation. La deuxième s'oriente sur la conception du logiciel et sa validation. Enfin, la troisième porte sur la conception détaillée, la réalisation et la validation du logiciel. Chaque cycle intègre une analyse de risque avant la réalisation d'un prototype. Le cycle en spirale est couramment utilisé dans les entreprises de petite taille ou la réactivité est très forte (notamment géographiquement), c'est à dire dont la structure permet de remanier une conception sans engager de protocoles organisationnels importants. Il est peu utilisé dans l'industrie lourde hormis dans de rares cas où l'analyse du risque est prépondérante comme par exemple dans le domaine des semi-conducteurs ou la conception de chaînes de fabrication robustes et génériques est particulièrement difficile à mettre en œuvre [WECK1999].

Le cycle de développement itératif est basé sur le cycle en spirale. Le nombre de cycles n'est plus limité à trois. Il est possible d'effectuer plusieurs itérations sur chacun si le prototype correspondant ne satisfait pas aux exigences définies au départ. Ce type de démarche permet de proposer des alternatives ou de nouveaux objectifs pour le cycle suivant. On limite en général la durée de chaque cycle à huit semaines. Ce modèle est peu envisageable dans les grosses structures ou lors de projets à long terme qui nécessitent parfois six mois voire un an avant de pouvoir revenir sur les phases d'analyse du besoin.

On trouve aussi la démarche ergonomique utilisée particulièrement pour la conception des interfaces homme machine (IHM) et des postes de travail [INRS1993]. On ne se limite plus simplement à l'analyse de la tâche mais aussi à l'analyse de l'activité et des conduites opératoires. Ces analyses permettent de mettre en évidence les modes de fonctionnement des opérateurs et les représentations mentales mises en œuvre pour traiter ces tâches. Cette méthode permet ensuite de formuler des hypothèses qui seront validées afin de proposer des mesures d'amélioration de la situation de travail.

La démarche HCI présentée sur la Figure 6-4 (Human-Computer Interface) et introduite en 1997 [HOLD1997] met l'accent sur le prototypage rapide des interfaces et de ses nombreuses évaluations par les utilisateurs. Elle propose, après l'analyse du besoin, un processus itératif de prototypage/évaluation d'interface utilisateurs. Ce type de démarche autorise un grand nombre de prototypes à évaluer.

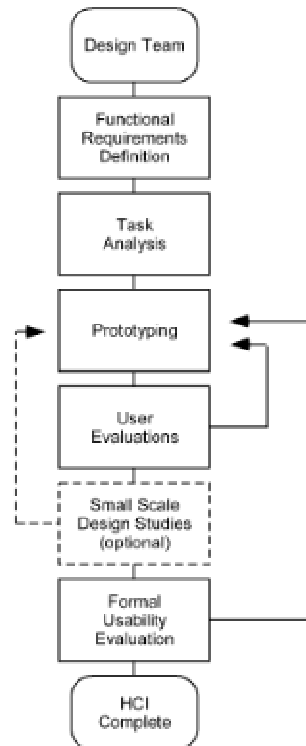


Figure 6-4 : Cycle HCI

Les cycles en cascade et en V portent leurs efforts sur les phases « amont ». Les erreurs d'évaluation et de conception dans ces phases seront catastrophiques pour le projet. Le cycle en spirale introduit la notion de risque et l'on commence à entrevoir la possibilité de considérer l'erreur humaine comme étant un risque non maîtrisé dans le cycle de conception. C'est l'homme qui décidera si un produit lui est utile, bénéfique, en d'autres termes si ce produit est efficace pour la tâche qu'il veut réaliser. Des démarches de développement comme HCI se centrent pleinement sur l'utilisateur mais restent limitées à la conception d'interface.

En parallèle de ces démarches s'est développé un standard de « règles » maximisant les chances d'aboutir à un produit informatique adapté au besoin de l'utilisateur. La norme ISO 13407 [STDISO1999] place donc l'utilisateur au centre du processus de conception. Elle fait état des démarches à mettre en œuvre pour intégrer l'homme tout au long du cycle de développement.

« Les utilisateurs finaux sont les mieux placés pour évaluer et influencer le développement d'un produit. Si le produit final correspond à leurs besoins, envies et caractéristiques, il aura toutes les chances d'être adopté. Et c'est bien le but ultime de tout produit. La conception centrée utilisateur impose que le développement du produit doit être guidé par les besoins des utilisateurs plutôt que par les possibilités technologiques » [STDISO1999].

Cinq principes sont nécessaires à la mise en œuvre de cette norme :

- Une préoccupation amont des utilisateurs, de leurs tâches et de leur environnement
- La participation active de ces utilisateurs, ainsi que la compréhension claire de leurs besoins et des exigences liées à leurs tâches

- Une répartition appropriée des fonctions entre les utilisateurs et la technologie (coopération homme machine)
- L'itération des solutions de conception : on peut s'imaginer le cycle comme une spirale, une démarche qui boucle et reboucle jusqu'à ce que le système satisfasse aux exigences définies au départ.
- L'intervention d'une équipe de conception multidisciplinaire.

A l'heure actuelle, les démarches qui tentent de mettre l'utilisateur dans le cycle de développement restent limitées à l'ergonomie [MAHD2006], que ce soit pour les interfaces logicielles ou pour des postes de travail. Dans le cadre de notre étude nous désirons étendre ces cycles de conception non seulement en intégrant plus efficacement l'homme mais aussi en proposant un cycle de développement adapté à des produits complexes. Nous entendons par complexe un produit à composantes matérielle(s) et logicielle(s) nécessitant une grande multidisciplinarité (mécanique, informatique, électronique, automatique, ergonomie ...). Nous nous intéresserons donc à une nouvelle méthode de conception centrée utilisateur pour systèmes complexes permettant de pallier les lacunes présentées ci dessus.

6.2. CCUSC (Conception Centrée Utilisateur pour Systèmes Complexes)

Dans un premier temps nous exposerons les exigences auxquelles devra répondre cette démarche. Dans un second temps, nous présenterons la démarche, les contraintes d'utilisations, ses avantages et enfin nous terminerons par une étude de cas sur le projet ARPH.

6.2.1. Exigences

Les exigences à satisfaire sont les suivantes :

- Réduire les coûts et les délais

La démarche devra permettre la réduction des temps de cycles. Dans la conception de systèmes complexes, le prototypage est à l'origine de coûts matériels importants que nous désirons limiter au maximum.

- Autoriser une définition incomplète des besoins en début du projet

Nous nous intéressons à la conception de systèmes pour lesquels les besoins ne sont pas complètement définis en début du projet. En effet, malgré l'existence de méthodes permettant d'analyser avec finesse les attentes d'un futur utilisateur, il est évident que, si le produit est innovant, les besoins vont évoluer avec la représentation que se fera l'utilisateur des possibilités du produit au fur et à mesure du processus de conception.

- Permettre l'identification la plus complète possible des besoins de l'utilisateur au cours du cycle de développement en l'incluant dans toutes les phases du projet pour évaluer les solutions proposées à un niveau aussi bien conceptuel que fonctionnel.
- Améliorer la coopération homme machine

En mettant l'utilisateur au cœur du processus de conception, nous espérons pouvoir améliorer de manière significative l'efficacité du système en proposant un contrôle du système basé, au maximum, sur des processus d'assimilation.

- Répondre aux attentes d'utilisateurs aux caractéristiques hétérogènes

D'après les thérapeutes, chaque individu est un cas particulier. Le produit conçu devra pouvoir s'adapter aux besoins variables de chacun.

- Assurer la validité des évaluations

Le prototypage coûte cher et la multiplication d'un prototype à un état donné est rarement envisageable. Il est alors difficile de valider statistiquement les résultats d'évaluations.

- Gérer l'hétérogénéité des composants

La réalisation d'un système alliant mécanique, électronique, informatique pose un problème d'intégration de composants hétérogènes. Chaque constructeur possède ses normes et l'interopérabilité n'est pas toujours prévue.

Le plus important est de faire participer l'utilisateur dans tout le processus de conception du produit. Nous désirons, avec lui, être en mesure de valider des fonctions mais également des concepts. Un concept est une capacité du système et une fonction est l'implémentation de ce concept en réel. Prenons par exemple le concept de manipulation permettant la saisie d'objet. La fonction l'instanciant pourrait être l'utilisation d'un bras manipulateur.

Nous nous plaçons du point de vue de la conception de produits innovants. Nous distinguons ainsi l'évaluation du concept et l'évaluation de la fonction. Pour valider le concept, il est nécessaire de placer l'utilisateur dans une situation telle qu'il puisse en saisir l'intérêt. Dans le cas de la fonction, il est impératif d'approcher la réalité. Ainsi, l'utilisateur peut appréhender les limites, physiques, technologiques..., apportées par la réalisation du concept. L'intérêt de cette distinction est, au départ, de vérifier si l'utilisateur a l'usage du concept et ensuite si la fonction réalisée répond correctement à ses attentes. Cela impose donc la construction d'au moins un prototype réel pour la validation des fonctions à chaque cycle d'itération. Ceci implique de pouvoir présenter à l'opérateur un produit intermédiaire qui fait cohabiter concept et réalité matérielle.

Les techniques de réalité virtuelle permettent d'évaluer des concepts puis, à moindre coût, différentes fonctions le mettant en œuvre. Le coût de développement d'un prototype virtuel est fortement réduit comparé au développement d'un prototype réel fiable et sécurisé. Dans l'exemple précédent, nous pourrions simplement modéliser une main dans un environnement virtuel. L'utilisateur peut alors déplacer la main vers l'objet, puis, cliquer sur l'objet qui est alors automatiquement saisi. L'évaluation de la fonction relative est plus compliquée car elle nécessite la modélisation d'un bras manipulateur et des schémas de commande du système.

Le prochain paragraphe propose une démarche de Conception Centrée Utilisateur pour Systèmes Complexes (CCUSC), mettant en œuvre des techniques issues de la RV.

6.2.2. Présentation de la méthode

La CCUSC s'appuie sur le cycle de conception en spirale et HIC. Elle utilise les outils technologiques disponibles actuellement tels que RV et RA et développe le modèle en spirale « traditionnel » sur une troisième dimension afin d'intégrer ces notions de réel et de virtuel. Ce modèle est présenté sur la Figure 6-5.

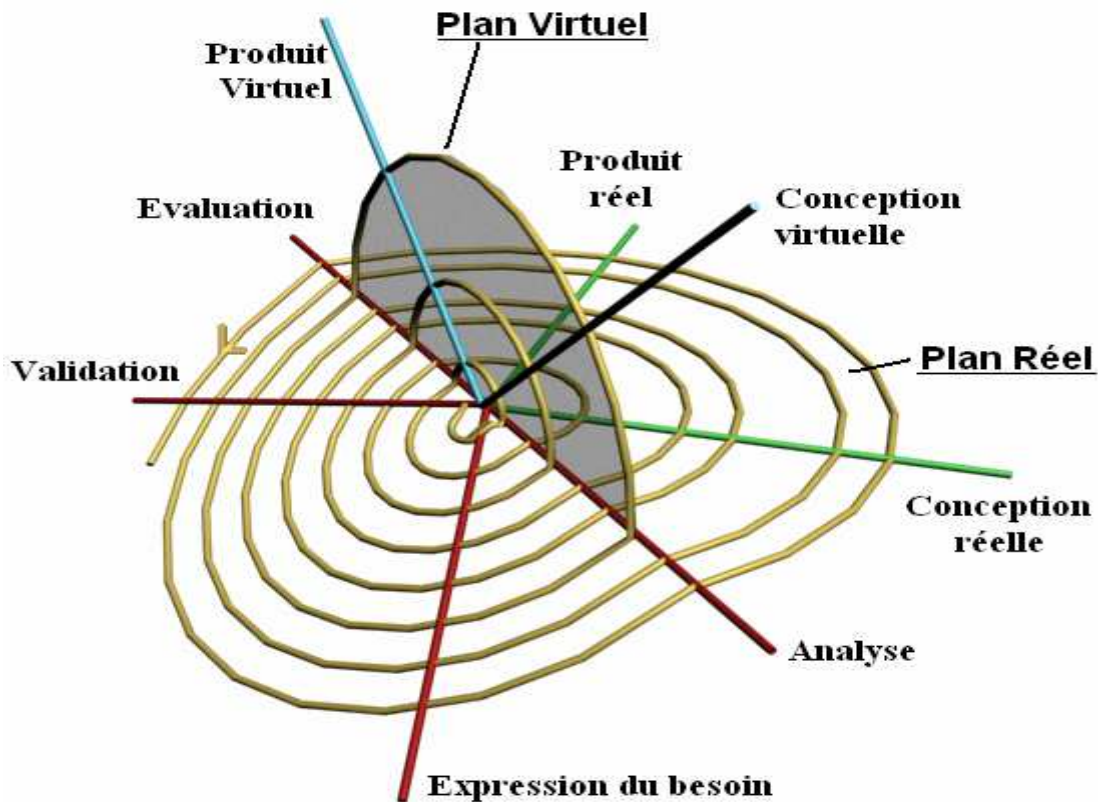


Figure 6-5 : Cycle CCUSC

On retrouve le schéma classique commençant par l'expression du besoin et se terminant par la validation du produit en passant par les phases de conception, de réalisation, de tests ou d'évaluation. Les étapes de conception et de production peuvent être réalisées dans un plan virtuel ou dans plan réel. Les étapes d'expression et de validation par l'utilisateur sont communes aux deux plans. La validation permet de vérifier, soit qu'un concept correspond bien à l'usage attendu, soit que la fonction associée répond bien aux attentes initiées par le concept. Les étapes d'analyse et d'évaluation représentent l'axe charnière entre le plan virtuel et le plan réel. C'est lors de l'analyse que le choix entre le plan virtuel et le plan réel est fait. Les deux plans se rejoignent à l'étape d'évaluation. Le plan horizontal est l'utilisation traditionnelle du modèle « spirale » ; il représente la production d'un produit réel. Le plan vertical est la conception d'un produit virtuel. À chaque itération, après les phases d'expression du besoin et d'analyse, nous avons le choix entre un cycle de prototypage rapide (virtuel) et la production d'un prototype réel. Entre ces deux plans, il y a l'espace de réalité mixte qui nous permet de présenter un produit combinant virtualité et réalité.

Prenons l'exemple d'un concept de main capable de se déplacer dans un environnement.

- Étape 1 : Le premier cycle de conception se déroule dans un plan complètement virtuel: on représente une main virtuelle qui se déplace dans un environnement virtuel. L'objectif de la première évaluation est de vérifier si l'utilisateur en a l'usage.
- Étape 2 : Une fois le concept validé, on cherche à identifier les fonctions nécessaires à sa mise en œuvre. Dans notre exemple, les fonctions principales associées sont la mobilité et la manipulation.

- Étape 3 : Le deuxième cycle, dont l'objectif est de concevoir l'une des deux fonctions, la mobilité par exemple, se déroule aussi dans un plan complètement virtuel. On propose différentes solutions virtuelles qui sont évaluées par les utilisateurs. Ces solutions prennent en compte certaines contraintes physiques, technologiques...
- Étape 4 : La solution virtuelle la plus pertinente est réalisée dans le plan réel donnant lieu au développement d'un prototype réel. Celui-ci est ensuite évalué par les utilisateurs.

Cette démarche simplifiée en quatre étapes induit un certain nombre de remarques.

- Les cycles des étapes 1 et 3 peuvent faire l'objet de plusieurs itérations.
- A chaque étape, un retour en arrière est possible. Par exemple, si le prototype réel de l'étape 4 ne donne pas satisfaction, on peut revenir à l'étape 3 pour affiner la conception.

Nous allons maintenant nous attacher au développement de la fonction manipulation. Deux voies s'offrent à nous selon que l'on parte de l'étape 3 ou de l'étape 4. Dans le premier cas, on utilise la fonction mobilité virtuelle retenue et on y ajoute la fonction de manipulation virtuelle. On dispose alors d'une solution entièrement virtuelle d'implantation du concept. Dans le second cas, on utilise la fonction de mobilité réelle de l'étape 4 sur laquelle on implante la fonction de manipulation virtuelle. Nous allons développer cette seconde voie dans les étapes 5 et 6.

- Étape 5 : Ce troisième cycle se déroule maintenant dans un plan de réalité mixte. On peut implanter sur le prototype réel de la fonction mobilité plusieurs solutions virtuelles de la fonction manipulation.
- Étape 6 : La solution mixte la plus pertinente donne lieu à l'évolution du prototype réel initial auquel on a ajouté la fonction manipulation réelle. Celui-ci est de nouveau évalué par les utilisateurs.

Nous avons vu qu'il existait deux façons d'évaluer une fonction, la simulation ou la production d'un prototype réel :

- La simulation validera un objet simplifié : structure et IHM. Cette phase est essentielle car elle permet de mettre l'objet en situation, d'un point de vue concepteur mais aussi utilisateur. Ainsi, concepteur et utilisateur appréhendent mieux les difficultés et les limites des diverses solutions.
- L'évaluation d'un prototype réel intègre les contraintes non prises en considération précédemment (réalité, technologies, réutilisation, coût, entretien...). L'avantage est de pouvoir confronter l'utilisateur avec un objet en interaction avec son environnement et soumis aux lois de la physique (accélération, glissade...). Il est plus facile de mettre un opérateur en situation lorsque que celle-ci contient des éléments réels (notamment pour la vidéo).

Si l'on peut décomposer le concept en plusieurs fonctions comme dans l'exemple du concept de la main virtuelle qui se décline en deux fonctions : mobilité et manipulation, nous pouvons itérer dans un espace de réalité mixte. Lorsque le nombre de fonctions est important, le plan mixte est au départ un plan de virtualité augmentée (beaucoup de virtuel et peu de réel) puis devient, au fur et à mesure de l'avancement du projet, un plan de réalité augmentée (beaucoup de réel et peu de virtuel) avant de se confondre avec un plan totalement réel. Finalement, nous construisons un produit innovant à partir d'un objet complètement virtuel en remplaçant graduellement les concepts par les fonctions virtuelles associées, puis, par les fonctions

réelles. Le processus se termine lorsque le produit est entièrement réel et validé. Cette utilisation « traditionnelle » de la CCUSC est schématisée sur la Figure 6-6.

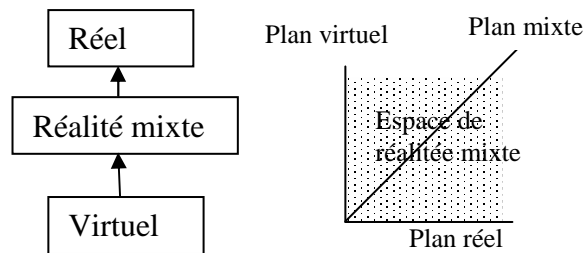


Figure 6-6 : Utilisation traditionnelle de la CCUSC

L'application de cette démarche ne se limite pas à son utilisation dès la définition du concept de l'objet innovant. Il est possible de la mettre en œuvre soit en cours de conception, soit quand il y a nécessité de faire évoluer un produit. Dans le premier cas, si la conception du produit a débuté sur un plan réel, on peut supposer que l'on dispose d'un prototype plus ou moins finalisé du produit. Si celui-ci n'a pas donné satisfaction lors des évaluations, il est possible de revenir sur un plan virtuel pour affiner le concept (Figure 6-7 a). Dans le cas où celui-ci est satisfaisant, on peut réitérer sur un plan mixte afin d'ajouter au prototype réel les concepts non encore finalisés (Figure 6-7 b). Dans le cas où l'on désire faire évoluer un produit, on peut suivre le même raisonnement. Si le besoin d'évolution du produit est important, on peut itérer sur un plan virtuel. Si cette évolution concerne l'ajout de fonctions élémentaires, on itère sur un plan de réalité mixte.



Figure 6-7 : Utilisation étendue de la CCUSC

Que l'on conçoive ou que l'on apporte des modifications à un produit, il est possible que l'utilisation de parties matérielles déjà commercialisées soit nécessaire pour diverses raisons (fiabilité, coûts ...). La virtualité augmentée permet d'intégrer dans une scène virtuelle les propriétés dynamiques réelles de ces objets tout en ne les modélisant que très simplement (au niveau visuel) dans le monde virtuel. On pourrait imaginer que, dans notre exemple, le bras manipulateur soit imposé pour des raisons de coûts de développement. Dans ce cas, on peut modéliser la structure géométrique du bras pour l'intégrer sur une base mobile virtuelle. En parallèle, on utilise un bras réel fixé sur un socle quelconque non mobile dans le monde réel. Lorsque l'utilisateur pilote le bras sur l'interface, il contrôle le bras réel. Le retour capteur réel est ensuite utilisé dans le monde virtuel pour obtenir une visualisation correcte en tenant compte des véritables valeurs articulaires du bras manipulateur réel. Cette méthode présente deux avantages. Premièrement, il n'est pas nécessaire de modéliser les propriétés dynamiques du bras. Deuxièmement, en fixant le bras réel dans un espace dégagé, on élimine le risque de collision. On a ainsi un bras dynamiquement réaliste dans un environnement virtuel qui, lui, peut être encombré et cela sans risque pour le matériel réel. On a donc des propriétés dynamiques (difficiles à modéliser en virtuel) qui peuvent se greffer dans des environnements

virtuels très variés et pouvant donc mettre l'utilisateur dans un grand nombre de situations d'évaluations n'existant pas forcément dans le monde réel.

La Figure 6-8 résume les différentes approches présentées ci-dessus. On y retrouve l'utilisation de la CCUSC débutant par un concept ainsi que son utilisation étendue partant d'un produit réel nécessitant des évolutions. Ce schéma montre bien que la CCUSC n'est pas limitée à passer du virtuel au réel. L'utilisation de la CCUSC étendue permet de faire des bouclages entre virtuel et réel au cas où un prototype réel en cours de conception serait nécessaire. De plus, même le produit virtuel est validé, il est possible de réitérer sur un plan virtuel si le choix technologique instanciant en réel la fonction virtuelle n'est pas satisfaisant. Il est aussi possible de revenir en arrière sur un plan de réalité mixte.

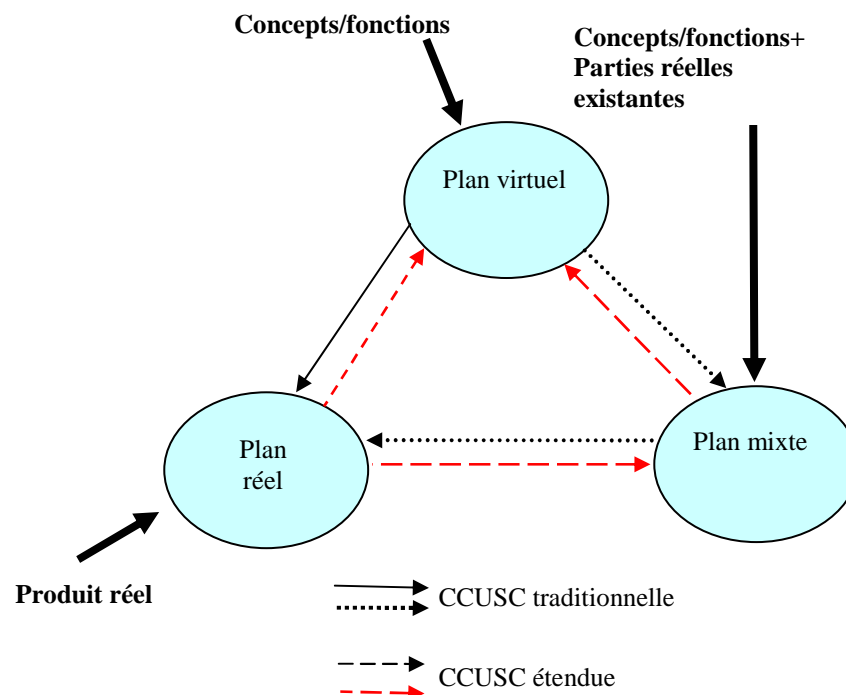


Figure 6-8 : Mise en œuvre de la CCUSC

6.2.3. Avantages et conséquences

En itérant autant que possible sur le plan virtuel, nous réduisons fortement le nombre de prototypes réels. La vision est le sens humain le plus riche en informations. Cela justifie notre choix de nous limiter à l'approche visuelle sur le plan virtuel. Généralement il n'est pas simple de valider l'utilisation qui sera faite d'un produit en employant seulement la réalité virtuelle. Le coût d'un simulateur hyperréaliste modélisant environnements, dynamique et comportements humains est sans limites. Les systèmes de réalité virtuelle exigent un équipement cher pour obtenir des degrés d'immersion et de présence proche de réalité, et donc difficile à reproduire et à déplacer. Ainsi, la simulation à coût réduit offre l'avantage de pouvoir être distribuée à un grand nombre de personnes et de faciliter ainsi les évaluations. Par la même, nous augmentons la validité statistique des résultats des évaluations.

D'un point de vue du projet, l'utilisation du virtuel permet de faire face plus facilement à des modifications du cahier des charges pendant le cycle même de la conception. Une

modification, même mineure, sur un prototype réel a un impact important. En virtuel, cet impact est moindre.

Dans le chapitre précédent nous avons validé un transfert de compétences positif entre une simulation et le réel, or, pour un utilisateur handicapé, la formation à l'utilisation d'un système complexe est l'une des principales difficultés. Nous pouvons, en suivant cette démarche CCUSC, planifier un apprentissage itératif du système en même temps que nous itérons sur des cycles de conception. Ainsi, l'utilisateur impliqué dans la démarche peut prendre en main le système en intégrant petit à petit les compétences requises jusqu'à un niveau d'expertise élevé en fin de conception. De fait, l'utilisateur est au départ confronté à un concept, puis avec un objet simple et enfin au produit final. Ainsi, à chaque phase d'évaluation correspond un simulateur. L'outil d'apprentissage disponible en fin de conception n'est plus un seul simulateur mais toute une panoplie de simulations retraçant l'évolution du produit, du concept à la réalité. Or, le système est complexe et son assimilation n'est pas immédiate. Nous émettons l'hypothèse que l'apprentissage du système par un utilisateur n'ayant pas été impliqué dans la conception du produit sera facilité si nous lui « rejouons » le scénario simplifié des étapes de conception. Il pourra par exemple manipuler d'abord le concept et comprendre globalement ce que le système est capable de faire. Puis, au fur et à mesure de l'apprentissage, le concept tendra vers l'objet réel. L'utilisateur n'est donc plus confronté de manière abrupte à un système complexe dont il n'en saisit pas forcément et immédiatement l'usage qu'il pourrait en avoir.

Un autre avantage particulièrement intéressant est de permettre au futur utilisateur de prendre plus de risques qu'avec le vrai système. Les expériences menées nous laissent penser que le simulateur permet à l'utilisateur d'imaginer plus facilement des stratégies nouvelles afin de s'approprier le système plus rapidement. Nous pensons tout du moins que l'utilisation de la simulation nous permettrait de le guider dans le choix de stratégies en lui proposant des situations d'apprentissage particulières qu'il ne serait pas possible de reproduire en réel. Ainsi, nous pensons qu'un apprentissage sur simulateur permettrait à l'utilisateur d'être plus performant sur le système réel qu'une personne n'ayant manipulé que ce dernier.

L'utilisation du virtuel, d'un point de vue matériel, nous permet de limiter largement les coûts de prototypage. En outre, le virtuel permet de tester facilement divers produits du marché et certainement de choisir le meilleur compromis qualité/prix. Ainsi le coût du produit lui-même peut être réduit et être utilisé par un plus grand nombre de personnes. À titre d'exemple, nous citerons le bras manipulateur Manus. Ce bras, jusqu'alors utilisé, est d'un coût élevé et sa maintenance est difficile. Nous pourrions, grâce à la réalité virtuelle, tester d'autres bras du marché et peut-être aboutir à un meilleur compromis qualité/prix.

Nous n'avons parlé jusqu'ici que du système physique (réel ou virtuel) en lui-même. Pourtant, les contraintes psychologiques doivent être prises en considération principalement pour tous les algorithmes de collaboration homme-machine et les IHMs. Là encore, la réalité virtuelle permet d'évaluer ces systèmes de collaboration à peu de frais. De plus, en diminuant le nombre de prototypes réels et les contraintes liées à leur évaluation, le délai de production du produit final diminue. Dans le même temps, en multipliant le nombre de prototypes virtuels, nous insérons dans le cycle de conception une dynamique renforcée qui satisfait pleinement aux critères de la CCU. En effet cette dynamique ne fera qu'accroître l'implication de l'utilisateur dans la démarche de conception, évitant ainsi les risques de rejet et améliorant sa satisfaction.

6.2.4. Contraintes et indices d'évaluations

6.2.4.1. Contraintes

Dans notre approche, nous émettons l'hypothèse que l'environnement et les composants virtuels utilisés n'ont pas besoin d'être hyperréalistes. Il est simplement nécessaire de respecter un compromis « niveau d'implication/coût » pour les évaluations et donc « coût/contribution » au niveau de la conception. Il n'est pas utile que l'immersion de la personne dans le simulateur soit totale. Nous cherchons un niveau de présence suffisant pour valider tel(le) ou une tel(le) concept/fonction. L'homme est suffisamment intuitif et adaptable pour comprendre un environnement simulé éloigné du réel. Les résultats de recherche (voir paragraphe 2.2) montrent que beaucoup de facteurs doivent être pris en considération. Lors des évaluations du simulateur, nous avons formulé et ensuite validé l'hypothèse qu'il était possible de trouver un compromis entre la qualité d'implication de l'utilisateur dans le monde virtuel, le coût de développement du simulateur et sa contribution dans la conception.

D'autre part, l'utilisation d'un simulateur à bas coût laisse supposer que le système à concevoir est de type téléopéré. En effet, si le produit à concevoir est manipulable directement, il est alors nécessaire que le matériel de simulation intègre des produits de visualisation de type SeeTrough et des interfaces haptiques. Le fait d'ajouter ce type de matériel rend les évaluations plus difficiles car le simulateur ne pourra plus être distribué à grande échelle. Ainsi, même si ces technologies sont intéressantes, on risque de perdre l'avantage de la validité statistique des résultats obtenus sur simulateur.

Une autre contrainte se situe dans le réalisme physique du simulateur, c'est à dire implémentant précisément les lois de la physique et de la mécanique. Un simulateur réaliste, modélisant des déformations de tissus, d'organes ou autre a un coût de développement important surtout si l'on désire un rendu temps réel. Il faudra donc faire attention au type de produit désiré avant d'utiliser la CCUSC. Par exemple, imaginons que l'on désire concevoir un nouvel appareil de coupe de cheveux à destination des salons de coiffure. Si pour valider le produit, la simulation demande une modélisation fine des cheveux, de leurs interactions, de leurs déformations, il est certainement plus intéressant de prototyper un produit réel dès le départ. On pourra éventuellement utiliser la simulation pour le design ou présenter le concept. Il paraît absurde à l'heure actuelle de vouloir développer un simulateur permettant l'apprentissage de ce type de produit.

Une autre difficulté est liée à l'utilisation de la réalité mixée. En passant dans un plan RM, on risque de perdre les avantages du tout virtuel. En effet, les évaluations nécessitant une partie réelle du produit ne pourront plus se faire de manière distribuée comme on le ferait avec un produit complètement virtuel. Nous risquons dans ce cas de diminuer fortement la validité statistique des résultats. D'autre part, la RM nécessite des algorithmes de recalage, de superposition, d'interaction entre objets virtuels et réels. Tout cela nécessite un coût de développement important et il faudra veiller à ce que le rapport contribution/coût reste le plus faible possible.

Du point de vue gestion de projet, il faudra garder à l'esprit que, si l'on veut utiliser la simulation comme outil d'apprentissage, il est nécessaire de prévoir dès le début du projet une architecture logicielle souple et une gestion des configurations adéquate. Le développement du simulateur devra être tout aussi rigoureux que celui du produit réel. En effet, il faudra penser dès le départ aux éventuelles stratégies d'apprentissage que l'on voudra mettre en œuvre par la suite. La simulation devra intégrer un ensemble de fonctionnalités

supplémentaires qui n'existent pas sur le système réel (guide virtuel de trajectoire, de saisie, effets de transparence, environnement multi caméras, système d'aide...).

6.2.4.2. Indicateurs d'avancement

Pour pouvoir utiliser la CCUCS efficacement, il est nécessaire de définir 2 indicateurs de progression. Le premier est l'indicateur de permutation du plan virtuel vers le plan réel (IPVR). La question est de savoir à quelle itération il est intéressant de passer du virtuel à un prototype réel. Il est donc nécessaire de mesurer la contribution d'une nouvelle itération dans le cycle de conception. Cet indicateur dépend alors de trois facteurs. Le premier est le taux de transformation du produit virtuel (TTPV). Plus il est grand, plus il est important de réitérer sur le plan virtuel. Le deuxième facteur est le taux de succès des sujets aux évaluations (TSE). Plus il est petit, plus il est nécessaire de modifier le produit virtuel. Le troisième facteur concerne le taux de réalisation des fonctions citées au cahier des charges (TRFCDC). Il n'est pas nécessaire de réitérer sur le plan virtuel si les caractéristiques du produit définies au départ sont satisfaites.

$$IPVR = \frac{(1 - TTPV) + TSE + (1 - TRFCDC)}{3}$$

Plus IPVR tend vers 1, moins la contribution de l'itération sur le plan virtuel est grande. Il est alors nécessaire de permuter vers un plan réel.

Le deuxième indicateur concerne la commutation du plan réel vers le plan virtuel (IPRV). Quand le processus de conception a lieu dans le plan réel, c'est le système réel qui est évalué. Le facteur intervenant est alors le taux de réalisation des fonctions du cahier des charges (TRFCDC). Plus ce taux tend vers 1, moins l'itération sur le plan réel contribue à l'amélioration du produit, et, ce dernier est alors prêt pour la production. Plus ce taux tend vers 0, plus il est nécessaire ou tout du moins intéressant de réitérer sur un plan virtuel. Ce facteur représente en fait l'inverse du taux de modifications nécessaires pour satisfaire aux exigences définies au départ.

$$IPRV = (1 - TRFCDC)$$

Si le système est complexe, il est possible qu'il soit nécessaire d'itérer sur un plan de réalité mixte. Pour cela, le système doit être découpé en n sous parties correspondant aux différents concepts et il faut associer les deux indicateurs précédents à chacune de ces sous parties i .

Si $IPRV_g = \frac{\sum_{i=1}^n IPRV_i}{n}$ tend vers 1, cela signifie que le système virtuel est abouti.

Si $IPRV_g = \frac{\sum_{i=1}^n IPRV_i}{n}$ tend vers 0, cela signifie que le système réel est près pour la production. Entre 0 et 1, la conception s'établit encore sur un plan de réalité mixte.

L'idéal est d'obtenir $IPRV_g = 0$ et $IPVR_g = 1$ ce qui signifie que l'on est en présence d'un système réel correspondant aux exigences du cahier des charges et d'une simulation complète offrant un outil d'apprentissage performant.

6.2.5. Etude de cas, application au projet ARPH

Dans ce paragraphe, nous allons présenter une étude de cas utilisant la réalité mixte qui permettrait une amélioration du prototype ARPH existant. Nous présentons d'abord un problème ciblé et issu d'évaluations puis nous proposons une solution. L'objectif est de montrer que l'approche CCUSC peut mener à un produit davantage en adéquation avec les désirs des utilisateurs.

6.2.5.1. Hypothèses

Les évaluations du système ARPH auprès de personnes handicapées (paragraphe 3.2) ont montré que la manipulation était une tâche difficile pour plusieurs raisons :

- Capacité de manipulation réduite
- Difficulté de repérage spatial

Plusieurs réponses à ces difficultés peuvent être envisagées. Le domaine accessible du bras est partiellement inutilisable du fait de son positionnement sur la plate-forme. De plus, l'intersection entre le champ visuel de la caméra et le bras gêne l'utilisateur. Ainsi l'emplacement du bras manipulateur sur la base n'est pas optimum pour assurer une bonne manipulabilité. D'autre part, le bras Manus utilisé n'est peut-être pas adapté, de par sa structure, à la télé manipulation. Les évaluations ont montré une satisfaction évidente de la part des utilisateurs concernant la base, c'est à dire la fonction de mobilité. Or, il n'est pas aisé de modifier l'emplacement du bras manipulateur sans toucher à la structure de la base mobile. De plus, Manus étant le seul bras disponible sur le marché, il n'est pas possible d'en utiliser un autre. Nous allons proposer dans le paragraphe d'évaluer d'autres solutions en prenant en compte ces contraintes.

6.2.5.2. Solution

Si l'on se place dans la démarche CCUSC étendue, nous disposons en fait d'un prototype réel qui ne donne pas entière satisfaction, ne répondant pas à tous les critères du cahier des charges. La base mobile étant satisfaisante, il est alors intéressant de réitérer un cycle de conception sur un plan, non plus réel mais mixte. Dans notre cas, nous allons utiliser la base mobile réelle sur laquelle sera fixé un bras manipulateur virtuel comme le montre la Figure 6-9.



Figure 6-9 : base mobile réelle et bras virtuel

Dans ce cas, il est possible de modifier l'emplacement du bras manipulateur sans contraintes mécaniques et d'évaluer différentes positions. De la même manière, il est possible de modéliser un bras qui n'existe pas encore afin de valider une structure appropriée facilitant la saisie. Ainsi, en gardant un environnement réaliste et une dynamique de mobilité réelle, nous pouvons à moindre frais évaluer de nouvelles fonctions de manipulation.

Ce type d'expérience impose cependant quelques contraintes. En effet, nous sommes en présence d'un objet virtuel en interaction avec le monde réel. Il n'est a priori pas possible dans ce cas de figure de saisir un objet réel, la saisie devra donc se faire sur un objet virtuel. De plus, le bras étant virtuel, il ne peut y avoir de collisions avec le monde réel. Certains indices utiles lors de la manipulation, tels que les ombres du bras sur le mobilier n'existent pas. Il est donc nécessaire, pour assurer une simulation de manipulation cohérente, de modéliser une partie du mobilier. Les évaluations pouvant être faites en milieu contrôlé (exemple au paragraphe 05.3.2), il est possible de recréer une situation d'évaluation en réalité mixte cohérente comme le montre la Figure 6-10.

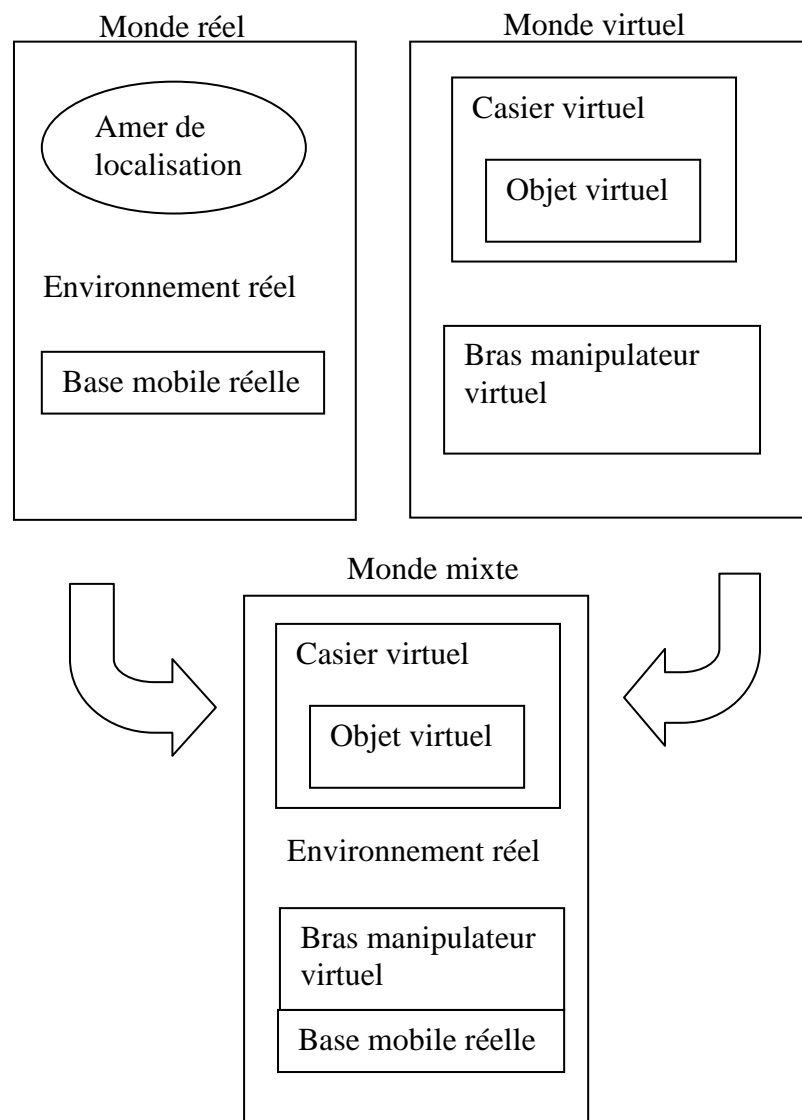


Figure 6-10 : Conception en réalité mixte

Pour cette expérience, nous nous plaçons en situation de téléopération : l'utilisateur manipule le robot à distance via la caméra embarquée. Un amer de localisation est placé dans le monde réel à l'endroit où l'on désire placer le « mobilier ». Dans notre cas, ce sera un meuble à plusieurs cases dans lesquelles on placera l'objet à saisir. Par un traitement simple, il est possible, à l'aide de la caméra embarquée de détecter l'amer et d'extraire sa position et son orientation par rapport à la caméra. Ainsi, on peut surimposer avec exactitude le casier virtuel sur l'image réelle. L'objet virtuel peut être alors positionné dans le casier. La connaissance de la position de la caméra par rapport à la base mobile nous permet de positionner le bras virtuel. Les positions des objets étant connues les unes par rapport aux autres, il est alors possible d'effectuer des saisies virtuelles. De plus, par exemple, lors d'une collision virtuelle entre le bras et le casier, on peut stopper la base mobile alors que rien ne bloque son déplacement dans le monde réel. Le fait d'avoir un casier virtuel nous permet de gérer les ombres du bras manipulateur sur celui-ci et donc d'implémenter cet indice nécessaire à une bonne manipulation.

Cette expérience permet de tester plusieurs emplacements de bras manipulateur, plusieurs structures et cela sans coûts supplémentaires ni risques pour le matériel.

6.3. Conclusion

Dans ce chapitre, après avoir présenté les démarches classiques de conception, nous avons présenté une nouvelle méthode de conception centrée utilisateur et adaptée aux systèmes complexes (CCUSC). Ce modèle, basé sur le traditionnel cycle en spirale, s'est vu modifié par l'ajout d'un plan de conception virtuel. Ce plan virtuel permet le prototypage rapide et l'évaluation de concepts de systèmes complexes et innovants dans des délais et des coûts réduits. En outre, elle fournit, en plus d'un produit final satisfaisant aux mieux les exigences de l'utilisateur, un outil d'apprentissage distribuable à grande échelle. Cette démarche a été ensuite appliquée à une étude de cas, montrant les avantages dont ARPH pouvait bénéficier.

En utilisant le prototypage virtuel, nous pouvons réduire les coûts et les délais. En proposant plus de prototype virtuel et donc en évaluant plus souvent le système, nous sommes capables de satisfaire plus efficacement l'utilisateur sur les plans essentiellement esthétique, fonctionnel et opérationnel (efficacité, efficience et satisfaction). De même, augmenter le nombre d'évaluateurs rend les résultats statistiques plus fiables. Le virtuel ne nécessitant pas de coût important en cas de modification ou d'évolution, nous autorisons une définition incomplète des besoins en début du projet. Ainsi la prise de risque est moindre qu'avec des prototypes réels. En tenant compte de l'utilisateur tout au long du cycle de conception, c'est-à-dire en lui proposant un outil d'apprentissage à chaque itération, celui-ci devient expert du système. Il est donc plus à même de juger de l'usage et de l'efficience du système au fur et à mesure de la conception. On peut alors penser que le produit final en sera amélioré en termes de coopération homme-machine. De même, l'utilisation du virtuel permettant de faire des modifications à moindres coûts, nous utiliserons cette capacité afin de présenter des prototypes différents en fonctions des caractéristiques propres de chaque utilisateur. Les problèmes d'hétérogénéité des composants matériels ne se posent plus en virtuel. Enfin, les utilisateurs disposent d'un outil d'apprentissage réaliste permettant une prise en main du système plus rapide.

7. Conclusion

Ce travail de thèse s'est déroulé dans le cadre du projet ARPH destiné à assister un opérateur handicapé pour la saisie et la manipulation d'objets à distance. Dans ce mémoire, nous avons commencé par présenter les évaluations du manipulateur mobile ARPH auprès de personnes handicapées tétraplégiques. Les résultats nous ont montré, bien que le prototype fût bien accueilli et jugé utile, un manque d'efficacité dans les phases de manipulation. La coopération homme machine était insuffisante et les utilisateurs ont souhaité pouvoir disposer d'un mode de commande coordonnée base-bras. Ces évaluations nous ont aussi souligné les difficultés logistiques (locaux aménagés pour le handicap, déplacement des personnes handicapées, déplacement du prototype...) de leur mise en œuvre. De plus, après les évaluations, s'est posée la question de comment prendre en compte les remarques formulées par les utilisateurs plus précisément et vérifier leur pertinence sans être obligé d'apporter des modifications importantes au prototype réel. Par exemple, changer l'emplacement du bras manipulateur de ARPH demande d'importantes modifications mécaniques. Nous nous sommes donc intéressés à adapter la méthodologie de conception CCU afin de faciliter l'évolution d'un prototype existant, méthodologie que nous avons ensuite étendue à la conception du prototype complet.

Concernant la commande coordonnée, nous avons proposé une méthode basée sur un système multi agents dans lequel chaque articulation possède un but local qui est de rapprocher l'effecteur de l'objectif. Les résultats obtenus en simulation font apparaître plusieurs atouts. Premièrement, cette démarche de résolution du problème permet d'éviter le calcul des modèles inverses du système. Deuxièmement, le système devient tolérant aux pannes des moteurs si le système est redondant. Troisièmement, il est possible d'agir localement sur certains agents pour avoir un comportement particulier difficile à modéliser avec des méthodes classiques basées sur la manipulabilité, comme privilégier la marche avant par exemple. La méthode a été implantée sur le système réel et les résultats obtenus sont conformes à ceux de simulation. Quelques limites ont été mises en évidence, pour lesquelles des développements sont envisagés. L'utilisation d'un système multi agent n'a pas permis, pour le moment, de suivre une trajectoire en gardant une orientation de la pince donnée. L'implantation d'agents dans les articulations du poignet de l'effecteur n'a pas donné de bons résultats. De même, l'utilisation d'un méta agent contrôlant l'ensemble du poignet n'a pas fonctionné. Il semble que l'utilisation du modèle inverse de la pince soit nécessaire pour satisfaire l'exigence en orientation. Même si le système permet de se positionner précisément à un endroit donné, la trajectoire n'est pas maîtrisée. Pour pallier cela, il faut définir un nombre important de points de passage sur la trajectoire désirée.

D'autres part, nous avons proposé une démarche de Conception Centrée Utilisateur (CCU) améliorée. Les objectifs principaux sont de limiter le nombre de prototypes dont le coût de développement est important, de satisfaire aux exigences des utilisateurs tout en prenant en compte leurs remarques le plus efficacement possible et d'assurer la sécurité pour la personne et son environnement. Pour cela, la méthode proposée est basée sur les techniques de réalité virtuelle. Dans un premier temps, nous avons évalué le transfert de compétences entre un simulateur de ARPH et le prototype réel. Ce transfert s'est avéré positif et nous avons alors pu proposer la démarche CCUSC (Conception Centrée Utilisateur pour Systèmes Complexes). Celle-ci propose de valider des concepts en virtuel afin de vérifier l'usage qu'en a l'utilisateur et ensuite un prototype virtuel du système par l'intermédiaire d'un simulateur faible coût. Ce dernier peut être distribué à grande échelle, augmentant ainsi la validité statistique des

résultats, tout en diminuant la logistique nécessaire à la mise en place d'évaluations. Lorsque le système virtuel est validé, un prototype réel est réalisé. La démarche CCUSC propose aussi d'opérer dans un monde mixte, alliant par exemple une visualisation de la scène réelle et des objets virtuels, qui permet de valider ou non une solution virtuelle tout en gardant un environnement réaliste. Globalement, la CCUSC permet de limiter le nombre de prototype réel, de faciliter et d'assurer la validité statistique des résultats et donc de proposer un produit final satisfaisant aux mieux les exigences dans des délais et des coûts moindres. La simulation développée durant la conception est, de plus, un outil d'apprentissage performant destiné aux futurs utilisateurs. La CCUSC présentée peut être utilisée dans tous les cas de conception de systèmes complexes. Pourtant, l'utilisation d'un simulateur faible coût, fonctionnant avec un simple ordinateur de bureau, implique que l'objet à concevoir soit du type téléopéré. Si ce n'est pas le cas, la simulation devra mettre en œuvre du matériel coûteux tel que des casques HMD ou SeeThrough et des environnements immersifs (CAVE) ne pouvant, a priori, pas être distribués à grande échelle. Dans ces cas, il faudra bien veiller à l'apport réel d'une telle dépense pour la démarche CCUSC. Notons aussi que l'utilisation de la réalité mixte nécessite l'utilisation d'un prototype réel d'au moins une sous partie du système. Dans ce cas, le prototype ne pouvant être distribué à grande échelle comme le simulateur, les difficultés logistiques restent importantes, notamment dans le domaine du handicap.

Plusieurs perspectives peuvent être avancées pour poursuivre ce travail. A court terme, nous désirons proposer une solution au problème de l'orientation de l'effecteur du manipulateur. Nous pensons continuer à explorer la piste multi agents en combinant différemment les agents. En cas d'échec, nous choisirons la piste mathématique. En ce qui concerne la CCUSC, nous désirons mettre en place une évaluation en réalité augmentée (étude de cas du paragraphe 6.2.5) afin de valider l'emplacement et la structure adéquats du bras manipulateur sans apporter, immédiatement et à l'aveugle, de modifications mécaniques importantes au prototype ARPH. De plus, le bras Manus utilisé actuellement ne semble pas être idéal pour notre utilisation et nous désirons proposer en simulation d'autres structures mécaniques qui faciliteraient la tâche de saisie.

A plus long terme, nous désirons évaluer dans quelle mesure le risque pris par les sujets en condition virtuelle peut être bénéfique pour l'apprentissage. Nous avons en effet observé que, lors des évaluations sur le transfert de compétences entre virtuel et réel, les sujets en condition virtuelle mettaient environ 25% de temps de moins que les sujets en condition réelle pour réaliser une même tâche. De même, le nombre de manoeuvres était plus important en condition virtuelle. Or, après six essais dans des conditions différentes, les sujets avaient tous atteint le même niveau d'expertise sur le système réel. Alors que nous voulions, au départ, valider un simulateur qui permettrait d'assurer un comportement identique en virtuel et en réel, il est possible que ces différences entre les deux conditions permettent à l'utilisateur d'explorer plus rapidement davantage de situations conflictuelles et donc d'apprendre plus efficacement. Nous mènerons donc de nouvelles évaluations dans ce sens afin de vérifier si cette prise de risque est bénéfique à l'apprentissage du système ARPH.

8. Références Bibliographiques

Publications personnelles :

Revue internationale avec comité de lecture

[DELA2006A] S.Delarue, K. Nait Chabane, P. Hoppenot, E. Colle, « ARPH: Comparison of a classical method and a method using man - machine collaboration to exploit the redundancy of the robotized assistant », AMSE, 2006, à paraître.

Conférences internationales avec comité de lecture

[DELA2006B] Sébastien DELARUE, Philippe HOPPENOT, Etienne COLLE, « UCD Method using VR and related techniques for designing complex system », Virtual Concept 2006, Proceedings of Virtual Concept, 2006

[DELA2007A] Sébastien Delarue, Ornella Plos, Philippe Hoppenot, Etienne Colle, « Evaluation of a mobile manipulator arm by disabled people », AAATE2007, octobre 2007, à paraître.

[DELA2007B] Sébastien Delarue, Philippe Hoppenot, Etienne Colle, « A multiagent controller for a mobile arm manipulator », ICINCO, 2007

Conférences nationales avec comité de lecture

[COLL2006] E. Colle, K. Nait Chabane, S. Delarue, P. Hoppenot « Comparaison d'une méthode classique et d'une méthode utilisant la coopération homme-machine pour exploiter la redondance de l'assistant robotisé », HANDICAP 2006, Paris, France, 2006.

Publications référencées dans le mémoire :

[BAEL2006] Caroline Ballargeau, Sylvia Elie « Evaluation du manipulateur mobile ARPH en situation écologique auprès de personnes tétraplégiques », Université Paris 8, Rapport de Master Professionnel Ergonomie et TIC, 2006

[BAYA2006] Bayart B., Kheddar A., « Haptic augmented reality taxonomy: haptic enhancing and enhanced haptics », " , EuroHaptics, 641-644, 2006.

[BAYL2001A] B. Bayle, J. Y. Fourquet, M. Renaud., « Manipulability analysis for mobile manipulators », International Conference on Robotics and Automation (ICRA'2001), 1251-1256, 2001.

[BAYL2001B] B. Bayle. Modélisation et commande cinématiques des manipulateurs mobiles à roues. Thèse de doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, 2001.

[BERA1999]. Bérard F., « Vision par ordinateur pour l'interaction homme-machine fortement couplée », Thèse de doctorat de l'Université Joseph Fourier, Grenoble, 1999.

[BERA2000] Bérard F., Coutaz J., Crowley James L., « Le Tableau Magique », Actes ERGO-IHM2000 Biarritz CRT ILS&ESTIA Ed.3-6 oct, 33-40, 2000.

[BLIS1997] Bliss J. P., Tidwell P. D., & Guest M. A., « The effectiveness of virtual reality for administering spatial navigation training to firefighters », Presence : Teleoperators and Virtual Environments, 6, 73-86, 1997.

[BOEH1981] Barry W.Boehm, « Software Engineering Economics », Prentice-Hall Advances in Computing Science & Technology Series, 1981.

- [BOHN1994] Petra Bohner, « A Multi-agent Approach to Distributed Control for Task-level Programs for Cooperating Manipulators », Proceedings of the IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems IROS'94, 1994.
- [BOUR1996] Bourgeois E., « L'adulte en formation : Regards pluriels. » Paris : De Boeck Université, 1996.
- [BROO1986] R. A. Brooks, « A robust layered control system for a mobile robot », IEEE Journal of Robotics and Automation, 14-23, 1986.
- [BURK2003A] Burkhardt J-M., Bardy B., Lourdeaux D., « Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des environnements virtuels », Psychologie Française, 48(2), 35-42, 2003.
- [CAME1993] Timcenko A Cameron, AJ Guida, « Distributed general purpose robot controller », IEEE International conference on robotics and automation,3, 161-166, 1993.
- [CHAI2001] Chaib-Draa B., Jarras I., Moulin B., « Systèmes multi-agents : principes généraux et applications », dans « Principes et architectures des systèmes multi-agents », J.-P. Briot et Y.Demazeau (Eds.) Hermès, 2001.
- [CHAR2004] Charron C., « Respect, le simulateur éducatif pour l'enfant-piéton », Microsimulateur, N°124, 26-29, 2004.
- [CHAU1997] Christophe CHAUDY, « Modélisation et rendu d'images réalistes de paysages naturels », Thèse de doctorat de l'université Joseph Fourier – Grenoble, 1997
- [CLOS2006] Laurianne Closier, TER – Rapport « Evaluation du simulateur ARPH », Université de Rennes, 2006
- [COLB2005] Heather J. Colbert, David W. Tack, « AUGMENTED REALITY FOR BATTLEFIELD AWARENESS », DRDC Toronto CR-2005-053, 2005
- [DAUT2005] Kerstin Dautenhahn, Sarah Woods, Christina Kaouri, Michael L. Walters, Kheng Lee Koay, Iain Werry, « What is a Robot Companion – Friend, Assistant or Butler? », IROS 2005, IEEE/RSJ International Conference, 1192-1197, 2005.
- [DAUT2006] K. Dautenhahn, M. Walters, S. Woods, K.L. Koay, C. Nehaniv, E.A. Sisbot, R. Alami, T. Simeon, « How may I serve you ? A robot companion approaching a seated person in a helping context », Conference on Human-Robot Interaction (HRI'06), 2006.
- [DEGU2007] Gilles Deguillard, TER – Rapport « Evaluation du transfert d'apprentissage entre virtuel et réelle, application au projet ARPH », Université de Rennes, 2007
- [DEPL1992] P. Déplanques, C. Novales, R. Zapata, and B. Jouvencel, « Sensor-based control versus neural network technology for the control of fast mobile robot behaviors in unstructured environment », Conf. on Industrial Electronics, Control, Instrumentation and Automation, 694-699, 1992.
- [DIDI2005] J.-Y. Didier, D. Roussel, M. Mallem, S. Otmane, S. Naudet, Q.-C. Pham, S. Bourgeois, C. Mégard, C. Leroux, A. Hocquard, « AMRA: Augmented Reality assistance in train maintenance tasks », Workshop on Industrial Augmented Reality (ISMAR'05), 2005.
- [DORF2001] Klaus Dorfmueller-Ulhaas, Dieter Schmalstieg. « Finger tracking for interaction in augmented environments », Proceedings of the IEEE and ACM International Symposium on Augmented Reality (ISAR'01), 2001.

- [DREY2004] Gérard Dreyfus, Manuel Samuelides, Jean-Marc Martinez, Mirta B. Gordon, Fouad Badran, Sylvie Thiria, Laurent Héroult, « Réseaux de neurones : Méthodologies et applications », Eyrolles 2e édition, 2004
- [DUHA1993] Dominique Duhaut, « Using multi agent approach solve inverse kinematic problem », Intelligent Robots and Systems IROS'93, IEEE/RSJ International Conference, Volume 3, 2002-2007, 1993.
- [DUHA1999] Dominique Duhaut, « Distributed Algorithm For High Control Robotics Structures », International Conference On Artificial Intelligence, Volume 1, 45-50, 1999
- [FEIN1993] Feiner S., MacIntyre B., Seligmann D., « Knowledge-based augmented reality. », Communications of the ACM, 36(7), 52-62, 1993.
- [FERB1995] Jacques Ferber, « Les systèmes Multi agents Vers une intelligence collective », IIA Informatique Intelligence Artificielle InterEditions, 1995.
- [FOLC2004] Folcher V., Rabardel P., « Hommes, artefacts, activités: perspective instrumentale », Falzon P. (s/d), Ergonomie. Paris, PUF, 2004.
- [FOUL1998] Gilles Foulon, « Génération de mouvements coordonnés pour un ensemble d'une plate-forme mobile à roues et d'un bras manipulateur », Thèse de Doctorat Institut National des Sciences Appliquées, 1998.
- [FRIC2006] R. Fricheteau, J.F. Omhover, « Utilisation de la réalité virtuelle pour la conception d'environnement pharmaceutique. », CONFERE 2006, 2006.
- [FUNG2000] LI Fung-Chun, Jer-Yann Lin, Liu Shyh-Jiung, Hsu Shih-Hua, Tarng Chau-Rong, Yieng Chau-Fu and Wu Tzong-Yiing, « A Case Study of Creating Geochemistry Lab of Virtual Reality in Education », ICCE/ICCAI 2000, pp.1665~1667, 2000.
- [GAIL1979A] Gaillard J-P., Guittet J., Kwee H-H., Quélin N., « Bilan de 17 heures d'expérimentation avec un sujet de niveau C5 », 2ème colloque européen para-médical des lésions médullaires, Lyon, 1979.
- [GAIL1979B] Gaillard J-P., Guittet J., Quélin N., « Aspects de l'interface entre tétraplégiques et téléthèse », Informatique et sciences humaines, N°42, 39-67, 1979.
- [GAIL2002] Gaillard J-P., « Approche ergonomique des robots d'assistance aux personnes tétraplégiques », Handicap : revue des sciences humaines et sociales, 96,55-69, 2002.
- [GAIL2003] Gaillard J.-P., Fréard D., Colle, E. & Hoppenot, P., « Operator's self confidence to detect mobile robot trajectory errors », Le Travail Humain, 66, 1-21, 2003.
- [GINE1991] Gineste M.-D., « Transfert. Dans le Grand Dictionnaire de la Psychologie », Paris : Larousse, 1991.
- [GINE1997] Gineste M.-D., « Analogie et cognition : étude expérimentale et simulation informatique », Paris : PUF, 1997.
- [GRAU1998] Grau J.-Y., Doireau P., & Poisson R., « Conception et utilisation de la simulation pour la formation », Le Travail Humain, 64, 361-395, 1998.
- [GUES1997] Z. Guessoum, « A Hybrid Agent Model: a Reactive and Cognitive Behavior », ISAD97 IEEE, 25-32, 1997.

- [HAUE2001] Hauet E., Ravaud J.-F., « Handicap, gênes ou difficultés ressentis par les personnes dans le cadre de leurs déplacements en dehors du domicile », rapport Association des Paralysés de France, 2001.
- [HIT_WEB] Site Web du HIT (Human Interface Technology), l'université de Washington, www.hitl.washington.edu/projects/exposure/ et www.hitl.washington.edu/projects/burn/.
- [HOC2000] Hoc M., « From human-machine interaction to human-machine cooperation », *Ergonomics*, 43, 833-843, 2000.
- [HODG1995] Hodges L.F., Watson B.A., Kessler G.D., Rothbaum B.O., Opdyke D., « Virtual environments for treating the fear of heights », *IEEE Computer*, 27-34, 1995.
- [HOLD1997] Tina Holden, Jurine Adolf, « Human Research Facility (HRF), Human-Computer Interface (HCI) Design Guide », National Aeronautics and Space Administration (NASA) design guide, 1997.
- [INRS1993] INRS, « Ergonomie et prévention », Edition INRS Référence, ED 774, 1993.
- [JOUK1992] Ammar JOUKHADAR, « Simulation dynamique et applications robotiques », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de grenoble, 1992.
- [KAWA1999] Kawanobe A., « Description and Evaluation of System for Running 3-Dimensional Computer-Graphics Courseware. », International Conference on Computers in Education, 1999.
- [KHAL1999] W. Khalil et E. Dombre, « Modélisation identification et commande des robots », édition HERMES, 2ème édition, 1999.
- [LAUG2001] Christian Laugier, César Mendoza, Kenneth Sundaraj, « Towards a Realistic Medical Simulator using Virtual Environments and Haptic Interaction », *Robotics Research: The Tenth International Symposium, Volume 6*, 289-306, 2001.
- [LEPL1997] Leplat J., « Regards sur l'activité en situation de travail », *Contribution à la psychologie ergonomique*, 7, 235-260, 1997.
- [LIEU2004] Lieury A., « Psychologie cognitive », 4ème édition, Paris : Dunod, 2004.
- [LOMB1994] Lombardo Jean-Christophe, Puech, Claude, « Modélisation d'objets déformables avec un système de particules orientées. », *Deuxièmes journées de l'Association Française d'Informatique Graphique*, 161-175, 1994.
- [LUCI2002] P. Lucidarme, O. Simonin, A. Liégeois, « Implementation and evaluation of a satisfaction/altruisme-based architecture for multi-robot systems », *proc. ICRA'02*, 1007-1012, 2002.
- [LUCI2003] P. Lucidarme, A. Liégeois, « Apprentissage de comportements réactifs pour des ensembles de robots mobiles », *JJCR17 Paris*, 33-39, 2003.
- [MAHD2006] M. Mahdjoub, J.C. Sagot, S. Gomes, « Mieux intégrer l'ergonomie dans la conception de produits en s'appuyant sur la réalité virtuelle », *CONFERE 2006*, 2006.
- [MILG1994A] Paul Milgram, Haruo Takemura, Akira Utsumi, Fumio Kishino, « Augmented reality: a class of displays on the reality-virtuality continuum », *SPIE Vol. 2351, Telemanipulator and Telepresence Technologies*, 1994.
- [MILG1994B] P. Milgram, F. Kishino, « A taxonomy of mixed reality visual displays », *IEICE Transactions on Information and Systems*, number E77-D(12), 1321-1329, 1994.

- [MITU1998] Mitul Saha, « Manipulator Planning and Obstacle Avoidance Using Genetic Algorithm », B-Tech Project in Manipulator Planning in IIT Kanpur, <http://members.rediff.com/mitulsaha/ga.html>, 1998
- [NAIT2006] K. Nait-Chabane, P. Hoppenot, E. Colle., « Mobile arm for disabled people assistance Manipulability measure for redundancy solve », *Journal of Intelligent & Robotics Systems*, 2006.
- [NIEL1993] Nielsen J., « Usability Engineering », Londres : Academic Press, 1993
- [NIKI2002] Igor Nikitin, Lialia Nikitina, Pavel Frolov, Gernot Goebbels, Martin Göbel, « Real-time simulation of elastic objects in Virtual Environments using finite element method and precomputed Green's functions », *Eighth Eurographics Workshop on Virtual Environments*, 2002.
- [NOCE2001] Olivier Nocent, « Animation dynamique de corps déformables continus, Application à la simulation de textiles tricotés », Thèse de doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, 2001
- [NORT1996] North M.M., North S.M., Coble J.R., « Effectiveness of virtual environment desensitization in the treatment of agoraphobia », *Presence*, vol5, no3, 346-352, 1996.
- [OLER1964] Oléron G., « Le Transfert. In P. Fraisse & J. Piaget (Eds.), *Traité de psychologie expérimentale : Apprentissage et mémoire* », Paris : PUF, vol. 4, chap. XIII, 1964.
- [OTMA2000] S. Otmane, M. Mallem, A. Kheddar and F. Chavand, « Active virtual guide as an apparatus for augmented reality based telemanipulation system on the Internet », *IEEE Computer Society 33rd Annual Simulation Symposium ANSS 2000*, 185-191, 2000.
- [OVER1994] Lars Overgaard Henrik, Petersen Perram John, « Motion Planning for articulated robot multi agent approach », *Distributed Software Agents And Proceeding 6th Europe Workshop On Modelling Autonomous Agents In A Multi Agent World Maamaw*, 206-219, 1994.
- [PALL2007] Palluel-Germain R., Bara F., Hillairet de Boisferon A., Hennion B., Gouagout P. & Gentaz E., « A visuo-haptic device - Telemaque - increases the kindergarten children's handwriting acquisition », *IEEE WorldHaptics*, 72-77, 2007.
- [PIAG1936] J. Piaget, « La naissance de l'intelligence chez l'enfant », Paris Lausanne, ed : Delachaux et Niestlé, 1936
- [PIAG1978] Jean Piaget, « La formation du symbole chez l'enfant », Paris, Delachaux et Niestlé, 1978.
- [PLAT1981] S. Platt, N. Badler, « Animating facial expressions. », *SIGGRAPH'81*, 1981.
- [PROV1995] X. Provot, « Deformation constraints in a mass-spring model to describe rigid cloth behaviour. », *Graphics Interface Proceedings*, 147-154, 1995.
- [RABA2005] Rabardel P., Bourmaud G., « Instruments et systèmes d'instruments ». Dans Rabardel P. et Pastré P., « Modèles du sujet pour la conception », Octarès Editions, (Coll. Travail et Activité humaine), 211-229, 2005.
- [RACK2005] Nathan Rackliffe, « An Augmented Virtuality Display for Improving UAV Usability », The MITRE Corporation, 2005.

- [REGE2004] H. Regenbrecht, T. Lum, P. Kohler, C. Ott, M. Wagner, W. Wilke, E. Mueller, « Using augmented virtuality for remote collaboration », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, Volume 13 , Issue 3, 338-354, 2004.
- [RICHE1994] Richelle M., Requin J. & Robert M., « *Traité de psychologie expérimentale* », Tome 2, Paris : PUF, 1994.
- [RIVA1998] Riva G., Melis L., « Virtual reality for the treatment of body image disturbances », *Virtual reality in Neuro-Psycho-Physiology - Giuseppe Riva Ed., IOS Press, 1997-1998.*
- [RONA1997] Ronald T. Azuma, « A Survey of Augmented Reality », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments* 6, 4, 355-385, 1997.
- [ROUL2006] Roulin J.-L., « *Psychologie cognitive* », 2ème édition, Paris : Bréal, 2006.
- [ROUS2003] Roussel P., Sanchez J., « Eléments sur la vie dans la cité : logement, transports, loisirs, sports, vie culturelle et sociale, Handicaps, incapacités, dépendance », *Revue Française des Affaires Sociales*, n°1-2, 2003.
- [RYBA2004A]- Y. Rybarczyk, D. Mestre, P. Hoppenot, E. Colle, « Implémentation télérobotique de l'anticipation sensorimotrice pour optimiser la Coopération Homme-Machine », *Le Travail humain*, tome 67, n°3/2004, 209-233, 2004.
- [RYBA2004B] Yves RYBARCZYK, « Etude de l'appropriation d'un système de téléopération dans l'optique d'une coopération HommeMachine », Thèse de doctorat de l'université d'Evry-Robotique et neurosciences, 2004.
- [SALIS1982] J. K. Salisbury and J.J. Craig., « Articulated hands force Control and Kinematic issues », *Intl J. Robotics Research*, Vol. 1, No. 1, 4-17, 1982.
- [SART2000] G. Sartoris , P. Bartelt, « Upwinded finite difference schemes for dense snow avalanche modeling », *International Journal of Numerical Methods in Fluids*, vol. 32, Issue 7, 799-821, 2000.
- [SCIA1996] L. Sciavicco and B. Siciliano, « *Modeling and control of robot manipulators* », The McGraw-Hill companies inc., 1996.
- [SERA1993] H. Seraji., « An on-line approach to coordinated mobility and manipulation. », In *ICRA'1993*, 28-35, 1993.
- [SIEL2004] Tobias Sielhorst, Tobias Obst, Rainer Burgkart, Robert Riener, and Nassir Navab, « An Augmented Reality Delivery Simulator for Medical Training, AMI-ARCS'04, 2004.
- [SIMO2002A] Gilles Simon, Marie-Odile Berger, « Reconstructing while registering : a novel approach for markerless augmented reality », In *International Symposium on Mixed and Augmented Reality - ISMAR'02*, 2002.
- [SIMO2002B] Gilles Simon, Marie-Odile Berger, « Pose Estimation for Planar Structures. », *IEEE Computer Graphics and Applications*, 22(6), 46-53, 2002.
- [SIMS1997] Simsarian Kristianand, Åkesson Karl-Petter, « Windows on the World: An example of Augmented Virtuality », *Interfaces 97: Man-Machine Interaction*, Montpellier, France, 1997.
- [SPER2002] Sperandio J.-C., Uzan G. « Ergonomie des aides techniques informatiques pour personnes handicapées », *Handicap-Revue de sciences humaines et sociales*, 93, 57-83, 2002.

- [SPER2004] Sperandio J.-C., « Evaluer une situation de handicap, approche ergonomique. » Dans Lofaso F., Ravauy J.-F., Roby-Brami A., « Innovations technologiques et handicap », Institut de Garches, Frison-Roche, Actes des 17èmes entretiens de l'institut, 2004.
- [STAN1998] Stanney K. M., « Aftereffects and sense of presence in virtual environments : formulation of a research and development agenda », *International Journal of Human-Computer Interaction*, 10, 135-187, 1998.
- [STDISO1999] ISO Standard 13407:1999, TC 159/SC 4, « Processus de conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs », 1999.
- [TOUP1995] Toupin L., « De la formation au métier : savoir transférer ses compétences dans l'action », Paris : ESF, 1995.
- [TOUR1992] Pierre Tournassoud, « Planification et contrôle en robotique Application aux robots mobiles et manipulateurs », *Traité des nouvelles Technologies série robotique* Edition Hermès, 1992.
- [VALO1996] Valot C., « Gestion du temps, gestion du risque (à travers quelques situations aéronautiques). », Dans *La gestion du temps dans les environnements dynamiques*, ed J.M. Cellier, V. De Keyser, C. Valot., Collection Travail Humain, PUF, Paris, 1996.
- [VIGA2004] Viganò G., Mottura S., Greci L., Sacco M., Boër C.R., « Virtual reality as a support tool in the shoe life cycle », *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 17-7, 653-660, 2004.
- [VIGU2005] Javier-Flavio Viguera, Gilles Simon, Marie-odile Berger, « Erreurs de calibration en RA : une étude pratique », 15ème congrès francophone Reconnaissance des Formes et Intelligence Artificielle – RFIA, 2006
- [WALL1998] Waller D., Hunt E., Knapp D., « The Transfer of Spatial Knowledge in Virtual Environment Training. », *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, 7(2), MIT Press, 1998.
- [WECK1999] Weckman J., Colvin T., Gaskins R.J., Mackulak G.T., « Application of simulation and the Boehm spiral model to 300-mm logistics system risk reduction », *Simulation Conference Proceedings*, Volume 1, 912–917, 1999.
- [WEIS1999] Weiss G., « A Modern Approach to Distributed Artificial Intelligence », The MIT Press, Cambridge, Massachusetts , 1999
- [WITM1996] Witmer B.G., Bailey J.H., Knerr B.W., Parsons K.C., « Virtual spaces and real world places: transfer of route knowledge », *International Journal of Human-Computer Studies* : Academic Press, Volume 45, 413-428, 1996.
- [WOOL1999] Wooldridge M., Weiss G., « Intelligent Agents », *Multiagent systems*, Ed.: MIT Press - 1999.
- [YOSH1984] T. Yoshikawa, « Analysis and control of Robot manipulators with redundancy », In M. Brady & R. Paul editors, *Robotics Research: The first International Symposium*, MIT Press, 735-747, 1984.
- [YOSH1985] T. Yoshikawa., « Manipulability of Robotic Mechanisms. », *International Journal of Robotics: Research*, vol.4, no 2, 3-9, 1985.
- [YOSH1990] T. Yoshikawa., « Foundation of robotics: Analysis and control. », MIT Press, 1990.

[ZAPA1992] R. Zapata, P. Lepinay, C. Novalés and P. Déplanques, « Reactive behaviors of fast mobile robots in unstructured environments : sensed based control and neural networks. » SAB, 1992.

Annexe I – Données sauvegardées en simulation

Les données sauvegardées lors des évaluations du robot ARPH, que ce soit en réel ou en simulation sont les suivantes:

Donnée	Repère/échelle	unité
Temps	Pas d'acquisition = 200ms	ms
Mode Caméra	Manuel Caméra manuel Caméra auto Suivi pince	M C A S
Vitesse linéaire de la base		m/s
Vitesse angulaire de la base		m/s
Position en X de la base	Par rapport au repère monde	m
Position en Z de la base	Par rapport au repère monde	m
Orientation de la base	Par rapport au repère monde	Radians
Position en X de la pince	Par rapport au repère de base du bras	m
Position en Y de la pince	Par rapport au repère de base du bras	m
Position en Z de la pince	Par rapport au repère de base du bras	m
Orientation 1 de la pince	Par rapport au repère de base du bras	Radians
Orientation 2 de la pince	Par rapport au repère de base du bras	Radians
Orientation 3 de la pince	Par rapport au repère de base du bras	Radians
Position en X de la pince	Par rapport au repère monde	m
Position en Y de la pince	Par rapport au repère monde	m
Position en Z de la pince	Par rapport au repère monde	m
Rayon de courbure	Entre 0 et 90	0 : tourne sur lui même 90 : ligne droite
Pan de la caméra	Orientation « horizontale » de la caméra	Radians
N états	Les N états de boutons qui composent l'interface (actuellement 60)	0 : relevé 1 : appuyé