

Conception d'une aide technique complexe et innovante -Application au projet ARPH-

Etienne Colle – Sébastien Delarue – Philippe Hoppenot

Laboratoire IBISC
CNRS- Université d'Evry
40 rue du Pelvoux
91000 Evry
prénom.nom@ibisc.univ-evry.fr

RÉSUMÉ. La conception d'une aide technique complexe et innovante est soumise à de nombreux facteurs tant humains que socioéconomiques et technologiques qui vont contraindre la solution. Pour que l'utilisateur reste au centre du processus de conception, il est nécessaire d'adapter l'approche centrée utilisateur (CCU). Cette modification n'est rendue possible que grâce à l'existence des nouvelles techniques issues de la RV. Le papier présente le domaine du handicap en se centrant sur le handicap moteur, puis un survol des moyens technologiques qui permettent de réduire la situation de handicap. La deuxième partie développe l'approche qui est proposée pour concevoir une aide technique complexe et innovante. Certains aspects de la CCU modifiée sont illustrés en s'appuyant sur le projet ARPH – Assistance Robotisée pour Personne Handicapée moteur.

The conception of an innovative auxiliary complex device is subjected to numerous factors so human as social, economic and technological which force the solution. So that the user stays in the centre of design process, it is necessary to adapt the User Centered Design (UCD). This modification is made possible only thanks to the existence of the new techniques coming from the RV. First the paper presents the domain of physical handicap and a short overview of the technological means which allow to reduce the situation of handicap. The second part develops the approach we propose to design a complex and innovative assistive system. Certain aspects of the modified UCD are illustrated by the project ARPH – Assistive Robotics for Handicapped People.

MOTS-CLÉS : système complexe et innovant, robotique d'assistance, handicap, CCU, réalité virtuelle, réalité augmentée, virtualité augmentée

KEYWORDS: innovative complex system, assistive robotics, handicap, UCD, virtual reality and augmented reality.

1. Introduction

La conception d'une aide technique complexe innovante destinée à assister une personne handicapée moteur pose des problèmes spécifiques liés à la nature de la population concernée et aux caractères innovant et complexe de l'objet d'assistance. De nombreux facteurs tant humains que socioéconomiques et technologiques vont progressivement contraindre le concept d'origine vers une solution qui doit refléter le plus fidèlement possible l'idée de l'usage que s'en était fait l'utilisateur. Le terme utilisateur, à prendre dans sa plus large extension, comprend la personne handicapée, son entourage, les aidants, les soignants, la logistique. Nous nous situons dans le cas de la conception d'une aide complexe constituée d'une composante logicielle et d'une composante matérielle faisant appel à un large spectre de compétences : mécanique, électronique, architecture informatique, automatique. L'exemple sur lequel nous nous appuyons pour illustrer nos propos est un assistant robotisé offrant à la personne handicapée moteur des capacités de mobilité et de manipulation d'objets (projet ARPH) développé au laboratoire IBISC de l'université d'Evry (Hoppenot *et al.*,2002), (Ait aider *et al.*,2002), (Ait aider *et al.*,2005). La nécessité de suivre une méthodologie mettant l'utilisateur au centre du processus de conception soumis lui-même aux contraintes suggérées précédemment oblige à proposer des adaptations de la conception centrée utilisateur (CCU). On se rend rapidement compte que l'évaluation à chaque itération est un des freins à l'emploi de la CCU pour l'élaboration d'un objet complexe qui intègre une forte composante matérielle. La mise en œuvre de cette approche n'est possible que grâce à l'existence d'outils récents tels que la réalité virtuelle et ses dérivés. Cependant le développement de ces outils n'est pas trivial et leur utilisation pose de nombreuses questions portant sur la cohérence, la correspondance et la validité des résultats obtenus dans l'un ou l'autre des mondes réel ou virtuel. Un autre point qui intervient dans la conception d'une aide robotisée est l'importance que revêt la coopération homme machine (CHM). La CHM présente plusieurs intérêts. Tout d'abord faire en sorte que l'utilisateur voit la machine comme un outil qui lui offre la capacité de réaliser une tâche jusqu'à lors inaccessible. L'utilisateur participe en tant qu'acteur au service que lui rend la machine. Un autre avantage est la possibilité de réduire la complexité de la machine en adoptant le principe de la semi-autonomie. Nous avons abordé la coopération homme machine dans plusieurs de nos travaux (Rybarczyk *et al.*, 2002a), (Rybarczyk *et al.*, 2002b), (Gaillard *et al.*, 2003), (Rybarczyk *et al.*, 2004a), (Rybarczyk *et al.*, 2004b), (Mestre *et al.*, 2005), l'objectif de ce papier est d'apporter une réflexion sur la conception d'un objet complexe innovant tel qu'un assistant robotisé pour handicapé moteur. Nous commençons par préciser certains points concernant le handicap moteur, les besoins chiffrés en aide technique complexe innovante pour la mobilité et la manipulation d'objets et les réponses proposées par les sciences et techniques. Dans la deuxième partie nous proposons une approche basée sur la conception centrée utilisateur pour des objets complexes innovants. Les outils issus de la réalité virtuelle et de ses

variantes sont essentiels à la mise en œuvre de cette approche, nous soulignons leurs intérêts et leurs difficultés d'emploi. Enfin nous montrons en quoi cette approche est intéressante en l'appliquant à certains aspects de la conception de l'assistant ARPH.

2. Handicap moteur et aides techniques innovantes

2.1. Situation de handicap

La classification internationale CIH¹ de l'OMS², basée sur le modèle de WOOD, distingue trois notions : la déficience, l'incapacité et le handicap. La déficience est une altération ou bien l'absence d'une fonction ou d'une structure anatomique, psychologique ou physiologique qui est pour une grande part du ressort de la médecine. L'incapacité correspond à une limitation des capacités fonctionnelles pour accomplir une activité normale alors que handicap est la limitation de la personne en tant qu'acteur social. La nouvelle classification internationale CIF³ élaborée dans les années 90 insiste sur la notion fondamentale de situation de handicap qui résulte de la confrontation d'un individu avec ses incapacités à un environnement non favorable.

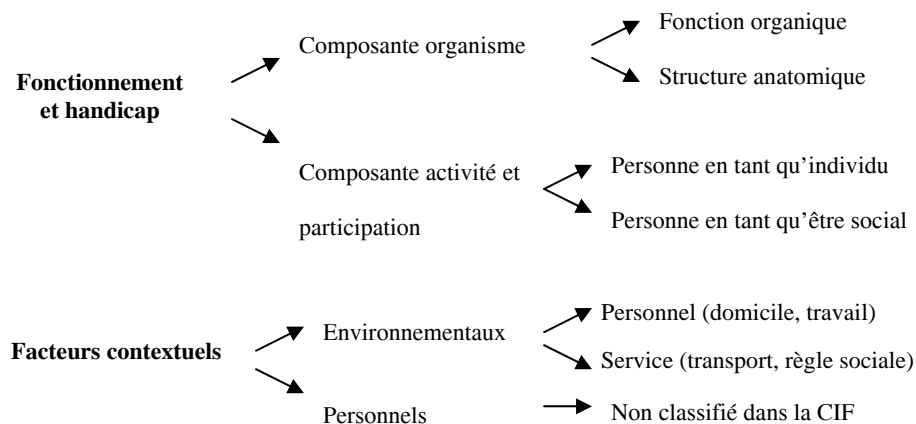


Figure 1. Terminologie de la Classification Internationale du Fonctionnement (CIF 2, 2000)

La Figure 1 précise la terminologie employée dans CIH-2:

¹ Classification Internationale des Handicaps déficiences incapacités, désavantages, 1980

² Organisation Mondiale de la Santé

³ Classification Internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF-2, 2000)

- Fonctions organiques désignent les fonctions physiologiques des systèmes organiques (y compris les fonctions psychologiques).
- Structures anatomiques désignent les parties anatomiques du corps, telle que les organes, les membres et leurs composantes.
- Activité désigne l'exécution d'une tâche par une personne. Les limitations d'activité désignent les difficultés que rencontre une personne dans l'exécution de certaines activités.
- Participation désigne l'implication d'une personne dans une situation de vie réelle. Les restrictions de participation désignent les problèmes qu'une personne peut rencontrer en s'impliquant dans une situation de vie réelle.
- Facteurs environnementaux désignent l'environnement physique, social et attitudinal dans lequel les gens vivent et mènent leur vie.

L'introduction de la notion de situation de handicap a le mérite d'impliquer que toute personne peut, à un moment donné, se trouver en situation de handicap. La réduction de la situation de handicap peut être évaluée en termes d'activité de la personne et de participation ou d'implication dans la vie sociale.

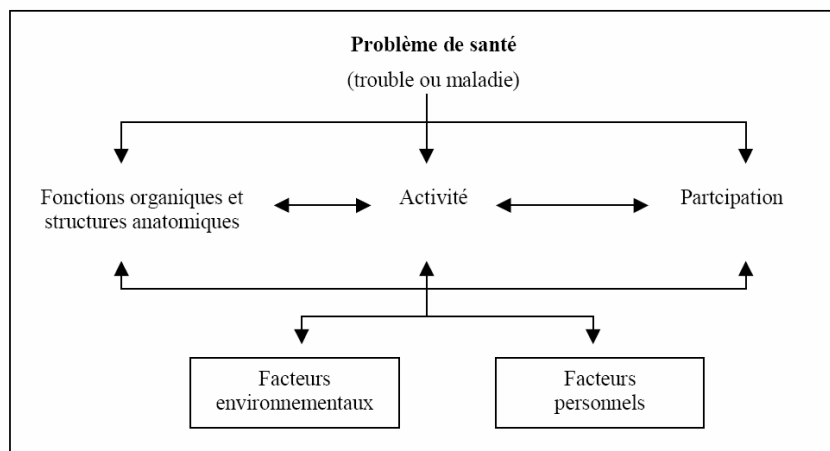


Figure 2. Modélisation de la Classification Internationale du Fonctionnement

D'après le modèle proposé en Figure 2, on peut aborder la réduction de la situation de handicap selon différents points de vue non exclusifs : santé , facteurs environnementaux et personnels.

2.2. Evaluation des besoins

Cette étape est cruciale. Les résultats conditionnent directement le processus de conception en permettant de pondérer l'influence des divers facteurs : humain, socio-économique – on peut citer le coût, l'importance de la population concernée, la variabilité de cette population – et technologique. Cependant les chiffres manquent pour obtenir une représentation fidèle de ces besoins. Les données chiffrées présentées dans les tableaux ci-dessous sont tirées de l'enquête HID 98-99⁴. Le Tableau 1 fait ressortir l'importance de la population concernée par une déficience.

Personne déclarant (% de la population)	
être affectée d'une déficience	40,4
Recourir à une aide technique	11,6
Recourir à une aide humaine	10,3

Tableau 1. Population concernée par une déficience

Le Tableau 2 précise les besoins en aides techniques qui s'adressent aux personnes handicapées moteur. On se rend compte que le besoin pour des aides complexes reste entier. Dans le meilleur des cas, le fauteuil roulant électrique, on atteint un taux de satisfaction de 59%. Ce même tableau fait apparaître un besoin important d'une assistance à la manipulation. Cependant d'autres études soulignent que le besoin d'une aide complexe lourde nécessitant l'utilisation de moyens robotiques ne concerne que quelques milliers de personnes voire quelques dizaines de milliers. C'est une constatation que le concepteur de l'aide doit garder à l'esprit. On ne peut pas compter sur un effet d'échelle pour réduire les coûts si on limite le

⁴ Les tableaux sont tirés de l'ouvrage « le handicap en chiffres » Synthèse réalisée par Cécile BROUARD (CTNERHI), en coordination avec les membres du comité de pilotage : Nathalie DUTHEIL, Pascale GILBERT, Hélène MICHAUDON, Solveig VANOVERMEIR (DREES), Pierrette TISSERAND et Catherine VASLIN (DGAS), Marc MAUDINET, Annick PIQUET et Jésus SANCHEZ (CTNERHI).

Les données chiffrées des tableaux présentés dans ce document proviennent de deux enquêtes :

[1] Goillot C., Mormiche P., Enquête «Handicaps, incapacités, dépendance» auprès des personnes vivant à domicile en 1999, INSEE

Résultats, collection Société, n°6, 2002.

[2] Goillot C., Mormiche P., Enquête «Handicaps, incapacités, dépendance» en institution en 1998, INSEE Résultats, collection

Démographie-Société, n°83-84, 2001.

domaine d'application à la seule suppléance fonctionnelle. Il est indispensable d'élargir le champ des applications potentielles d'une telle aide et donc de prévoir un système très modulaire capable de s'adapter à des besoins variés.

Besoin en aide	Besoin satisfait	Besoin non satisfait	Satisfaction (%)
Mobilité/Déambulateur	149 900	17500	90
Mobilité/Fauteuil roulant	189 700	19400	91
Mobilité/Fauteuil roulant électrique	24 900	17100	59
Manipulation à distance	31200	57100	35,3
Manipulation de livre	8500	40700	17,3

Tableau 2. Les besoins en aides techniques complexes pour la mobilité et la manipulation

Le Tableau 3 rappelle que souvent le handicap se conjugue au pluriel. Il se posera donc la question de l'interopérabilité avec d'autres systèmes d'assistance à des fonctions vitales, de communication ou encore de perception.

Lieu	Monodéficience (%)	Pluridéficience (%)	Déficience non précisée (%)	Sans (%)	Population (millions)
Domicile	18	10	11	61	57,41
Institution	42	53	3	2	0,66

Tableau 3. Pluridéficiences

2.3. Réponses apportées par les sciences et technologies

Les sciences et technologies proposent plusieurs voies pour réduire le désavantage provoqué par une situation de handicap. Le domaine d'intervention se situe au niveau de l'environnement et/ou de l'individu.

Tout d'abord, une idée qui vient naturellement est l'aménagement des environnements existants, et en parallèle la conception des futurs lieux de vie. Des équipes de recherche élaborent des aides à la conception de bâtiments destinées à l'architecte. Ces logiciels vont lui permettre d'intégrer dans ses projets la dimension handicap, comme a pu l'être la dimension développement durable (Aupetit *et al.*,

2006). Les voies qui s'intéressent à l'individu cherchent soit à corriger la déficience, soit à agir au niveau de l'incapacité. Cette distinction qui peut être discutée, présente l'avantage de mieux comprendre les objectifs et les solutions adoptées. Si le but est de réduire la déficience, les solutions appartiennent majoritairement au GBM⁵ car elles requièrent une intervention chirurgicale sur le patient pour la pose d'électrodes ou l'introduction de microboitiers, l'implant cochléaire en est une bonne illustration. Dans le domaine du handicap moteur, des projets utilisent le principe de l'électrostimulation fonctionnelle pour rendre à la personne l'usage d'un segment du membre supérieur ou inférieur (Guiraud *et al.*, 2003a), (Guiraud *et al.*, 2003b). Il est bien évident que ces projets sont fortement pluridisciplinaires et font appel à bien d'autres domaines que ceux appartenant au GBM. Cependant ils présentent la caractéristique commune d'être intrusif (intervention chirurgicale). Il en est de même des orthèses (contact physique) qui vient se placer sur le corps pour assister un segment défaillant. Si l'altération n'est pas irrémédiable, la déficience peut être réduite en utilisant une machine de rééducation musculaire (Manamanni *et al.*, 2005) (Afilal *et al.*, 2006.). Ces machines proposent différents modes de fonctionnement qui permettent au praticien d'adapter le programme de rééducation aux besoins spécifiques du patient. Dans le cas où la déficience est due à l'absence d'un segment, il est possible d'utiliser une prothèse. En restant au niveau de l'individu, si le but est de réduire l'incapacité plutôt que la déficience, les projets cherchent à restaurer une partie des capacités fonctionnelles perdues en s'appuyant sur une aide technique. Cet article traite des machines complexes innovantes destinées à la suppléance fonctionnelle conçues à partir des méthodes et des techniques développées en robotique. La particularité de ces machines est de posséder des capacités de perception, d'action et de traitement de l'information. Cette dernière aptitude confère à la machine, dans une certaine mesure, la possibilité de diagnostic, de prise de décision et surtout d'interaction avec la personne au sens d'influence réciproque de ces deux entités. L'objectif n'est pas de réaliser une machine autonome mais au contraire, autant que faire se peut, de favoriser une coopération entre l'homme et la machine dans le but principal de rendre service à cette personne.

3. Conception centrée utilisateur d'un objet complexe innovant

Cette section aborde la conception d'aides complexes innovantes. Après avoir décrit des méthodologies traditionnelles nous proposons une adaptation argumentée de la conception centrée utilisateur.

⁵ Génie Biologique et Médical

3.1. Conception traditionnelle

La Figure 3 présente les deux processus de production actuellement les plus utilisés dans le milieu industriel. On y trouve le cycle en V et le cycle en spirale. Dans le cycle en V, l'utilisateur exprime un besoin. L'industriel y répond en lui présentant un cahier des charges qui fait alors office de contrat entre les deux parties. L'industriel fait ensuite son analyse, sa conception, la réalisation et les tests. Il ne retrouve le client que pour la livraison finale du produit. Dans le cycle en spirale (Beohm, 1988), même si les étapes du processus de production sont identiques, le client est régulièrement mis à contribution pour valider les choix intermédiaires fait par l'industriel.

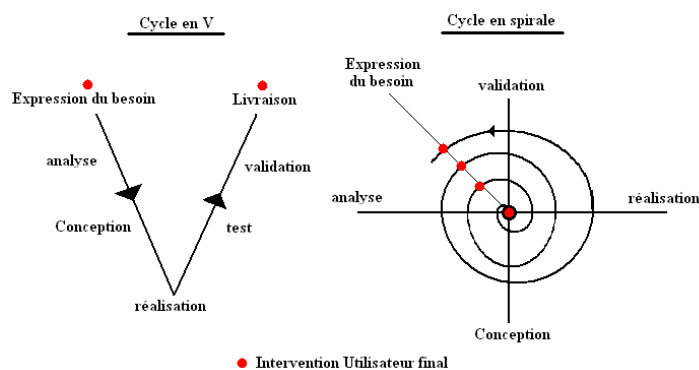


Figure 3. Schémas de conception traditionnelle

L'apport du cycle en spirale par rapport au cycle de développement en V est donc l'éventuelle implication du client pour redéfinir ou vérifier à chaque itération que le besoin exprimé au départ est bien compris et retranscrit et ainsi, tendre vers une meilleure satisfaction du client lors de la livraison finale.

3.2. Conception centrée utilisateur

Plusieurs approches non exclusives peuvent être envisagées pour concevoir une aide technique: la conception centrée utilisateur, la conception par l'usage, la conception participative et la conception centrée incapacité qui permettrait d'aboutir à une aide technique généralisable.

La conception centrée utilisateur consiste à considérer les utilisateurs et leurs besoins tout au long du processus de développement d'un produit. Dans le cas d'une application informatique, la norme ISO 13407 (ISO13407, 1999) définit le principe et les caractéristiques de la conception centrée utilisateur.

3.3. La norme ISO 13407

3.3.1. Nature et objectifs de l'ISO 13407

La normalisation dans le domaine de l'ergonomie des interfaces couvre deux champs distincts : celui des produits et celui des processus. Les normes développées en matière d'ergonomie informatique ont d'abord été dédiées aux préconisations sur la qualité ergonomique finale du produit. La norme ISO 13407 vise le champ plus large du cycle de conception d'applications informatiques et détermine les exigences auxquelles un projet doit répondre pour être considéré comme "centré sur l'humain". Elle concerne la méthodologie de conception et l'intégration de la démarche ergonomique dans un cycle de développement (Ergolab, 2004).

3.3.2. Caractéristiques du processus de conception centrée utilisateur

Cinq principes sont nécessaires à la satisfaction de la norme *ISO 13407*:

- *Une préoccupation amont des utilisateurs*, de leurs tâches et de leur environnement
- *La participation active de ces utilisateurs* pour une compréhension claire de leurs besoins et des exigences liées à leurs tâches
- *Une répartition appropriée des fonctions* entre les utilisateurs et la technologie
- *L'itération des solutions de conception* jusqu'à satisfaction aux exigences définies au départ
- *La contribution de chaque membre de l'équipe multidisciplinaire de conception.*

Le processus typique comprend trois phases principales mises en oeuvre de façon itérative : analyse, conception, évaluation. A chaque étape, définie dans la norme ISO 13407, plusieurs méthodes en ergonomie des interfaces sont utilisables mais elles ne seront pas toutes mises en jeu dans un même projet. Les méthodes sont à choisir et à adapter en fonction de facteurs variés tels que le temps disponible, les marges de manœuvres financières, la disponibilité des utilisateurs, le type d'application (experte ou grand public), le domaine d'intervention, les compétences des intervenants. De façon résumée, les moyens d'impliquer les utilisateurs passent par des méthodes de types entretiens ou questionnaires, observation, « focus groups » et tests utilisateurs.

3.4. Objet complexe innovant de type aide technique

La conception d'une aide technique complexe innovante destinée à assister une personne handicapée moteur pose des problèmes spécifiques qu'il faut prendre en compte dans la méthodologie de conception.

3.4.1. *Spécificité des utilisateurs finaux*

L'étude des besoins a montré que la population des personnes concernées est limitée. En outre, elle présente des handicaps de caractéristiques très hétérogènes qui posent les questions de la spécification des besoins très variables, de la conception d'un produit adaptable et évolutif qui respecte les critères socioéconomiques contraignants et de l'évaluation en cours du processus. Le prototype intermédiaire doit posséder suffisamment d'adaptabilité pour répondre à cette forte variabilité. Le faible nombre d'utilisateurs potentiels et les particularités de chaque personne soulève le problème de protocoles et de validité des résultats d'évaluation.

3.4.2. *Spécificité de l'objet innovant*

Le caractère innovant fait que l'utilisateur rencontre des difficultés à définir clairement ses besoins en terme d'usage. Afin d'évaluer l'apport de l'objet d'assistance, comment identifier la plupart de ces usages, hors ceux prévus, si ce n'est par des phases de découverte consommatrices de temps ? Comment mettre en situation l'utilisateur alors que l'objet n'existe pas ?

3.4.3. *Spécificité due à la complexité de l'objet*

Dans le cadre du champ d'application du handicap, nous entendons par complexité un objet constitué d'une composante logicielle et d'une composante matérielle d'influence égale. La composante matérielle fait appel à des compétences dans plusieurs disciplines généralement la mécanique, l'électronique, l'informatique, l'électrotechnique. Les facteurs socioéconomiques du domaine contraignent à réduire la complexité en établissant un compromis adéquat entre complexité et usage, en impliquant davantage l'utilisateur au travers d'une coopération homme machine forte, en réutilisant, autant que faire se peut, des composants déjà commercialisés. Ce dernier point pose le problème crucial de l'interopérabilité de composants hétérogènes. Enfin une dernière question et non des moindres, concerne l'évaluation en cours du processus de l'objet complexe. Pour éviter un rejet immédiat des utilisateurs évaluateurs, il faut assurer la fiabilité d'un prototype intermédiaire, la prise en main progressive de cet objet qui par sa nature complexe n'est pas d'un usage aisé, d'autant plus si l'utilisateur est handicapé. En effet, la mise en évidence des apports et des limites d'usage d'un objet innovant et complexe par une population présentant des déficiences ne peut être menée à bien sans une phase d'apprentissage. C'est une problématique à part entière qui se complique dans l'optique de l'évaluation en cours de conception itérative de prototypes intermédiaires.

3.5. *Conception centrée utilisateur d'un objet complexe innovant*

On peut reprendre les principes de la CCU énoncés plus hauts pour évaluer la distance qui sépare la conception d'un produit à forte dominante logicielle avec celle d'un produit mixte :

- *Une préoccupation amont des utilisateurs*, de leurs tâches et de leur environnement. Si on cherche à développer un produit nouveau basé sur un concept innovant, l'utilisateur peut ne pas avoir suffisamment d'éléments pour définir les besoins au départ. Il est nécessaire d'élaborer une maquette pour lui permettre de mieux appréhender le concept. Cependant ce concept, sous la pression d'un ensemble de contraintes, va subir lors de sa mise en œuvre une déformation dont les conséquences requièrent une nouvelle évaluation par l'utilisateur. Autrement dit pour que l'évaluation ait un sens il faut être le plus proche possible de la réalité de terrain.

- *La participation active des utilisateurs* pour une compréhension claire de leurs besoins et des exigences liées à leurs tâches. L'utilisateur intervient principalement dans le processus de conception aux étapes de définitions des besoins et d'évaluation. Il peut aussi apporter son concours à l'étape de conception notamment pour affiner une solution. Il est à noter que si l'objet à concevoir est innovant, il faut être capable d'en présenter une représentation la plus fidèle possible pour que l'utilisateur ait les moyens d'en évaluer l'usage.

- *Une répartition appropriée des fonctions* entre les utilisateurs et la technologie convient tout à fait la philosophie de l'assistance à la personne telle qu'elle est énoncée par la plupart des acteurs du domaine du handicap. C'est à notre avis un des points qui doit requérir une attention particulière et une approche fortement pluridisciplinaire; le rejet ou non de l'objet par l'utilisateur en dépend (Hoppenot *et al.*, 2002). La coopération homme machine (CHM) présente plusieurs intérêts (Rybarczyk *et al.*, 2002a), (Rybarczyk *et al.*, 2002b), (Gaillard *et al.*, 2003), (Rybarczyk *et al.*, 2004a), (Rybarczyk *et al.*, 2004b), (Mestre *et al.*, 2005). Tout d'abord faire en sorte que l'utilisateur voit la machine comme un outil qui lui offre la capacité de réaliser une tâche jusqu'à lors inaccessible. L'utilisateur participe en tant qu'acteur au service que lui rend la machine. Un autre avantage est la possibilité de réduire la complexité de la machine en adoptant le principe de la semi autonomie. Dans ce cas, l'utilisateur et la machine sont considérés comme une unité dont les fonctions sont réparties de manière appropriée entre ces deux composantes. La distribution statique ou dynamique, des fonctions selon les capacités des composantes est un des problèmes posés par ce type de coopération. En effet, l'aptitude de la personne handicapée à participer à la tâche est fortement dépendante de facteurs environnementaux, comme l'ambiance, et personnels comme la fatigabilité.

- *L'itération des solutions de conception* jusqu'à satisfaction des exigences définies au départ. Dans le cas de la conception d'un produit mixte, la difficulté réside essentiellement dans la production d'un objet évaluable à chaque itération. Il est difficilement imaginable de faire évoluer la composante matérielle du prototype à chaque itération pour le soumettre à l'évaluation de l'utilisateur alors que c'est plus envisageable pour la composante logicielle (Schnädelbach *et al.*, 2004).

- *La contribution de chaque membre* d'une équipe de conception multidisciplinaire, notamment pour l'évaluation qui ne se limite pas à de simples considérations sur l'utilisabilité mais met en oeuvre des méthodes rigoureuses de recueil et d'analyse de données.

En résumé, c'est l'étape d'évaluation dans le processus de conception qui représente la principale difficulté à l'adoption de la CCU pour la conception d'un objet complexe qui mixte logiciel et matériel. En effet, la concrétisation des solutions, c'est à dire la réalisation de prototypes intermédiaires présente l'avantage de confronter les utilisateurs avec une évolution du produit pour évaluer itérativement l'adéquation avec les besoins spécifiés voire pour affiner ces besoins. Dans le cas de produits à composante logicielle majoritaire, cibles de la norme ISO 13407, la concrétisation des solutions peut se faire grâce à des méthodes simples comme créer des maquettes statiques sur papier ou mimer l'enchaînement des écrans en fonction des réponses de l'utilisateur (c'est le prototypage papier), ou encore concevoir des story-boards qui permettent à l'utilisateur de jouer des scénarios d'utilisation en fonction des consignes. Il est financièrement inconcevable d'effectuer une modification importante de la composante matérielle de l'objet complexe à chaque itération. Il y a d'un côté un objet complexe en cours de développement qu'il faut fiabiliser pour deux raisons, le rejet par l'utilisateur du système et surtout sa sécurité. De plus, 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, dont le handicap présente des caractéristiques très variables d'un individu à l'autre. Chaque personne est à considérer comme un cas particulier. Comme il a déjà été souligné, cette variabilité soulève aussi des interrogations quand à la validité des résultats d'évaluation.

L'utilisation de la réalité virtuelle et des techniques connexes offre une possibilité de lever ce verrou (Fischer, 2002), (Fuchs, 2006). Ces techniques permettent d'envisager un prototypage rapide, moins onéreux qui, couplé avec la réalisation incrémentale du prototype réel, permettrait l'évaluation par l'usage à chaque itération. La conception mixée dans laquelle prototypes réel et virtuel cohabitent pour : 1) donner à l'utilisateur la meilleure idée possible du produit à un instant donné, 2) mettre l'utilisateur dans une situation plus réaliste. Si l'évolution se révèle favorable, à chaque nouvelle itération du processus de conception la part de la composante réelle du produit croît.

Nous avons soulevé précédemment le problème de la déformation que subit le concept dans le processus de mise en oeuvre sous la pression de contraintes diverses. On peut signaler en particulier la nécessité de trouver un compromis entre la complexité, le coût et l'usage tout en assurant une fiabilité et surtout une sécurité totale pour l'utilisateur, terme à prendre au sens large. Nous avons vu que la coopération homme machine est une voie possible pour réduire la complexité de la machine et donc son coût en évitant de rechercher une autonomie complète. Un

autre facteur y participant est la réutilisation de composants commercialisés. Toutefois il faut garder à l'esprit que la réutilisation n'est pas la panacée car elle contraint la solution et impose une gestion de l'hétérogénéité qui peut être complexe.

3.5.1. *Principes de notre démarche*

Pour répondre aux interrogations précédentes Nous proposons d'adapter la CCU pour les points suivants :

- L'utilisateur participe à la conception tout au long du processus en lui permettant d'intervenir non seulement au niveau de la fonction mais aussi du concept.
- Comme nous nous plaçons dans la perspective de la conception d'un objet innovant nous distinguons l'évaluation du concept de celle de la fonction. Dans le cas du concept pour que l'évaluation soit pertinente il faut placer l'utilisateur en situation telle qu'il puisse appréhender les intérêts du concept. Dans le cas de la fonction, il faut se rapprocher de la réalité pour que l'utilisateur puisse juger des limites apportées par la mise en œuvre du concept. L'intérêt de cette distinction est d'abord de vérifier si l'utilisateur a l'usage de ce concept puis de vérifier si la fonction répond bien à l'attente.
- La contrainte économique forte impose une construction itérative d'un seul prototype réel au fur et mesure de la validation du concept et des fonctions qui y sont liées. Ceci implique d'être capable de présenter à l'opérateur un produit intermédiaire qui mixe concept et réalité.

3.5.2. *Schéma de conception sur deux plans*

A la base de notre schéma de conception présenté en Figure 4, on retrouve le cycle de développement en spirale traditionnel. Cependant, dans notre approche, nous l'avons présenté sur deux plans très différents. Le plan horizontal est l'utilisation traditionnelle modélisée dans "le cycle en spirale" ; il représente le cycle de production d'un produit réel. Nous ajoutons un plan vertical qui est une conception virtuelle. À chaque cycle itératif, après un avis de besoin et la phase d'analyse, nous offrons le choix entre un cycle de prototypage rapide (virtuel) et une production réelle d'un prototype. Entre ces deux plans, il y a l'espace de réalité mixée qui nous permet de présenter un produit mixé combinant concepts et fonctions. Supposons que le processus de conception débute à partir du concept de l'objet innovant en prenant l'exemple de l'assistance à la manipulation à distance d'objets par une personne handicapée. À l'initialisation du processus l'objet est virtuel. À l'extrême, le concept peut être représenté par une main virtuelle capable de se déplacer dans l'environnement. La première évaluation de cet objet innovant simulé consiste à demander à l'utilisateur s'il en a l'usage. Dans l'affirmative, l'étape suivante consiste à élaborer les différentes fonctions qui permettront à terme

de réaliser le produit en commençant par exemple par la fonction mobilité. On conçoit la base mobile et on évalue la capacité de l'utilisateur à en faire usage, on itère jusqu'à validation (bien sûr la fonction mobilité intègre plusieurs sous fonctions auxquelles on applique la même démarche de conception). Il y a deux possibilités pour évaluer la mobilité : la simulation et/ou la réalisation. La simulation va valider un objet simplifié, la base mobile : sa structure, l'IHM... Elle est indispensable car elle permet de mettre l'utilisateur en situation, afin qu'il appréhende mieux les difficultés et les limites des diverses solutions. Après un certain nombre d'itérations, quand la simulation ne fait plus évoluer la solution, il y a réalisation de la base mobile retenue en intégrant des contraintes qui n'ont pas été prises en compte précédemment dans la simulation de l'objet (réutilisation, coût, maintenabilité...).

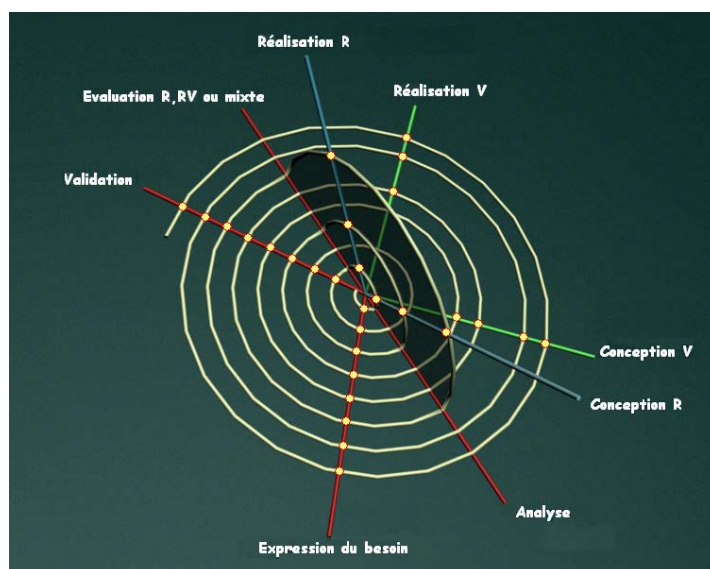


Figure 4. Schéma de conception sur deux plans

Cette étape supplémentaire présente l'avantage de confronter l'utilisateur à un objet en interaction avec son environnement, soumis, entre autres, aux lois de la physique (accélération, glissement...). En résumé, on construit le produit à partir d'un objet innovant complètement virtuel en remplaçant progressivement les fonctions ou les composants virtuelles par leurs clones réels. Le processus se termine quand le produit entièrement réel est validé. La mise en œuvre de cette démarche de conception fait appel aux diverses techniques développées autour de la réalité virtuelle que nous décrivons dans la section suivante.

3.5.3. *Les techniques de réalité virtuelle*

Hormis la RV, nous allons utiliser des techniques connexes à ce domaine (Fuchs *et al.*, 2006) telle que la Réalité augmentée (RA), la Virtualité augmentée (VA) et la Réalité Mixte (RM).

La RA consiste à surimposer des composants de synthèse sur une image réelle (Curtis *et al.*, 1998). Les composants ajoutés peuvent être de type texte, image (documentation, objet virtuel ...). Cette technique permet la réalisation d'un objet complexe mixant fonctions réelles et fonctions virtuelles. Lors de l'évaluation, la mise en situation de l'utilisateur est plus réaliste car une partie de l'objet est réel (Healthier *et al.*, 2005).

La VA consiste à ajouter à un environnement virtuel des composants réels. Cette technique est plus délicate à implémenter car elle engage plus de ressources. Elle a pourtant de nombreux avantages comme la possibilité d'inclure dans un monde virtuel simplifié les propriétés dynamiques d'un objet réel sans avoir à le modéliser avec précision. On peut donc avoir la dynamique de certains composants du système tout en ayant la possibilité d'évoluer dans des environnements virtuels très variés qui n'existent pas en réel. Entre RA et VA, on peut déplacer le curseur qui définit la part du réel et du virtuel. On parle alors de RM.

La vision est le sens le plus riche en information ce qui justifie que nous nous limitons à la modalité visuelle dans l'utilisation des techniques de RV.

3.5.4. *Discussion*

Dans le cas général, il n'est pas simple de valider l'utilité et l'usage qui va être fait d'un produit en utilisant uniquement la réalité virtuelle. Le coût d'un simulateur hyperréaliste, modélisant les environnements, les dynamiques, les comportements humains est très élevé. Non seulement la modélisation est une tâche complexe mais cela nécessite aussi du matériel d'immersion onéreux et encombrant difficile à transporter et à dupliquer. Il est souvent nécessaire de se déplacer pour effectuer des évaluations directement au domicile des personnes handicapées. Nous avons donc écarté l'idée de tout valider en simulation avant la production réelle du système. Nous désirons plutôt nous positionner sur le prototypage rapide. Grâce à cela nous allions une conception mieux ciblée (puisque nous pouvons valider les concepts en virtuel) et une validation réelle par prototypage itératif du système en réel.

Dans notre approche, l'environnement ou le composant virtuel est généré par un simulateur utilisant uniquement la modalité visuelle. L'objectif est de placer l'utilisateur suffisamment en situation pour leur permettre de valider un concept. Le simulateur n'a pas besoin d'être hyperréaliste mais doit respecter le compromis degré d'implication/coût de production/apport dans la conception. L'immersion de la personne dans le simulateur n'a nul besoin d'être totale. Nous recherchons un degré de présence suffisant pour valider une idée (Bach *et al.*, 2004). La sensation de présence d'une personne dans un monde virtuel ne dépend pas uniquement du degré de réalisme. La personne humaine est suffisamment intuitive et adaptative pour

retrouver ses marques dans un environnement simulé éloigné du monde réel. (Les jeux vidéo ne sont pas toujours d'une grande qualité visuelle, ce qui n'empêche pas les joueurs de s'investir et d'être présent très fortement grâce à des dynamiques, des symboliques de jeu et des scénarii bien conçus). La correspondance entre les mondes réel et virtuel fait l'objet de nombreux travaux (Fuchs *et al.*, 2006). Les résultats montrent que beaucoup de facteurs entrent en jeu. Nous formulons ici l'hypothèse qu'il est possible de trouver un compromis entre qualité d'implication de l'utilisateur dans le monde virtuel, l'effort de production du simulateur et les apports à la conception du produit innovant. Si l'on revient au schéma de conception de la Figure 4, on voit que, si l'on a abordé au moins une fois chaque plan, on dispose alors du système sous forme simulé et réel. On peut effectuer des phases d'évaluation mixte qui allieront le virtuel et le réel nous fournissant des outils supplémentaires pour une meilleure évaluation du concept de départ. On remarque bien ici que ce n'est plus uniquement le produit final qui est validé. La RV appliquée à la CCU nous donne la possibilité d'évaluer des concepts avant qu'ils ne soient appliqués. Les limites imposées par la nécessité de réaliser un prototype réel à chaque cycle sont levées. Nous disposons alors, sans autre développement supplémentaire, d'un simulateur fiable et suffisamment réaliste destiné à l'apprentissage (Träskbäck *et al.*, 2004).

3.5.5. Avantages

Pour un utilisateur handicapé, l'apprentissage de l'utilisation d'une aide complexe est une des principales difficultés. Nous pouvons envisager pour l'apprentissage d'utiliser de manière itérative le simulateur construit lors de la phase de conception. L'utilisateur est d'abord confronté aux concepts puis à un objet simple qu'on va compliquer jusqu'à l'objet complexe final simulé. Le futur utilisateur peut prendre plus de risques qu'avec le système réel et ainsi mieux explorer les possibilités du système (analogie avec un joueur qui perd la notion réelle de la mort dans un jeu vidéo ou le nombre de vie est infinie). Des expérimentations en cours laissent penser que le simulateur permet d'envisager plus facilement de nouvelles stratégies et donc de s'approprier le système plus rapidement. Nous vérifierons ce point par des expérimentations futures en analysant le transfert de compétences sur système réel après un apprentissage sur simulateur, notamment voir si les stratégies utilisées sont les mêmes que pour une personne n'ayant appris que sur le système réel. Cet outil qui facilite l'apprentissage présente un double intérêt. D'une part, l'utilisateur peut se familiariser avec les fonctions de système avant l'utilisation du robot réel lorsque le produit est commercialisé. D'autre part, cette phase d'apprentissage s'avère nécessaire dans le processus même de conception car, que le système soit réel ou virtuel, il n'en reste pas moins complexe d'utilisation.

Un autre avantage est la réduction du temps de conception. En effet, les contraintes d'expérimentation ne sont pas à sous-estimer. Dans le cadre du handicap ce sont essentiellement les contraintes de disponibilité des utilisateurs finaux, de la logistique à mettre en œuvre pour le déplacement des personnes ou du prototype,

des coûts induits pour les phases de test et de validation. En diminuant le nombre de cycles, on peut limiter ces phases. Si le simulateur peut être déplacé et dupliqué, il est possible de le mettre à disposition au domicile de plusieurs utilisateurs. C'est un argument supplémentaire qui milite en faveur d'une limitation de la complexité du simulateur.

4. Application au projet ARPH

Nous allons appliquer cette méthode au système complexe ARPH (Aide Robotisée pour Personnes Handicapées) qui est un robot destiné à l'assistance à la manipulation à distance d'objets par une personne handicapée motrice. ARPH est développé pour des personnes incapables de se déplacer et de manipuler des objets sans aide. L'objectif est de procurer un minimum d'autonomie dans leur vie quotidienne, que ce soit chez elles ou bien à l'extérieur.

L'objectif de cette section est de montrer en quoi l'approche que nous avons proposée, munie des outils de la RV, permet de développer un produit plus en adéquation avec l'attente des utilisateurs car évalué plus régulièrement à chaque itération. Cette approche permet de partir d'un concept d'aide et d'obtenir un prototype réel mais peut être appliquée aussi dans l'optique de faire évoluer un produit existant. Nous commençons par présenter l'état actuel du système ARPH et les contraintes qui ont influencé les choix de conception. Puis nous terminerons en illustrant sur des cas concrets les possibilités offertes par les techniques issues de la RV dans le cadre de l'approche de conception proposée.

4.1. Etat actuel du système ARPH

ARPH est composé d'un bras manipulateur fixé sur une base mobile et d'une caméra orientable afin de saisir, manipuler des objets que ceux-ci soient dans ou hors du champ de vision de l'utilisateur. En cours de déplacement, une ceinture ultrasonore permet au robot d'éviter des obstacles placés sur son chemin. Un ordinateur embarqué sur le robot accueille un ensemble de serveurs de gestion des principaux composants matériels (Figure 5). Le robot est commandé à distance par l'intermédiaire d'une architecture client serveur et d'un réseau sans fil WIFI. L'interface utilisateur est installée sur un ordinateur distant. L'utilisateur peut piloter le système à l'aide de différents modes de commande : manuel, caméra, suivi de cible... (Rybarczyk, 2001).

Le prototype du système ARPH a été évalué par des utilisateurs handicapés en juillet 2006. Les résultats sont en cours d'exploitation. Nous avons en parallèle développé un simulateur en réalité virtuelle possédant les mêmes caractéristiques physiques que le système réel : champ de caméra, vitesse de déplacement,

environnement réel modélisé en 3D (Figure 6). L'interface utilisateur est identique pour les systèmes réel et virtuel.



Figure 5. Assistant robotisé ARPH

Nous avons en collaboration avec l'université de Rennes, validé l'intérêt de ce simulateur pour l'approche et la saisie d'objets (publication en cours). Il ressort des conclusions de ces manipulations que le comportement des utilisateurs est globalement identique, que ce soit en virtuel ou en réel. Les résultats montrent une plus grande similarité entre les deux conditions, réelle et virtuelle, pour la phase de déplacement alors que pour la saisie (tâche plus complexe), l'utilisateur semble désorienté par le simulateur.



Figure 6. Exemple de vue délivrée par le simulateur

que pour la saisie (tâche plus complexe), l'utilisateur semble désorienté par le simulateur. L'analyse des résultats tend à montrer un manque d'implication de la personne dans la condition virtuelle peut être due à une sensation de présence insuffisante. Lors de la conception du simulateur, nous avons atteint un certain degré de réalisme avec un logiciel pouvant être installé sur un ordinateur personnel. L'architecture logicielle nous permet d'intégrer facilement de nouveaux environnements virtuels et sa modularité, de modifier facilement tel ou tel composant (positionnement de la caméra et du bras, champ de vision, orientation, capteurs de proximité, algorithmes comportementaux ...).

4.2. Contraintes de conception d'ARPH

Au cours de la conception du système ARPH nous avons rencontré deux grands types de contraintes pour construire les composants des deux principales fonctions, à savoir la mobilité et la saisie d'objets. Le premier est principalement dû à la volonté de réutiliser autant que possible des produits commercialisés avec les avantages inhérents : réduction du coût, utilisation de produits fiabilisés et maintenus par le circuit de distribution ... Cependant la réutilisation contraint le choix des solutions jusqu'à s'éloigner du concept. Il faut alors évaluer si l'usage est préservé. Le deuxième type de contraintes est lié à la difficulté de définir a priori la disposition de certains organes les uns par rapport aux autres : bras par rapport à la base mobile, caméra par rapport au bras ... Il est important de remarquer que nous ne cherchons pas à valider chaque organe indépendamment mais plutôt une fonction d'usage comme par exemple la saisie d'objet qui peut faire intervenir plusieurs organes mécaniques et des algorithmes comportementaux spécifiques à ceux-ci. Le choix des organes est donc important mais le positionnement de ceux-ci les uns par rapport aux autres pour satisfaire une fonction d'usage l'est presque davantage. Il intervient directement dans le processus d'appropriation du système par l'utilisateur comme l'a montré l'étude que nous avons menée à ce sujet (Rybarczyk et al., 2004). La simulation apporte une réponse à problème de positionnement relatif des organes.

4.3. Etude de cas

Possédant un prototype réel et un simulateur, nous allons maintenant étudier différents cas illustrant l'apport des techniques de RV à la démarche que nous proposons. Chaque exemple souligne les difficultés de mise en œuvre.

4.3.1. Cas utilisant la virtualité augmentée

L'idée est ici de superposer à une base mobile virtuelle évoluant dans un environnement virtuel un bras MANUS réel. Nous évitons ainsi les difficultés de modélisation réaliste du bras. Ce cas de figure nécessite de fixer le bras Manus dans

l'environnement réel et de positionner une caméra orientable pour le filmer. Cette caméra doit suivre les mouvements de la caméra du monde virtuel pour obtenir une visualisation correcte du Manus. De cette vidéo est extrait le bras. Il faut simplifier cette phase en adoptant des éclairages et des arrières plans appropriés (fond vert/violet, éclairage uniforme). L'image extraite peut être alors superposée sur l'image virtuelle calculée. Comme souligné précédemment, une des difficultés techniques rencontrées dans la conception du système ARPH actuel a été de pouvoir placer le bras à différentes positions sur la base mobile réelle. En utilisant cette solution, il suffit de déplacer la caméra qui filme le bras pour simuler ces différentes positions. Néanmoins, il apparaît des limites. En effet, à moins de développer un système d'extraction d'image coûteux, nous ne pouvons pallier les problèmes d'occultations. En effet, le bras étant superposé sur l'image virtuelle, il sera toujours au premier plan ce qui exclut de faire passer l'une ou l'autre de ses articulations derrière un obstacle du monde virtuel. De même, la saisie d'un objet virtuel par le bras réel n'est pas envisagée.

4.3.2. Cas utilisant la réalité augmentée

Le cas de la virtualité augmentée présentée auparavant peut être « inversé ». Ici, nous allons utiliser la base mobile réelle dans un environnement réel nous assurant ainsi un réalisme parfait du déplacement au niveau visuel et dynamique. Nous avons par le biais des différentes manipulations noté la difficulté qu'ont les utilisateurs à percevoir la profondeur en vision monoculaire. La perte de cette information a pour conséquence, entre autres, le risque de détériorer le bras manus. Ainsi, en superposant à l'image réelle un bras Manus virtuel, il est possible de manipuler sans risques (Figure 7). La mise en place de ce mode est matériellement très simple.



Figure 7. Pince virtuelle plongée dans un environnement réel

Pourtant, la encore, il faut interdire les situations conduisant à des occultations. On peut cependant remédier à ce problème de façon relativement simple. En effet, les phases d'expérimentation pour la saisie ont lieu dans un environnement très contrôlé. De ce fait la localisation du robot dans ce dernier est assez fine. On peut donc, en modélisant certaines parties de l'environnement réel dans le monde virtuel, prendre en compte ces occultations. De même, la saisie d'objets virtuels dans le monde réel devient possible. Il n'est en effet pas nécessaire de superposer directement le bras virtuel sur l'image réelle. On peut utiliser des effets de transparence pour laisser à l'utilisateur une meilleure vision de l'environnement. Il est aussi possible de ne superposer par exemple, que la pince sur l'image réelle.

Bien que le Manus soit le seul bras manipulateur commercialisé actuellement donc un choix obligé, il serait intéressant de modéliser d'autres types de manipulateur dans notre système. Nous pourrions alors définir plus facilement l'outil idéal qui n'est peut être pas forcément un bras manipulateur, pour la manipulation et cela sans coût matériel supplémentaire.

5. Conclusion

Ayant développé un objet complexe innovant d'assistance à la personne handicapée en utilisant un cycle classique de conception en spirale avec une participation des utilisateurs lors de l'expression des besoins et de quelques évaluations, nous avons été confrontés à des nombreuses limitations. Dans cet article nous proposons une adaptation de la CCU afin de répondre aux contraintes spécifiques du domaine d'application. Cette approche s'appuie sur les techniques issues de la réalité virtuelle. Nous montrons sur des exemples leur apport. Ayant à notre disposition un prototype réel et un simulateur, les travaux en cours mettent en oeuvre les études de cas cités précédemment. L'un des intérêts de l'approche étant de faciliter l'évaluation du système en cours de processus par une population handicapée. Il est nécessaire de mettre en place des protocoles d'expérimentations rigoureux qui prennent en compte les dimensions réalité, virtualité et réalité ou virtualité mixée.

6. Bibliographie

- Afilal L.-e., Manamanni N., Moughamir S., Zaytoon J., « Isometric and Isokinetic mechanical stimulation of the neuromuscular gamma reaction », *Elsevier, Mathematics and Computers in Simulation*, 2006.
- Ait Aider O., Hoppenot P., Colle E., « A model-based method for indoor mobile robot localization using monocular vision and straight-line correspondences », *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 52, p. 229-246, 2005.
- Ait-Aider O., Hoppenot P., Colle E., « Adaptation of Lowe's camera pose recovery algorithm to mobile robot self-localisation », *Robotica*, Vol. 20, pp. 385-393, 2002.

Etienne Colle, Sébastien Delarue, Philippe Hoppenot : "Conception d'une aide technique complexe et innovante ;application au projet ARPH" - Sciences et Technologies pour le Handicap, Hermès Science publications, Lavoisier, p. 71-93, Vol1, 2007

- Aupetit S., Puret A., Gaucher P., Monmarché N., Slimane N. « Classification automatique et visualisation de plans d'habitations adaptées », *4-ème Conférence Handicap*, Paris, Porte de Versailles. 7 au 9 juin, 2006.
- Bach C., Scapin D. L., « Obstacles and Perspectives for Evaluating Mixed Reality Systems Usability », *Workshop MIXER Exploring the Design and Engineering of MR system, IUI-CADUI 2004*, no 13-16, p. pp.72-79. Funchal, Portugal", January 2004,
- Beohm B.W., « A Spiral Model of Development and Enhancement », *ACM SIGSOFT Software Engineering Notes, Issue 4 ACM Press*, Volume 11, 1988.
- Curtis D., Mizell D., Gruenbaum P., Janin A., « Several devils in the details : Making an app work in the airplane factory », *Proceedings of IWAR'98*, p. 47-60, San Francisco. ACM, 1998.
- Ergolab, <http://www.ergolab.net/articles/conception-centree-utilisateur.html>, 2004
- Fischer X., Troussier N., La Réalité Virtuelle pour une conception centrée sur l'utilisateur *Mécanique et Industries*, Vol. 5, N°2, p. 147-160, 2002.
- Fuchs P., Moreau G., *Le traité de la réalité virtuelle*, volume 1 à 4, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, deuxième édition, 2006.
- Gaillard J.P., Freard D., Colle E., Hoppenot P. , « Operator's self confidence to detect mobile robot trajectory errors », *Le Travail Humain*, tome 66, n°1, pp. 1-21, 2003.
- Guiraud D., Makssoud H. El, Poignet P., Fraisse P., Dombre E., « Applications des outils de l'automatique au problème de la restauration du mouvement de membres paralysés sous stimulation électrique fonctionnelle », *Journées Nationales de la Recherche en Robotique*, Clermont Ferrand, France, October 2003.
- Guiraud D., Makssoud H. El, Poignet P., Fraisse P., Dombre E., « Automatic Control Theory Applied to the Restoration of the Movement of Paralysed Limbs », *ARP : International Advanced Robotics Programme, 3rd IARP International Workshop on Service, Assistive and Personal Robots*. Madrid, Spain", October 2003, p. 99-103.
- Heather J. Colbert; David W. Tack, « Augmented Reality for Battlefield Awareness », *DRDC Toronto*, may 2005.
- Hoppenot P., Colle E., « Mobile robot command by man-machine co-operation - Application to disabled and elderly people assistance », *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, July 2002, vol. 34, n°3, pp. 235-252.
- ISO Standard 13407:1999, TC 159/SC 4, « Processus de conception centrée sur l'opérateur humain pour les systèmes interactifs », TC 159/SC 4, ICS:13.180, april 2004.
- Manamanni N., Afilal L.-e., Moughamir S., Chourali T., Zaytoon J., « Characterization and implementation of mechanical stimulation on isokinetic machines », *Elsevier, Control Engineering Practice*, 13(9), p.1151-1161, 2005.
- Mestre D.R., Rybarczyk Y., Hoppenot P., Colle E., : « Assistance Robotics: Implementation of human-like visuo-motor synergies on a teleoperated mobile device », *CSUN's 20th Annual International Conference Technology and Persons with Disabilities*, March 14-19 2005, Los Angeles, CA.

Etienne Colle, Sébastien Delarue, Philippe Hoppenot : "Conception d'une aide technique complexe et innovante ;application au projet ARPH" - Sciences et Technologies pour le Handicap, Hermès Science publications, Lavoisier, p. 71-93, Vol1, 2007

- Rybarczyk Y., Galerne S., Hoppenot P. Colle C., Mestre D., « The development of robot human-like behaviour for an efficient human-machine co-operation », *AAATE*, Ljubjana, September 2001, p.274-279.
- Rybarczyk Y., Ait Aider O., Hoppenot P., Colle E., « Remote control of a biomimetics robot assistance system for disabled persons », *Modelling Measurement and Control*, 2002
- Rybarczyk Y., Etienne C., Hoppenot P., « Contribution of neuroscience to the teleoperation of rehabilitation robot », *SMC'2002*, Hammanet, Tunisia, abstract p.75, 6-9 October 2002.
- Rybarczyk Y., Mestre D., Hoppenot P. Colle E., « A biological model for the evaluation of human-machine adaptation », *AMSE*, vol. 65, n°78, p. 23-33, 2004.
- Rybarczyk Y., Mestre D., Hoppenot P. Colle E., « Implémentation télérobotique de l'anticipation sensorimotrice pour optimiser la Coopération Homme-Machine », *Le Travail Humain*, tome 67, n°3/2004, p. 209-233, 2004.
- Schnädelbach H., Kolvea B., Twidale M.B., Benford S., « The Iterative Design Process of a Location-aware Device for Group Use », *Proceedings Ubicomp2004, Lecture Notes in Computer Science*, Vol 3205. 329-346, 2004.
- Träskbäck M., Haller M., « Mixed reality training application for an oil refinery: User requirements », *VRCAI04, Virtual Reality Continuum and its applications in Industry*, NTU, Singapore, June 2004.