

Evaluation d'une aide à la navigation d'un fauteuil « intelligent »

J-M. Pergandi
P. Mallet
D. Mestre

UMR Mouvement et perception
Faculté des Sciences du Sport
163 Avenue de Luminy 13288 Marseille cedex 09

Résumé- Le pilotage d'un fauteuil électrique, via le joystick, reste une lourde tâche pour une part importante d'handicaps sensoriels, moteurs et cognitifs. Plusieurs approches en robotique mobile autonome facilitent ou automatisent le contrôle du véhicule. L'approche dynamique permet d'effectuer des comportements de suivi de mur, d'évitement d'obstacles, de passage de porte et d'atteinte de destinations avec un coût faible de calcul et des trajectoires douces.

Le fauteuil électrique du projet WAD (Wheelchair Attractor Dynamics) dispose d'une aide à la navigation adaptée à un large public. Une évaluation a été effectuée auprès d'enfants atteints d'une infirmité motrice et cérébrale (IMC). Les résultats montrent un apprentissage rapide de l'interface homme-machine et des trajets correctement réalisés par le fauteuil en mode automatique et en situation réelle.

Cette aide à la navigation est en cours d'industrialisation sur le fauteuil TopChair qui a la particularité de monter et descendre des escaliers. Pour mener à bien ce projet, des simulations 3D et des expérimentations au centre de réalité virtuelle de l'Université de la Méditerranée seront effectuées.

I. INTRODUCTION

L'autonomie de déplacement des personnes en situation de handicap moteur dépend de l'assistance d'un tiers ou d'un fauteuil roulant. Dans les cas des déficiences motrices les plus sévères, le fauteuil électrique est prescrit. La sécurité aux abords d'escaliers, l'évitement d'obstacles, le passage de portes nécessitent alors une attention soutenue de la part du pilote de ce type de véhicule, et ce malgré la grande variété d'interfaces d'entrée existant (commande vocale, au souffle, par le mouvement des yeux, joysticks, écran tactile, clavier...).

Le plus couramment, le pilotage d'un fauteuil est aujourd'hui laissé à l'initiative de l'humain qui au moyen d'un joystick précise le cap (avant, arrière, gauche, droite) ainsi que l'amplitude de la vitesse désirée. Un tel contrôle continu de la trajectoire demande néanmoins de l'entraînement et une certaine concentration.

II. APPROCHE THEORIQUE

D'importants travaux [Madarasz 86] [Bourhis 93] [Jaros 93] [Bell 94] [Mazo 95] [Bühler 95][Min 02] [Law 02], proposent depuis une quinzaine d'années des solutions de

fauteuils « intelligents » et un ensemble de fonctions automatiques embarquées, telles que le suivi de mur, l'évitement d'obstacles ou encore le passage de portes. Ces techniques de navigation utilisent dans leur version la plus évoluée un modèle global et dynamique de l'environnement, et la perception de cet environnement est assurée par des capteurs de type sonars, infrarouges, laser ou encore vision camera. Enfin l'intégration des commandes motrices, au moyen de codeurs incrémentaux, permet de disposer d'une estimation de la position du véhicule, qui doit être recalée à intervalles réguliers avec la position réelle.

Par rapport à ces méthodes, parfois coûteuses en temps de calcul, l'approche dynamique s'avère être un moyen intéressant et original pour la génération de comportements. Pour mémoire nous rappellerons que l'hypothèse centrale de l'approche dynamique en robotique mobile autonome [Bicho 98][Bicho 00][Schöner 95]][Mallet 02], réside dans le fait que le comportement moteur ainsi que les représentations pertinentes nécessaires à sa réalisation, doivent d'une part être générés de façon continue dans le temps, et d'autre part résister aux fluctuations ou perturbations auxquelles tout système réel est exposé. Cela conduit à une conception dans laquelle le comportement et les représentations sont les solutions stables (ou attracteurs) d'un ensemble de systèmes dynamiques, qui traduisent en temps réel l'information sensorielle en contraintes continûment variables.

D'autres avantages de cette approche sont la faible taille du code, la douceur des trajectoires générées, une relative immunité face à l'imprécision des capteurs utilisés, ainsi que la disponibilité d'outils de diagnostics par la possibilité de suivre l'évolution au cours du temps des variables de contrôle.

III. PROJET « WHEELCHAIR ATTRACTOR DYNAMICS »

L'architecture de commande du Projet WAD (Wheelchair Attractor Dynamics) est installée actuellement sur un fauteuil roulant électrique modèle CRUISER de chez INVACARE (Fig. 1). Ce fauteuil est équipé d'un système DX de base (joystick et module de puissance), auquel nous avons rajouté le module DX Key, qui permet un interfacement aisé via le port parallèle d'un ordinateur portable.

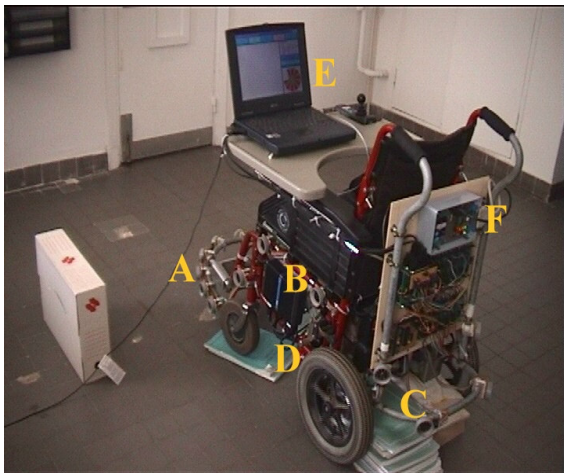


Fig. 1. Projet WAD. **A** : ceinture de capteurs de proximité infrarouge située à l'avant du véhicule. **B** : un capteur de proximité infrarouge latéral gauche. **C** : un capteur de proximité infrarouge située à l'arrière du véhicule. **D** : codeur incrémental gauche situé devant la roue. **E** : ordinateur embarqué qui reçoit les informations proprioceptives et extéroceptives et fournit en retour les commandes motrices calculées par le système dynamique. **F** : DX Key qui permet un interfaçage entre le système DX et l'ordinateur portable

En mode manuel, le pilote impose au moyen du joystick des commandes de vitesse et de direction qui sont transmises au module de puissance et à la motorisation via le bus DX.

En mode automatique, les capteurs de proximité infrarouge et les codeurs incrémentaux renseignent sur les contraintes de l'environnement, ainsi que sur l'orientation et la distance de la cible par rapport à la position courante du véhicule. Ces informations proprioceptives (codeurs incrémentaux) et extéroceptives (capteurs de proximité) permettent de calculer des commandes de vitesse et de direction qui sont transmises au module de puissance via l'interface DX Key sans avoir à manipuler le joystick. Le fauteuil atteint seul sa destination.

A tout moment le pilote peut passer du mode automatique au mode manuel et inversement.

IV. INTERFACE HOMME-MACHINE

Différentes versions de l'Interface Homme-Machine (IHM) permettent de répondre à divers profils d'utilisateur.

A. Classification des profils utilisateur

Une classification a été réalisée sur deux axes, l'un moteur et l'autre cognitif. Sur l'axe moteur nous avons distingué deux grands profils « moteurs » d'utilisateurs :

- ceux qui ont des troubles moteurs mais qui ont une capacité d'action et de manipulation sur les objets. Il s'agit du profil moteur 1.
- ceux qui n'ont quasiment ou pas de possibilité à manipuler des objets. Il s'agit du profil moteur 2.

Ensuite, sur l'axe cognitif nous avons simplement distingué les utilisateurs qui possèdent la lecture (profil cognitif A) ou non (profil cognitif B). Les profils moteurs et cognitifs sont croisés et donnent lieu donc à 4 profils.

B. Choix des interfaces motrices

Le profil moteur 1 utilise un joystick et le profil moteur 2 utilise une interface de type « tout ou rien » (contacteur au pied, contacteur à la main, etc...).

C. les séquences des tâches et les interfaces graphiques

Il y a quatre tâches dont chacune s'effectue sur une interface graphique adaptée. La première tâche est de sélectionner la pièce où se trouve le fauteuil. L'interface graphique correspondante affiche le plan de l'habitation (Fig. 2). Chaque pièce du plan est un item sélectionnable.

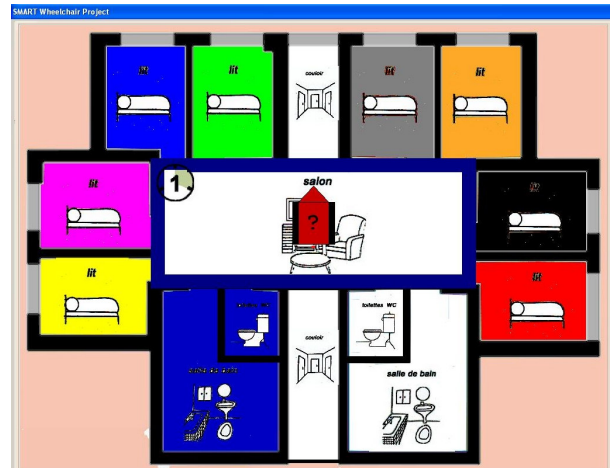


Fig. 2. Tâche de sélection de la position initiale du fauteuil. L'utilisateur doit sélectionner la pièce où se trouve le fauteuil. Le fauteuil rouge se déplace de pièce en pièce.

La tâche suivante est une tâche de validation (Fig. 3). L'utilisateur doit choisir entre deux items : retour en arrière (l'utilisateur retourne à la première tâche) ou validation (item de droite).

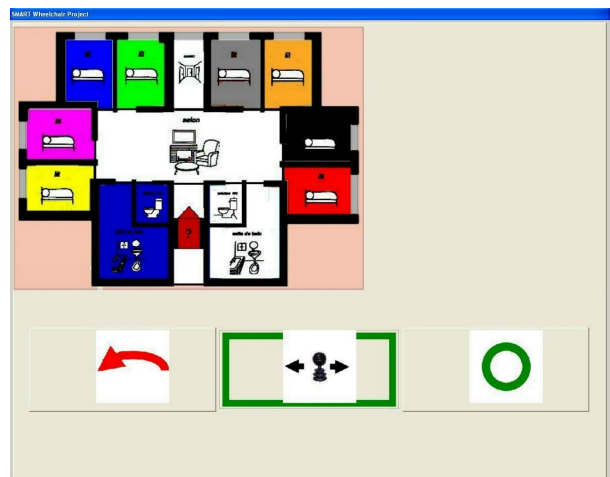


Fig. 3. Tâche de validation de la position initiale du fauteuil. La flèche rouge représente le « retour en arrière » et le cercle vert la « validation ». La plateforme au centre des deux options à choisir permet d'annuler un mauvais choix ou de se reposer.

La troisième tâche est la sélection de la destination (Fig. 4). Les pièces du plan sont des destinations à choisir. Une flèche montre la position de départ et la destination.

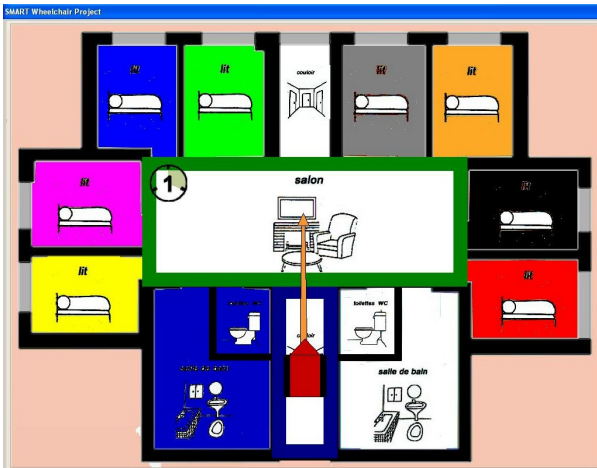


Fig. 4. Tâche de sélection de la destination. L'utilisateur doit sélectionner la pièce de destination. Une flèche indique la position initiale et la destination.

La dernière tâche est une tâche de validation de la destination (Fig. 5) et le principe est similaire au cas précédent.

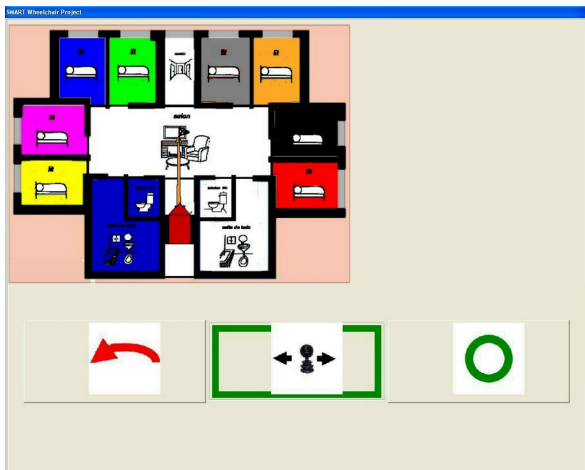


Fig. 5. Tâche de validation de la destination.

Pour le profil cognitif B uniquement une communication iconique est utilisée (Fig. 2, 3, 4, 5). En revanche, pour le profil cognitif A, une communication lexicale et iconique est utilisée.

D. Choix des systèmes de navigation dans les items

Pour le profil moteur 1 (capacité à manipuler des objets), un système de navigation manuelle est utilisé. Il s'agit de parcourir un ensemble d'items via le joystick. Pour sélectionner un item, ce système de navigation permet à l'utilisateur de ne pas gérer les distances entre items et accepte une grande marge d'erreur au niveau de la direction au moins égal à dix degrés. La validation d'un item se fait lorsque l'utilisateur n'actionne plus le joystick durant un temps

paramétrable et affiché à l'écran (voir le chrono affiché sur les Fig. 2 et 4).

Enfin, pour le profil moteur 2 (incapacité à manipuler des objets), nous proposons un système de navigation automatique par défilement. Ce système de commande consiste à proposer un ensemble d'items qui sont à tour de rôle sélectionnables durant une durée paramétrable. Le choix d'un item se fait en produisant une réponse motrice au moment où l'item souhaité est sélectionnable. L'utilisateur ne gère donc pas le parcours des items qui est imposée par le programme. Le temps durant lequel l'item est sélectionnable est affiché afin d'aider l'utilisateur à mieux planifier sa réponse motrice (voir le chrono affiché sur les Fig. 2 et 4).

V. EVALUATION AUPRES D'ENFANTS INFIRMES MOTEURS CEREBRAUX

A. Le centre Saint Thys

Une évaluation a été effectuée au Centre Saint-Thys à Marseille avec la participation d'enfants atteints d'une Infirmitté Motrice Cérébrale (IMC). Ce centre est la référence pour la prise en charge des IMC en région PACA. Le Centre Saint-Thys a pour mission d'intégrer et d'insérer socialement, culturellement et professionnellement les enfants et adolescents accueillis. Il s'agit de les aider à acquérir la plus grande autonomie possible par l'intermédiaire d'une éducation sensorimotrice, d'une scolarité adaptée, d'une intégration culturelle, d'une insertion sociale et professionnelle. Cette étude a été effectuée en étroite collaboration avec le service d'ergothérapie.

B. Méthodologie

Quatre enfants IMC ont participé à l'étude. Ils sont tous atteints d'une tétraparésie athétosique. Cette pathologie se caractérise par des mouvements permanents et aléatoires des quatre membres [Delcey 15]. Malgré des mouvements désordonnés, ces enfants ont tout de même la capacité de produire des mouvements volontaires avec une précision variable selon la gravité de leur trouble. L'âge des enfants se situe entre 11 et 14 ans.

Deux des enfants ont une capacité de manipuler des objets (profil moteur 1) et les deux autres enfants ont une incapacité à les manipuler (profil moteur 2). Les sujets sont familiers à l'utilisation de l'ordinateur. Chaque enfant utilise une interface motrice adaptée pour interagir avec l'ordinateur (joystick à mentonnière, joystick main, contacteur main, contacteur pied).

Aucun de ces enfants n'a acquis la lecture de façon complète. Ils correspondent tous au profil cognitif B et présentent des troubles cognitifs plus ou moins importants.

C. Evaluation

L'étude s'est déroulée sur trois semaines et en deux phases : une phase d'apprentissage et une phase d'évaluation.

La phase d'apprentissage consistait pour chaque enfant à apprendre l'utilisation de l'IHM. L'apprentissage était individualisé et durait deux fois une demi-heure. L'utilisation et l'enchaînement des tâches de l'IHM ont été assimilés par tous les enfants dès la première explication et démonstration.

En revanche, d'un point de vue moteur, il a fallu personnaliser certains paramètres du système de navigation (temps de défilement du curseur, fonction transfert du joystick, délai de validation, etc...). Un apprentissage court a suffi pour une navigation aisée sur les items proposés.

Ensuite, la phase d'évaluation consistait d'abord à effectuer un essai sans trajet. Ensuite les sujets effectuaient deux essais avec trajet en situation réelle et en mode automatique (Fig. 6). Le trajet, identique pour tous les sujets, consistait à longer un couloir, éviter un pot de fleur et un meuble, et passer une porte pour arriver au centre de la pièce cible. Sur l'un des deux trajets, le fauteuil devait aussi éviter une personne mobile.



Fig. 6. Evaluation au centre de Saint Thys. Passage de porte effectué par le fauteuil au cours d'un essai avec un des sujets IMC

D. Résultats

Le fauteuil a su atteindre sa cible. Les enfants ont tous sélectionné correctement la position initiale du fauteuil et la pièce cible.

Sur les deux tâches de validation présentes dans chaque essai, les sujets font en moyenne un retour en arrière pour corriger leur sélection. Aucune différence entre sujet ou profil n'est à relever (Fig. 7).

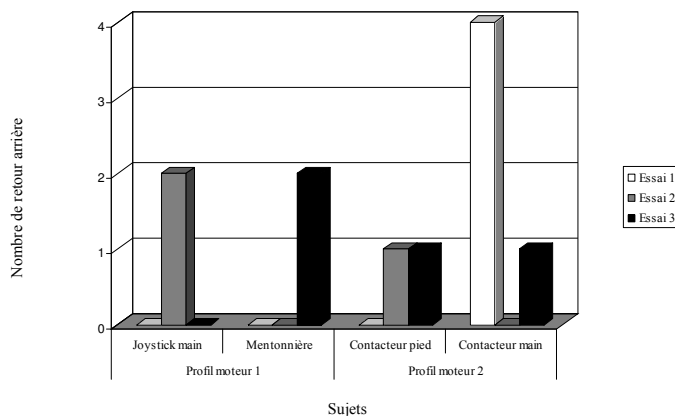


Fig. 7. Nombre de retour en arrière par sujet et par essai

Ensuite, le nombre moyen d'actions motrices par sujet et sur les trois essais est de 11 (Fig. 8). Une action motrice correspond à la sélection d'un item. Une différence entre profils moteurs semble apparaître. Le profil moteur 1 (capacité à manipuler des objets) correspond en moyenne à 15,6 actions alors que le profil moteur 2 (incapacité à manipuler des objets) ne fait en moyenne que 6,3 actions. Cette différence est liée au type de système de navigation utilisé par chacun des profils. Le profil moteur 1 doit naviguer sur un ensemble de pièces via le joystick, ce qui peut nécessiter beaucoup d'actions si le nombre de pièces est important, et si la pièce à sélectionner est loin de la position initiale du curseur. Pour ce profil moteur, le nombre d'action minimal pour sélectionner la pièce cible peut varier de quatre à dix actions. En revanche pour le profil moteur 2, le système de commande utilisé est celui d'une navigation automatique par défilement. Par conséquent ce profil n'a pas à gérer la navigation sur les pièces contrairement au profil moteur 1. Le profil moteur 2 peut donc en quatre actions effectuer toutes les tâches (une action par tâche).

On note de plus une augmentation du nombre d'actions motrices au cours des essais du profil moteur 1. Cette augmentation traduit vraisemblablement la fatigabilité d'une commande joystick que celui-ci soit manipulé à la main ou au menton.

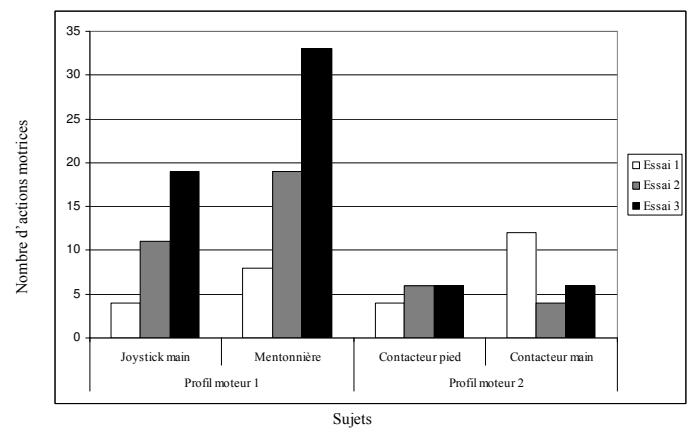


Fig. 8. Nombre d'actions motrices par sujet et par essai

Enfin, le temps moyen passé pour effectuer l'ensemble des tâches est de 55,25 secondes (Fig. 9). On observe un temps moyen plus important pour le sujet utilisant un contacteur pied (82 secondes). Cette différence par rapport aux autres sujets (autour des 45 secondes) est liée à un inconvénient du système de navigation automatique entre items. Le défilement du curseur effectue plusieurs tours en passant par toutes les pièces. Si l'utilisateur, lors du premier tour, omet de sélectionner la pièce souhaitée, il faut alors attendre qu'un nouveau tour se fasse, ce qui augmente grandement le temps passé sur la tâche.

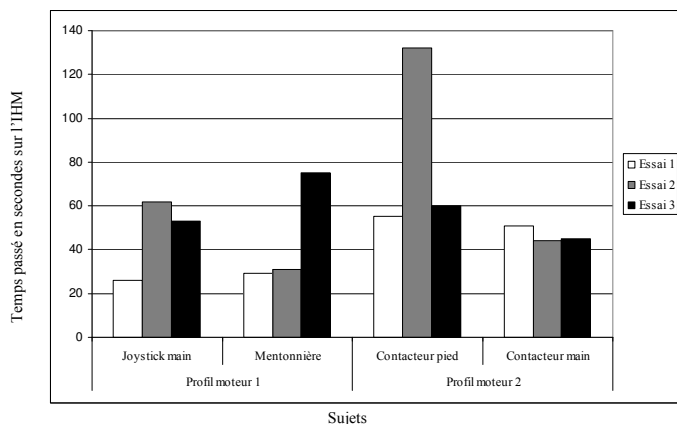


Fig. 9. Temps passé en seconde sur l'IHM par sujet et par essai

L'ensemble de ces résultats montre que chaque système de navigation présente un avantage et un inconvénient. Le système de navigation manuelle nécessite beaucoup d'actions mais demande un temps d'activité relativement faible. En revanche le système de navigation automatique nécessite peu d'action mais le temps passé à réaliser la tâche peut être important. Une voie de solution pour apporter un compromis entre le temps d'exécution et le nombre d'actions serait une sélection progressive d'item selon un principe de regroupement spatial.

Malgré les améliorations nécessaires, tous les enfants ont montré un vif intérêt et un réel enthousiasme durant toute l'étude, surtout pendant la phase d'évaluation, lorsque le fauteuil les a conduit automatiquement à la destination. Les deux enfants du profil moteur 2, n'avaient jamais effectué auparavant de déplacement sans l'aide d'une tierce personne.

VI. PERSPECTIVES

A. Simulation d'une intégration avec le fauteuil TopChair

Le système d'aide à la navigation développé et évalué sur le prototype WAD est en cours d'industrialisation sur le fauteuil TopChair [18] déjà commercialisé par la société HMC2 Développement. Le système TopChair (Fig. 10) présente les caractéristiques d'un fauteuil roulant électrique standard en mode route, et présente de plus la particularité de pouvoir monter et descendre des escaliers en toute autonomie grâce à un système de chenilles en caoutchouc.



Fig. 10. Le fauteuil TopChair est capable de monter les marches sans l'aide d'une tierce personne

L'intégration d'une aide à la navigation sur le fauteuil TopChair nécessite la recherche d'une configuration optimale des capteurs. De plus, des capteurs de proximité situés à mi hauteur seront ajoutés afin d'éviter des obstacles en élévation tels que les plateaux de tables.

Pour orienter les prises de décision, des simulations en 3D sous Virtools® sont en cours. Virtools® est une application générant des scénarios 3D hautement interactifs pour la réalisation d'application en réalité virtuelle.

Nous avons implémenté les comportements d'évitement d'obstacle et d'atteinte de destinations en environnement domestique sous Virtools® (Fig. 11). Un protocole expérimental est en cours de réalisation. Les tests évalueront les performances de plusieurs configurations de capteurs. Ces configurations seront testées à travers le croisement d'un grand nombre de facteurs environnementaux : type d'obstacle (tables, chaise, cloison ...), dimensions des obstacles, orientation des obstacles ...

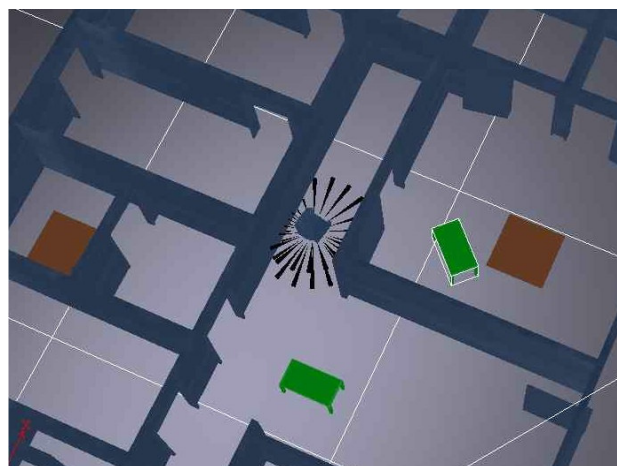


Fig. 11. Simulation en 3D du système dynamique sous Virtools®. Démonstration d'une simulation en 3D avec un robot et ses capteurs (cônes en noir) régi par un système dynamique. Le robot évite les obstacles (murs et tables) et atteint ses cibles (carrés grisés sur le sol).

Ces simulations permettront d'exclure un grand nombre de configurations non performantes avant d'évaluer le comportement du fauteuil en situation réelle.

B. Le fauteuil TopChair « intelligent » en réalité virtuelle.

Suite à ces premières simulations, des expérimentations seront effectuées au centre de réalité virtuelle de l'IFR Etienne-Jules Marey de l'université de la Méditerranée. Ce centre dispose d'un CAVE® [Cruz-Neira 93] composé de trois murs de projection et d'un sol, permettant d'immerger le sujet (visuellement, mais aussi auditivement). En particulier, le champ visuel du sujet peut ainsi être complètement occupé par la stimulation visuelle. Le système utilise un ensemble de techniques de capture des mouvements de l'utilisateur et d'interfaces de contrôle, permettant de calculer en temps réel la position du sujet (tête et membres) dans un environnement virtuel. Ce dispositif permet d'étudier les couplages action-perception en temps-réel. Il permet aussi d'optimiser les caractéristiques immersives d'un environnement virtuel, par rapport à un écran de visualisation classique par exemple [Mestre 06].

Ces expérimentations, qui seront sur le thème du handicap et de la mobilité sur fauteuil roulant, auront comme objectifs d'évaluer la communication homme – machine, de réaliser une méthode de prescription de fauteuils, et d'étudier l'orientation spatiale et l'apprentissage de la conduite.

VII. CONCLUSION

Le formalisme de l'approche dynamique permet d'obtenir les comportements d'évitement d'obstacles et d'atteinte de cible choisie par le pilote. L'évaluation au centre Saint-Thys montre ces performances en situation écologique avec des enfants IMC. Les solutions d'interaction homme machine proposées sont adaptées à une population hétérogène. Des enfants IMC avec des troubles moteurs importants et un retard cognitif ont su manipuler avec aisance et rapidité notre aide à la navigation.

Tous les choix relatifs aux aspects ergonomiques et technologiques imposés par l'intégration d'un système dynamique sur le fauteuil TopChair seront traités en partie par des simulations 3D et des expérimentations en réalité virtuelle.

VIII REMERCIEMENTS

Nous remercions Madame Limouzin, Directrice du Centre Saint-Thys, Madame Nevière, responsable du service paramédical pour son accueil et sans qui cette étude n'aurait pu être effectuée, et tout particulièrement l'ensemble du service d'ergothérapie qui a déployé énormément d'énergie pour la réalisation de ce projet. Enfin, nous remercions les enfants et leurs parents pour leur précieuse participation.

REFERENCES

- [1] D. A. Bell, J Borenstein, S.P. Levine, Y Koren and L Jaros "An assistive navigation system for wheelchairs based upon mobile robot obstacle avoidance," In IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, San Diego, California, pp. 2018-2022, 1994.
- [2] E Bicho, P Mallet and G. Schöner, "Using Attractor Dynamics to control autonomous vehicle motion," In Proceedings of IECON'98, IEEE Industrial Electronics Society, pp. 1176-1181, 1998.
- [3] E.Bicho, P.Mallet, G.Schöner, "Target Representation on an autonomous Vehicle with Low - Level Sensors", The International Journal of Robotics Research Vol 19, No.5, May 2000, pp.424-447.
- [4] G Bourhis, K Moumen, P Pino, S Rohmer and A Pruski, "Assisted navigation for a powered wheelchair," IEEE Inter.Conf. on Systems, Man and Cybernetics, Le Touquet, France. pp. 553-558, 1993.
- [5] C Bühler, R Hoelper, H Hoyer and W Humann, "Autonomous robot technologie for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities," *Robotics and Autonomous Systems* Vol. 14 pp. 213-222, 1995.
- [6] L A Jaros, D Bell, S P Levine, J Borenstein and Y Koren, "Navchair : Design of an Assistive Navigation System for Wheelchairs," In RESNA '93, Las Vegas, Nevada, pp. 379-381, 1993.
- [7] P Mallet, G Schöner "WAD Project where Attractor Dynamics aids wheelchair navigation". Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems. EPFL, Lausanne, Switzerland October 2002.
- [8] Rybarczyk, D Mestre, P Hoppenot, E Colle " Implémentation de mécanismes d'anticipation visuomotrice en téléopération ". Le Travail Humain. Sous presse.
- [9] G.Schöner, M Dose and C Engels, "Dynamics of behavior : Theory and applications for autonomous robot architectures," *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 16, pp. 213-245, 1995.
- [10] J-W Min, K Lee, S-C Lim, D-S Kwon, "Human-Friendly Interfaces of Wheelchair Robotic System for Handicapped Persons", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, Lausanne, Switzerland, October 2002, pp 1505-1510.
- [11] C K.H. Law, M Y.Y. Leung, Y Xu, S.K. Tso, "A cap as Interface for Wheelchair Control", Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, Lausanne, Switzerland, October 2002, pp 1439-1444.
- [12] Fehr L., Langbein E., kaar St.B. Adequacy of power wheelchair control interface for persons with disabilities: Aclinical survey. In Journal of Rehabilitation Research and development Vol 37 n°3 May/June 2000 pp 353-360.
- [13] Madarasz, R. L., Heiny, L. C., Crompton, R. F., and Mazur, N. M. The design of an autonomous vehicle for the disabled. IEEE J. Robotics Automation RA-2(3) 1986 pp 117-126.
- [14] Mazo, M., Rodriguez, F. J., Lazaro, J. L., Urena, J., Garcia, J. C., Santiso, E., Revenga, P. A., and Garcia, J. J. 1995. Wheelchair for physically disabled people with voice, ultrasonic and infrared sensor control. *Autonomous Robots* 2 pp 77-88
- [15] Delcey, M. : Déficiences motrices et situations de handicap, aspect sociaux, psychologiques, médicaux, techniques et législatifs, troubles associés, Edition APF 2002.
- [16] Cruz-Neira, C., Sandin, D.J., & DeFanti, T.A. (1993). Surround-Screen Projection-Based Virtual Reality: The Design and Implementation of the CAVE. *ACM Computer Graphics*, 27, 135-142.
- [17] Mestre, D. & Fuchs, P. (2006). Immersion et Présence. In *Traité de la Réalité Virtuelle, Troisième Edition* (sous la direction éditoriale de P. Fuchs). A paraître aux Presses de l'Ecole des Mines de Paris.
- [18] TopChair : <http://perso.wanadoo.fr/topchair/>