

Vers un Système d'Aide au Choix et aux Réglages
du Fauteuil Roulant Manuel

Lepoutre François Xavier, Adam Emmanuel, Faupin Arnaud, Anne-Pascale
Maquinghen, Eric Watelain

Laboratoire d'Automatique, de Mécanique et d'Informatique Industrielle et
Humaine
UMR CNRS 8530
Université de Valenciennes et de Hainaut Cambrésis
59313, Valenciennes cedex 9

Lepoutre François Xavier,
LAMIH
Université de Valenciennes et de Hainaut Cambrésis
59313, Valenciennes cedex 9
Tél : 03 27 51 13 34, fax : 03 27 51 13 18
Francois-xavier.lepoutre@univ-valenciennes.fr

Vers un Système d'Aide au Choix et aux Réglages du Fauteuil Roulant Manuel (FRM)

Introduction

Le choix du thème de ces journées par la Fondation Garches suffit pour attester de l'importance sociétale du Fauteuil Roulant Manuel. Cette importance est fondée, entre autres, sur le nombre élevé et croissant d'utilisateurs, sur l'histoire de ce dispositif, sur l'aspect emblématique de son image, sur les incidences musculo-squelettique pour les usagers, sur les coûts socio-économiques. Les communications de ces journées et les articles de ce recueil démontrent chacun un aspect de cette importance.

Il apparaît ainsi rapidement que le FRM est un objet paradoxal : simple au premier abord, il doit se plier à un nombre considérable de contraintes et, si possible, optimiser des critères souvent contradictoires. Le catalogue des principaux fabricants présente de nombreux types de FRM, chacun d'eux se déclinant en dizaine de modèles plus ou moins différents, à quoi s'ajoutent encore des dizaines de dispositifs optionnels. Cette variété s'explique aisément par la diversité des personnes utilisatrices, de leurs capacités, de leurs activités, de leur environnement.

Cette complexité du matériel implique la complexité du choix et de l'adaptation d'un FRM pour une personne particulière. Pour cela, la littérature française et étrangère regorge de conseils. On peut citer, à titre d'exemple et parmi les plus connus, les travaux de Cooper (1998), Van der Woude (2001), Peter Axelson (1994), Brubaker (1990).

Ces travaux qui consistent en des articles scientifiques, constitués de phrases et de schémas, très riches en informations diverses, sont parfois limités par leurs approches mono réglage et/ou monocritère qui peuvent conduire à des ambiguïtés et/ou à des contradictions.

L'objet de cet article est de présenter un travail en cours qui a l'ambition de réaliser un logiciel d'Aide au Choix et aux Réglages du Fauteuil Roulant Manuel. La formalisation informatique ayant comme avantage et comme contrainte de ne pas supporter l'ambiguïté. Ce travail, intitulé SACR-FRM, réunit dix équipes françaises, il est soutenu financièrement par l'Agence Nationale de la Recherche (ANR). Ces équipes ont des compétences complémentaires en sociologie, clinique, biomécanique, intelligence artificielle (voir annexe sur les participants).

Cet article illustre en premier lieu la difficulté de ce travail sur un exemple, le réglage de hauteur de siège, Hs. Cet exemple met en évidence les limites et contradictions que l'on rencontre quand on se borne à une approche "monocritère" pour le choix et les réglages du FRM. Le travail sera ensuite décrit comme un problème d'optimisation multicritères sous contraintes. Quelques critères et contraintes seront explicités. La formalisation de ce

problème, nécessaire pour une programmation informatique, se fera à l'aide de règles d'inférence et de formules appelées "indices" de qualité. Les liens, nombreux, entre les facteurs, les indices et les critères seront représentés par un graphe et résolus à l'aide des méthodes dites de Réseaux Bayésiens. Plusieurs réseaux Bayésiens seront inclus dans des "agents autonomes" qui proposeront à l'utilisateur du logiciel SACR-FRM plusieurs fauteuils différents et "satisfaisants" ainsi que les valeurs des indices significatifs des différents critères. Plusieurs règles relatives à des problèmes biomécaniques apparaissent et seront aussi exposées.

Exemple du réglage de hauteur de siège

L'ambition de réaliser un logiciel d'Aide au Choix et aux réglages du FRM impose de déterminer une règle logico-mathématique qui relie cette hauteur à différents paramètres relatifs à la personne, à l'usage, à l'environnement.

La littérature fournit plusieurs règles pour le réglage de la hauteur de siège, figure 1 :

Hauteur du siège (H_s) =

1. Hauteur telle que l'angle du coude soit compris entre 100 et 120° lorsque la main est positionnée sur le point le plus haut de la main courante (Brubaker C.E. (1990), Axelson P. et al. (1994), Cooper R.A. (1998), Van der Woude L.H.C. et al. (1989), Boninger (2000)). Réglage est réputé, par les experts, être le "bon" réglage pour propulser le FRM par les mains courantes.
2. Hauteur telle que pour des reposés pieds à environ 4-6cm du sol ($H_rP = 4-6\text{cm}$ pour éviter d'accrocher des obstacles), la cuisse puisse être en appui régulier sur le siège (parallèle au siège, pour éviter les surpressions ischiatiques et donc les escarres). (Brubaker C.E. (1990))

Ces deux règles peuvent donner des résultats contradictoires, en particulier, pour des sujets de dimensions "grande" ou "petite" ou de morphologie extrême.

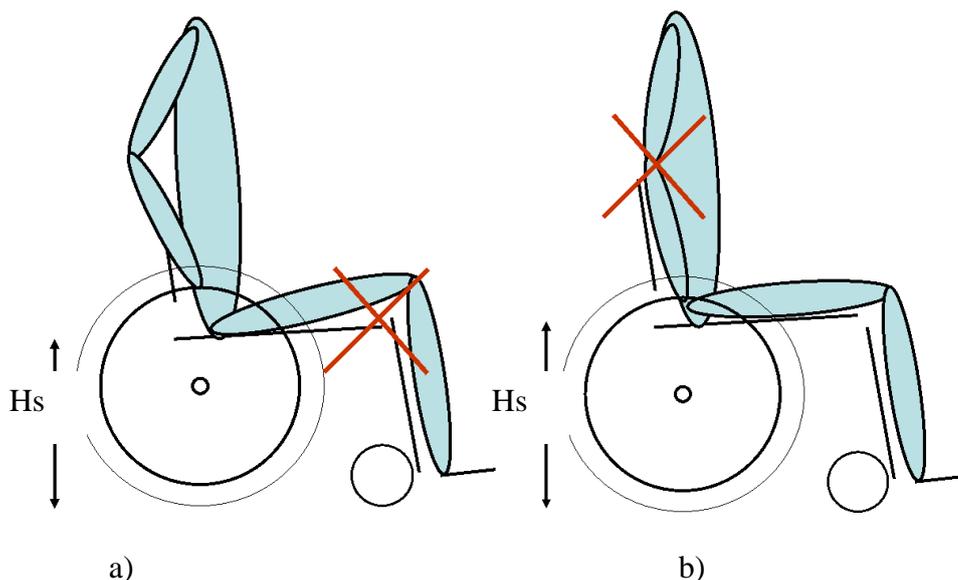


Figure 1. Application des règles 1 et 2 pour la hauteur de siège et pour un sujet "grand".

- a) Le respect de la règle 1 entraîne un mauvais réglage par rapport à la règle 2
- b) Le respect de la règle 2 entraîne un mauvais réglage par rapport à la règle 1.

En plus de ces deux règles on trouve encore dans la littérature que la hauteur de siège doit :

- positionner la personne à même hauteur que ses interlocuteurs
- permettre le passage des jambes sous les tables ou les lavabos
- être adaptée pour les transferts FRM \leftrightarrow toilette, lit, véhicule.

La formule logico-mathématique qui respecte toutes ces recommandations est impossible à déterminer et il est nécessaire de prendre en compte, d'une part, l'aspect multicritères et les compromis que cela entraîne et, d'autre part les contraintes qui limiteront le domaine des solutions "satisfaisantes".

Le choix et le réglage du FRM : problème d'optimisation multicritères sous contraintes

Critères d'évaluation d'un FRM

La littérature fournit plusieurs critères qui permettront de comparer des FRM. Le plus communément cité est la manœuvrabilité (Tomlinson, 2000, Axelson, 1994) qui correspond à la facilité de propulsion du FRM en environnement encombré (couloirs, portes, mobiliers).

Une liste plus large de critères est présentée Tableau I. Elle est organisée selon le type d'activité et selon trois catégories génériques qui sont la performance, le coût et la sécurité. Il apparaît, en effet, que les critères d'évaluation d'un FRM ne sont pas les mêmes selon que l'activité envisagée est professionnelle, de déplacement, de transfert ou encore si l'on se place du côté de la personne aidante. Les trois catégories génériques de critères sont les performances (rapidité, précision), les coûts (énergétique, musculaire ou en gênes et douleurs, le prix), la sécurité (risque de chutes ou de Troubles Musculo-Squelettiques, TMS).

Facteurs influents sur les critères : FRM, personne, environnement

Le tableau I met aussi en évidence que certains facteurs physiques et biomécaniques du FRM (par ex le réglage de hauteur de siège cf. ci-dessus) ont une influence contradictoire sur plusieurs critères.

Ce tableau ne met pas en évidence le fait que les caractéristiques des personnes (anthropométrie, fonctionnalité, motivation, apprentissage, ...) et leur environnement (logement, urbanisme, ...) ont une influence sur l'activité des personnes et donc sur la "hiérarchie" ou la "pondération" des critères.

La recherche d'un optimum "multicritère" passe par différentes méthodes telles que, par exemple, la pondération des critères ou le surclassement. (J.C. Pommerol, 1993)

Contraintes

Les contraintes qui limitent certains réglages et/ou options du FRM sont nombreuses et souvent implicites. L'"avantage" des contraintes est qu'elles limitent le domaine des solutions "satisfaisantes" et donc facilitent le travail d'optimisation. Ainsi, par exemple, le fait de pouvoir passer les genoux sous le plan de travail va imposer une limite maximale à la hauteur de siège et à la géométrie des accoudoirs. Autre exemple, le mouvement de transfert assis sur le FRM → debout impose que les palettes repose pieds soient amovibles.

L'identification précise et exhaustive de ces contraintes est indispensable pour éviter les solutions inadéquates.

Tableau I. Liste des critères d'évaluation d'un FRM

Type d'Activité	Catégories	Nom	Explications
Aucune, repos, télévision	Sécurité	Confort, aise	Minimisation des gênes et douleurs à long terme, bonne installation pour éviter les attitudes vicieuses et les complications
Socio-professionnelle		Communication	"confort" de communication interpersonnelle
		Accessibilité au poste de travail	adaptation aux conditions d'activités
Déplacement autonome	Performances	Maniabilité (manœuvrabilité)	Qualités du FRM à être propulsé en environnement restreint (couloir)
		Franchissement d'obstacles	Qualités du FRM pour franchir des obstacles
		Propulsion	Qualités du FRM pour franchir de longues distances
	Sécurité	Instabilité latérale	Risque de chute latérale

	Instabilité longitudinale	Risque de chute en arrière ou en avant
	Dangerosité musculo-squelettique	Risques de TMS
	Dangerosité pour les tissus	Risques d'escarres

Transfert

Coût	Efforts et énergie nécessaires pour les transferts	Réduction des gênes et obstacles pour les transferts
Sécurité	Instabilité latérale	Risque de chute latérale
	Instabilité longitudinale	Risque de chute en arrière ou en avant
	Dangerosité musculo-squelettique	Risques de TMS
	Dangerosité pour les tissus	Risques d'escarres, risques de blessure par frottement, choc

Transfert voiture

Coût	Efforts et énergie nécessaires pour embarquer/débarquer le FRM	
-------------	--	--

Déplacement aidé

Coût / sécurité	Efforts et énergie nécessaires pour la personne aidante	Réduction des efforts et risques de TMS pour la personne aidante
------------------------	---	--

Sport (multisport), loisir

Performance	Maniabilité (manoeuvrabilité)	Qualités du FRM à être propulsé en environnement encombré (terrain de jeux)
	Propulsion	Qualités du FRM pour franchir rapidement de longues distances
	Solidité	

Critères généraux

	Esthétique	
Coût	Prix	

Indices

La formalisation mathématique du processus d'optimisation nécessite de créer des indices représentatifs de ces différents critères. Ainsi, par exemple, l'instabilité latérale pourra être quantifiée par la formule Hauteur du Centre de Gravité / largeur au sol du FRM. Dans cette formule la largeur au sol du FRM peut être obtenue du fabricant ; par contre, la hauteur du CdG dépend du FRM et de la personne, une estimation de la hauteur de ce CdG sera donc effectuée en fonction de quelques caractéristiques du FRM et de la personne (anthropométriques et lésionnelles, par ex. amputés).

Réseau Bayésien des relations entre facteurs et indices

Les relations entre les facteurs et les indices sont donc multiples et peuvent être représentées par un graphe selon le formalisme des réseaux Bayésiens. Dans ce formalisme, les sommets du graphe représentent les différents concepts et les arcs les influences entre ces concepts, figure 2.

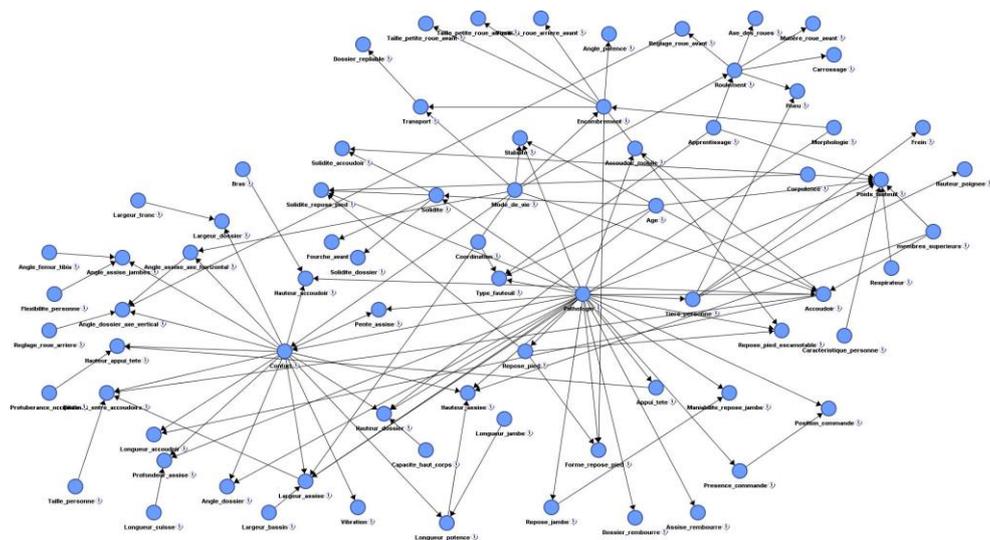


Figure 2. Réseau Bayésien des relations entre facteurs et indices

Un réseau bayésien [Naïm 07] est donc un graphe orienté sans cycle, dont les nœuds sont des variables aléatoires (continue ou discrète). Chaque nœud contient la définition des probabilités d'apparition de ses valeurs par rapport aux nœuds parents (nœuds à l'origine des arcs qui lui sont reliés).

Une fois les nœuds et influences entre nœuds déterminés (le placement des arcs), les valeurs des probabilités peuvent être : soit fixées suite aux propositions des experts du domaine modélisées ; soit apprises, c'est-à-dire déterminées automatiquement à partir d'une base de quelque dizaines d'exemples.

Les influences entre concepts peuvent être ainsi de type probabilistes ou certaines. On appellera alors règle une influence certaine, logique ou mathématique.

La résolution du réseau bayésien, c'est-à-dire le calcul des probabilités d'appartenance des différents critères à un de leurs états passe par divers algorithmes statistiques, dont la règle de Bayes.

Détermination des règles

Ces règles, ou influences certaines, peuvent être mécaniques ou biomécaniques.

Exemple (simplifié) de règle mécanique : l'indice de stabilité latérale est égal au quotient de la largeur entre roues sur la hauteur du centre de gravité.

Exemple (simplifié) de règle biomécanique : la largeur de siège doit être égale à la largeur du bassin + 2cm.

Les règles mécaniques et biomécaniques sont déterminées par différentes méthodes.

La première méthode consiste à formaliser les connaissances des experts. Les experts sont chacun des participants du projet qui ont tous une expérience conséquente du FRM, soit directe par leur pratique régulière ou clinique, soit indirecte par leurs recherches antérieures.

La seconde méthode est expérimentale et consiste à analyser, sur une population "représentative" la relation entre un facteur (réglage, caractéristique environnementale ou personnelle) et indices. Pour cela, un dispositif original, le FRET II, a été mis au point dans le cadre du projet. Il s'agit d'un Fauteuil Roulant Ergomètre de Terrain constitué d'un bâti comportant 7 réglages et équipés de 2 capteurs de forces 6 axes et de deux roues dynamométriques. Figure 3.

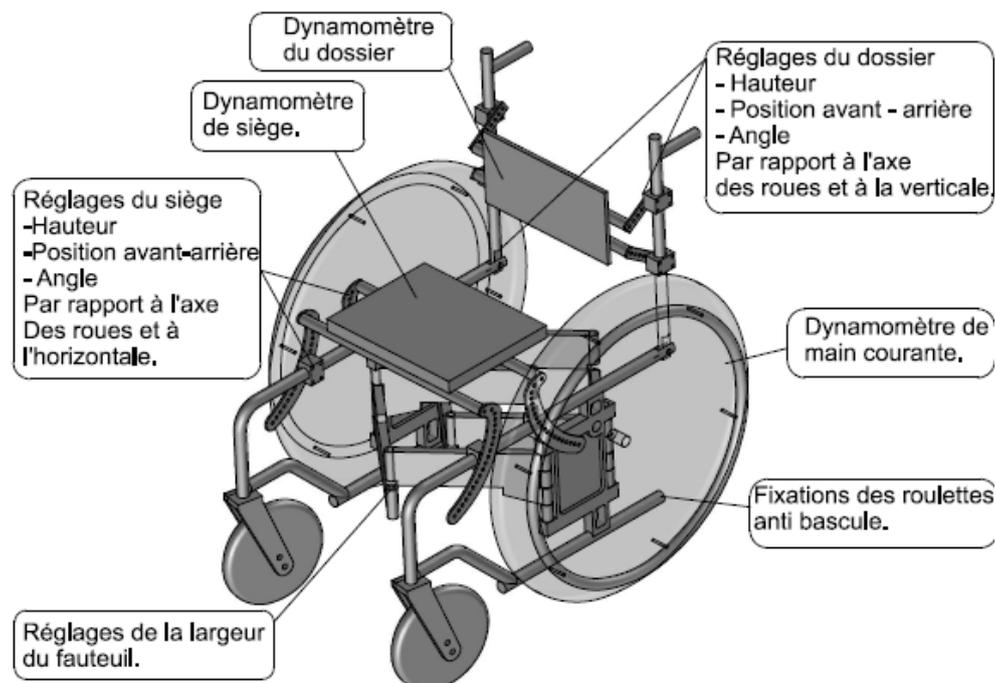


Figure 3. Schéma fonctionnel du Fauteuil Roulant Ergomètre de Terrain, FRET II.

La troisième méthode, complémentaire des précédentes, consiste à modéliser ces relations facteurs/indices. Moyennant des hypothèses, cette méthode permet d'interpoler et/ou d'extrapoler le domaine d'utilisation des règles obtenues par les méthodes précédentes. Ces modèles peuvent être classés en plusieurs niveaux selon qu'ils prennent en compte des variables et paramètres géométriques, cinématiques et dynamiques.

Architecture du système d'aide au choix du FRM

Le système d'aide au choix du FRM doit gérer chacun des domaines suivants :

- informations liées au futur utilisateur du FRM (déficience, âge, ...),
- informations liées au type d'utilisation du fauteuil (activité, environnement, ...),
- informations liées aux caractéristiques du fauteuil (forme, matière, dimensions, ...),
- informations sur les fauteuils existants.

Cette nature répartie du problème conduit à bâtir le système sous la forme d'un système multi-agent (système dont les éléments constitutifs (les agents) agissent de manière autonome, sur bases de règles et de contraintes afin de réaliser leurs tâches, le plus généralement en coopération entre les agents). (Schwaiger 03).

La figure 4 présente l'architecture du futur système d'aide au choix du FRM.

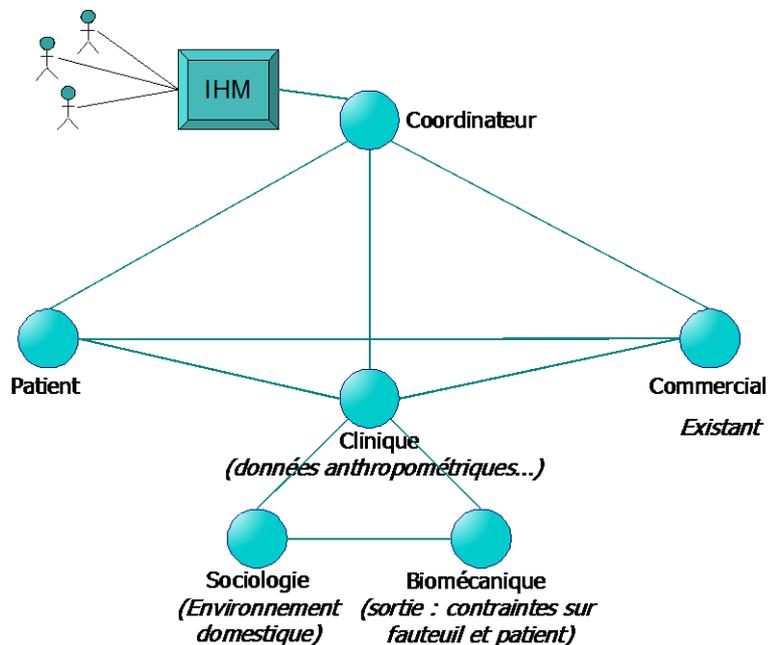


Figure 4. Architecture du système multi-agent

Conclusion

Le projet SACR-FRM est un projet ambitieux en raison de la multiplicité des facteurs influents et des critères d'évaluation. Le consortium qui s'attelle à ce projet réunit des compétences scientifiques multiples (sociologie, clinique, biomécanique, informatique) et des experts du domaine.

Outre son objectif essentiel, ce projet a permis et permettra d'avancer dans plusieurs domaines : connaissance des usagers et des usages du FRM en France, la formalisation claire et précise des critères et indices d'évaluation d'un FRM, la formation des personnels médicaux, commerciaux et des utilisateurs, la réalisation d'un Fauteuil Roulant Ergomètre de Terrain, l'évaluation des efforts exercés sur le fauteuil et dans les articulations des personnes (par dynamique inverse) pour des franchissements d'obstacles variées, la modélisation biomécanique de la propulsion et du transfert.

Liste des partenaires du projet SACR-FRM

La société TSR (Mérignac, France) est une entreprise spécialisée dans la conception de systèmes mécaniques et de capteurs. Elle conçoit et fabrique le Fauteuil Roulant Ergomètre de Terrain (FRET II).

Participants : L. Belloir, Y. Couettard

Le CERMES, centre de Recherche Médecine, Sciences, Santé et Société, est un laboratoire mixte rattaché à l'Inserm (U750), au Cnrs (UMR 8169) et à l'École des Hautes Etudes en Sciences Sociales. Il possède une expertise importante en matière de sciences humaine et sociales sur le handicap.

Participants : J.F. Ravaud, I. Ville, M. Winance

Le Laboratoire de BioMécanique, LBM, de l'École Nationale Supérieure des Arts et Métiers de Paris (UMR 8005), est reconnu pour ces activités de recherche en modélisation des segments corporels et en analyse du mouvement.

Participants : J.C. Cabelguen, F. Lavaste

Le centre d'Etude et de Recherche sur l'Appareillage des Handicapés CERAH, à Woippy, est associé au LBM dans ce programme.

Participant : P. Fodé et les ergothérapeutes ?

Le Centre d'Innovations Technologiques (CIT) de l'hôpital Raymond Poincaré à Garches met à disposition de l'étude un environnement hospitalier, comprenant les compétences du Centre de choix et d'essai de FR de la Fondation Garches et le laboratoire d'analyse 3D du mouvement de l'hôpital.

Participants : B. Guillon, F. Lofaso, D. Pradon

Le Service de Médecine Physique et de Réadaptation, SMPR, de Lille.

Participants : S. Delamer, A. Thevenon

Le LAMIH, Laboratoire d'Automatique, de Mécanique, d'Informatique industrielles et Humaines apporte ses compétences en conception de systèmes d'aide à la décision (équipe Raisonnement Automatique et IHM) et en Biomécanique (équipe Modélisation et Commande des Systèmes Industriels et Humains). Le LAMIH coordonne le projet.

Participants : E. Adam, A. Baudoin, J.F. Debril, A. Faupin, F.X. Lepoutre, A-P Maquinghen, P. Pudlo, E. Watelain

Le LBMH, Laboratoire de Biomécanique et de Modélisation Humaine, Unité Mixte INRETS, Université de Lyon 1

Le HANDIBIO-LESP, laboratoire d'Ergonomie du Sport et de la Performance de l'Université de Toulon et du Var

Participants : P. Gorce, N. Louis

Le LIMOS, Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes, UMR (6158) du CNRS, de l'Université Blaise Pascal de Clermont Ferrand

Participants : N. de Saint Rémy, P. Vaslin

Références bibliographiques

C.E. Brubaker, Ergonomic considerations. J Rehabil Res Dev Clin Suppl 2 (1990), p37-48.

Peter Axelson, Jean Minkel, Denise Chesney. A Guide to Wheelchair Selection: How to Use the ANSI/RESNA Wheelchair Standards to Buy a Wheelchair.. Paralyzed Veterans of America. 202/872-1300. 1994.

Rory A. Cooper. Wheelchair Selection and Configuration. Demos Medical Publishing. 410 pp. 1998

Boninger ML, Cooper RA, Koontz AM, Chan L. Manual wheelchair pushrim biomechanics and axle position. Arch Phys Med Rehabil. 2000; 81: 608-13.

Van der Woude L, Veeger D, Rozendal R, Sargeant T. Seat height in handrim wheelchair propulsion. J Rehabil Res Dev. 1989; 26(4):31-50.

Van der Woude, L.H., Veeger, H.E., Dallmeijer, A.J., Janssen, T.W. and Rozendaal, L.A. (2001) Biomechanics and physiology in active manual wheelchair propulsion. Med Eng Phys 23, 713-33.

Kendra Betz. The Rear Wheel Big Deal-Manual Chair Considerations for Fit and Function. Page 216-217. 22nd International Seating Symposium March 2-4, 2006.

D Tomlinson. Managing Maneuverability and Rear Stability of adjustable Manual Wheelchairs: An Update. Physical Therapy. 2000; 80(9): 904 - 911.

Nwaigwe, Adaeze. Ergonomics Considerations in IT-Enabled Computer-Aided Design for Discrete Manufactured Products. Thesis. 132pp. 2005.
Participants : L. Cheze, R. Dumas

N. Vignier, J.-F. Ravaud, M. Winance, F.-X. Lepoutre, I. Ville. Demographic of wheelchair users in France : results of national community-based Handicaps-Incapacité-Dépendance surveys. J Rehabil Med 2008; 40: 231–239

A. Schwaiger and B. Stahmer, SimMarket: Multiagent-Based Customer Simulation and Decision Support for Category Management, Book Series Lecture Notes in Computer Science, Multiagent System Technologies, 2003.

J.C. Pommerol, S. Barbara-Romero : Choix multicritère dans l'entreprise, Hermes, 1993