

**République Algérienne Démocratique et populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique**  
**Université des Frères Mentouri Constantine**  
**Faculté des Sciences de la technologie**  
**Département d'Electronique**

N° d'ordre :

N° de série :

**Thèse**

Présentée par

**Ali SAIDI SIEF**

Pour l'obtention du :

**Doctorat en Troisième Cycle**

Option :

**Contrôle et traitement du signal**

**Thème**

Modélisation et simulation de mouvements humains en vue de  
l'évaluation de l'accessibilité à la préhension pour une personne à  
mobilité réduite

Soutenue le .....

Devant le jury composé de :

<i>Président</i>	<i>CHAREF Abdelfatah</i>	<i>Prof.</i>	<i>U. des Frères Mentouri Constantine 1</i>
<i>Rapporteur</i>	<i>BENNIA Abdelhak</i>	<i>Prof.</i>	<i>U. des Frères Mentouri Constantine 1</i>
<i>Rapporteur</i>	<i>PRUSKI Alain</i>	<i>Prof.</i>	<i>U. de Lorraine Metz</i>
<i>Examineur</i>	<i>MANSOURI Nora</i>	<i>Prof.</i>	<i>U. des Frères Mentouri Constantine 1</i>
<i>Examineur</i>	<i>BENATIA Djamel</i>	<i>Prof.</i>	<i>U. Batna 2</i>
<i>Examineur</i>	<i>BOUJEHEM Djalil</i>	<i>Prof.</i>	<i>U. 8 mai 1945 Guelma</i>

## **Dédicaces**

*«A ceux qui m'ont conçu, fabriqué, élevé et permis d'être ce que je suis aujourd'hui... ma chère mère et mon cher père»*

*« A tous mes frères, toutes mes sœurs et aux personnes que leur présence est estimée dans ma vie, pour leurs conseils, aides et encouragements »*

*« Je dédie ce travail spécialement à mon meilleur ami, ma source de joie et de bonheur ...  
Nacer Nadir»*

## **Remerciements**

Tout d'abord, je remercie le bon dieu le tout puissant de m'avoir donné le courage et la santé pour finir ce travail de thèse.

Je tiens à remercier M. Bennia Abdelhak et M. Alain Pruski, Professeurs à l'université des Frères Mentouri et à l'université de Lorraine, qui m'ont encadré avec beaucoup d'efficacité et ont été la source de précieux conseils et encouragements.

Mes remerciements s'adressent aussi à Mme Mansouri Nora, Professeur à l'université des Frères Mentouri pour sa précieuse aide et son encouragement.

Je remercie l'ensemble des membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter de lire et d'évaluer ce mémoire : Mme MANSOURI Nora (Professeur à l'université des Frères Mentouri, examinateur), M. CHAREF Abdelfatah (Professeur à l'université des Frères Mentouri, président), M. BENATIA Djamel (Professeur à l'université de Batna 2, examinateur), M. BOUJEHEM Djalil (Professeur à l'université de 8 mai 1945 Guelma, examinateur).

J'adresse mes remerciements aussi aux membres de laboratoire LCOMS avec qui j'ai collaboré pendant mes séjours de recherches. Merci à Wahida Handouzi, Frédéric Boussefsaf, Mohamed Badèche, Moussaoui Ebdelhak.

Merci à mes amis, Nacer Nadir, Boudaira Billel, Ghemari Nawfel, Filali Fahem, Haddou Benderbal Hichem, Djelloule Imen.

Merci à tous les membres de ma famille pour leur soutien sans limite et leurs encouragements.

# Résumé

Les recherches sur l'accessibilité de l'habitation pour les personnes handicapées se sont beaucoup développées ces dernières années. Le travail de notre thèse s'écrit dans le cadre d'un projet créé en 1997 par le laboratoire de conception, optimisation et modélisation des systèmes (LCOMS) sur le développement de systèmes d'assistance aux personnes handicapées. Notre thématique : l'accessibilité et l'environnement fait partie de quatre autres thématiques qui sont développés dans le même cadre du projet. Dans cette thèse, nous nous intéressons au processus d'évaluation d'accessibilité à la préhension et à la mobilité des objets de manœuvre (de service et de commande) pour une personne assise sur une chaise roulante, dans un environnement bâti et selon le protocole : rapprocher, atteindre, manipuler et utiliser. Le logement est dit accessible si les composants des trois niveaux d'accessibilité (aides techniques personnelles, environnement technologique et information et services) sont conçus et mis en œuvre de manière à combler les exigences de la personne handicapée.

Dans ce travail, nous proposons un outil de simulation pour mesurer les paramètres qui sont liés à l'accessibilité des éléments manipulables. Grâce à cet outil et l'algorithme de calcul que nous avons développés, nous avons simulé les opérations de manipulation et identifier les paramètres principaux qui affectent l'accessibilité des objets ainsi que les relations liant les uns par rapport aux autres.

Les données relatives à l'accessibilité à l'intérieur des logements qui sont utilisées mondialement ne décrivent pas précisément les besoins des personnes handicapées. Ce manque de fiabilité peut être dû à plusieurs facteurs parmi eux l'absence de prise en compte des capacités physiques de la personne, de la conception de l'aide technique à la mobilité et du type de méthodes utilisées durant la phase de conception ou de réhabilitation de l'environnement bâti. Nous avons développé une approche objective de l'évaluation de l'accessibilité en tenant compte de tous les paramètres dynamiques contribuant au processus de manipulation.

Les résultats obtenus, nous ont permis de contribuer essentiellement à l'évaluation de l'accessibilité avec un outil de simulation très dynamique. Cet outil est créé de façon que les personnes concernées puissent intégrer leur avis à propos des modifications prévues avant et après la simulation.

## Mots-clés

Accessibilité à la préhension et à la mobilité, élément de manœuvre, fauteuil roulant, personnes à mobilité réduite, réhabilitation du logement, manipulation, incapacités physiques.

# Abstract

Accessibility housing researches for person with disabilities have developed considerably in recent years. This thesis work is part of LCOMS project created in 1997 which is about the support systems development for person with disabilities. Our thematic: Accessibility and the built environment is one of four thematics which are developed in the same project. In this thesis, we are interested in the accessibility (of reachability and of mobility) assessment processes of maneuvering devices (command and service devices) for wheelchair user within a built environment, according to the protocol: closer toward, reach, handle and operate. The so-called house is accessible, if a three accessibility's level components are accessible (personal technical aid, technical environment, information and service) and are designed and implemented to satisfy the person with disabilities requirements.

In this work, we are proposed simulation tool in order to measuring the parameters linked to the maneuvering objects accessibility. Thanks to this tool and the computational algorithms that we are proposed, we are succeeded to identify the main parameters that affect the accessibility of these objects and the relationships that relating the variation of each one to another.

The indoor housing accessibility prescriptive which is used worldwide is not describing accurately persons with disabilities needs. This unreliability is due to a number of factors among them: the ignorance of person's physical degradation, the wheelchair design and also the approaches that used in rehabilitation or designing of built environment. We are developed an objective approach in order to evaluate accessibility taking into account the accessibility dynamic parameters which are contributing to the manipulation succeeded.

The obtained results, allow us primarily to contribute to the accessibility assessment of maneuvering/command/service devices with dynamic powerful tool. This tool is created to allow and help people to easily communicate with rehabilitation engineer about their proposed changes and their views before and after accessibility assessment simulation.

## Keywords

Accessibility of reachability and mobility, maneuvering device, wheelchair, wheelchair user, persons with disabilities, housing rehabilitation, manipulation.

# Productions scientifiques

## **Conférences et workshops**

- A. Saidi sief, A. Pruski, A. Bennia, 2013. Feasible Trajectory for person on Wheelchair to Assess the Accessibility to the Mobility and to the Reachability, 3rd International Conference on Systems and Control, Alger, Algérie, Octobre 2013.
- A. Saidi sief, A. Pruski, A. Bennia, 2015. The evaluation of Maneuvering objects vis-à-vis wheelchair-user. 7th International conference on Modelling, Identification and control, Sousse-Tunisia, December 18-20, 2015.
- A. Saidi sief, A. Pruski, A. Bennia, 2016. Contribution à l'évaluation de l'accessibilité des éléments de manœuvre pour une personne en fauteuil roulant. Conférence Handicap 2016 : 9ème édition, hôtel Mercure Vaugirard Porte de Versailles en lien avec le salon Automic Paris, 8-10 juin 2016.

## **Articles de revues**

- A. Saidi sief, A. Pruski, A. Bennia, W. Handouzi, 2016. Swinging doors accessibility assessment for a wheelchair user, journal of technology and disability (IOS Press), DOI : 10.3233/TAD-160444, Vol 28 (2016), pp.53-66.
- A. Saidi sief, A. Pruski, A. Bennia, 2016. A new approach for handling element accessibility problems faced by persons with a wheelchair, Journal of automation, mobile robotics & intelligent systems, DOI : 10.14313/JAMRIS\_4-2016/29, Vol 10 (December 2016), pp. 27-38.

# Table des matières

Dédicace .....	
Remerciements.....	
Résumé .....	
Mots-clés .....	
Abstract.....	
Keywords .....	
Production scientifiques.....	
Table des matières .....	
Liste des figures .....	
Liste des tableaux.....	
<b>Introduction générale .....</b>	<b>15</b>
<b>Chapitre I: Handicap (notions et statistiques) .....</b>	<b>19</b>
I.1. Introduction .....	19
I.2. Handicap.....	20
I.2.1. La classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) .....	20
I.2.1.1. La classification internationale des handicaps (CIH) : déficiences, incapacités, désavantages.....	19
I.2.1.2. De la CIH à CIF : Les limites d'une conception individuelle du handicap.....	21
I.2.2. Le Processus de production du handicap (PPH) .....	22
I.3. Les aides humaines et techniques .....	24
I.3.1. Les aides humaines.....	24
I.3.2. Les aides techniques et les outils d'aides à la préhension .....	26
I.3.2.1. Exemples des aides techniques et leurs utilisations.....	27
I.3.2.2. Les outils d'aides à la préhension.....	30
I.4. Le handicap et le logement.....	30
I.4.1. Analyse et statistiques .....	30
I.4.2. Les solutions proposées pour des personnes à mobilité réduite.....	36
I.4.2.1. Logements équipés (domotique, habitats intelligents).....	36
I.4.2.1.1. La domotique.....	36
I.4.2.1.2. Habitat intelligent pour la santé (HIS) .....	38
I.4. Conclusion.....	42
<b>Chapitre II: Revue de la littérature.....</b>	<b>44</b>
II.1. Introduction .....	44

II.2. Approches législatives et réglementaires et outils technologiques pour l'évaluation de l'accessibilité .....	45
II. 2.1. Approche réglementaire de l'accessibilité.....	45
II. 2.2. Approche technologiques d'évaluation de l'accessibilité .....	48
II. 3. Conclusion.....	62
<b>Chapitre III : Modélisation.....</b>	<b>63</b>
III.1. Introduction.....	63
III.2. Anatomie du corps humain .....	64
III.3. Modélisation biomécanique .....	64
III.4. Description et modélisation de la partie haute du corps humain .....	67
III.4.1. Segments corporels de la partie haute du corps.....	69
III.4.2. Articulations .....	69
III.4.3. Plans et axes de références .....	72
III.4.3.1. Les plans de références.....	72
III.4.3.2. Les axes de références.....	73
III.4.3.3. Les mouvements principaux des articulations des membres supérieurs .....	74
III.4.4. Modèle de l'ensemble (Le bras, l'épaule et la colonne vertébrale).....	74
III.4.5. Modèle du fauteuil roulant .....	75
III.4.6. Modèle cinématique direct et inverse d'une chaîne articulaire ouverte .....	77
III.4.7. La méthode de représentation de Denavit-Hartenberg.....	78
III.4.8. Modélisation de l'environnement .....	80
III.5. Conclusion .....	81
<b>Chapitre IV : Méthodologie de travail .....</b>	<b>84</b>
IV.1. Introduction.....	81
IV.2. Problèmes de la cinématique inverse .....	84
IV.2.1. Traitement de multiples contraintes et résolution de problème de conflit .....	84
IV.2.2. Traitement de problèmes sous-contraintes et les problèmes sur contraintes.....	85
IV.2.2.1. La redondance .....	85
IV.2.2.2. N'a pas de solution exacte .....	85
IV.2.2.3. Une solution unique .....	85
IV.2.3. Limites angulaires .....	86
IV.2.4. Obstacles .....	86
IV.3. Méthodes de résolution de l'inverse cinématique .....	86
IV.3.1. Méthodes analytiques .....	86
IV.3.2. Méthodes de linéarisation .....	87
IV.3.3. Méthodes d'optimisation .....	87



IV.4. Planification de trajectoire d'une base mobile .....	87
IV.4.1. Méthode par décomposition de l'environnement en cellule .....	88
IV.4.2. La méthode de champ potentiel .....	88
IV.4.3. La méthode de la fenêtre dynamique .....	88
IV.4.4. La méthode de la bande élastique .....	88
IV.4.5. Méthodes basées sur la logique floue .....	88
IV.4.6. Planification par la méthode de juxtaposition de splines polynomiales et la méthode de DKP : Deterministic Kinodynamic Planning .....	89
IV.5. Notre approche .....	89
IV.5.1. Algorithme .....	90
A. Aperçu .....	90
B. Planification et Cinématique Inverse Intégrés.....	91
IV.5.2. Calcul de l'espace de mobilité admissible (polygones de configurations) .....	95
IV.5.2.1. Introduction .....	95
IV.5.2.2. La somme de Minkowski .....	95
IV.5.2.3. La différence de Minkowski .....	96
IV.5.2.4. Calcul de l'espace de mobilité : polygones de configuration .....	96
IV.5.3. Outil de simulation .....	99
IV.6. Conclusion.....	100
<b>Chapitre V : Résultats et discussions</b> .....	104
V.1. Introduction.....	104
V.2. Etude comparative.....	105
V.2.1. Base fixe.....	106
V.2.1.1. Scénario 1 : prendre/déposer un objet dans un Library .....	106
V.2.1.2. Scénario 2 : déposer un objet dans une cabinet .....	106
V.2.1.3. Scénario 3 : prendre/déposer un objet de deux surfaces différentes .....	107
V.2.1.4. Discussions .....	107
V.2.2. Base mobile .....	108
V.2.2.1. Notre approche.....	109
V.2.2.2. Comparaison avec une approche dans le même domaine d'application .....	114
V.3. Teste d'accessibilité à la préhension et à la mobilité : paramètres d'accessibilité d'un élément de manœuvre .....	118
V.3.1. Valeurs minimales de l'espace de manœuvre d'un fauteuil roulant : porte pivotante à pousser .....	119
V.3.2. Valeurs minimales de l'espace de manœuvre d'un fauteuil roulant : porte pivotante à tirer .....	121
V.3.3. Hauteurs minimales et maximales de poignée .....	122

V.4. Résultats de la première étude: relation entre la conception du fauteuil roulant, l'espace de manœuvre et les zones d'atteintes .....	123
V.4.1. Dimension de l'espace de manœuvre du fauteuil et les hauteurs de préhension admissibles .....	124
V.4.1.1. Porte pivotante à tirer et à pousser .....	124
V.4.1.2. Poignée .....	125
V.4.1.3. Porte coulissante .....	126
V.4.1.4. Eléments de service et commande .....	127
A. Approche parallèle .....	127
B. Approche en face .....	128
V.4.1.5. Cas particuliers .....	129
A. Sonnette de la porte d'entrée.....	129
B. Système de contrôle d'accès .....	129
V.4.2. Positionnement de l'espace de manœuvre du fauteuil roulant devant une porte .....	130
V.4.3. Discussion .....	132
V.5. Résultats de la deuxième étude : la relation entre les capacités résiduelles articulaires (l'âge) de la personne et les dimensions du fauteuil roulant, l'espace de manœuvre et les zones d'atteintes	135
V.5.1. Portes .....	135
V.5.2. Hauteurs de préhension des éléments de service et commande : manipulation en face .....	136
V.5.3. Équipements de service/commande installés l'angle rentrant d'un portail .....	137
V.5.4. Discussion .....	138
<b>Conclusion et perspectives .....</b>	<b>139</b>
I. Conclusion.....	139
II. Perspectives.....	139
<b>Annexe .....</b>	<b>139</b>
<b>Bibliographie .....</b>	<b>143</b>

## Liste des figures

Figure I.1. Schéma de classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF)	22
Figure I.2. Le processus de Production du Handicap (PPH) – D’après P. Fourgeyrollas et coll. (1988).	23
Figure I.3. Conception actuelle des situations de handicap - Représentation des interventions visant à favoriser la participation sociale (appui sur le PPH Québécois, Figure I.2).....	24
Figure I.4. Exemple des aides humaines professionnelles, servent à maintenir dans l’emploi les personnes handicapées. ....	25
Figure I.5. Exemple d’un aide humaine familiale qui sert à l’intégration dans la vie quotidienne.....	25
Figure I.6. Personne en fauteuil roulant. ....	27
Figure I.7. Des aides techniques à la visualisation selon HID : (a) un véhicule adapté, (b) les prothèses et appareillages de correction de la position du corps, (c) chiens-guides, (d) interfaces d’ordinateurs pour reconnaissance et synthèse vocale. ....	28
Figure I.8. Des aides techniques à l’audition : (a) appareil auditif, (b) alarme visuelle, (c) système visualisation de métro. ....	29
Figure I.9. Aides techniques pour compenser la préhension chez des personnes handicapées. ....	30
Figure I.10. Fréquence des déficiences en fonction de l’âge. ....	31
Figure I.11. Les aménagements du logement, les aides techniques et appareillages . ....	33
Figure I.12. Proportion des personnes ayant fait aménager leur logement, selon l’âge, le GIR et la nature de l’aide Enquête Handicap-santé 2008, voie ménage, INSEE). ....	36
Figure I.13. Les différents services de la domotique. ....	38
Figure I.14. Hospitalisation à domicile. ....	39
Figure I.15. Robot aidant.....	40
Figure I.16. Architecture du système d’information et de communication. ....	41
Figure I.17. Plate forme de développement du Projet HM2PH (Habitat Modulable. ....	41
Figure I.18. Les Etapes principales de la conception de HM2PH . ....	42
Figure II.1. Exemple de l’espace de manœuvre minimal pour un passage accessible selon ADA (America with Disabilities Act).....	46
Figure II.2. Exemple de l’espace de manœuvre au tournant pour une personne en fauteuil roulant selon ADA (America with Disabilities Act).....	46
Figure II.3. Exemple d’indice passe-partout. ....	48
Figure II.4. Cinq exemples des photos prises d’un bureau à partir de différentes positions.....	49
Figure II.5. Le modèle 3D d’un bureau photographies produit à partir des cinq images 2D par le logiciel Photo Modeler.....	49
Figure II.6. Navigation virtuelle d’une personne en fauteuil roulant dans un environnement afin d’illustrer certaines normes d’accessibilité de manière graphique et visuelle . ....	50
Figure II.7. Exemple d’un simulateur pour suivre une trajectoire en simulation . ....	51
Figure II.8. Espace accessible au fauteuil roulant d’une salle de bain :l’espace en blanc représente l’espace dans lequel le fauteuil roulant peut se déplacer . ....	52
Figure II.9. Trajectoire accessible du fauteuil roulant de l’entrée principale à l’urinoir droit de la salle de bain . ....	52
Figure II.10. Exemple d’ouverture une porte pivotante et l’espace de manœuvre du fauteuil associé selon la définition de . ....	53
Figure II.11. Le diagramme de transfert du fauteuil roulant pour les W.C : rapprochement diagonale et à coté . ....	53
Figure II.12. Traitements psychologique utilisant la réalité virtuelle . ....	55

Figure II.13. Simulateur de conduite de fauteuils dans des environnements virtuels (LCOMS) [10]...	56
Figure II.14. Etiquetage des points de l'environnement pour une personne sans limitations particulière des articulations .....	56
Figure II.15. Etiquetage des points de l'environnement avec limitation des débattements articulaires.	57
Figure II.16. Réalité virtuelle et visualisation. ....	57
Figure II.17. Exemples des patients qui participent à l'étude avec les modifications qu'ils apportent aux leurs aides techniques de mobilité.....	58
Figure II.18. Schéma des contrastes des utilisateurs dans leur vie quotidienne. ....	59
Figure II.19. L'interface du logiciel Adob connect web-based. ....	60
Figure II.20. Le WMRA au moment de test.....	61
Figure III.1. Le squelette humain.....	64
Figure III.2. Modélisation biomécanique 2D de corps humain : modèle multi-segmentaire avec de segments rigides .....	66
Figure III.3. Génération de corps virtuel : a) Squelette b) Métalles c) Enveloppe d) Maille e) Tissu. ....	67
Figure III.4. Description squelettique de membres supérieurs. ....	67
Figure III.5. Description squelettique de la colonne vertébrale. ....	68
Figure III.6. Les sept principaux segments osseux (thorax, clavicule, omoplate, humérus, radius, ulna et main) et les trois complexes articulaires (épaule, coude, poignet) du membre supérieur. ....	68
Figure III.7. Segments corporels de la partie haute. ....	69
Figure III.8. Articulations synoviales. ....	70
Figure III.9. Articulations synoviales de membres supérieurs et leurs équivalentes en biomécanique.	71
Figure III.10. Modèle de colonne vertébrale. ....	72
Figure III.11. Position anatomique de référence.....	72
Figure III.12. Plans anatomiques de références. ....	73
Figure III.13. Axes anatomiques de références. ....	73
Figure III.14. Modélisation des bras-épaules-colonne vertébrale.....	77
Figure III.15. Modèle du fauteuil roulant.....	78
Figure III.16. Couple personne-fauteuil roulant. ....	79
Figure III.17. Système de convention des articulations et ses paramètres. ....	81
Figure III.18. Exemples d'un environnement d'expérience. ....	82
Figure IV.1. Prendre/déposer un objet .....	86
Figure IV.2. Cinématique inverse.....	87
Figure IV.3. Configurations avec deux cibles. ....	87
Figure IV.4. Problème à une infinité de solutions. ....	88
Figure IV.5. Problème n'a pas de solution (cible inatteignable). ....	88
Figure IV.6. Problème a une seul solution. ....	88
Figure IV.7. Aperçu de différentes parties de l'algorithme proposé.....	93
Figure IV.8. Exemple de fermeture d'une porte pivotante.....	98
Figure IV.9. La somme de Minkowski. ....	99
Figure IV.10. La différence de Minkowski. ....	99
Figure IV.11. Les droites candidates : (a) polygone obstacle, (b) polygone enveloppe. ....	100
Figure IV.12. Espace de mobilité admissible lorsque l'enveloppe est un plan d'appartement et le fauteuil un polygone rectangulaire dont le point de référence est situé au centre avec orientation donnée des portes pivotantes. A droite se trouve le fauteuil avec une orientation donnée. ....	101
Figure IV.13. Outil de simulation.....	102
Figure V.1. Trajectoire du suivi sous forme carrée.....	108
Figure V.2. Erreur entre la trajectoire de la main et la trajectoire désirée (position+orientation). ....	109

Figure V.3. Durées d'exécution (trajectoire sous forme carrée).....	109
Figure V.4. Les positions du fauteuil roulant vs. Les trajectoires de la main.....	110
Figure V.5. Trajectoire à suivre sous forme cercle. ....	110
Figure V.6. Erreur entre la trajectoire résultante de la main et la trajectoire désirée (position+orientation). ....	111
Figure V.7. Durées d'exécution (trajectoire sous forme cercle).....	111
Figure V.8. Les positions du fauteuil roulant vs. Les trajectoires de la main.....	112
Figure V.9. Trajectoire à suivre sous forme ligne droite.....	112
Figure V.10. Erreur entre la trajectoire résultante de la main et la trajectoire désirée (position+orientation). ....	113
Figure V.11. Durées d'exécution (trajectoire sous forme ligne droite).....	113
Figure V.12. Les positions du fauteuil roulant vs. Les trajectoires de la main.....	114
Figure V.13. Positions du fauteuil roulant résultant par rapport à celles du suivi (méthode de Farelo et al.). ....	115
Figure V.14. Orientation du fauteuil roulant résultante et du suivi (par la méthode de Farelo et al)...	115
Figure V.15. Positions du fauteuil roulant, de la main et du suivi (par notre méthode). ....	116
Figure V.16. Orientation du fauteuil roulant résultante (par notre approche). ....	116
Figure V.17. Temps d'exécution (par notre approche). ....	117
Figure V.18. Erreur entre la trajectoire de la main résultante et celle du suivi (par notre approche). .	118
Figure V.19. Dimensions du fauteuil roulant. ....	118
Figure V.20. Exemple d'une porte pivotante à pousser non franchissable. ....	120
Figure V.21. Faisabilité de la manipulation de la porte en fonction des différentes valeurs de LAM. 120	
Figure V.22. L'espace de manœuvre d'une porte pivotante à pousser (LAP = 0.88 m). ....	121
Figure V.23. L'espace de manœuvre d'une porte pivotante à tirer.....	121
Figure V.24. L'espace de manœuvre d'une porte pivotante à tirer (LAP = 0.98 m). ....	122
Figure V.25. Hauteurs admissibles de la poignée par rapport à l'espace de manœuvre minimal.....	122
Figure V.26. La variation de LAM+LAP en fonction de WhW+WhL1. ....	124
Figure V.27. La variation de LAM+LOM en fonction de WhW+WhL1.....	125
Figure V.28. La variation de HH en fonction de WhW et WhW+WhL1.....	125
Figure V.29. Porte coulissante : relation entre les dimensions du fauteuil et l'espace de manœuvre correspond (rapprochement en parallèle). ....	127
Figure V.30. Hauteurs de préhension selon l'approche en parallèle.....	128
Figure V.31. Hauteurs de préhension selon l'approche devant. ....	128
Figure V.32. Bouton par rapport à l'angle rentrant de parois.....	129
Figure V.33. Hauteur et espace de manœuvre du système de contrôle d'accès, approche parallèle. ..	130
Figure V.34. Positionnement de l'espace de manœuvre d'une porte pivotante à pousser et à tirer.....	132
Figure V.35. Positionnement de l'espace de manœuvre d'une porte coulissante. <b>Erreur ! Signet non défini.</b>	

## Liste des tableaux

Tableau I.1. Classification internationale de handicaps (CIH).....	20
Tableau I.2. Fréquence des déficients moteurs en fonction du type d'établissement.....	32
Tableau I.3. Recours aux aides techniques et aménagements du logement selon le GIR, l'âge et le sexe (enquête Handicap-Santé 2008).....	34
Tableau IV.1. Type des mouvements personne-fauteuil roulant.....	85
Tableau IV.2. Type d'intersection.....	101
Tableau V.1. Résultats du premier scénario.....	106
Tableau V.2. Résultats obtenus du deuxième scénario.....	107
Tableau V.3. Résultats obtenus du troisième scénario.....	107
Tableau V.5. Exemples des prescriptions des éléments de manœuvre adoptées en France et États-Unis.....	134
Tableau V.6. Espaces de manœuvre et hauteurs de préhension pour les trois types des personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant (porte pivotante).....	136
Tableau V.7. Hauteurs admissibles des équipements/dispositifs pour les trois catégories des personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant.....	136
Tableau V.8. Distance 'D' par rapport à l'angle rentrant de parois pour les trois catégories des personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant (porte coulissante).....	137
Tableau A.1. Tableau de Denavit-Hartenberg de la chaîne cinématique considérée.....	143
Tableau A.2. Les limites articulaires normales des personnes ayant un âge entre 15 ans et 35 ans....	144
Tableau A.3. Les limites articulaires pathologiques des personnes ayant un âge entre 45 ans et 60 ans.....	145
Tableau A.4. Les limites articulaires pathologiques des personnes ayant un âge entre 60 ans et 75 ans.....	146
Tableau A.5. L'espace de manœuvre minimale d'une porte coulissante pour les trois types des limites articulaires et les trois types du fauteuil roulant.....	147
Tableau A.6. Hauteurs admissibles des équipements de commande/services installés sur le mur (prises, interrupteurs interphones, vannes de gaz ...etc.) pour les trois types des limites articulaires et les trois types du fauteuil roulant (approche parallèle).....	148
Tableau A.7. Hauteurs admissibles du système de contrôle d'accès des portes d'entrées et l'espace de manœuvre minimal du fauteuil roulant correspondant pour les trois types des limites articulaires et les trois types du fauteuil roulant.....	148

## Introduction générale

---

L'accessibilité d'un logement est une notion qui regroupe plusieurs concepts entre autres : l'accessibilité à la mobilité qui concerne les capacités de mouvement de la personne sur de larges surfaces, l'accessibilité à la préhension qui permet de définir des éléments de hauteur ou profondeur maximale et la combinaison des deux, et les actions de manipulation indépendantes ou combinées avec le système d'aide technique à la mobilité. De manière générale, l'accessibilité désigne la capacité d'une personne à appréhender son environnement et à le maîtriser. Elle se réfère à des objets, des bâtiments, de l'information et de la technologie disponibles dans des activités quotidiennes de toute personne. La plupart des actes quotidiens nécessitent une disposition totale des capacités motrices, perspectives et cognitives. Il y a des personnes qui sont nées avec un certain type de handicap alors que d'autres l'acquièrent plus tard par un accident, par une maladie ou par la procédure du vieillissement. Quelle que soit la manière d'acquérir le handicap, il devient difficile de poursuivre un mode de vie habituel sans le soutien de proches ou d'une aide extérieure.

Pour les personnes handicapées, la notion d'accessibilité est particulièrement présente au quotidien puisqu'en général l'environnement est conçu pour des personnes ayant toutes leurs facultés physiques, sensorielles et cognitives. Pour les personnes handicapées, l'accessibilité intérieure d'un logement est un facteur très important qui leur permet de vivre et de travailler indépendamment. En général, l'adaptation des logements aux personnes handicapées se fait selon la nature de l'incapacité de cette personne. À cet effet, l'évaluation de l'accessibilité et l'aménagement d'un environnement bâti sont nécessaires lorsque les capacités physiques de la personne ne correspondent plus aux nécessités de l'habitat. L'aménagement et la réhabilitation du logement désignent l'adaptation des outils, des équipements (de manœuvre, de commande de service ...etc.) et des procédés en vue de les personnaliser et d'aider les personnes handicapées à surmonter les obstacles qu'elles rencontrent.

La réhabilitation d'un logement doit être basée sur des règles et dispositifs efficaces pour améliorer l'accessibilité des personnes handicapées en milieu privé ou public. Les problèmes de l'accessibilité sont souvent liés à la méconnaissance des prescriptions mises en place par les gouvernements ou la non-fiabilité des règles adoptées et leur ignorance des besoins spécifiques des personnes handicapées. En règle générale, plus un environnement est accessible, plus il est facile à maîtriser et moins il est coûteux de tenir compte des besoins des personnes handicapées. Par ailleurs, le fait de tenir compte des besoins et les spécifications des utilisateurs handicapés tout au début de la conception de l'environnement et l'élaboration des systèmes accroît l'efficacité de l'accessibilité et en réduit les coûts. De fait, puisque chacun possède des agencements uniques de forces et de faiblesses (de capacités et d'incapacités), tous peuvent profiter des aménagements qui doivent accroître leurs forces, leurs autonomies et les pousser plus loin tel que leurs faiblesses ou leurs incapacités ne soient pas un obstacle dans leur vie quotidienne. De ce fait, les systèmes d'évaluation d'accessibilité doivent tenir compte des caractéristiques uniques de chacun pour que l'environnement soit fiable et utilisable par tout le monde.

Afin de réussir à créer un environnement accessible et utilisable par toute personne ayant des incapacités, il est primordial de placer ces personnes au centre des efforts du processus de l'évaluation d'accessibilité et de l'aménagement de l'environnement. Il existe trois niveaux d'accessibilité qui doivent être envisagés pour combler les exigences des personnes handicapées en matière d'accessibilité.

- *Aides techniques personnelles* : désignent des outils qu'utilisent souvent les personnes handicapées, le fauteuil roulant pourrait être un exemple d'aide technique personnelle. Ce dernier doit être fait en mesure et être adapté aux besoins de la personne ainsi que de l'environnement pour minimiser les effets des déficiences sur l'objectif de mobilité et de manipulation des objets, pour accroître la capacité et pour promouvoir l'indépendance.
- *Environnement technologique* : il représente les éléments et les dispositifs qui constituent l'environnement et qui peuvent être utilisés par la personne handicapée tels que : les rampes pour fauteuils roulants, les portes, les fenêtres, les bordures ...etc. La conception de



l'environnement peut créer des obstacles aux personnes s'ils sont incompatibles avec leurs aides techniques personnelles (comme le fauteuil roulant qui ne peut pas passer par une porte ou lorsque la personne est incapable de faire des manœuvres pour manipuler correctement certains éléments de manœuvre).

- *Information et services* : ce niveau d'accessibilité désigne l'information et les services qui circulent dans les technologies pour arriver à la personne. Les informations et des services sont généralement conçus de sorte qu'ils puissent être utilisés par des personnes handicapées et leurs aides techniques. Par exemple, une personne aveugle peut se trouver dans un environnement technologique qui doit intégrer facilement ses aides techniques personnelles qui lui parlent. Le média multiple et souple correspond à deux stratégies très utilisées dans ce niveau d'accessibilité.

Dans cette thèse, nous nous intéressons plus particulièrement au processus d'évaluation de l'accessibilité à la préhension et à la mobilité (premier et deuxième niveau d'accessibilité) des éléments de manœuvre par rapport à une personne en fauteuil roulant dans un environnement bâti. L'objectif de notre travail est d'étudier une méthodologie permettant d'évaluer l'accessibilité des éléments de manœuvre/commande/services d'un logement pour une personne utilisant un fauteuil roulant manuel, en vue de caractériser ces éléments au sens d'accessibilité (à la préhension et à la mobilité) en prenant en considération les capacités articulaires (selon la tranche d'âge) de la personne et le type du fauteuil roulant utilisé. De point de vue méthodologique, notre étude correspond à définir les mouvements de la chaîne articulée de la personne avec les déplacements du fauteuil roulant dans un cadre dynamique de la réalisation des tâches quotidiennes de manipulation, telle que l'ouverture d'une porte. Cette opération et selon la technologie nécessite des mouvements différents. À la fin, les résultats obtenus seront utilisés comme des recommandations dans la phase d'aménagement, sur les types d'environnement technologique et les aides techniques personnelles qui doivent être mises en considération selon les capacités résiduelles de la personne.

La thèse est organisée comme suit : nous présentons dans le premier chapitre, un état de l'art des interprétations de la notion de handicap utilisées et l'évolution de la classification/catégorisation des personnes handicapées dans la littérature. Nous exposons les différents aides développés pour améliorer les conditions de la vie des personnes ayant des incapacités physiques, sensorielles, intellectuelles ...etc.

Dans le deuxième chapitre, nous présentons une revue de la littérature sur les approches proposées dans le même objectif que le présent travail. Tout d'abord, nous abordons les approches législatives d'accessibilité adoptés mondialement pour les personnes handicapées. Ensuite, les approches numériques et expérimentales innovantes qui utilisent l'outil réalité virtuelle pour simuler les mouvements humains. A la fin de ce chapitre, nous discutons les avantages et les inconvénients de chaque méthode ainsi que leur taux de contribution à l'accessibilité.

Le troisième chapitre présente le modèle anatomique, squelettique et biomécanique du corps humain, plus particulièrement la partie haute du corps. Nous allons exposer les différents mouvements des membres supérieurs de chaque articulation et dans les trois plans : sagittal, frontal et transversal. À la fin, nous présentons le modèle de la structure articulée et celui du fauteuil roulant qui est utilisé en simulation.

Le quatrième chapitre est consacré à présenter en détail le principe de notre approche pour l'évaluation de l'accessibilité, son objectif et le cadre dans laquelle elle a été développée. Nous allons expliquer par un exemple notre problématique en termes de simulation en précisant les contraintes et les conditions qui ont été prises en considération dans notre étude. La raison pour laquelle nous avons choisi un algorithme du type incrémental pour résoudre notre problématique, le principe fonctionnement de ce dernier ainsi que les contraintes et les conditions considérées dans la simulation des mouvements humains et des déplacements du fauteuil roulant. À la fin de ce chapitre, l'outil de simulation qui décrit les différents blocs de calcul ainsi que le logiciel de développement auront été présentés.

Le cinquième chapitre, présente les résultats originaux de notre étude servant à améliorer la qualité de l'accessibilité à la mobilité et à la préhension des objets de manipulation par rapport aux personnes à mobilité réduite.

Enfin, on conclut cette thèse en présentant les perspectives de recherche et les travaux que seront abordés au long terme.

# Chapitre I: Handicap

---

## **I. 1. Introduction**

Un handicap est une condition désavantageuse pour une personne créant des contraintes, ce qui limite les activités quotidiennes et sociales. Les services d'aide au handicap ont connu une forte de progression au cours de ces dernières années. Effectivement, ces progrès offrent une solution adaptée aux besoins des personnes à mobilité réduite ou dépendante, en assurant surtout un meilleur confort dans la vie quotidienne. Cependant, la vraie révolution réside dans le domaine de l'interface homme-machine, c'est-à-dire les moyens mis en œuvre pour que l'homme puisse « communiquer avec/ou utiliser » une machine. L'exemple de l'interface pour commander un produit par de simples mouvements de tête voire même de pupille, est une avancée révolutionnaire dans la compensation des handicaps les plus lourds. Une notion bien définie des personnes handicapées sert à comprendre leurs besoins ainsi que les aides personnelles/techniques adéquates. Dans ce chapitre, nous allons présenter les interprétations les plus adoptées de la notion de handicap dans la littérature, la catégorisation du handicap et les services/technologies d'aides au handicap les plus utilisées.

## I.2. Handicap

Donner une définition du handicap sur laquelle tout le monde s'accorde semble impossible. Et s'il est bien un pari difficile, c'est de parler de handicap en théorie, autour de concepts, de terminologie, à des personnes handicapées, à leurs proches, aux professionnels qui quotidiennement les accompagnent. Pour les personnes les plus concernées, les termes définition et classification ont souvent une connotation péjorative, théorique voire technocratique. L'idée de classer des handicaps induit la crainte de voir les gens mise en compartiments, leur souffrance en rubriques, leurs problèmes quotidiens en tableaux et pourcentages [1].

Pourtant, il existe deux types de classifications adoptées mondialement, la CIF (Classification Internationale du Fonctionnement, du Handicap et de la Santé) adopté par l'OMS (Organisation Mondiale de Santé) en 2001, précédemment CIH (adopté par l'OMS 1980); et le PPH (Processus de Production du Handicap) développé par l'équipe Québécoise de Patrick Fougeyrollas et diffusé depuis 1998.

### I.2.1. La classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF)

#### I.2.1.1. La classification internationale des handicaps (CIH) : déficiences, incapacités, désavantages

– **Une déficience** est une perte de substance ou altération d'une structure ou fonction (psychologique, physiologique ou anatomique) ; la déficience correspond à la lésion (exemple : amputation, lésion de la moelle, dégénérescence d'un nerf...etc.) et/ou au déficit en résultant (exemple : paraplégie, ankylose, aphasie, surdité, incontinence urinaire...etc.).

– **L'incapacité** correspond à toute réduction (partielle ou totale) de la capacité d'accomplir une activité d'une façon ou dans les limites considérées comme normales. Par exemple : incapacités à marcher, à s'accroupir, à fermer le poing...etc., mais aussi (en situation) à se lever, se laver, utiliser les WC, s'habiller, communiquer, mémoriser, réfléchir...etc.

– **Le désavantage** (conséquence des déficiences ou des incapacités) représente une limitation ou une interdiction d'accomplissement d'un rôle social normal (en rapport avec l'âge, le sexe, les facteurs sociaux et culturels) tel que : gagner sa vie, faire des études, avoir un emploi, s'occuper...etc.

La figure (I.1) permet de montrer les liens entre ces trois concepts qui permettent de définir le handicap selon le CIH.

CIH						
Cause	⇒	Déficiences	⇒	Incapacités	⇒	Désavantages
Maladies		Mentales		à mémoriser		à trouver un emploi
Malformation		Motrices		à marcher		à prendre le métro
Accidents		Sensorielles		à communiquer		pour la scolarité

Tableau I.1. Classification internationale de handicaps (CIH) [2].

### I.2.1.2. De la CIH à CIF : Les limites d'une conception individuelle du handicap

Dans ce modèle, la CIH (le handicap) se situe donc en aval de la cause médicale (diagnostic) et cela permet de le considérer indépendamment de cette cause. Le problème n'est pas seulement d'être polio ou SEP...etc., mais d'avoir besoin d'une auxiliaire de vie, d'être paraplégique ou amputé...etc., de vivre dans une ville inaccessible en fauteuil roulant, d'être un handicapé devenu vieux ou un vieux devenu handicapé [3].

Les limites de la CIH sont nombreuses :

- L'enchaînement n'est pas univoque : le modèle proposé (Figure I.1) peut laisser croire que les événements se déroulent toujours dans l'ordre indiqué.
- Le vocabulaire systématiquement négatif et l'application à une population donnée sont discriminants.
- La CIH (1980) reste promotrice d'un modèle du handicap ignorant le rôle de l'environnement.

Le processus de révision de la CIH par l'OMS organisée autour du futur schéma de la CIH et l'environnement de la personne handicapée, avant lui les travaux québécois autour du processus de production du handicap (PPH) et simultanément d'autres sources d'inspirations comme le système d'identification des personnes handicapées et ont tous eu pour préoccupation de tenter une intégration de différents modèles, comme celui proposé par Pierre Minaire (1978), pour sortir de leur opposition binaire et réductrice et proposer l'approche la plus globale et universelle possible de la question des personnes handicapées. Au niveau européen, le forum des associations représentatives de personnes handicapées proposait au début des années 90 une définition du handicap remarquable par la synthèse qu'elle réalise : *Le handicap apparaît dans l'interaction entre la déficience, la limitation fonctionnelle et une société qui produit des barrières empêchant l'intégration.* Cette approche vient avec des termes importants, le handicap n'est plus un phénomène statique mais dynamique, un processus (apparaît) qui résulte de la combinaison (interaction) de deux séries de facteurs : individuels (déficience et limitation fonctionnelle) et sociaux (barrière), l'accent étant mis sur la résultante sociale (intégration) de cette combinaison. **Cette définition, élaborée par des personnes handicapées elles-mêmes, sous-tend actuellement tous les modèles** proposés pour tenter de rendre compte de la complexité de la notion de handicap [3]. La CIF adopte aujourd'hui une définition du handicap très proche de celle du forum européen, dans un cadre conceptuel le nouveau rapport mondial de la santé définit le handicap comme un terme générique désignant les déficiences, les limitations d'activité et les restrictions de participation. Il renvoie aux aspects négatifs de l'interaction entre un individu atteint d'un problème de santé (comme l'infirmité motrice cérébrale, le syndrome de Down, la dépression) et les facteurs personnels et environnementaux (comme les attitudes négatives, l'inaccessibilité des transports et des bâtiments publics et des soutiens sociaux limités). Même si la notion d'interaction entre un individu et ses propres facteurs personnels peut être jugée « schizophrénique », l'idée d'une situation de vie résultant d'une double lignée de facteurs, intrinsèques et extrinsèques, est celle retenue notamment par le schéma (Figure I.1) [2].

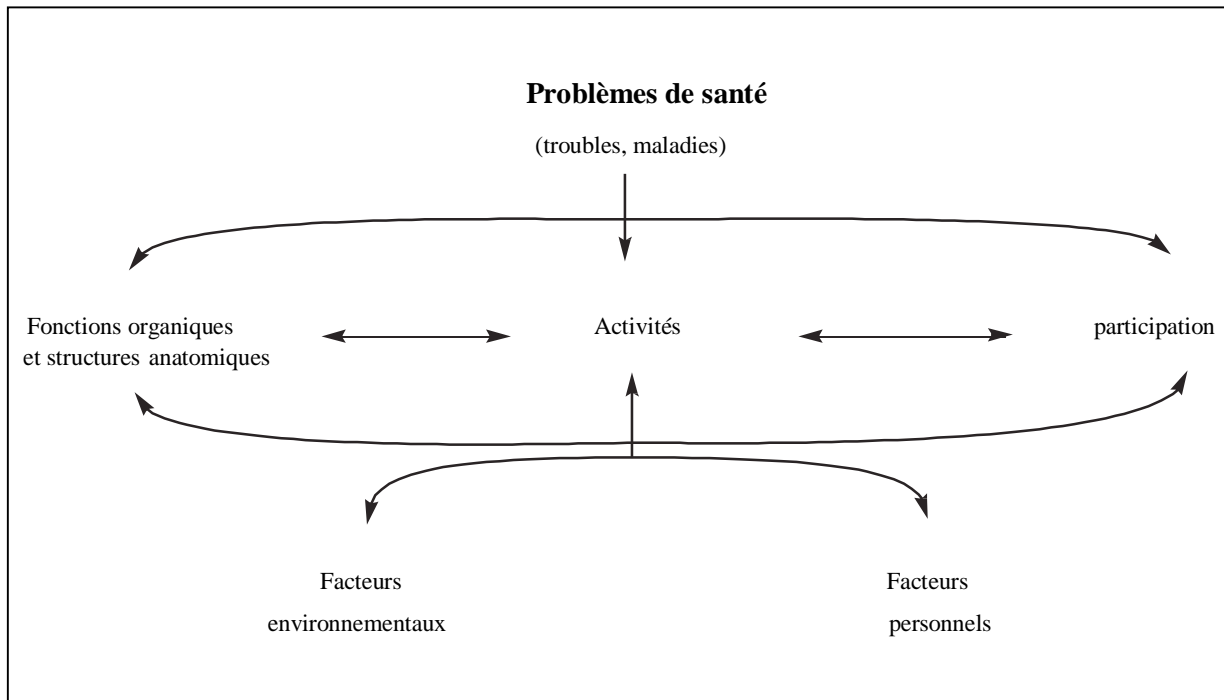


Figure I.1. Schéma de classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF) [2].

### I.2.2. Le Processus de production du handicap (PPH)

Dès 1988, Fougeyrollas et al. commençaient une procédure de révision de la CIH, et publiaient en 1996 une classification complète : le Processus de Production du Handicaps (PPH) [4], adoptant et illustrant par un schéma pédagogique particulièrement clair une définition similaire du handicap (le terme générique neutre d'habitude de vie étant retenu pour désigner les dimensions positives (participation) et négatives (situation de handicap)). Une situation de handicap correspond à la réduction de la réalisation des habitudes de vie, résultant de l'interaction entre les facteurs personnels (les déficiences, les incapacités et les autres caractéristiques personnelles) et les facteurs environnementaux (les facilitateurs et les obstacles). Pour la première fois, une finalité universelle (le développement humain) dépassant le champ discriminatoire du handicap comme stigmaté était assigné à une classification à visée internationale, et une véritable dimension socio-environnementale était définie, décrite et articulée avec les facteurs individuels. À ce jour, le PPH est sans doute le modèle le plus abouti et le plus facilement utilisable par la clarté de ses définitions et de ses concepts et par la pédagogie de son schéma illustratif (Figure I.2) [3].

Dr. Michel Decely (2002) a proposé un modèle qui décrit la conception actuelle des situations de handicap. Une multitude d'appellations ont été utilisées pour désigner ceux qu'on appelle maintenant « personnes handicapées » ou pour utiliser une terminologie plus récente et qui ne fasse pas du handicap une caractéristique purement personnelle, les personnes en situation de handicap (Figure I.3) [3].

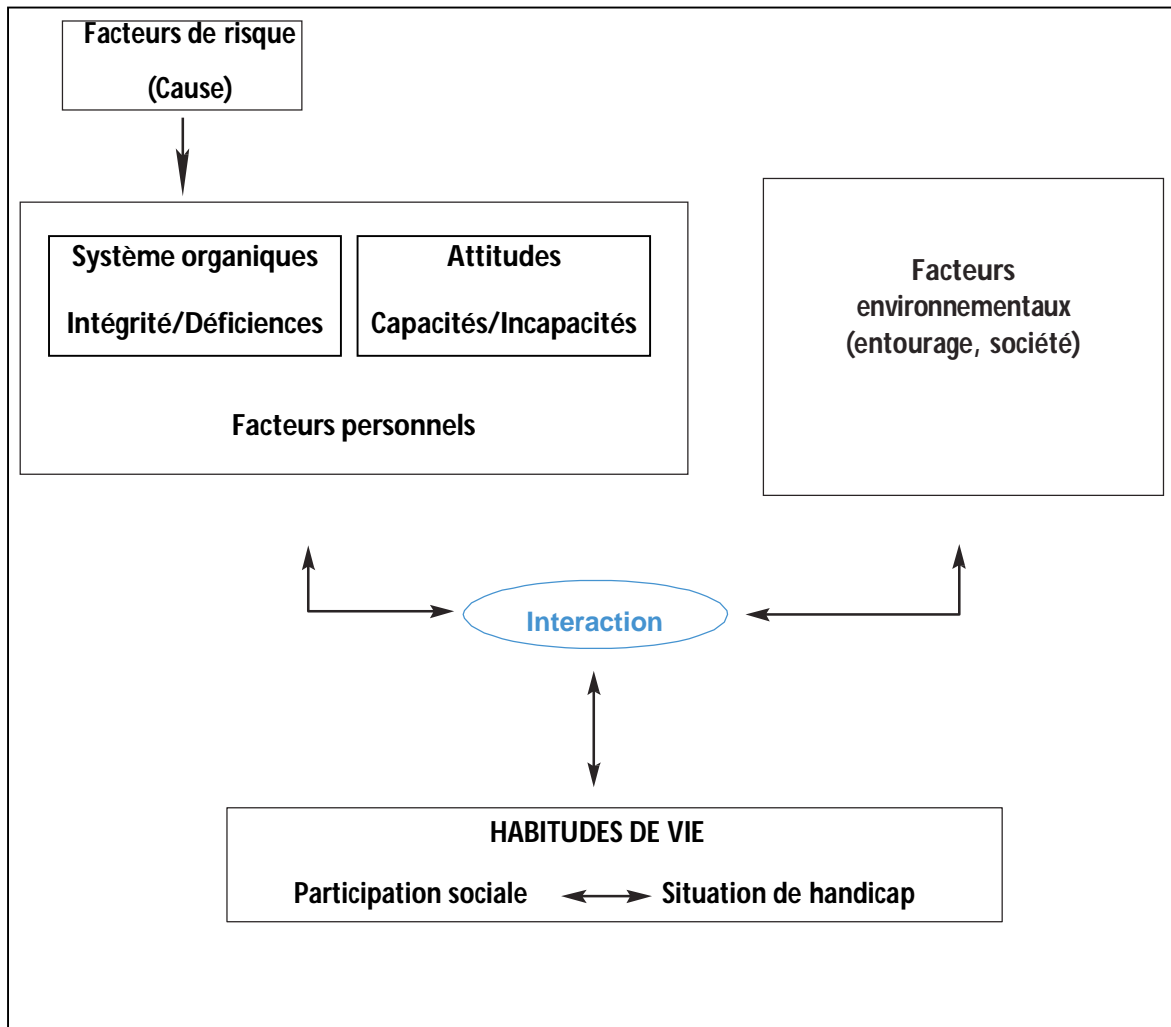


Figure I.2. Le processus de production du handicap (PPH) – D’après P. Fourgeyrollas et coll. [4].

✓ **CIF ou PPH, faut-il choisir entre ces deux classements du handicap ?**

Choisir une de ces deux classifications amènerait à faire l’exclusion de l’autre. Ces deux modèles explicatifs du handicap partagent bien plus d’éléments en commun que de différences. Et ce sont ces points de divergences qui animent les discussions, les réflexions et les recherches actuelles. L’élément principal de ces deux classifications, et leur apport principal, porte sur la définition du handicap en tant que résultat de l’interaction d’un sujet avec son environnement. Trop longtemps le handicap a été lu que comme caractéristique n’appartenant qu’à la personne porteuse d’une déficience, sans que l’on ne tienne compte de l’environnement dans lequel elle évoluait. Aujourd’hui, sans nier l’importance de la déficience, on admet que l’environnement joue un rôle essentiel dans la diminution ou l’augmentation des difficultés que rencontre la personne dans les situations de vie quotidienne. D’où l’importance accordée dans les deux classifications aux facteurs environnementaux. La CIF et le PPH sont deux dictionnaires qui permettent d’évaluer les situations de handicap que rencontre un individu, et de déterminer avec une meilleure objectivité ses besoins prioritaires. Chacune de ces classifications utilise des outils adaptés aux finalités des professionnels qui les utilisent [5].

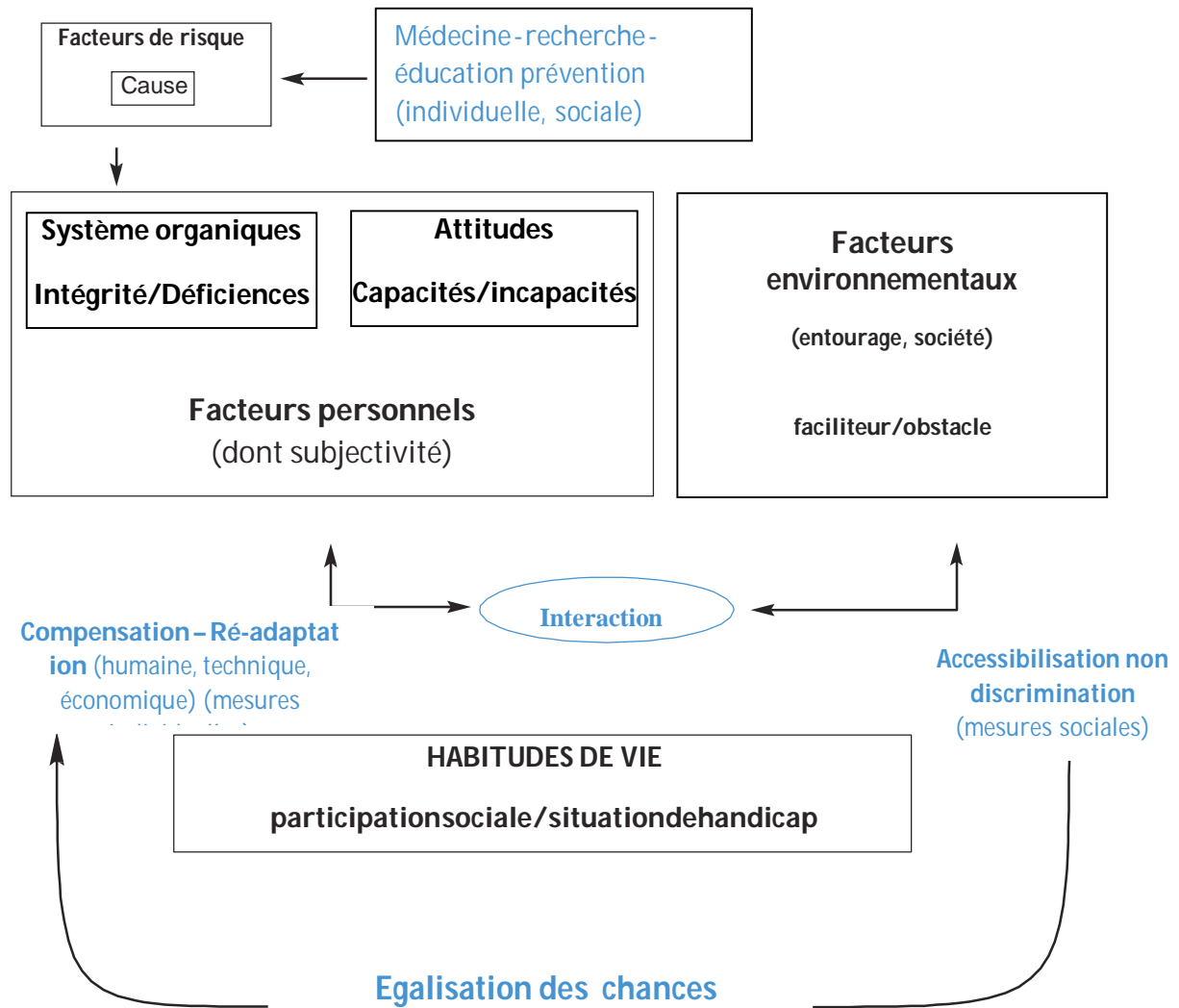


Figure I.3. Conception actuelle des situations de handicap - Représentation des interventions visant à favoriser la participation sociale (appuyer sur le PPH Québécois, Figure I.2).

### I. 3. Les aides humaines et techniques

#### I.3.1. Les aides humaines

Nul doute que la technologie renforce l'indépendance. Mais les aides humaines restent indispensables. Pour la plupart des personnes handicapées, l'aide humaine est synonyme d'accompagnement mais un accompagnement qui, dans le cas d'une personne dépendante sur le plan physique, consiste à faire appel au « corps d'autrui » pour exécuter des tâches courantes, le plus souvent nécessairement personnelles et intimes, sous la conduite ou le pilotage de la personne handicapée. Toutefois, il n'est pas sans risque de subir l'intrusion dans sa vie privée. L'aide humaine à domicile des personnes en situation de handicap a été répartie en trois parties distinctes. La première concerne les besoins, la demande et les attentes des personnes en situation de handicap en matière d'aide humaine. La seconde, les offres. Ce point distingue l'aide **humaine professionnelle** et l'**aide humaine familiale**. Une troisième partie tente de faire le lien entre les différentes formes d'aide humaines d'une part, entre l'aide humaine et d'autres moyens de compensation dont les aides



techniques, d'autre part. La question de la définition des besoins en aide humaine des personnes en situation de handicap est régulièrement posée dans des articles et des rapports de recherche ou d'étude. Il s'agit de prendre en compte les spécificités de chacune et de chacun selon les moments ou les événements du parcours de vie et de disposer d'outils d'évaluation pertinentes [6].

Dans la littérature, nous avons trouvé différents types de besoins : ceux relatifs à l'autonomie des personnes entendues par la possibilité des personnes à exprimer leurs besoins et leurs attentes et à avoir la possibilité de formuler et de mettre en acte son projet de vie. Il existe trois entrées possibles pour prendre en compte les spécificités :

- Une entrée par les incapacités [1].
- Une entrée par la prise en compte de l'évolution des besoins et des contraintes environnementales [7].
- Et enfin une entrée par le moment de la trajectoire et du parcours de vie des personnes : entrée dans la maladie chronique et âge ou événements de la vie [8][9].



Figure I.4. Exemple des aides humaines professionnelles, servent à maintenir dans l'emploi les personnes handicapées.

La figure (I.4) décrit les rémunérations versées aux agents chargés d'accompagner une personne handicapée dans l'exercice de ses fonctions professionnelles ou les prestations équivalentes servies par des organismes de droit privé.



Figure I.5. Exemple d'une aide humaine familiale qui sert à l'intégration dans la vie quotidienne.

### **I.3.2. Les aides techniques et les outils d'aides à la préhension**

Le terme « aide technique » souvent considéré comme quelque chose de vague nécessite d'être précisé. La dénomination « aide technique » recouvre la notion de matériel ou d'équipement en opposition avec l'aide humaine ou l'aide animalière. Dans les années 80, on a remplacé les termes « aides techniques » par « produits pour mieux vivre » puis récemment par « produits d'aide à la vie » [10].

Des définitions internationales existent, précisant le champ couvert par les aides techniques. La norme ISO 9999 définit les aides techniques comme « tout produit, instrument, équipement ou système technique utilisé par une personne handicapée, fabriqué spécialement ou existant sur le marché, destiné à prévenir, compenser, soulager ou neutraliser la déficience, l'incapacité ou le handicap ». La recommandation 92 du Conseil de l'Europe fait référence à la norme ISO 9999 et inclut non seulement les appareillages classiques mais aussi « tout outil ou système technique susceptible de faciliter le déplacement, la manipulation, la communication, le contrôle de l'environnement, les activités simples ou complexes de la vie quotidienne, domestique, scolaire, professionnelle ou sociale » [10].

- Les aides techniques pour les personnes en situation de handicap sont tous les produits, instruments, équipement ou système technique, adapté ou spécialement conçu qui permettent de compenser totalement ou en partie une limitation d'activité d'une personne du fait de son handicap.
- Les aides techniques représentent pour les personnes en situation de handicap un des éléments majeurs à l'acquisition d'une autonomie de mobilisation, de déplacements, etc.
- Les aides techniques tout en réduisant l'intervention des aides humaine ne peuvent pas toujours s'y substituer totalement mais en compensant le plus possible le handicap, elles redonnent une réelle indépendance à la personne.
- Certaines aides techniques peuvent être remplacées par une aide animalière (le chien guide aveugle devient alors une sorte de «prothèse » pour le déficient visuel et se substitue à la canne blanche).
- Pour certains types de handicaps (moteurs et sensoriels) les aides techniques sont primordiales, pour d'autres (mental et psychique), les besoins en aides techniques sont peu importants alors que ceux en aides humaines sont prioritaires.

Pour garantir que les aides techniques sont appropriées, adéquates et de bonne qualité, elles doivent :

- Être adaptées à l'environnement.
- Répondre aux besoins de l'utilisateur.
- Être accompagnées d'un suivi adéquat qui assure une utilisation efficiente et en toute sécurité [10].

### I.3.2.1. Exemples des aides techniques et leurs utilisations

#### ✓ Aide technique à la mobilité : handicap moteur

La déficience motrice est une atteinte de la motricité par perte de substance ou altération d'une structure ou fonction (anatomique et physiologique). Elle entraîne une réduction de la motricité globale de la personne, pouvant toucher les capacités à : se déplacer, maintenir une posture, agir et prendre des informations sur le monde extérieur, communiquer, s'alimenter ou encore sur l'activité réflexe (Figure. I.6).



Figure I.6. Personne en fauteuil roulant.

#### ✓ Aide technique à visualisation : Handicap visuel

Les personnes ayant un handicap visuel n'ont pas toutes des gênes identiques. Selon le degré de sévérité de leur déficience visuelle, on parle de cécité ou de malvoyance. La perte de vision peut être d'apparition brutale ou progressive, elle peut affecter la vision centrale, la vision périphérique ou les deux. Le retentissement fonctionnel est, par conséquent, très variable d'une personne à l'autre. Dans la vie quotidienne, la déficience visuelle se répercute d'abord sur les activités mettant en jeu la vision centrale (lecture, écriture, reconnaissance des détails...etc.) et sur les déplacements, surtout dans les environnements inconnus ou comportant des obstacles imprévus. Les aides techniques destinées à la compensation du handicap visuel sont relativement peu utilisées. Ils regroupent l'ensemble des dispositifs destinés à aider la réalisation d'activités de la vie quotidienne, et notamment les dispositifs d'aménagement du logement, les prothèses, ainsi que les différents matériels utilisables par les personnes pour compenser leurs incapacités dans la vie quotidienne [11].

L'ensemble des aides techniques étudiées dans le questionnaire HID (Handicap-Incapacité-Dépendances) [12] sont regroupées en sept domaines :

- Les aménagements et adaptations du logement (sanitaires adaptés, cuisines, dispositifs de soutien...etc.).
- Les prothèses et appareillages de soutien, de maintien ou de correction de la position du corps.
- Les aides pour les soins personnels et la protection.

- Les aides pour la mobilité personnelle et les transferts (cannes, fauteuils roulants, déambulateurs, cannes blanches, chiens-guides, véhicules adaptés).
- Les aides pour la communication, l'information, la signalisation (aides optiques et électro-optiques, interfaces d'ordinateurs pour reconnaissance et synthèse vocale, traitements de texte en braille, magnétophones, usage du braille, aides pour parler, aides auditives).
- Les aides à la manipulation.
- Les aides pour les traitements.



Figure I.7. Des aides techniques à la visualisation selon HID : (a) un véhicule adapté, (b) les prothèses et appareillages de correction de la position du corps, (c) chiens-guides, (d) interfaces d'ordinateurs pour reconnaissance et synthèse vocale.

✓ **Aide technique à l'audition : le handicap auditif**

La déficience auditive se traduit par une diminution partielle ou totale de la capacité à entendre les sons, mais aussi par une modification de leur perception. La surdité peut apparaître à tous les âges de la vie et présenter un caractère évolutif. Enfin, les acouphènes et l'hyperacousie font partie des troubles graves de l'audition et perturbent considérablement la perception et le confort de la personne qui en est atteinte. La déficience auditive recouvre une réalité différente pour chaque personne, et ses conséquences varient en fonction du degré de surdité, de l'âge auquel celle-ci apparaît, des possibilités d'appareillage, du type d'éducation reçue, du mode de communication privilégié.

On regroupe sous le terme **d'aide technique à l'audition** tous les accessoires, appareils divers, systèmes d'écoute, techniques de sous-titrage et de retranscription, systèmes de signalisation visuels, etc., qui s'utilisent soit en complément de l'appareil de correction auditive ou de l'implant cochléaire pour améliorer la compréhension dans certaines situations du quotidien.



(a)

(b)



(c)

Figure I.8. Des aides techniques à l'audition : (a) appareil auditif, (b) alarme visuelle, (c) système visualisation de métro.

On a aussi le **handicap psychique**, regroupe les personnes atteintes de difficultés d'ordre psychique souffrent d'un malaise qui peut se traduire, à certains moments, par des comportements déroutants pour les autres, car éloignés des conduits convenus et habituels. Il n'y en a pas des aides techniques spécifiques à cette catégorie des handicapées, mais selon le type de maladie on peut proposer une aide pertinente. Par exemple, pour compenser les problèmes de la mémoire, un PDA ou un téléphone portable pouvant prendre des notes peut lui permettre de planifier ses tâches, un bloc note ou agenda pour noter ses devoirs. On peut citer aussi **les troubles des paroles et de langage, la déficience mentale et les maladies invalidantes**, comme types de handicaps, ces trois dernières catégories ne s'appuient pas sur des aides techniques, les aides humaines telles que : l'assistant de vie, éducatrice, orthophoniste, psychologue ou psychiatre ...etc., sont beaucoup plus demandés à ce niveau.

**I.3.2.2. Les outils d'aides à la préhension**

Les aides à la préhension sont indispensables pour les personnes ayant peu d'usage de leur main ou une faible préhension. Le terme d'aide technique à la préhension rassemble tout produit, instrument ou système technique utilisé par une personne handicapée et destiné à prévenir, compenser, soulager ou neutraliser la déficience, l'incapacité ou le handicap.



Figure I.9. Aides techniques pour compenser la préhension chez les personnes handicapées.

**I.4. Le handicap et le logement**

**I.4.1. Analyse et statistiques**

L'enquête HID de l'INSEE en 2000 (l'Institut National de la Statistique et des Etudes Economiques) qui est la première enquête menée en France. Cette enquête est une opération couvrant l'ensemble de la population : enfants, handicapés adultes, personnes âgées qu'ils vivent en ménage ordinaire ou en établissement. Ses objectifs sont de mesurer le nombre de personnes handicapées ou

dépendantes, d'évaluer les flux d'entrée et de sortie en incapacité et de relever la nature, la quantité et les fournisseurs d'aides existantes ainsi que les besoins non satisfaits. Cette opération s'est déroulée en quatre étapes par entretien en face-à-face par un enquêteur de l'INSEE. Menée au dernier trimestre 1998, la première vague a concerné près de 15 000 personnes résidentes ou soignées en institution (établissements pour personnes âgées, établissements pour enfants et adolescents handicapés, pour adultes handicapés, institutions psychiatriques). À l'occasion du recensement de mars 1999, près de 360 000 personnes vivant en domicile ordinaire ont rempli pour leur part un court questionnaire, à la suite duquel environ 17 000 d'entre elles ont reçu la visite d'un enquêteur fin 1999. Un second entretien avec les mêmes personnes était prévue deux ans plus tard : fin 2000, pour les personnes en institution et fin 2001, pour les personnes vivant en domicile ordinaire [12].

L'enquête faite sur les gens ayant des déficiences motrices (l'objet de notre thèse) nous montre clairement le nombre important de cette catégorie des handicaps, et le niveau des difficultés à se déplacer à l'extérieur de leur lieu de vie s'avèrent les plus fréquents par rapport aux difficultés entravant l'accès au logement, que ce soit pour un domicile ordinaire ou institution. L'objectif de cette étude statistique est d'étudier **les capacités** et **les incapacités** des personnes handicapées pour les activités de la vie quotidienne, qui s'expriment **dans le cadre de l'environnement** particulier dans lequel chacune d'elles évolue. L'autonomie ou la dépendance des personnes est en effet relative à cet environnement construit. Une personne utilisant un fauteuil roulant pourra rencontrer des difficultés d'accès à certaines pièces de l'institution si les portes sont trop étroites pour le passage du fauteuil et être en revanche totalement autonome dans ses déplacements dès lors que portes et couloirs sont adaptés aux dimensions des aides techniques utilisées.

Cette démarche d'observation a moins pour objet de vérifier l'adaptation des locaux des institutions médico-sociales aux besoins des populations qu'elles accueillent que de mettre en évidence les bénéfices d'un environnement aménagé et d'appareils adaptés au handicap sur l'autonomie de certaines personnes dans les actes de la vie courante [12].

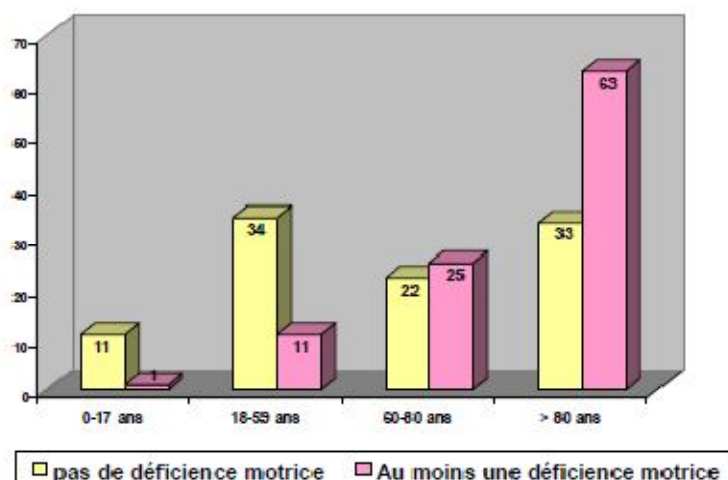


Figure I.10. Fréquence des déficiences en fonction de l'âge.

Ce mode particulier de traitement de l'enquête HID offrira aux acteurs du secteur médicosocial (chercheurs, travailleurs sociaux, décideurs) une observation originale de la population handicapée car elle a l'avantage:

- D'une part, comme toute étude statistique d'envergure, d'objectiver les situations rencontrées sur le terrain et de repérer les grandes tendances.
- D'autre part, de prendre en compte les facteurs techniques (environnement, aides techniques, appareillages) qui ont participé à la construction des données recueillies.

Les résultats de cette enquête, nous permettent d'étudier les variables relatives à l'accessibilité à l'institution (plan incliné à l'entrée, parking aménagé, etc.). Elles ne peuvent participer à la construction des groupes homogènes dans la mesure où ces informations sont indépendantes, sans interaction avec les données relatives aux incapacités, aides techniques et aménagements à l'institution. En fait, si l'accessibilité du logement aborde bien à la fois les questions de l'incapacité et de l'aménagement de l'environnement, elle le fait dans un cadre précis, avec un objectif bien identifié qui est celui de repérer les défauts d'accessibilité et d'en lister les causes.

Type d'établissement	pas de déficience motrice (%)	au moins une déficience motrice (%)
11 Etabl. d'Educ.Spé. (EES) pour déficients intellectuels	89	11
12 EES enfants atteints de troubles de la conduite et du comportement	96,2	3,8
13 EES pour handicapés moteurs	6,7	93,3
14 EES pour déficients visuels	85,8	14,2
15 EES pour déficients auditifs	92,9	7
16 EES pour polyhandicapés	61,2	38,8
19 Autres établissements pour enfants	77,4	22,6
20 Etablissements d'hébergement pour adultes handicapés	67,8	32,2
30 Institutions pour personnes âgées	35,4	64,6
40 Unités de soins de longue durée des E.H	31	69
50 Etablissements psychiatriques	77,7	22,3
Proportion tous établissements confondus	46,1	53,9

Tableau I.2. Fréquence des déficients moteurs en fonction du type d'établissement.

Parmi les questions liées à l'accessibilité certaines touchent le logement et ses aménagements, d'autres les déplacements. L'indication du niveau d'accessibilité est parfaitement liée au degré de difficulté ressenti par ces personnes lors de leurs déplacements à l'extérieur ou à l'intérieur du domicile. Cela correspond à la question « lors de vos déplacement hors de votre domicile (non compris le parc ou le jardin), êtes-vous gêné(e) du fait d'un handicap ou d'un problème de santé ? ».

Cinq réponses sont alors possibles :

- Personnes confinées au lit, personnes non gênées.
- Personnes gênées, mais pouvant se déplacer seules sur tous les itinéraires.



- Personnes gênées, mais pouvant se déplacer seules sur certains itinéraires.
- Personnes ne pouvant se déplacer seules.
- Personnes non autorisées à sortir.

Cet indicateur, fondé sur les perceptions des répondants, ne donne pas de mesure « objective » des difficultés rencontrées.

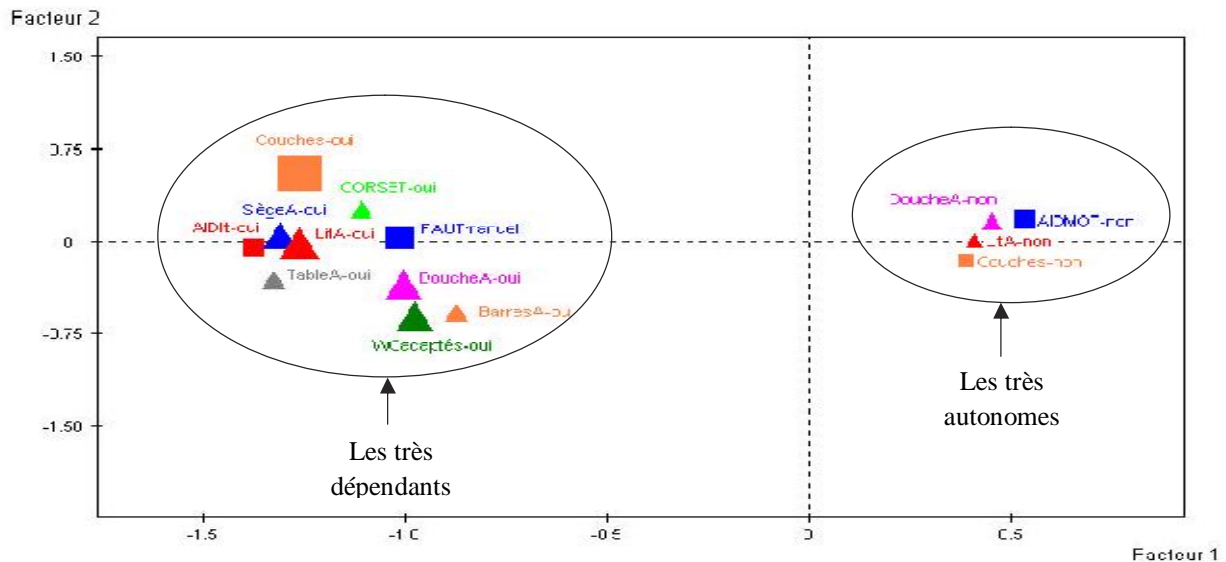


Figure I.11. Les aménagements du logement, les aides techniques et appareillages [12].

Les dernières statistiques réalisées par la direction de la recherche, des études de l'évaluation et des statistiques sur les usages et besoins des aides techniques et des aménagements du logement, publiées en décembre 2012, nous montrent que le recours aux aides est indépendant souvent de l'âge, notamment les aides à la mobilité dont 14% des personnes âgées les utilisent [13].

Le recours aux aides techniques et aux aménagements du logement est très lié au niveau de dépendance, mesuré ici par l'indicateur du groupe iso-ressource (GIR) estimé à partir des réponses à l'enquête HSM [14].

✓ **Les groupes iso-ressources (GIR)**

Il s'agit d'une estimation réalisée à partir des réponses à l'enquête ; il doit être considéré comme un indicateur statistique du degré de dépendance de la personne.

Le GIR 1 correspond aux personnes âgées confinées au lit ou au fauteuil et dont les fonctions mentales sont gravement altérées, qui nécessitent une présence indispensable et continue d'intervenants.

Le GIR 2 comprend deux groupes de personnes âgées : celles qui sont confinées au lit ou au fauteuil, dont les fonctions mentales ne sont pas totalement altérées et qui nécessitent une prise en charge pour la plupart des activités de la vie courante, et celles dont les fonctions mentales sont altérées mais qui ont conservé leurs capacités à se déplacer.

Le GIR 3 correspond, pour l'essentiel, aux personnes âgées ayant conservé leurs fonctions mentales, partiellement leur capacité à se déplacer mais qui nécessitent plusieurs fois par jour des aides pour leur autonomie corporelle. La majorité d'entre elles n'assume pas seule l'hygiène de l'élimination anale et urinaire.

Le GIR 4 comprend essentiellement deux groupes de personnes. D'une part, celles qui n'assument pas seules leurs transferts mais qui, une fois levées, peuvent se déplacer à l'intérieur du logement. Elles doivent parfois être aidées pour la toilette et l'habillage. La grande majorité d'entre elles s'alimente seules. D'autre part, s'y ajoutent celles qui n'ont pas de problème pour se déplacer mais qu'il faut aider pour les activités corporelles et les repas.

Le GIR 5 correspond aux personnes qui assurent seules leurs déplacements à l'intérieur de leur logement, s'alimentent et s'habillent seules. Elles nécessitent une aide ponctuelle pour la toilette, la préparation des repas et le ménage.

Le GIR 6 regroupe toutes les personnes qui n'ont pas perdu leur autonomie pour les actes discriminants de la vie courante [14].

L'usage d'une aide technique est deux fois plus fréquent que l'aménagement de logement : 20 % des personnes âgées utilisent au moins une aide technique et 10 % ont fait au moins un aménagement dans leur domicile (Tableau I.3). Cet écart peut s'expliquer par le fait que les aides techniques sont pour la plupart moins onéreuses que les aménagements du logement. Obtenir une canne ou un déambulateur est plus facile que de faire élargir son couloir ou d'adapter sa salle de bain. Le manque d'informations sur les avantages des aménagements du logement peut également expliquer la relativement faible fréquence de ces adaptations [13].

		Effectifs (en milliers)	Natures des aides mobilisés		
			Au moins une aide technique (%)	Au moins un aménagement du logement (%)	Au moins une aide technique ou un aménagement du logement (%)
<b>GIR</b>	1 et 2	188	82	56	86
	3 et 4	686	73	45	81
	5 et 6	12 312	16	7	21
<b>Age</b>	Moins de 80 ans	10 488	13	7	17
	80 ans et plus	2 698	47	21	53
<b>Sexe</b>	femmes	7 441	22	11	27
	hommes	5 745	18	8	21
<b>ensemble</b>		13 186	20	10	25

Tableau I.3. Recours aux aides techniques et aménagements du logement selon le GIR, l'âge et le sexe (enquête Handicap-Santé 2008).

L'aggravation des situations de perte d'autonomie se perçoit dans la multiplicité des usages d'aides. Six personnes âgées sur cent utilisent une aide technique et vivent dans un logement qui a été aménagé. Les personnes en GIR 1 ou 2 cumulent plus d'aides que les personnes moins dépendantes, et cela indépendamment de l'âge, contrairement aux moins dépendants. Plus de la moitié des personnes estimées en GIR 1 ou 2 utilisent au moins une aide technique tout en ayant aménagé leur logement (tableau I.3). Dans plus de la moitié des cas, ces aides sont multiples et 31 % des personnes en GIR 1 ou 2 qui ont un aménagement du logement ont fait au moins deux adaptations dans leur domicile. L'usage cumulé des deux aides est nettement moins fréquent pour les personnes âgées les moins dépendantes. Il concerne 37 % des GIR 3-4 et 3 % des GIR 5-6. Avec l'avancée en âge, l'utilisation d'aides de natures différentes augmente. Parmi les personnes de moins de 80 ans en GIR 5-6, 2 % cumulent des aides techniques et des aménagements du logement, cette proportion atteint 9 % pour les personnes âgées de 80 ans ou plus [13].

Selon les dernières statistiques estimées de l'enquête HSM réalisé en 2008 par la DRESS et l'INSEE, parmi 13.2 millions de personnes âgées de plus de 60 ans vivant en logement ordinaire en 2008, 25% ont fait réaliser un aménagement de leur logement. Cette proposition est relativement stable depuis 1999 (22%, estimé à partir de l'enquête Handicap-Incapacité-Dépendance, [12]). Les aménagements faits dans le logement peuvent servir à améliorer l'accessibilité des pièces (élargissement de portes ou couloirs), adapter des pièces (salle de bain, cuisine) ou des meubles (lits, sièges). Certains de ces aménagements peuvent être réalisés avant que la personne ne rencontre réellement des problèmes d'autonomie, anticipant ainsi d'éventuelles difficultés à venir [13].

Les aménagements du logement ont été classés en cinq catégories [14]:

- Accessibilité :
  - Portes spécialement élargies.
  - Couloirs spécialement élargis.
  - Regroupements de pièces.
- Pièce adaptée :
  - Toilettes adaptées.
  - Salle de bain adaptée.
  - Cuisine adaptée.
- Meuble adapté :
  - Table(s) adaptée(s).
  - Lit électrique ou médicalisé.
  - Siège(s) adapté(s).
- Dispositif de soutien
- Autres :
  - Dispositifs lumineux.
  - Equipements de domotique.

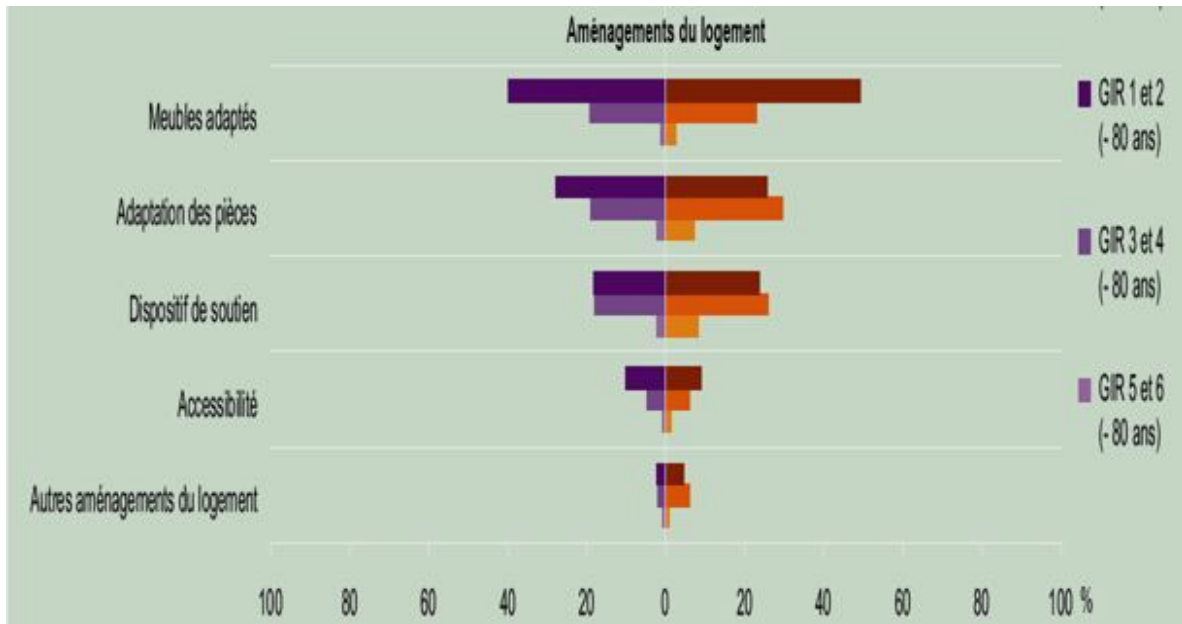


Figure I.12. Proportion des personnes ayant fait aménager leur logement, selon l'âge, le GIR et la nature de l'aide (Enquête Handicap-santé 2008, voie ménage, INSEE).

Les personnes estimées en GIR 1 ou en GIR 2 utilisent très majoritairement certains types de l'aménagement indépendamment de leur âge. Par exemple, le meuble adapté concerne 40% des personnes très dépendantes de moins de 80 ans et 49% de celles de 80 ans ou plus. L'utilisation des aides par le reste de la population, estimée en GIR de 3 à 6, est plus hétérogène. Au sein d'un même GIR, les personnes âgées voient leur état se dégrader avec le vieillissement ; l'apparition de nouvelles limitations ou leur aggravation nécessite un recours accru aux aménagements de logement [13].

## I.4.2. Les solutions proposées pour des personnes à mobilité réduite

### I.4.2.1 Logements équipés (domotique, habitats intelligents)

#### I.4.2.1.1. La domotique

De plus en plus de personnes lourdement handicapées manifestent la volonté de mener une vie qui soit "la plus normale possible" et désirent habiter dans leur "chez-soi" plutôt que de vivre chez leurs parents ou dans des institutions spécialisées. Il va de soi que la vie en autonomie d'une personne handicapée nécessite des aides et des aménagements divers qui déterminent aussi les limites de cette autonomie. Une partie de ces limites concerne l'habitat lui-même. Pour vivre seule, une personne handicapée a besoin d'un habitat qui soit sécurisé et dans lequel elle puisse avoir facilement accès aux objets et aux pièces.

La domotique est l'ensemble des technologies issues de l'électronique, de l'informatique et des télécommunications utilisées dans les habitations. Les technologies développées par la domotique touchent principalement aux domaines de la sécurité, du confort, de la gestion d'énergie et de la communication. Elles ont pour objet d'offrir un contrôle maximal de l'environnement domestique en permettant aux personnes dépendantes de piloter à distance les équipements électriques de l'habitat

(éclairage, chauffage, volets et stores, électroménager, portes et lits automatisés...etc.) selon leurs besoins du moment ou en suivant des scénarios personnalisés. La domotique touche ainsi à tous les domaines de l'habitat (volets, panneaux solaires...etc.) et s'imisce de plus en plus dans les appareils ménagers : les chaudières, les systèmes d'alarme, les climatiseurs, les lampes, les machines à laver, les réfrigérateurs, les digicodes, les caméras...etc. Si elles sont développées au départ pour le « tout public », on devine tout de suite les perspectives pour l'accessibilité ou la sécurité des habitats des personnes handicapées. Surtout, elles permettent d'envisager à long terme la possibilité pour de plus en plus des personnes subissant des handicaps importants de vivre en milieu ordinaire ou, en tout cas, de bénéficier d'une autonomie considérablement augmentée [15].

### ✓ **Avantages/services de la domotique pour les personnes à mobilité réduite**

Les personnes handicapées à mobilité réduite et âgée peuvent avoir du mal à se déplacer. Dans ce cas, la domotique peut être un précieux partenaire pour activer ou désactiver de nombreuses commandes à distance : allumer/éteindre la lumière ou actionner des appareils électriques. L'accessibilité élémentaire du logement à une personne à mobilité réduite passe par 4 paramètres essentiels :

- **L'accès facile partout:** il faut des portes aux dimensions normées et, idéalement, à ouverture automatique : des capteurs de présence, une télécommande et des gâchettes électroniques déclencheront l'ouverture (et la fermeture) de la porte à chaque passage.
- **La circulation intérieure au logement :** une amélioration évidente est l'éclairage domotique. Des interrupteurs/émetteurs radiofréquences (RF) + des capteurs de mouvement infrarouges (placés à la hauteur adéquate) + quelques récepteurs RF sur les lampes et plafonniers facilitent déjà beaucoup la vie quotidienne ...etc.
- **L'usage facile des équipements quotidiens** (WC, douche, lavabo, cuisine, volets, chauffage...etc.). Des capteurs infrarouges pour l'ouverture des robinets. Une centrale domotique pour piloter l'essentiel de la maison d'un simple index sur une télécommande domotique (qui centralise les ordres), ou en tapotant sur un smartphone ou une tablette, les portes de placard s'ouvrent, les volets roulants remontent (ou descendent), les stores coulissent, le chauffage se régule à la température optimale ... etc.
- **La sécurité et la liberté totale** même si vous vivez seul(e). Quelqu'un sonne au portail à l'autre bout du jardin et vous êtes dans votre lit. D'un simple geste sur votre tablette domotique tactile, vous voyez qui sonne et décidez – ou pas – d'ouvrir le portail (qui se refermera ensuite automatiquement).
- **Le parcours lumineux :** pour faire face à ce désagrément, le parcours lumineux est un système permettant de déclencher automatiquement la lumière au cours d'un trajet nocturne. L'éclairage non agressif se met en action dès que la personne descend du lit et s'éteint de façon automatique lorsqu'elle retourne se coucher.



(a) Chaque équipement est activé à l'unité, commande centralisée, pièce par pièce,



(b) Robot au service du handicap



(c) Détecteur trace un chemin commande centralisée, lumineux pour mieux



(d) Nouvelle prise à manipulation



(e) Fauteuil monte-escalier facile



(e) Leds du variateur témoignent du niveau d'intensité



(g) Le clavier coordonné aux interrupteurs commande l'alarme en local ou à distance.



(h) L'interrupteur à effleurement se commande par le simple rapprochement d'une partie du corps, coude, dos, épaule ... etc.

Figure II.13. Les différents services de la domotique.

#### I.4.2.1.2. Habitat intelligent pour la santé (HIS)

L'Habitat Intelligent pour la Santé (HIS), est une spécialisation de la notion d'habitat intelligent (Smart Home), qui intègre des capteurs et des actionneurs pour assurer un suivi médical à distance des

occupants et les seconder dans l'accomplissement des tâches journalières. Son concept fait référence au confort et à la sécurité désormais réalisables grâce aux toutes dernières avancées technologiques, vise notamment, à redonner une vie autonome, dans leur domicile, à des personnes âgées légèrement dépendantes ou à des personnes souffrant de diverses pathologies et handicaps qui devraient normalement les contraindre à une hospitalisation. Il permet également d'assurer le maintien à domicile des personnes âgées autonomes.

Dans la littérature, on trouve de nombreuses études dans le domaine de l'habitat intelligent pour la santé entre eux, les projets de Noury et al. [16], qui présentent les principales démarches menées dans les domaines technologiques impliqués (systèmes d'informations, équipements domotiques, capteurs, assistance robotisée). Stefanov et al. [17] identifient cinq groupes pour les dispositifs qui peuvent équiper un habitat intelligent (dispositifs pour automatiser et commander l'environnement, pour assister les activités de l'occupant, pour surveiller la santé de l'occupant, pour l'échange d'informations, pour les loisirs). En 2006, Scanail et al. [18] s'intéressent à l'état de santé de personnes âgées vivant à leur domicile. Ils estiment que la mobilité est un bon indicateur de l'état de santé, et présentent les technologies existantes pour la télésurveillance de la mobilité (et d'autres paramètres vitaux) de personnes âgées. D'autres projets de recherche Nugent et al. [19] présentent les solutions existant pour automatiser l'habitat afin d'assister le quotidien des personnes âgées indépendant.



Figure I.14. Hospitalisation à domicile.

Une grande variété de capteurs est utilisée dans l'HIS afin de collecter des informations sur l'état de l'occupant et sur son environnement. Les capteurs peuvent être classés suivant le type

d'informations collectées. Ces informations servent à contrôler les performances des actionneurs installés par la domotique. En général, les actionneurs installés dans l'HIS comportent :

- Des technologies existantes dans le domaine domotique pour faciliter l'accomplissement de certaines tâches par l'occupant (Figure I.13).
- Des robots d'assistance peuvent venir en aide à l'occupant pour effectuer certaines tâches journalières (Figure I.13(B)).
- Des outils d'assistance comme le téléphone aide-mémoire, destiné aux personnes souffrant d'Alzheimer, qui affiche automatiquement la photo de l'appelant et rappelle à la personne âgée l'historique de ses communications, ou comme la boîte à pharmacie qui vérifie la prise de médicaments et si le patient se trompe de médicaments, une sonnerie l'avertit de son erreur... (Figure I.13).
- Des robots aidants qui peuvent aider l'occupant à accomplir des tâches plus élaborées comme : préparer un repas ou faire le ménage, faire sa toilette...etc. Ces robots peuvent être téléguidés ou bien pilotés par la voix ou le geste (Figure I.15).



Figure I.15. Robot aidant.

### ✓ **Système d'information et de communication**

Le système d'informations et de communication de l'HIS permet la mise en réseau de différents HIS avec le service de soins, le personnel soignant et les proches. Son architecture globale (développée à partir de l'architecture présentée par Duchêne [20]) est présentée par la Figure I.16). Chaque **habitat intelligent pour la santé** comporte de captures pour assurer une télésurveillance en temps réel de l'occupant, stocke de données de captures, commande des actionneurs qui suivent les instructions du serveur et les données collectées des capteurs pour adapter l'environnement à l'état de l'occupant. De l'autre côté il y a le **serveur d'information** constitué d'un serveur de communication sur Internet, d'une base de données et d'un module de décision. Le module de décision s'occupe des tâches, il y a aussi des **acteurs du système** et des **observateurs du système**, proches de l'occupant, médecin traitant, référent APA.



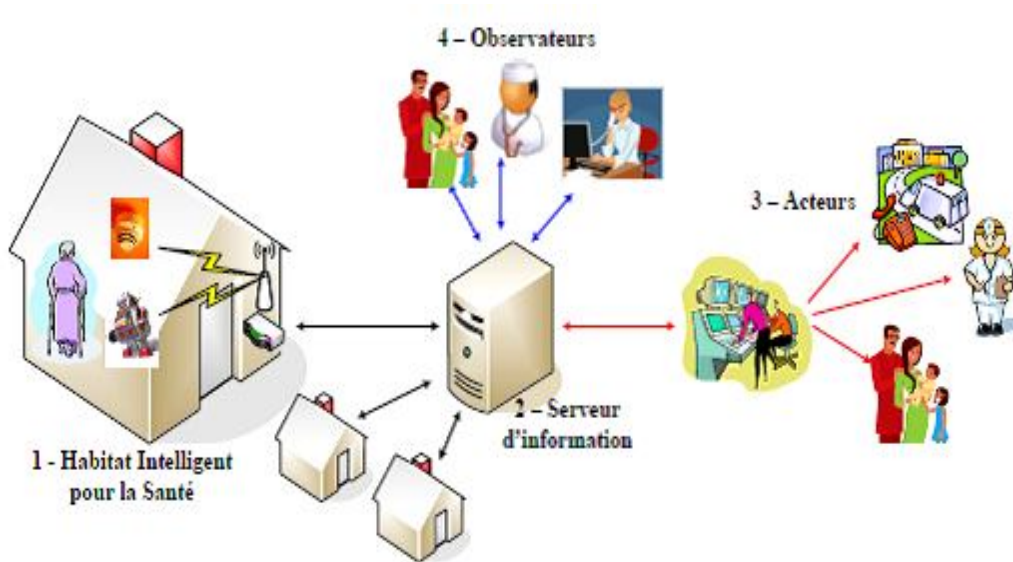


Figure I.16. Architecture du système d'information et de communication.

✓ **Le Projet HM2PH**

Dans le même contexte que l'HIS il se construit le projet HM2PH (Habitat Modulaire et Mobile pour Personnes Handicapées) par une équipe de spécialistes [21]. L'objectif de ce projet, est de spécifier les fonctionnalités d'un espace de vie mobile, ouvert sur l'extérieur et adapté pour une personne handicapée à mobilité réduite et son entourage, avec pour préoccupation majeure un accès à une autonomie accrue par l'utilisation de dispositifs appropriés (aides techniques, domotique ...). De plus, il doit pouvoir s'insérer aussi bien dans une structure d'accueil fortement médicalisée que dans un milieu familial.

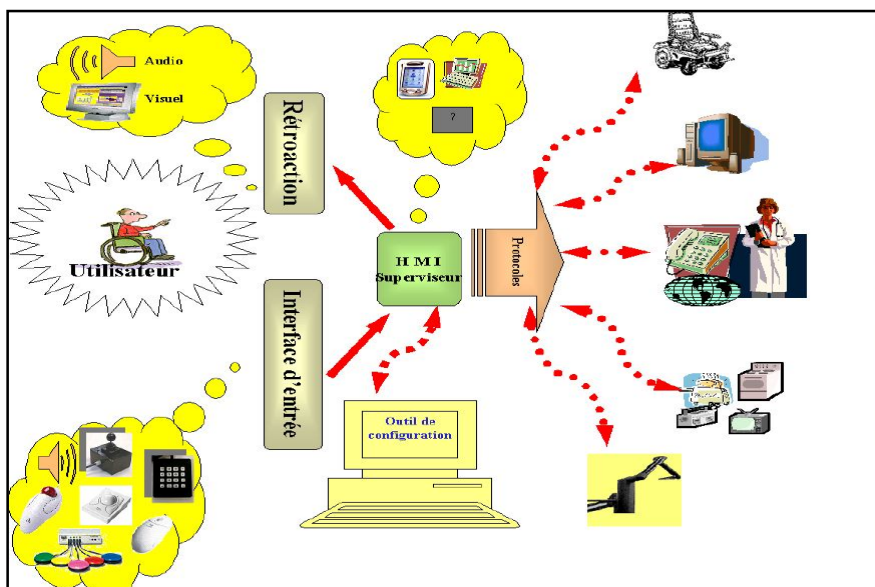


Figure I.17. Plateforme de développement du Projet HM2PH (Habitat Modulaire Et Mobile pour Personnes lourdement Handicapée).

Il s'agit d'essayer de redonner l'autonomie aux personnes handicapées après un processus d'adaptation et ce quel que soit le degré de handicap de la personne concernée en d'adapter au mieux le logement pour pouvoir pallier aux déficiences physiques, cognitives ou sensorielles de ces personnes. La mobilité de l'habitation est le résultat d'une réflexion des échanges extérieurs et intérieurs. Afin de réaliser un tel habitat, il a été nécessaire de faire appel à différents professionnels (architectes, médecins, ergothérapeutes ...etc.).

Les travaux de projet HM2PH s'appuient sur des logiciels informatiques. Composé de trois modules [22]:

- Analyser les déficiences et capacités du futur résident et de proposer une liste de matériel spécifique à mettre en œuvre (aides techniques, équipements domotiques ...etc.) pour compenser ses éventuels handicaps.
- Générer une série de plans créés automatiquement en suivant les règles architecturales (classiques et liées au domaine du handicap) et les désirs du futur résident
- Le troisième module permet de visiter en temps réel une modélisation en 3D des plans générés précédemment, afin de tester et valider les équipements proposés et installés.

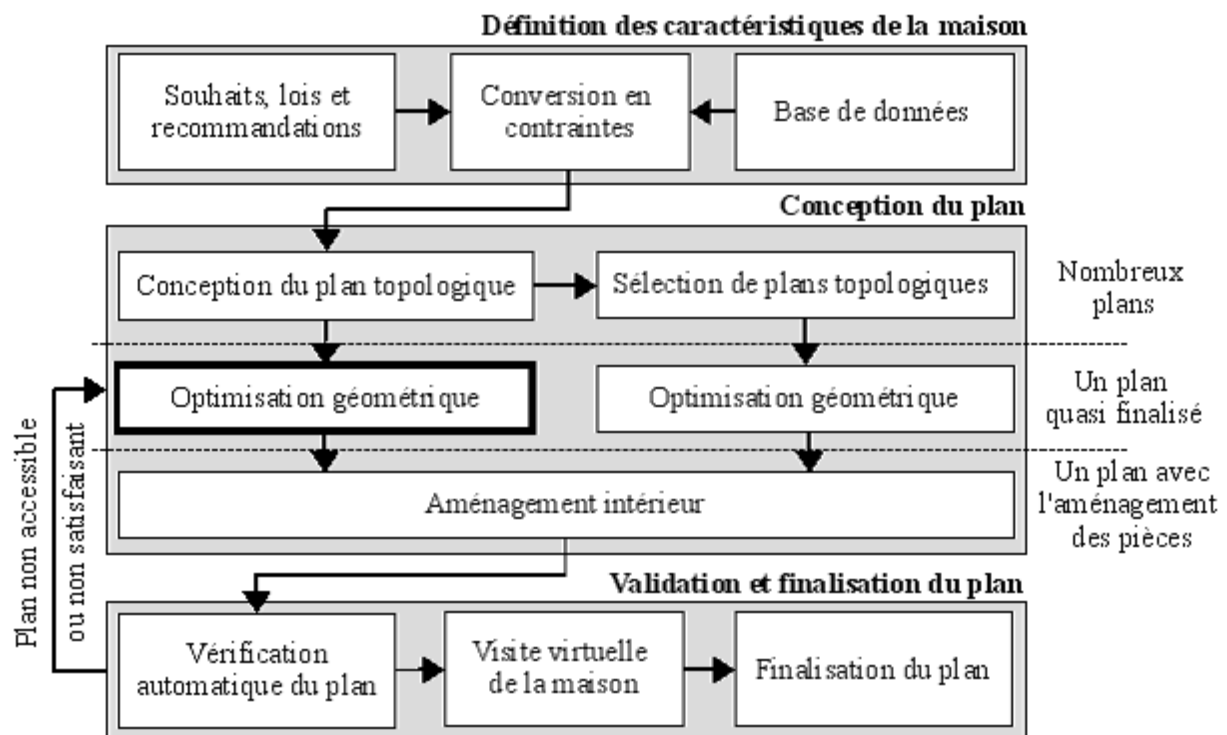


Figure I.18. Les Etapes principales de la conception de HM2PH [21].

#### I.4. Conclusion

La notion de handicap avait eu différentes d'interprétations/définitions au cours de la littérature. Les classifications appliquées aux personnes handicapées deviennent plus distincte avec l'évolution de la technologie. Dans ce chapitre nous avons fourni un résumé des différentes interprétations de la

notion de handicap utilisées, l'évolution de la classification/catégorisation des personnes handicapées, les différentes enquêtes qui ont été faites sur les personnes handicapées, les améliorations qui ont été apportées par les nouvelles technologies au niveau des aides techniques et les résultats de recherches de plusieurs travaux visant l'amélioration de la vie quotidienne des personnes handicapées de façon générale.

## Chapitre II: Revue de la littérature

---

### **II. 1. Introduction**

Dans l'évaluation de l'accessibilité et de l'aménagement des environnements pour des personnes handicapées, les méthodes utilisées jouent un rôle clé dans la définition des prescriptives qui doivent être utilisées par les ingénieurs de la réhabilitation. L'accessibilité désigne tout simplement des objets, des meubles, de l'information et des technologies que les personnes handicapées peuvent utiliser. Tant dis que les aménagements désignent l'adaptation des outils, des procédés et des systèmes en vue de les personnaliser et d'aider les personnes handicapées à surmonter les obstacles qu'elles rencontrent. Généralement, plus l'environnement est accessible, plus il est facile à maîtriser et moins coûteux de tenir compte des besoins des utilisateurs handicapés lors de la phase d'aménagement. Pour cela, les techniques d'évaluation d'accessibilité doivent être fiable et tenir compte des spécifications liées à la nature du handicap de la personne. D'ailleurs, le fait de tenir compte des besoins des utilisateurs handicapés tout au début de la conception et de l'élaboration des habitats accroît l'efficacité de l'accessibilité et en réduit le coût. En revanche, le fait pour les concepteurs de ne pas tenir dûment compte de l'incidence de leurs environnements bâtis sur les personnes handicapées rend les

aménagements pour tenir compte des besoins de ces personnes moins efficaces et plus onéreux. De plus, le fait de prendre en considération l'accessibilité vers la fin de la conception et de l'élaboration des procédés rend ces derniers moins accessibles dans certains cas et peut créer des nouveaux obstacles si les méthodes d'aménagement ne sont pas fiables. Dans ce chapitre nous allons présenter les différentes méthodes que ce soient manuelles ou numériques, leurs avantages et leurs inconvénients sur l'accessibilité pour des personnes handicapées.

## **II. 2. Approches législatives et réglementaires et outils technologiques pour l'évaluation de l'accessibilité**

### **II. 2.1. Approche réglementaire de l'accessibilité**

Il n'existe pas, à l'heure actuelle, de consensus officiel sur la méthodologie à utiliser dans l'évaluation de l'accessibilité d'un logement. Dans la plupart des pays industrialisés, des normes ou des préconisations sont disponibles permettant aux professionnels du bâtiment d'être guidées dans la conception de constructions neuves. Il n'est en général pas prévu de recommandations, sauf celles dictées par le bon sens, pour l'aménagement de l'intérieur des logements. Nous allons essayer de citer les différentes lois utilisées en matière d'accessibilité adoptées par certains pays à travers le monde. On commence par la France [23], une loi comporte des règles pour les constructions neuves que ce soit des logements collectifs ou individuels. Il prévoit que toutes personnes handicapées ont le droit d'une maison adaptée, que ce soit un handicap physique, sensoriel, mentale ...etc. Ces règles sont définies selon la définition du handicap dans sa diversité par toutes limitations d'activités et restriction de participation à la vie en société une année plus tard, un arrêté publié le 1<sup>er</sup> aout 2006, décrit les règles à respecter lors la construction des nouveaux bâtiments d'habitation collectifs, individuels destinés aux personnes handicapées. Ces dispositions sont générales permettant un accès global essentiellement dans le cadre de la mobilité.

Aux États-Unis, le congrès américain a élargi la notion de discrimination aux pratiques basées sur le handicap, dans le Fair Housing Act, des exigences de design et de construction pour les maisons multifamiliales construites après mars 1991 sont établies [24].

Deux de ces actes sont également insérés dans le Fair Housing Act :

- Le principe de l'aménagement raisonnable.
- Le principe des modifications raisonnable.

La loi assure qu'un non-respect de design et de construction sera considéré comme une discrimination illégale. Afin de s'assurer que les personnes à mobilité réduite (PMR) pourront utiliser et profiter de leur résidence, un document portant sur sept grands axes a été défini (entrée des bâtiments, espace commun, portes, ...etc.).

En parallèle, on trouve le code America with Disabilities Act (ADA) [25], qui décrit tous les règles permettant aux opérateurs à construire des bâtiments accessibles par personnes handicapée ainsi de

faire rénovation et réadaptation des logements existants pour répondre aux besoins de ces occupants. Ces mêmes exigences légales existent en Afrique du Sud [26] et en Australie [27].

Les figures II.1, et II.2 décrivent les dimensions nécessaires à respecter qui permettent à la personne au fauteuil roulant de franchir un passage, et de faire tourner son fauteuil pour passer d'un passage à l'autre, respectivement.

Au Royaume-Uni [28], et aussi en Hollande [29] les lois et les réglementations concernant la construction des logements obligent les responsables des projets à réaliser des habitations accessibles, adaptées aux différents besoins des personnes handicapées. Les normes décrites par la loi néerlandaise (NEN 1814) [29] contient plusieurs exigences plus pointues qui sont applicables aux espaces extérieurs ainsi qu'aux bâtiments et aux maisons. L'idée de base de cette loi est de rendre les éléments de service et d'aménagements atteignables et utilisables par tout le monde et pas seulement par les personnes en chaise roulante.

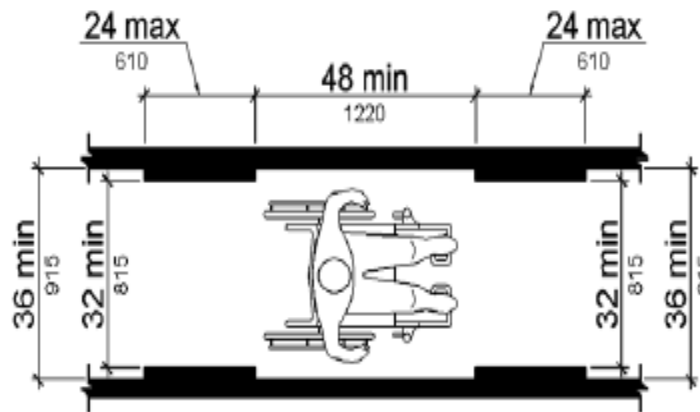


Figure II.1. Exemple des dimensions minimales (min) et maximales de l'espace de manœuvre pour un passage accessible selon ADA (America with Disabilities Act).

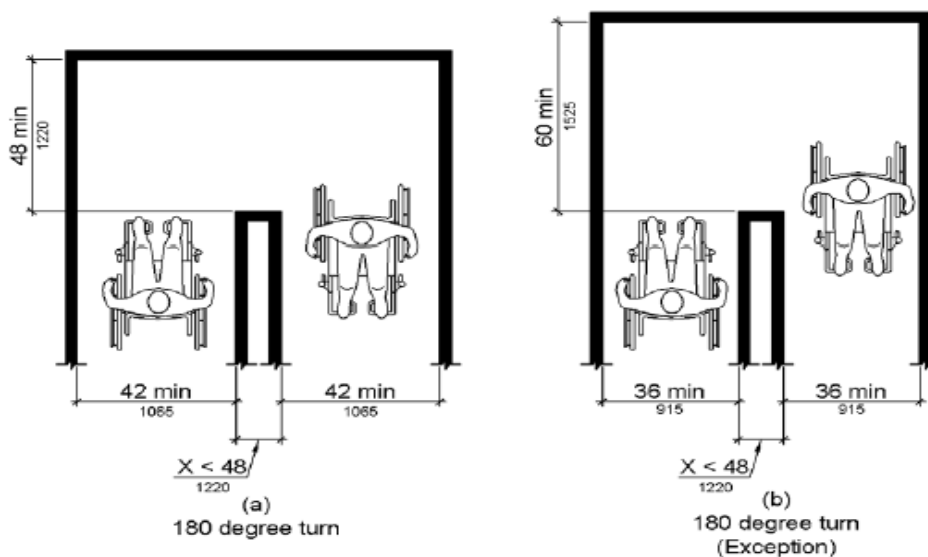


Figure II.2. Exemple des dimensions minimales (min) de l'espace de manœuvre au tournant pour une personne en fauteuil roulant selon ADA (America with Disabilities Act).

En Belgique et suivant à la loi [30] qui avait été connu d'autres modifications ces dernières années, seuls les bâtiments ouverts aux publics doivent respecter certains critères (le type d'accès aux bâtiments, les dimensions des portes, portails ... etc.). Mais elle n'impose pas de normes claires pour l'accessibilité des bâtiments privés. Le souhait d'améliorer l'offre en matière de logements adaptables et modulables existe bien, on peut citer la circulaire relative à la création et la construction de logement adaptables et adaptés (2009-2010) pour les personnes à mobilité réduite. Une brochure a été publiée dans ce sens intitulée « guide d'aide à la conception du logement public adaptable ».

Au niveau européen [31], le Conseil de l'Europe incite les pays membres à encourager l'accessibilité des logements, lieux de travail et bâtiments publics en proposant une réflexion sur l'évolution dans la manière de penser les constructions (approche individuelle, approche catégorielle, approche intégrée).

L'application des approches législatives augmente certainement le taux de l'autonomie et l'accès facile aux habitations individuels et les services publics pour les personnes handicapées, mais il y a certaines limitations concrètes concernant l'aménagement intérieur des habitats pour des personnes à mobilité réduite (PMR). La conception des logements selon les approches législatives n'implique pas nécessairement une réelle facilité d'utilisation et un design qui satisfait les exigences au terme d'accessibilité des personnes en mobilité réduite. Le service passe-partout du groupe d'action pour une meilleure accessibilité aux personnes handicapées (GAMAH) [32], activant en région de Wallonie en Belgique, développe depuis plus de vingt ans toute une série d'actions visant à améliorer l'accessibilité des espaces publics, des transports et des bâtiments de manière à permettre aux personnes à mobilité réduite d'acquérir le maximum d'autonomie. L'aménagement selon GAMAH, vise à améliorer l'accessibilité et elle touche certaines catégories telles que :

- **L'aménagement non matériel** : il s'agit d'un langage simplifié pour les personnes ayant une déficience intellectuelle, accompagnement d'une personne aveugle ... etc.
- **L'aménagement collectif** : il s'agit de l'adaptation d'infrastructures sportives et culturelles, placement d'ascenseur dans les gares de trains et de métro ...etc.
- **L'aménagement individuel** : adaptation d'un poste de travail pour un travailleur présentant un handicap spécifique comme un téléphone adapté, écran adapté ... etc.

Le fait de prévoir des aménagements collectifs ne dispense pas de l'obligation de prévoir des aménagements individuels lorsque ceux-ci s'avèrent nécessaires afin de garantir la participation de la personne en situation de handicap [32]. L'indice passe partout (IPP) pour mesurer l'accessibilité proposé par le GAMAH, donne une information complète sur le niveau d'accessibilité des bâtiments pour les personnes handicapées. Les mesures de l'aménagement se sont faites en basant sur la description d'un handicap qui fait référence à la classification internationale de fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF), entérinée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) le 22 mai 2001 lors de la cinquante-quatrième assemblée mondiale de la santé.



Figure II.3. Exemple d'indice passe-partout.

L'indice passe-partout est le fruit d'une analyse détaillée de l'accessibilité de bâtiments en tenant compte des différents handicaps et ce en privilégiant l'autonomie de chacun. À l'heure actuelle il existe un seul logo pour évaluer l'accessibilité d'un bâtiment. Soit ce logo est affiché, soit il ne l'est pas, soit il est affiché à mauvais escient. De plus, ce logo n'est absolument pas nuancé, il ne résume pas la totalité des critères à prendre compte pour les différents types de handicaps.

L'objectif de l'indice passe-partout est de nuancer l'information et donner une appréciation la plus précise possible en fonction de 6 catégories de PMR. Autrement dit, passer d'un logo unique à logo précis.

### II.2.2. Approche technologiques d'évaluation de l'accessibilité

Les outils technologiques basés sur les logiciels informatiques sophistiqués sont des outils plus performants, permettant d'améliorer et soutenir les approches traditionnelles d'évaluation de l'accessibilité. Il existe plusieurs logiciels servant à donner de nouvelles spécifications d'un espace de vie adapté, favorisant l'autonomie domestique pour les personnes handicapées. Entre autres, celui développé dans le cadre du projet HM2PH [22][21], qui permet de réadapter un habitat avec des nouvelles spécifications, équipé de technologies de communication qui permet au résident de rester en contact avec son entourage, selon les besoins de la personne handicapée elle-même.

Parmi les méthodes utilisées dans ce sens sont les méthodes d'acquisition et la modélisation d'environnement et objets en 3D qui peuvent aider à l'évaluation. L'opération commence par la sélection de l'environnement à modéliser, ensuite, des photos sont prises avec une caméra catadioptrique approximativement équiangulaire. La géométrie de la séquence (incluant quelques paramètres intrinsèques) est estimée avec un modèle de caméra centrale. Finalement, plusieurs modèles 3Ds locaux (sur trois vues) sont reconstruits tout le long de la séquence, et le modèle 3D global est obtenu en appliquant une sélection sur les modèles 3Ds locaux : chaque modèle 3D local est partitionné en petits morceaux, et un morceau est rejeté si un autre modèle local est disponible pour reconstruire le morceau avec moins d'incertitude [33].

Un autre exemple de modélisation en 3D [34] est basé sur le système de la télé-habilitation par la réalité virtuelle (VRTS). Ce système est utilisé pour l'évaluation de l'accessibilité, il permet d'évaluer l'accessibilité d'une personne à mobilité réduite. L'idée de faire construire l'environnement virtuel en 3D par le logiciel Photomodeler Pro à partir des plans 2D. Ensuite, lancer le test de



l'accessibilité dans ce modèle 3D virtuel pour acquérir l'information nécessaire sur l'accessibilité de l'environnement par rapport à son utilisateur (personne en chaise roulant).

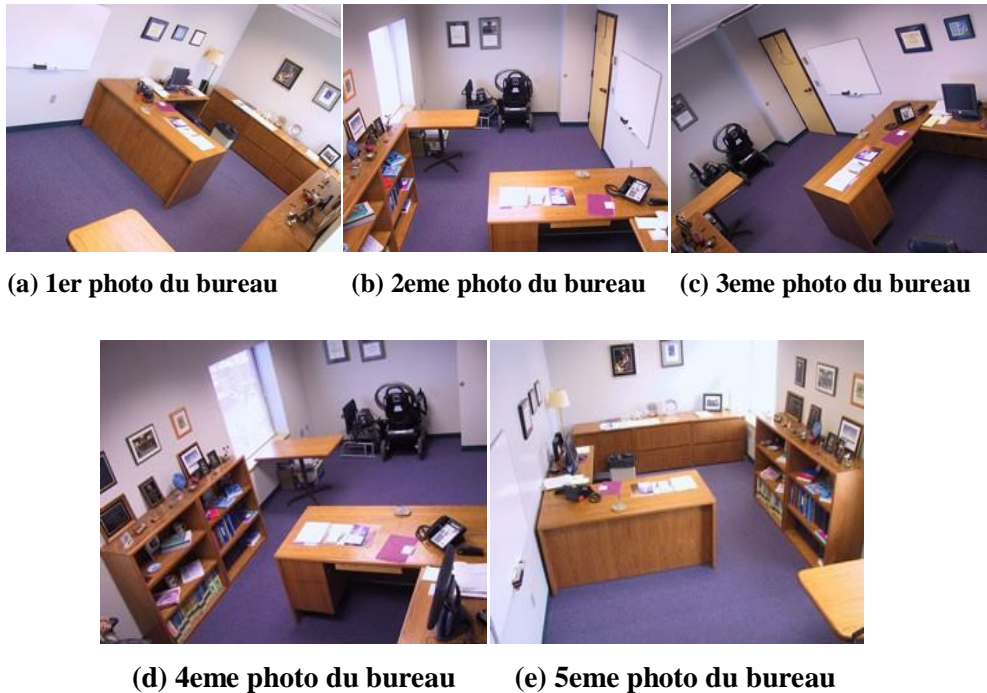


Figure II.4. Cinq exemples des photos prises d'un bureau à partir de différentes positions.

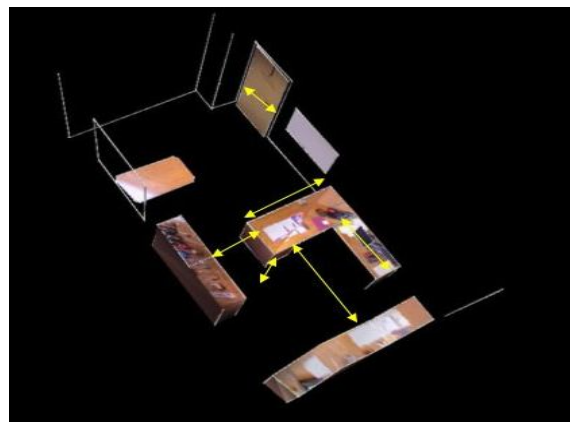


Figure II.5. Le modèle 3D d'un bureau photographies produit à partir des cinq images 2D par le logiciel Photo Modeler.

Les techniques de scan laser aussi sont considérées parmi les méthodes les plus utilisées pour la modélisation 3D des environnements [35]. Cette technique de relevé 3D, évolue à une vitesse remarquable en ce qui concerne l'acquisition de donnée. Pour ce faire, il convient de suivre le protocole suivant [36] :

- Saisir des données : il s'agit du processus d'acquisition des points à partir du scanner laser 3D.
- Recalage des nuages : cette étape consiste à recalibrer les nuages de points entre eux, soit en les géoréférençant, soit en fixant un premier nuage comme référence avant de recalibrer les autres sur le « scan » connu.

- La segmentation : ici, le but est d'isoler des portions du nuage de points, pour un meilleur traitement par la suite. De cette manière on pourra séparer la tuyauterie des escaliers.
- La modélisation : cette étape consiste à appliquer un modèle CAO au nuage de points, pour construire le modèle en 3D, une fois le modèle 3D de l'environnement construit, il peut être utilisé pour évaluer l'accessibilité.

La modélisation et la simulation de comportement des personnages dans un environnement virtuel 3D a connu beaucoup de progression ces dernières années, mais il reste toujours difficile à simuler. Les systèmes de réalité virtuelle immersive telle que la navigation au sein de l'environnement et l'alternance de sa conception, sont des modèles interactifs de vie qui facilite la planification, la conception et l'évaluation de la maison et les milieux de travail pour les personnes ayant une déficience physique.

En général, l'objectif de ces systèmes est de relever l'ensemble des non-conformités de l'environnement, non-conformité est un élément ne respectant pas les textes réglementaires. Une non-conformité est toujours liée à un type de déficience (motrice, visuelle, auditive, ...etc.). Elle possède un impact différent sur la mobilité des personnes. En fonction des profils de personnes concernées et de l'impact des non-conformités, des préconisations (c'est-à-dire des modifications à apporter) sont élaborées. L'idée est de se déplacer dans l'environnement afin de valider les chemins qui lient des fonctions (accueil, entrée, ...etc.) entre elles. Lors du déplacement, on analyse les éléments rencontrés (porte, couloir, pente, ...etc.). Pour chaque élément, on marque la ou les non-conformités rencontrées par des mesures et/ou des photos. L'avantage de l'outil logiciel permet donc aux architectes et décideurs urbains d'utiliser les avantages de la visualisation et de la simulation 3D afin de diagnostiquer des environnements à partir de plan 2D et/ou 3D [37].

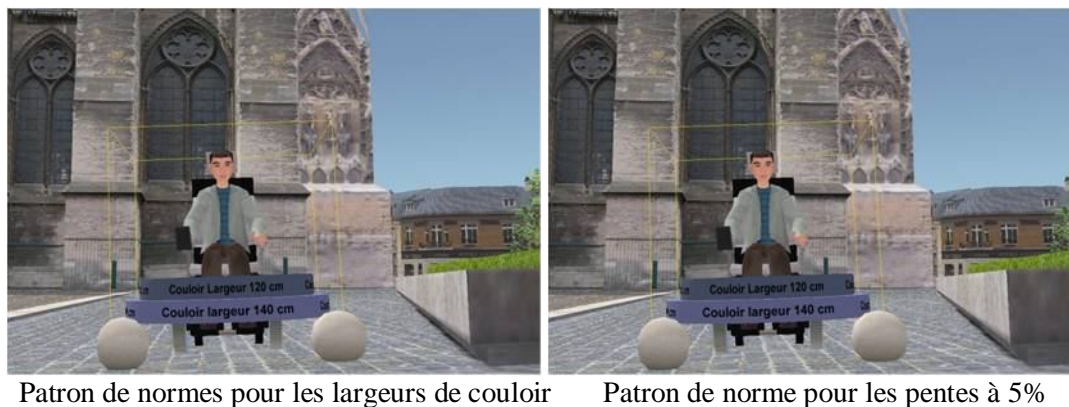


Figure II.6. Navigation virtuelle d'une personne en fauteuil roulant dans un environnement afin d'illustrer certaines normes d'accessibilité de manière graphique et visuelle [37].

Afin de pouvoir tester les environnements simulés, il existe trois types de navigations différentes:

- **La navigation libre** : correspond à la navigation métier utilisée par un architecte. Elle se fait à l'aide des mouvements de la caméra. L'utilisateur pilote la caméra comme dans les

applications 3Ds classiques (souris + clavier). La caméra n'est soumise à aucune contrainte spécifique.

- **La navigation simplifiée** : fait appel à un modèle de fauteuil roulant simplifié. Le modèle intègre les mouvements d'un fauteuil roulant classique en translation et rotation. Ce type de navigation est soumis aux contraintes de suivie de sol et évitement des obstacles.
- **La navigation physique** : répond au besoin de rendu réaliste de la dynamique de déplacement d'un fauteuil roulant.

La notion d'autonomie est liée généralement aux capacités de la personne à mobilité réduite à maîtriser son environnement, mais dans le cas d'une personne qui utilise un fauteuil roulant électrique (FRE) elle devient être aussi impérativement liée aux capacités de la personne à bien contrôler son fauteuil roulant. Le FRE généralement, est difficile à maîtriser au début d'utilisation, surtout par les enfants ou les personnes âgées, en plus il peut poser des problèmes de sécurité. Pour ces raisons, un certain nombre des études se sont lancés au début des années 90 pour la conception d'un simulateur de pilotage de FRE qui permet d'évaluer expérimentalement les diverses situations de conduite qui permet de réaliser un premier apprentissage pour acquérir les bonnes méthodes (placement sur la voie de circulation, prise en compte de l'inertie du fauteuil ...etc.) avant de laisser l'utilisateur en autonomie [38][39]. La recherche dans ce domaine est une autre façon pour aider les personnes à maîtriser leurs lieux de vie, mais elle se limite seulement à la conception/maîtrise du fauteuil roulant électrique.



Figure II.7. Exemple d'un simulateur pour suivre une trajectoire en simulation [40].

L'évaluation de l'accessibilité d'une personne en fauteuil roulant manuel, l'objet de notre thèse, a été abordé dans la littérature par beaucoup de chercheurs. L'objectif est l'amélioration des capacités d'action d'un utilisateur dans un milieu domestique [41]. La plupart de ces études proposées dans ce domaine se sont intéressées à déterminer les zones de circulation accessibles du fauteuil roulant dans un espace d'habitat domestique, en recherchant les trajectoires réalisables qui peuvent relier les différentes pièces de l'habitat et de les classifier par rapport aux paramètres d'évaluation. Les techniques de planification de trajectoires qui sont destinées spécifiquement au domaine de la

robotique mobile, sont la solution efficace aux problèmes de navigation des véhicules en réalité virtuelle [42][43][44][45][46].

Latombe [47], a utilisé les performances des techniques de planification des trajectoires pour déterminer s'il existe un chemin utilisable (accessible) du fauteuil roulant lié entre les différents éléments de l'habitat (par exemple : s'il existe un chemin lié entre le portail de la maison et la salle de bain) en utilisant les techniques de planification de trajectoires mentionnées auparavant. La facilité de la navigation et l'accès à l'habitat individuel sont des opérations indispensables pour les personnes en fauteuil roulant. Le test dans ce cas est séparé en deux opérations : la vérification de l'existence d'un chemin accessible entre deux éléments prédéfinis de l'habitat, et la vérification de l'accessibilité de l'espace d'ouverture et fermeture autour de l'élément sélectionné en considérant les contraintes du fauteuil roulant. Ensuite, suivant les résultats du test, les positions des éléments de l'habitat vont être organisées.

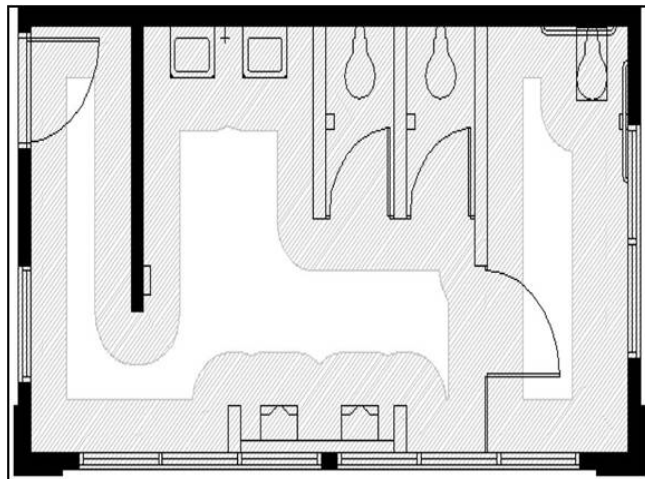


Figure II.8. Espace accessible au fauteuil roulant d'une salle du bain; l'espace en blanc représente l'espace dans lequel le fauteuil roulant peut se déplacer [47].

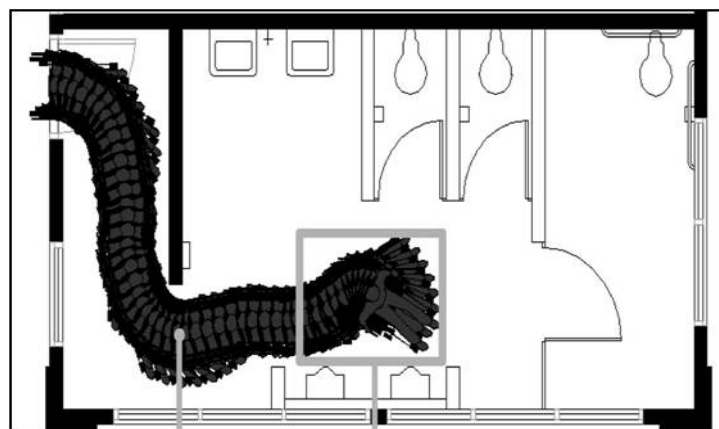


Figure II.9. Trajectoire accessible du fauteuil roulant de l'entrée principale à l'urinoir droit de la salle de bain [47].

La figure II.9, représente un chemin accessible généré par le planificateur de trajectoires qui assure la connexion entre le portail de la maison et la salle de bain. Grâce à cette approche, on peut avoir toutes les informations nécessaires sur la distribution des éléments de l'habitat par rapport à la personne en chaise roulante.

Le deuxième résultat retenu de ce test est la dimension minimale de l'espace de manœuvre qui doit être considéré pour réussir la manipulation/franchissement des éléments mobiles de l'habitat. La figure II. 10 représente les dimensions minimales de l'espace de manœuvre d'ouverture d'une porte pivotante pour une personne en fauteuil roulant. Le calcul de l'espace de manœuvre dans ce cas, s'est fait par des valeurs constantes du fauteuil roulant et de l'élément de manœuvre.

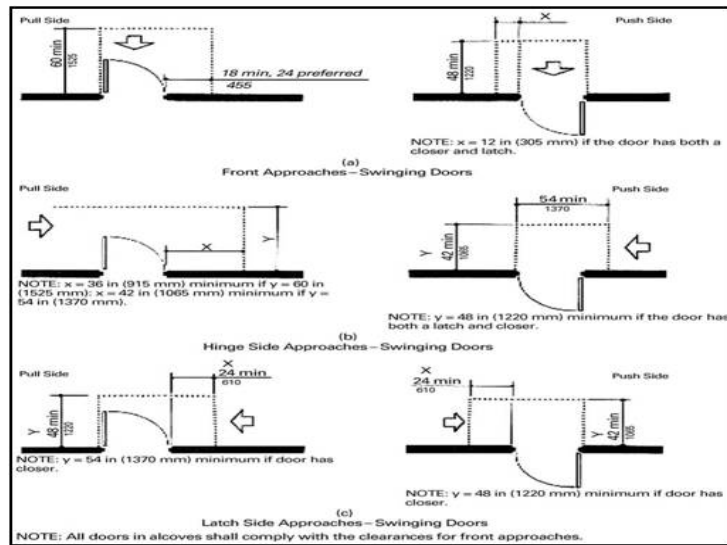


Figure II.10. Exemple d'ouverture une porte pivotante et l'espace de manœuvre du fauteuil associé selon la définition de [25].

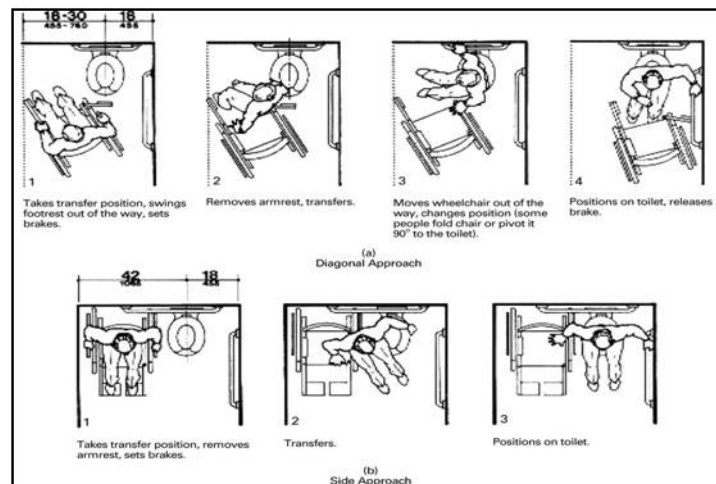


Figure II.11. Le diagramme de transfert du fauteuil roulant pour les W.C : rapprochement diagonale et à coté [25].

L'évaluation globale de l'accessibilité d'une salle de bain a été faite en testant la faisabilité du chemin correspondant au déplacement du fauteuil roulant entre la porte d'entrée et l'urinoir droit de la salle de bain et l'existence de l'espace de manœuvre minimale de navigation.

La figure II.11 montre l'usage des toilettes par une personne en fauteuil roulant, cette opération connue par **le transfert de fauteuil roulant** [47]. Comme montre la figure II.11, la personne peut se transférer du fauteuil au siège toilette par deux méthodes : transfert diagonal et transfert à coté. Dans ce test, les dimensions de l'espace de manœuvre autour du siège des toilettes et la position du siège doit être déterminée selon la méthode de transfert utilisée.

### ✓ **L'outil réalité virtuelle**

La réalité virtuelle (RV) fut proposée pour la première fois en juillet 1989 lors d'un salon professionnel, par Jaron Lanier, le responsable de la société *VPL Research* spécialisée dans les périphériques d'immersion. Il forgea cette expression dans le cadre de la stratégie marketing et publicitaire de son entreprise, sans chercher à en donner une définition très précise [48].

En général, pour admettre que quel que soit le statut de la chose en soi existe-t-elle, ou non, indépendamment de l'homme qui la perçoit, trois types de médiation interviennent entre le monde et l'homme : la médiation des sens (le monde aperçu), la médiation de l'action (le monde expérimenté), et la médiation de l'esprit (le monde imaginé). Ces trois médiations sont indissociables et constituent trois points de vue d'une même réalité.

L'idée était de développer une technologie capable de créer un monde imaginaire non différentiable du monde réel. Aujourd'hui, il s'agit de créer une reproduction acceptable de la réalité pour fins d'entraînement, divertissement ou de conception [49].

La réalité virtuelle s'apparait ces dernières années comme un outil très performant pour la compensation du handicap physique et moteur. L'amélioration de qualité de vie des personnes handicapées implique l'introduction des nouvelles technologies dans les processus d'aménagement des habitats. Les technologies de réalité virtuelle ou de réalité augmentée offrent un nouveau paradigme d'interaction Humain-Monde virtuel. Elles permettent une interaction et une immersion dans des conditions de plus en plus diversifiées, se généralisant à des supports utilisés dans la vie quotidienne accessible à des coûts de plus en plus bas. Les outils allant du « serious game » ou dérivés des plateformes de jeu (console Wii) à des systèmes lourds permettant une immersion multisensorielle peuvent permettre une exploration multiparamétrique de l'activité, du comportement et de paramètres physiologiques.

Les travaux de recherche dans le cadre de l'étude des apports de la réalité virtuelle pour l'aide à la rééducation motrice [50], ont pour but d'améliorer en qualité et en rapidité la fonction motrice de sujets atteints des déficiences motrices dues à des lésions centrales du cerveau ou au vieillissement. La figure II.12 représente quelques traitements psychologiques se basant sur la réalité virtuelle.



Figure II.12. Traitements psychologique utilisant la réalité virtuelle [51].

En termes d'utilisation en psychologie, jusqu'à présent l'efficacité clinique de la RV a été vérifiée dans le traitement de plusieurs de troubles psychologiques qui sont indiqués dans le travail de thèse de Klinger [51] et d'autres auteurs : l'acrophobie [52][53][54] la peur de conduire [55] ...etc.

L'utilisation de la RV pour la rééducation et l'aménagement des habitats pour des personnes handicapées possède plusieurs avantages [56]:

- L'évolution dans des mondes virtuels permet d'obtenir beaucoup de données sans ajouter de capteurs physiques.
- Pallier les problèmes de fiabilité des systèmes.
- Meilleur souplesse des expériences.
- Pour écarter (dans un premier temps) les problèmes de sécurité.
- Pour atténuer les problèmes de confiance des utilisateurs.

Elle peut permettre aussi une qualité de vie supérieure que ce soit par façon directe ou par la simulation d'une pièce ressemblant à l'appartement de la personne handicapée qui peut lui permettre de s'entraîner à se mouvoir dans son fauteuil roulant (chaise roulante instrumentée) et à apprivoiser le déplacement dans son environnement quotidien (ex : une main virtuelle permet d'éteindre ou d'allumer les lumières, d'ouvrir des tiroirs...etc.). Cependant, toutes les sensations du monde réel ne peuvent être rendues lors de la mise en situation dans les mondes virtuels, qui peuvent fausser les résultats des processus d'évaluation.

Grace à la RV on peut développer un simulateur de conduite de fauteuils dans des environnements virtuels [56]. Ce simulateur permet aux enfants comme les adultes qui ont subi un accident, d'apprendre à conduire un fauteuil électrique ou manuel, pour les enfants handicapés un mode ludique peut utiliser dans un cadre d'activités sportives adaptées.

Pour l'aménagement des habitats la RV a accru les difficultés des calculs des modifications apportées aux appartements. On peut simuler une pièce avec des encombrements et des obstacles. D'autre part, grâce à la visualisation 3D, les architectes peuvent se promener dans l'immeuble qu'ils

ont imaginé avec un fauteuil roulant et testent si les parties du logement sont accessibles. Cependant, il convient de remarquer que toutes les sensations du monde réel ne peuvent être rendues lors de la mise en situation dans des mondes virtuels.

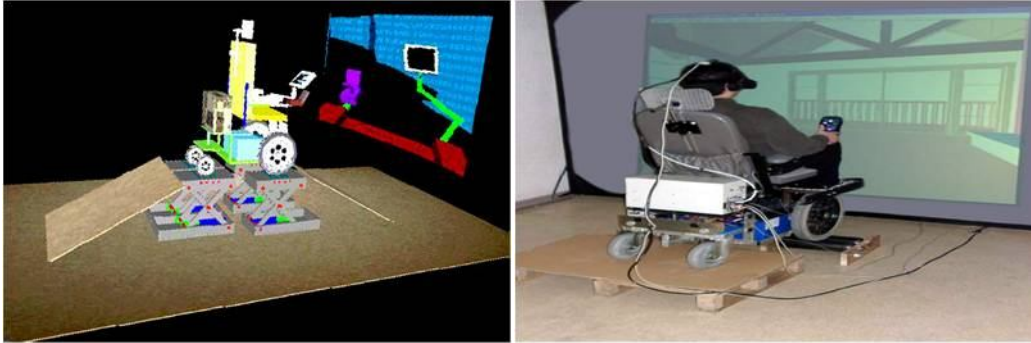
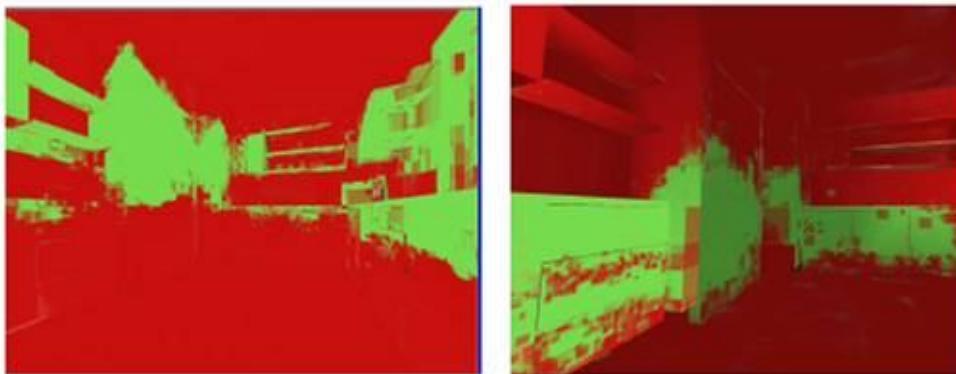


Figure II.13. Simulateur de conduite de fauteuils dans des environnements virtuels (LCOMS) [10].

Il y avait plusieurs projets de recherche qui utilisent la réalité virtuelle pour faire l'aménagement des habitats. Cette procédure commence souvent donc par diagnostiquer, à l'aide de la RV le degré de handicap de la personne, et l'environnement virtuel en 3D. Pruski et al. [57], ont proposé une méthode d'évaluation de l'accessibilité d'un environnement bâti en vérifiant l'existence d'une solution à l'inverse cinématique d'une chaîne articulaire constituée par la structure biomécanique d'une personne avec ses limitations propres de débattements articulaires. La personne se déplace dans l'environnement par l'intermédiaire d'une aide technique qui est soit un déambulateur soit un fauteuil. Cette application nécessite de prendre en compte l'encombrement du mobile puisque selon la forme et la surface au sol, les capacités de préhension sont différentes. Les formes du mobile, l'une circulaire et l'autre rectangulaire. La forme du système de mobilité a une influence sur l'ensemble des positions possibles atteignables dans l'espace d'évolution. Le principe de cette implantation consiste à étiqueter chaque point de l'espace par une couleur selon son caractère d'accessibilité ou non (Figure II.14 II.15).



(a) en déambulateur

(b) en fauteuil roulant

Figure II.14. Etiquetage des points de l'environnement pour une personne sans limitations particulière des articulations



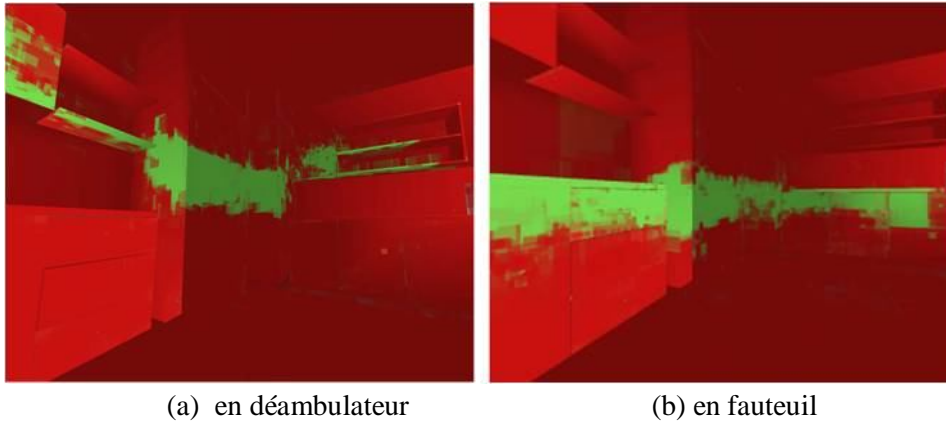


Figure II.15. Etiquetage des points de l'environnement avec limitation des débattements articulaires.

D'autres chercheurs sont allés plus loin avec l'évaluation d'accessibilité de l'intérieur d'habitat que ce soit pour des personnes à mobilité réduite ou d'autres types de handicap. Ils ont proposé, grâce aux avantages de la RV de créer un avatar numérique capable d'exécuter des mouvements réels dans un environnement virtuel 3D. Parmi ces projets, on trouve le projet américain du laboratoire *Digital Humans* de l'université d'Iowa (USA), qui était un précurseur dans le domaine de la réalité virtuelle avec le programme VSR [58]. Ce programme de recherche s'intéresse à la modélisation et la simulation du mouvement humain en vue d'en obtenir une meilleure compréhension. Santos TM le prototype développé dans le cadre de ce projet, est un modèle numérique intelligent, caractérisé par un système musculo-squelettique complet avec une peau qui se déforme et des muscles qui se contractent. Il peut prédire des mouvements réels et peut interagir avec l'environnement. Santos TM cinquième génération est un modèle humain qui permet d'analyser des tâches conduisant à des mouvements réalistes pouvant aider à évaluer les produits pour des personnes handicapées dans le domaine d'ergonomie.



Figure II.16. Réalité virtuelle et visualisation [58].

L'évaluation de l'accessibilité des personnes à mobilité réduite par les méthodes de simulation virtuelle n'est pas le seul moyen envisagé. Il y a certains nombres des chercheurs qui préfèrent utiliser les méthodes qui se basent sur le contact direct avec la personne handicapée en utilisant certaine forme des entretiens (questionnaires) préparés par des experts à travers des expériences et observations réelles réalisées par la personne à mobilité réduite elle-même. Le but de ces approches est de

déterminer les facteurs implicites/explicites qui restreignent l'autonomie de la personne et essayer d'apprendre de leurs expériences quotidiennes avec ses aides techniques pour améliorer les conceptions de ces dernières.

Récemment, un groupe de chercheurs mexicains-colombiens ont proposé une étude basée sur une expérience personnelle qualitative des personnes handicapées. Cette étude sert à créer une base de données théorique et méthodologique en incluant tous les designs des aides techniques utilisés. Cette étude permet : d'identifier les problèmes de l'accessibilité rencontrés par des personnes souffrant des incapacités physiques utilisant un aide technique de mobilité, d'identifier les obstacles physiques qui limitent la mobilité et reconnaître les pratiques socioculturelles (voir Figure II.17).

L'expérience a été appliquée sur 15 patients en Colombie et en Mexique souffrants de certaines maladies telles que : la spondylarthrite ankylosante, l'arthrite rhumatoïde, ou les amputés et qui utilisent fauteuil roulant ou autre aide technique à la mobilité. Les résultats sont utilisés pour améliorer les critères ergonomiques qui influencent la conception et la fabrication de dispositifs d'assistance [59].



(a) Personnes à mobilité réduite avec douleur.



(b) Personnes à mobilité réduite sans douleur.

Figure II.17. Exemples des patients qui participent à l'étude avec les modifications qu'ils apportent aux leurs aides techniques de mobilité [59].

Poursuivant dans la même ligne de recherches, on trouve le travail de Myriam Winance (2014) [60]. Le travail s'inscrit dans le cadre du projet "*approches de la biomécanique, de l'intelligence artificielle distribuée et de la sociologie pour la réalisation d'un système d'aide au choix et au réglage des fauteuils roulants manuels*". L'auteur a proposé une étude théorique basant sur une enquête

ethnographique réalisée entre 2007 et 2009 composée des interviews détaillées entre les utilisateurs du fauteuil roulant et leurs familles, les données enregistrées sont analysées à travers le logiciel Nvivo.

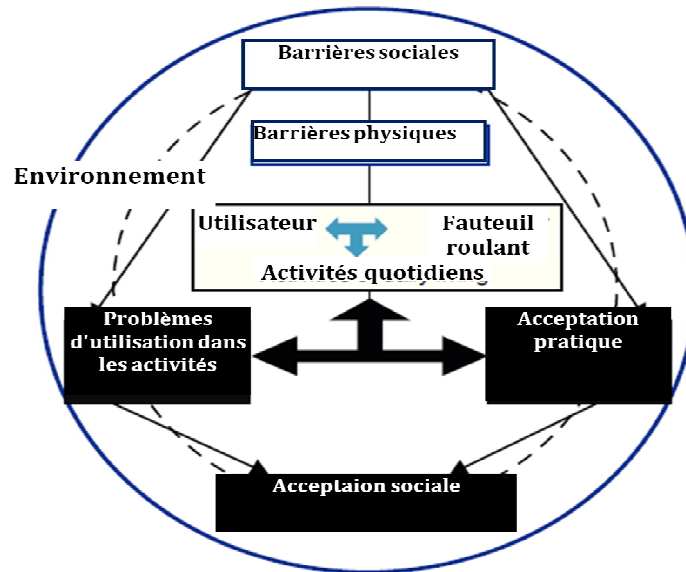


Figure II.18. Schéma des contrastes des utilisateurs dans leur vie quotidienne [59].

L'objectif principal de cette recherche est la contestation de faisabilité de la conception universelle (Universal Design) proposé auparavant par Mace [61], qui disent qu'on peut réduire la diversité des incapacités des personnes handicapées en une seule conception environnementale. Les résultats trouvés par Myriam Winance, montrent que l'adaptation ou la modification à faire en ce qui concerne l'environnement ou bien les aides techniques à la mobilité doivent inclure les différents besoins des personnes handicapées, ainsi que la conception des environnements (aide technique à la mobilité) doivent être dotées de ressources et caractéristiques variées qui répondent aux diversités d'incapacités physiques du côté exécution et de nature du handicap.

Crytzer and al. [62], sont allés plus loin dans ce domaine. ils ont choisi de traiter les problèmes liés aux activités quotidiennes exécutées par une personne en fauteuil roulant: l'influence du déplacement quotidien de la personne du fauteuil roulant à l'environnement (toilette, siège de voiture ...etc.), et les besoins durant l'opération de transfert du fauteuil roulant. La méthode est basée sur le *Live web-based conferencing using Adobe Connect technology (Clarix Technologies, Inc., Pittsford, NY)*, ce dernier permet aux groupes des experts dans le domaine de la technologie d'assistance, de l'architecture, de l'ingénierie, de la thérapie, du fauteuil roulant assistant, de se connecter pour discuter avec les participants leurs différents problèmes d'utilisation du fauteuil roulant.

Les réunions et les discussions virtuelles entre les experts et les participants se déroulent dans le cadre des trois sujets prédéfinis suivants :

- **Les standards courants** : pour identifier les espaces qui nécessitent des modifications selon l'opération de transfert en fauteuil roulant indépendant (Independent Wheelchair Transfer).

- **Les futures améliorations** : pour identifier les besoins supplémentaires concernant le transfert en fauteuil roulant indépendant.
- **Problèmes de transfert** : pour identifier les problèmes liés au transfert en fauteuil roulant indépendant dans l'environnement, avec des examens plus profonds (ex : les transferts multi-étapes, aide-transfert, les surfaces de stabilité ...etc.).

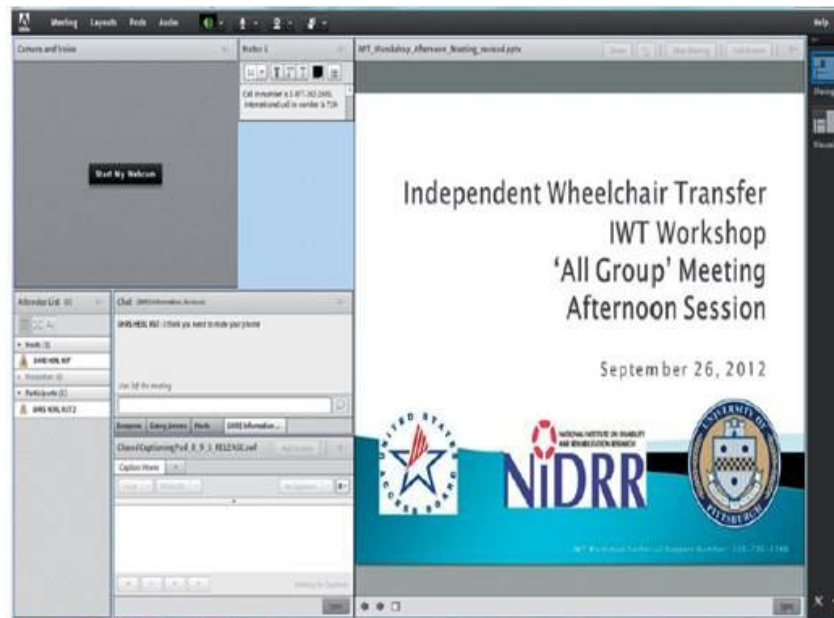


Figure II.19. L'interface du logiciel *Adob connect web-based*.

À la fin des entretiens, les manuscrits des discussions sont analysés à travers la théorie de Grounded [63]. Cette théorie, permettant de mieux comprendre les facteurs liés au transfert en fauteuil roulant indépendant dans un lieu de vie. Les remarques relevées après l'analyse des résultats permettant de :

- Comprendre les problèmes rencontrés par les personnes à mobilité réduite.
- Définir les modifications qui doivent être apportées du point de vue des personnes.
- Quantifier les différents problèmes liés à l'utilisation de la chaise roulante dans un environnement inaccessible.
- Définir la relation bilatérale entre la conception du fauteuil roulant et la conception de l'environnement.

Farelo et al. [64], ont proposé une solution alternative (WMRA : fauteuil roulant monté par un bras robotique) pour aider les personnes à mobilité réduite à réaliser ses activités quotidiennes de manipulation. Ce fauteuil roulant se déplace et manipule les éléments de manœuvre à travers une interface de contrôle intégré. La position de la personne dans l'opération de manipulation est de guider ce fauteuil en lui envoyant des ordres via des bras de contrôle. Cette approche diminue considérablement les efforts que la personne doit les dépenser pour réaliser une opération quotidienne, augmente aussi son autonomie.



Figure II.19. Le WMRA au moment de test [64].

L'accessibilité chez les personnes âgées à mobilité réduite est encore plus difficile par rapport aux personnes ayant toutes leurs capacités articulaires. Dans le cas des personnes âgées, l'aspect confort est très nécessaire. Il y en a de nombreuses études telles que celle proposé par Cooper et al. [65], qui traitent le problème d'inconfort d'utilisation le fauteuil roulant chez les personnes âgées. L'objectif principal de cette étude était pour déterminer le niveau de l'inconfort pour différentes personnes utilisant des dossiers dans leur fauteuil roulant. Cette mesure a été faite par l'outil d'évaluation de l'inconfort du fauteuil roulant (TAWC).

Avec le même objectif de l'approche de Cooper et al., on trouve l'étude de Karmarkar [66]. Cette étude a pour objectif : quantification des utilisations du fauteuil roulant manuel par des personnes qui résident dans des maisons de soins infirmiers. Selon les résultats obtenus, l'utilisation de fauteuil roulant est dépendante de plusieurs facteurs tels que : la démographie des personnes (ex : âge, genre ...etc.), les facteurs de santé (ex : état de la santé, déficiences physiques, Co-morbidités), les caractéristiques du fauteuil roulant (condition, type de fauteuil roulant), les contraintes et les facilitateurs environnementaux (accessibles *versus* inaccessibles individuels et publiques environnements) et la qualité de service délivrée (ex : fauteuil roulant avec des prescriptions d'un spécialiste *versus* un non spécialiste). Dans cette étude les chercheurs ont fait une comparaison entre les résidents de NH (HN : maison du sois infirmiers publique et privée) et la maison des affaires de vétérans (VN) sur l'utilisation du fauteuil roulant en tenant compte des facteurs d'utilisation. Les résultats obtenus de cette étude montrent que la prescription et la personnalisation de la conception des fauteuils roulants doivent être faites en tenant compte des capacités physiques de la personne, la structure de l'environnement ...etc. La solution efficace pour améliorer les performances de l'utilisation des fauteuils roulants et pour diminuer les blessures involontaires est de tenir compte des différents facteurs dès la conception.

### **II. 3. Conclusion**

La simulation numérique des mouvements humains par la technologie de RV nous permet de vérifier l'état d'accessibilité d'un habitat par rapport à l'accès aux objets et à leur manipulation. Dans ce chapitre, nous avons présenté une revue de la littérature des différentes approches numériques, législatives et manuelles proposées pour l'évaluation d'accessibilité et l'aménagement des logements des personnes handicapées. L'intérêt primordial de ces méthodes est la réhabilitation de l'intérieur et l'extérieur d'un lieu de vie pour une personne à mobilité réduite, dans l'objectif de le rendre accessible, en tenant compte des différents facteurs tels que : l'aide technique à la mobilité utilisée, les zones d'atteinte, l'espace d'usage ...etc.

La simulation d'un personnage 3D humain dans un environnement virtuel avec des contraintes réelles facilite considérablement l'évaluation de l'accessibilité. La RV est un outil très efficace et plus adéquat du côté mesures pour évaluer l'accessibilité intérieure et faire l'aménagement nécessaire d'un lieu de vie individuel ou publique.

## Chapitre III : Modélisation

---

### **III.1 Introduction**

Dans ce chapitre, nous allons présenter le modèle biomécanique de la partie haute du corps de la personne que nous avons utilisé en simulation. Les modèles biomécaniques proposés dans littérature, s'inspirent entièrement de l'anatomie du corps humain. En fait, de nombreux travaux décrivent une partie du corps ou le corps entier. Dans notre application, nous nous intéressons seulement au modèle qui décrit la partie haute du corps (de bas de colonne vertébrale jusqu'à la main) car notre étude concerne les personnes à mobilité réduite (handicaps moteurs) dont les membres inférieurs sont inactifs. Le modèle que nous allons utiliser doit décrire les limites articulaires de la personne qui doivent être définies par un expert connaissant la personne (médecin, rééducateur, ergothérapeute ...etc.) ou bien par mesure discrète avec la personne handicapée elle-même.

### III.2. Anatomie du corps humain

Le corps humain est composé de plus de 600 muscles, de 200 os, de 360 articulations et tissus osseux. Les muscles sont généralement rattachés aux os et aux articulations. Les os ont pour rôles de protéger, de soutenir et de supporter les différentes parties du corps. Les muscles squelettiques sont fixés aux os par les tendons et lorsqu'ils se contractent font bouger les os et provoquent le mouvement. Les articulations sont des liens qui unissent deux ou plusieurs os, leurs fonctions principales sont relatives à la mobilité qu'elles confèrent au squelette, à leur capacité d'unir les os entre eux et, particulièrement dans le cas du crâne et de la cage thoracique, elles offrent une forme de protection mécanique. Elles se regroupent selon leur structure (fibreuse, cartilagineuse ou synoviale) ou selon leur mobilité (immobile, semi-mobile ou mobile).

Le squelette humain regroupe quatre parties principales : la tête, le tronc, les membres supérieurs et les membres inférieurs. Chaque partie comporte des groupes d'os liés entre eux par des articulations et le groupe lui-même lié à un autre par une certaine articulation. La tête est reliée au tronc par les articulations du cou, les bras sont reliés au tronc par les articulations de l'épaule, qui est une articulation constituée de la clavicule et de l'omoplate, chacune de nos jambes est liée au tronc par les articulations de la ceinture pelvienne.

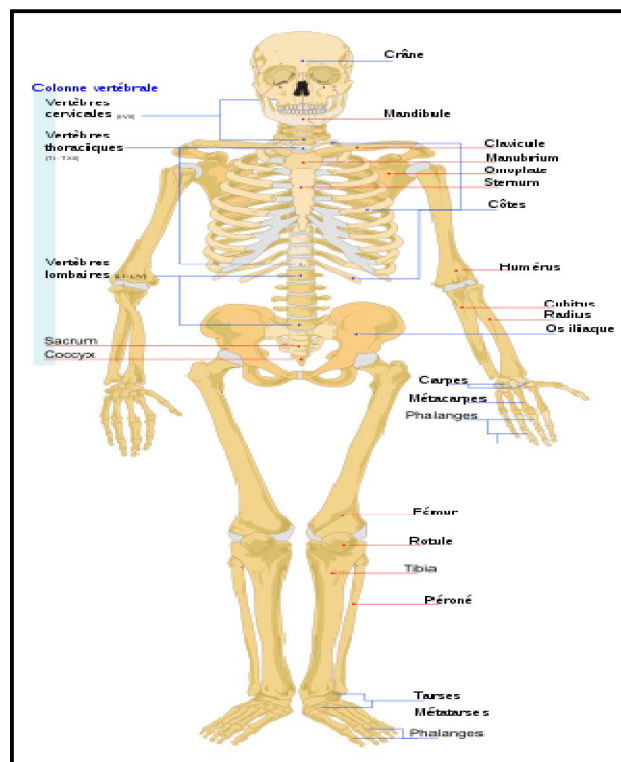
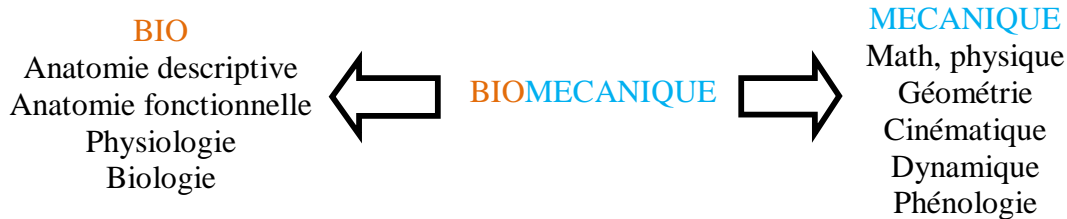


Figure III.1. Le squelette humain.

### III.3 Modélisation biomécanique

La biomécanique est une approche scientifique récente qui utilise les apports des autres sciences biologiques et fondamentales afin d'étudier l'être humain. Elle utilise les notions mécaniques des êtres vivants pour analyser leur mécanisme fonctionnel [67].





La modélisation biomécanique doit beaucoup aux travaux des anatomistes (Vesalius 1540, Browne 1680, Bell 1763...) qui dès le XV<sup>ème</sup> siècle font progresser la connaissance du corps humain grâce à la dissection de cadavres. A partir du XIX<sup>ème</sup> siècle, l'étude du mouvement prend un essor particulier grâce à la photographie et au cinéma. Sous l'impulsion de Muybridge (1830-1904), de Marey (1830-1904) et de Demeny (1850-1917), les méthodes et les appareils de capture du mouvement, les chronophotographies et les modèles schématisant le mouvement du corps humain se développent.

De nos jours, les connaissances en biomécanique permettent de modéliser en 3 dimensions le mouvement du corps humain et de construire des prothèses artificielles au comportement mécanique proche de la réalité.

Une première approche pour comprendre la complexité du comportement de l'ensemble du système musculo-squelettique est de mettre en évidence les mécanismes basiques mis en œuvre par ce système, en utilisant des modèles biomécaniques simples. L'objectif des approches biomécanique du corps humain est de comprendre les relations entre les structures et les fonctions du corps afin d'adapter des modèles simples compatibles avec les exigences fonctionnelles. Il y a deux méthodologies biomécaniques principales pour la modélisation du corps humain.

- La biomécanique instrumentale, elle se base sur les méthodes de mesures et de traitement des données.
- La biomécanique théorique, se base sur la théorie, les procédures de modélisation, simulation et optimisation qui comporte deux types de modèles. *Le modèle théorique* qui se base sur les connaissances théoriques des structures et fonctions mécaniques du corps humain qui lui-même renferme trois modèles (modèle mécanique, musculo-mécanique et neuro-musculo-squelettique) et le *modèle empirico-statistique* qui est utilisé pour identifier et évaluer les paramètres biomécaniques qui influencent sur la performance [68].

Au niveau le plus élémentaire, la structure squelettique est modélisée dans un premier temps comme une hiérarchie des segments rigides reliés par des articulations. Ce modèle multi-segmentaire consiste à représenter le corps humain en un système de segments reliés les uns aux autres par des articulations. La construction d'un tel modèle, s'appuie sur des points anatomiques (ex : cheville, genou, hanche...etc.) qui définissent les segments corporels (ex : pied, jambe, cuisse...etc.) et des mesures anthropométriques qui caractérisent les segments telles que sa masse et la position de son centre de masse.

Le corps humain est arrangé en série, où chaque structure anatomique indépendante est connectée à une autre articulation. Chaque doigt comprend un nombre de liaisons segmentaires connectées via des articulations. On peut suivre la liaison pour atteindre la tête, la main, le pied gauche et le pied droit. Nous appellerons une telle chaîne, une série de branches (Figure III.2). Elle représente la modélisation d'un homme en un certain nombre de branches cinématiques [69][70]. Il est important de distinguer la différence entre un corps rigide et un corps flexible. Un corps rigide ne peut pas se déformer (nous considérons typiquement l'os comme non déformable), un corps flexible (ou l'objet déformable) subit relativement de grandes tensions quand il est soumis à une charge. Pour l'approche présentée dans ce travail, seulement le mouvement de corps rigide est assumé à tout moment.

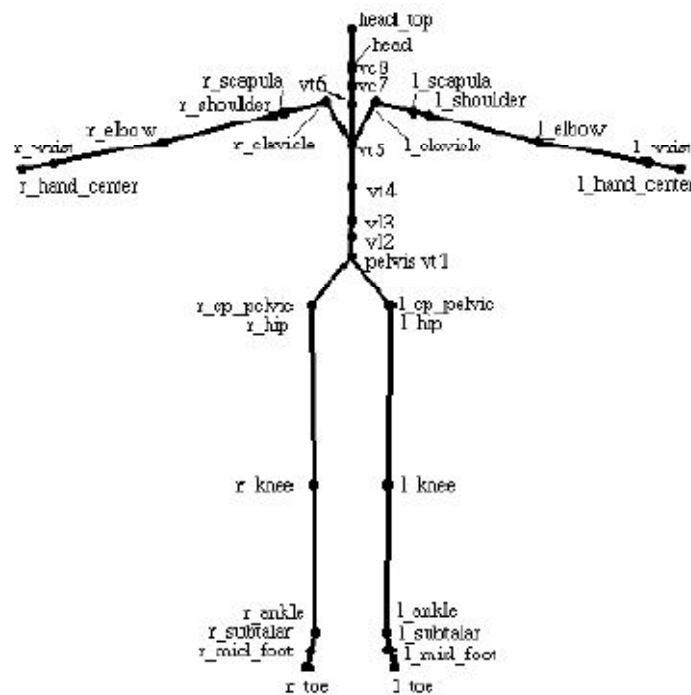


Figure III.2. Modélisation biomécanique 2D de corps humain : modèle multi-segmentaire avec de segments rigides.

Dans certaines applications d'ergonomie le personnage est composé de plusieurs couches. La couche de base est composée de la chaîne articulaire des segments rigides (squelette). La conception du personnage en 3D consiste à couvrir la chaîne articulaire par une couche de peau composée des taches d'une surface rigide collé directement sur les segments rigides, et des patches d'une surface déformables autour des articulations pour connecter les segments rigides. Généralement, il y a une autre couche intermédiaire entre le squelette et la couche de peau, composée des objets souples similaire à la forme des muscles du corps humain. Le tissu le plus fiable doit générer comme une enveloppe des objets souples. la méthode le plus fréquente est d'utiliser les Métalles (*Metaballs*) déformable mélangé ou non, distribuées autour de squelette pour créer un corps anatomique

déformable proche du réel [71][72][73]. Dans notre application nous nous intéressons seulement au modèle multi-segmentaire (voir Figure III.3b).

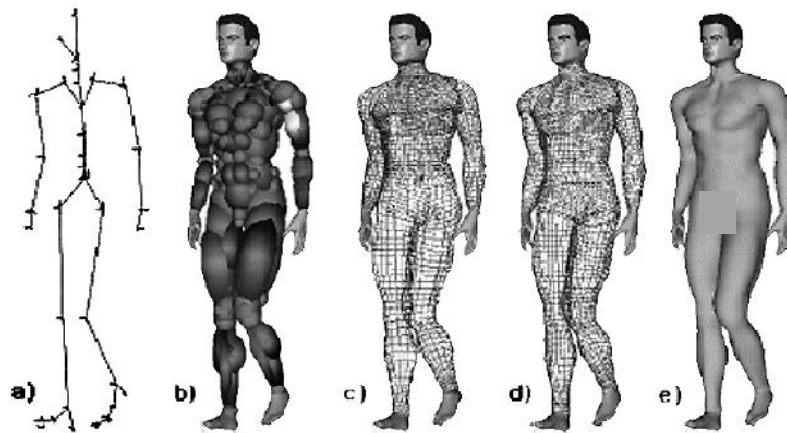


Figure III.3. Génération de corps virtuel : a) Squelette b) Métaballes c) Enveloppe d) Maille e) Tissu.

L'avantage qu'offrent de tels modèles est qu'ils ne possèdent qu'une petite quantité de paramètres mécaniques à expertiser. Ce faible nombre de paramètres faciliterait alors la compréhension de fonctionnement entre les différentes parties du système. La bibliographie dans le domaine de la biomécanique propose plusieurs modèles de l'humain [74][75][76][77]. La plupart des modèles supposent que le corps est formé d'un ensemble de segments corporels (des parties rigides) plus ou moins indéformables reliés les uns aux autres par des articulations.

#### III.4 Description et modélisation de la partie haute du corps humain

La partie haute du corps humain se compose de plusieurs os et sont reliés à la cage thoracique par la ceinture scapulaire (l'épaule) composée de la clavicule en avant et de l'omoplate en arrière. La clavicule est un os mince et long situé entre l'omoplate et le sternum, contourné en S et à double courbure, l'une étant convexe et l'autre concave. L'omoplate ou la scapula est un os plat, triangulaire, appliqué à la face postérieure du thorax qui s'articule avec la clavicule par l'acromion et avec la tête humérale par la cavité glénoïde.

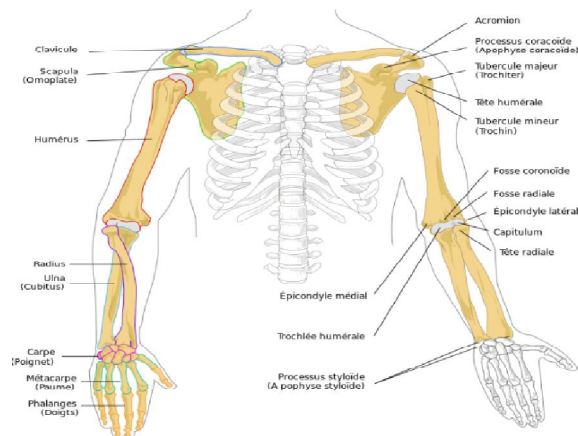


Figure III.4. Description squelettique de membres supérieurs.

La colonne vertébrale ou rachis est une structure osseuse complexe. Elle permet la mobilité et la souplesse nécessaires au corps humain, est une forme non-linéaire avec quatre courbures : deux courbures concaves nommées lordose lombaire et cervicale et deux courbures convexes appelées cyphose thoracique et sacrée. La colonne vertébrale est une chaîne d'organes biologiques subdivisée en 5 régions: partie cervicale, thoracique, lombaire, sacrée et coccygienne (voir Figure III.4) [78].

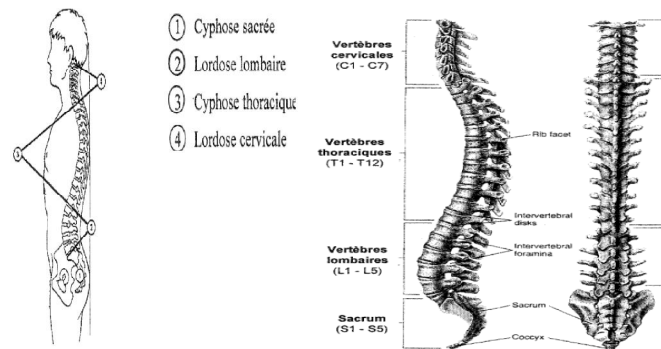


Figure III.5. Description squelettique de la colonne vertébrale.

Les principaux segments osseux du membre supérieur, à savoir le thorax, la clavicule, l'omoplate, l'humérus, le radius, l'ulna et la main, sont facilement repérables sur le corps humain par observation ou palpation.

- **L'humérus** = os le plus long et le plus gros du membre supérieur, il s'articule à son extrémité proximale avec l'omoplate et à son extrémité distale avec le radius et le cubitus.
- **L'ulna** ou le cubitus est un os long, située entre l'humérus et le carpe, en dedans du radius. Il est plus long que le radius. Son extrémité proximale comprend l'olécrâne, qui forme la proéminence du coude.
- **Le radius** est l'os latéral de l'avant-bras toujours situé vis-à-vis du pouce, Il se termine au niveau du poignet et sert de base à la majeure partie de l'articulation avec la main (voir Figure III.6).

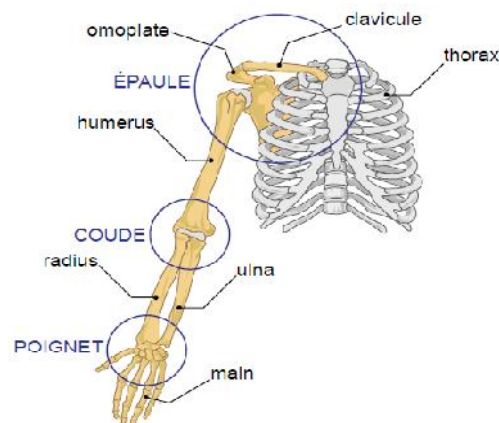


Figure III.6. Les sept principaux segments osseux (thorax, clavicule, omoplate, humérus, radius, ulna et main) et les trois complexes articulaires (épaule, coude, poignet) du membre supérieur.

### III.4.1. Segments corporels de la partie haute du corps

Cette partie du corps se sépare en trois parties principales :

- **Tête et cou**
- **Tronc** (Thorax, Abdomen et Bassin)
- **Membres supérieurs** (reliés entre eux par la ceinture scapulaire) Chaque membre comprend l'humérus (bras), le cubitus et le radius (avant-bras), le carpe (poignet), le métacarpe (main) et les phalanges (doigts)

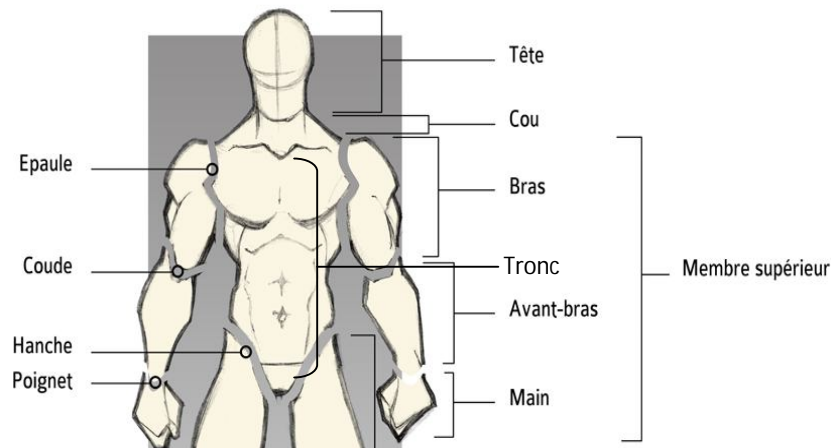


Figure III.7. Segments corporels de la partie haute [79].

### III.4.2. Articulations

Lors l'analyse de mouvements les articulations utilisées sont choisies de manière simplifiées pour faciliter la simulation. Seules les articulations principales sont prises en considération. Les articulations principales utilisées dans la modélisation biomécanique de la partie haute donc sont :

- Articulation du **cou**
- Articulation du **l'épaule**
- Articulation du **coude**
- Articulation du **poignet**
- Articulation de la **hanche**
- Articulations **de colonne vertébrale**

Si on essaierait de donner une notion simple aux articulations, on peut dire qu'une articulation est un point où deux ou plusieurs os se rencontrent. Selon le type de mobilité qui elles offrent trois types d'articulations: articulation fibreuse, articulation cartilagineuse et articulation synoviale.

Les articulations synoviales sont très connues dans le corps humain, elles unissent presque tous les segments corporels. Les articulations des membres supérieurs sont toutes de type synoviales. L'amplitude de mouvement articulaire et les degrés de liberté possibles sont en fonction de la forme géométrique de l'articulation, elles sont classées en 6 types différents (voir Figure III.8)

- **Articulation sphéroïde ou énarthrose** : Une tête sphérique convexe vient se loger dans une cavité sphérique concave. Ce type d'articulation permet 3 degrés de liberté et donc une très grande mobilité : flexion/extension, abduction/adduction, rotation externe/interne et circumduction (voir Figure III.8a).
- **Articulation en selle** : Deux têtes concaves viennent s'emboîter perpendiculairement. Ce type d'articulation permet 2 degrés de liberté : flexion / extension et abduction / adduction (voir Figure III.8b).
- **Articulation condylienne** : Une tête ellipsoïdique convexe vient se loger dans une cavité ellipsoïdique concave. Ce type d'articulation permet 2 degrés de liberté : flexion / extension et abduction / adduction (voir Figure III.8c).
- **Articulation trochléenne ou ginglyme** : L'articulation forme une charnière. Ce type d'articulation ne permet qu'un seul degré de liberté : flexion / extension (voir Figure III.8d).
- **Articulation trochoïde** : Un cylindre convexe vient se loger dans un cylindre concave. Ce type d'articulation ne permet qu'un seul degré de liberté : rotation externe / interne (voir Figure III.8e).
- **Articulation plane ou arthroïde** : Deux surfaces planes sont en contact. Ce type permet 3 degrés de liberté mais avec très peu d'amplitude (voir Figure III.8f).

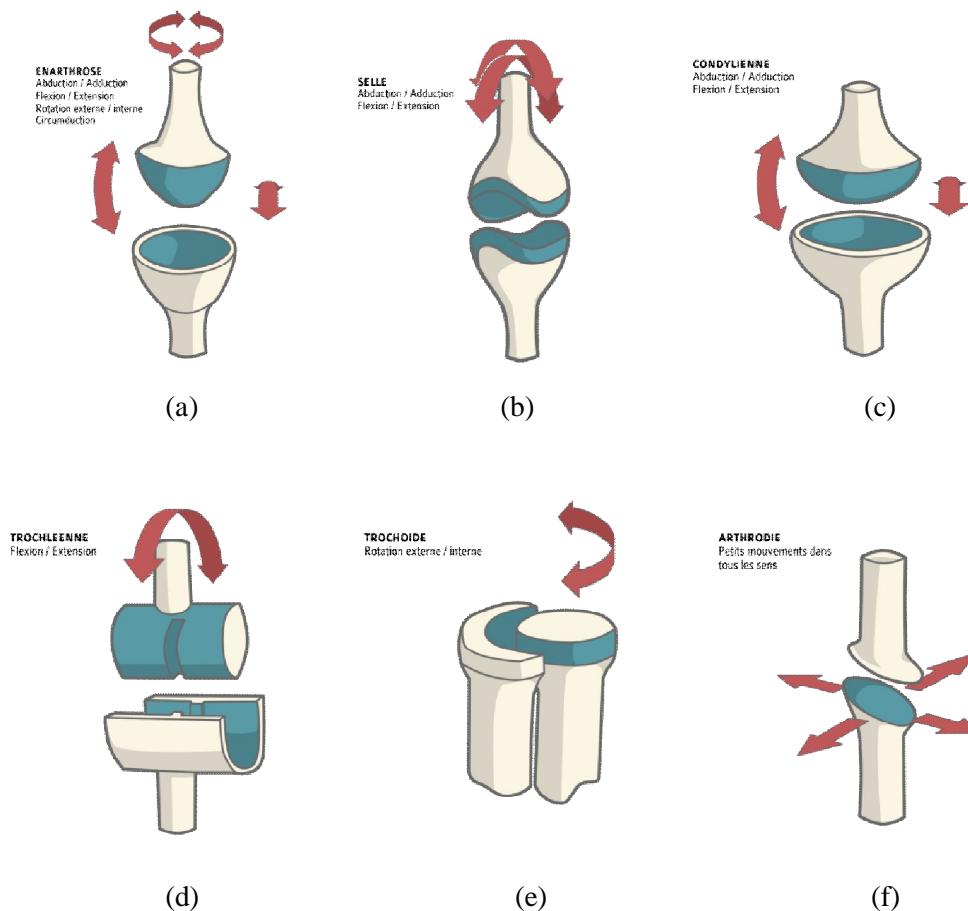


Figure III.8. Articulations synoviales.

Les membres supérieurs décrits généralement par les quatre articulations synoviales suivantes :

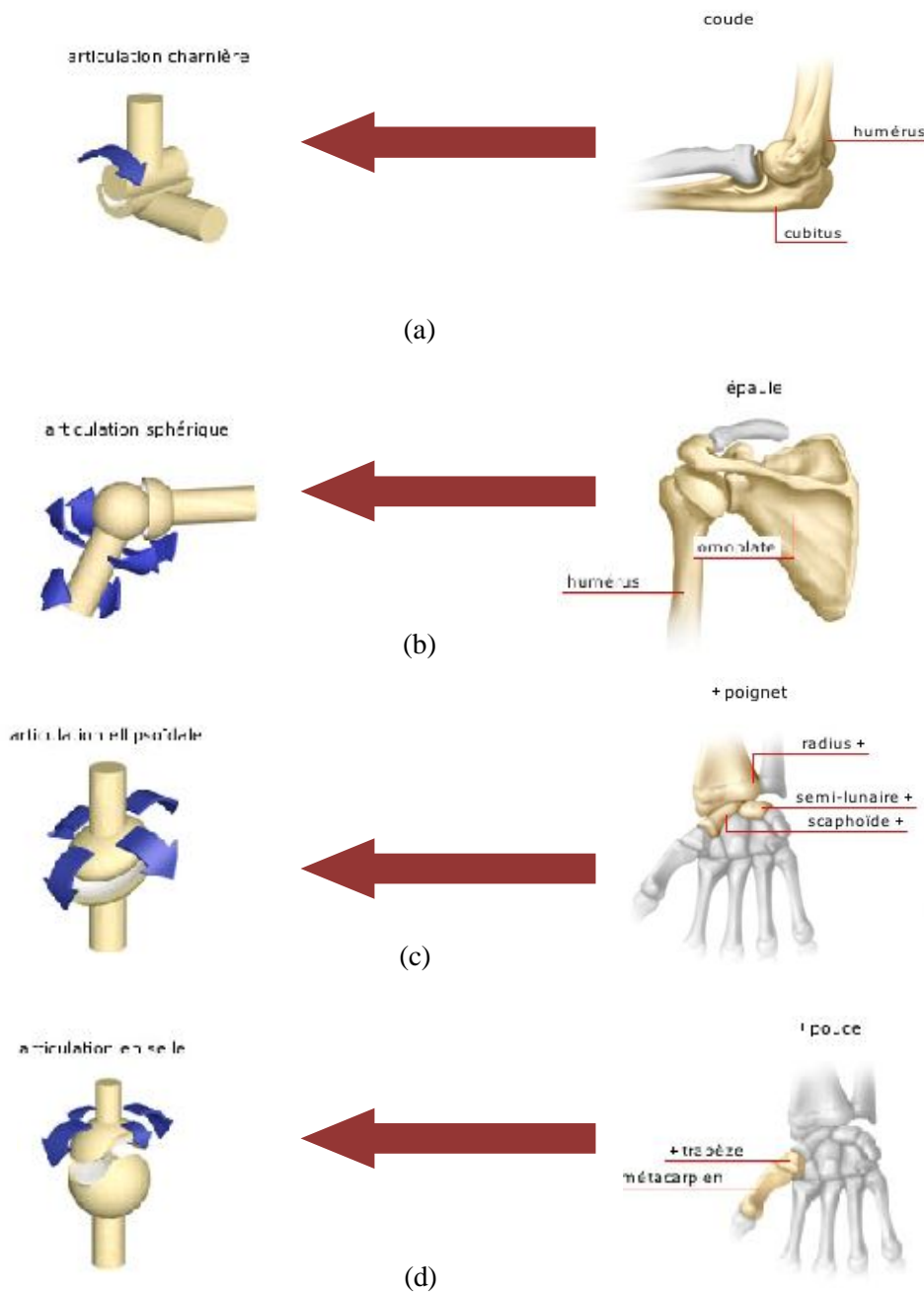


Figure III.9. Articulations synoviales de membres supérieurs et leurs équivalentes en biomécanique.

La colonne vertébrale se compose de 24 vertèbres qui s'arrangent pour construire une chaîne d'os articulée de type **condylienne**. Généralement, il est difficile de peser sur la forme de la colonne vertébrale pour avoir des postures réalistes, pour cette raison on trouve que la modélisation de la colonne vertébrale dépende d'application visée. Plusieurs modèles biomécaniques ont été proposés dans la littérature pour décrire les mouvements de celui-ci. On cite la modélisation par une courbe proposé par Korien [80], un autre modèle proposé par [81] qui décrit les mouvements de colonne

vertébrale en termes d'angles de flexion totale dans les plans sagittale, latérale et les directions axiales (voir Figure III.12).



Figure III.10. Modèle de colonne vertébrale [69].

### III.4.3. Plans et axes de références

#### III.4.3.1 Les plans de références

Les plans et les axes associés au corps humain servent à expliquer la situation du sujet par rapport à l'observateur, de quelle manière le sujet effectue son mouvement et comment peut-on voir le sujet : de face, de dos ... etc. Les plans et axes utilisés généralement sont définis par rapport à la position standard anatomique humaine.

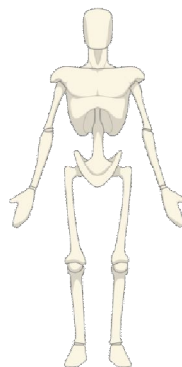


Figure III.11. Position anatomique de référence [79].

A partir de cette position anatomique on décrit trois plans qui passent par le centre de gravité du corps humain qui sont perpendiculaires les uns par rapport aux autres (voir Figure III.12).

- **Le plan sagittal** : plan vertical qui passe par la ligne médiane du corps et divise en deux parties symétriques, droite et gauche
- **Le plan frontal** : un plan vertical perpendiculaire au plan sagittal qui divise le corps en deux parties symétriques antérieures (ventrales) et postérieures (dorsale).
- **Le plan transversal** : plan horizontal, parallèle au sol, divise le corps en deux parties symétriques, supérieurs (du côté de la tête) et inférieure (du côté des pieds)



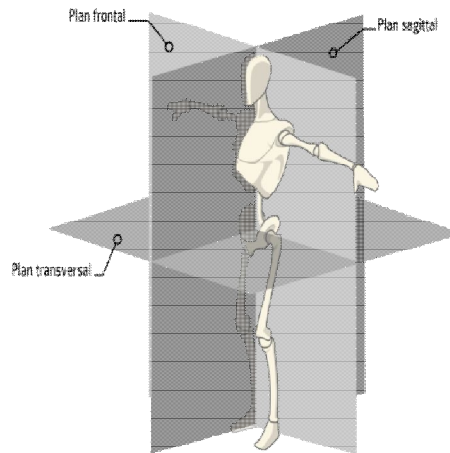


Figure III.12. Plans anatomiques de références [79].

Ces trois plans sont les plans principaux dans lesquels la personne exécute ses différents mouvements. Il existe aussi d'autres plans lorsqu'on étudie une partie du corps séparément.

#### III.4.3.2. Les axes de références

Les axes sont des lignes imaginaires autour de laquelle la personne exécute son mouvement, chaque axe est défini par l'intersection de deux plans et ils sont perpendiculaires aux plans de références présentés au-dessus. Les intersections entre les plans de références engendrent trois axes suivants (voir Figure III.13):

- **L'axe antéro-postérieur** : il est formé par l'intersection des plans sagittaux et transversaux en venant d'arrière en avant.
- **L'axe transversal** : il est formé par l'intersection des plans frontaux et transversaux en passant horizontalement de gauche à droite.
- **L'axe longitudinal** : il est formé par l'intersection des plans sagittaux et frontaux en passant verticalement de haut en bas.

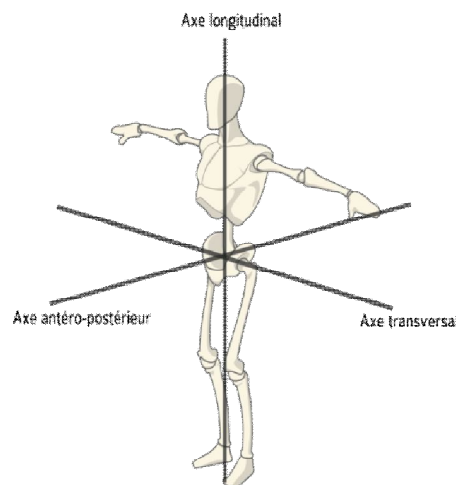
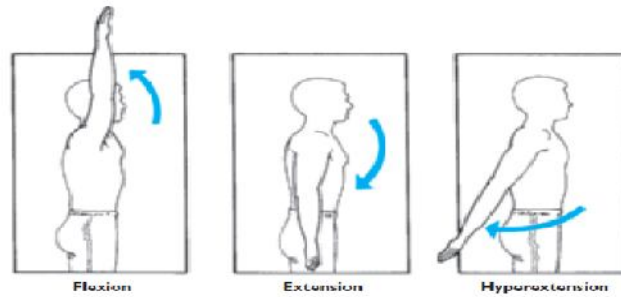


Figure III.13. Axes anatomiques de références [79].

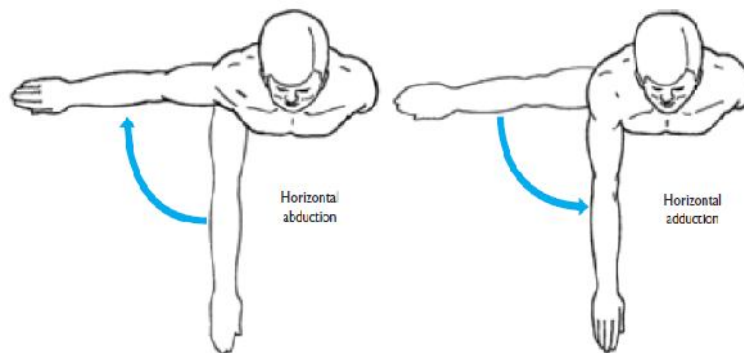
### III.4.3.3. Les mouvements principaux des articulations des membres supérieurs

Les mouvements principaux de la partie haute du corps humain dans les trois plans de références sont :

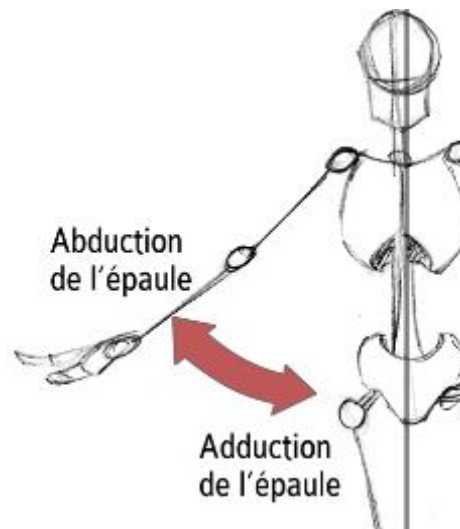
- Mouvement de l'articulation de l'épaule dans les plans de références.



(a) Les mouvements dans le plan sagittal de l'épaule [82].

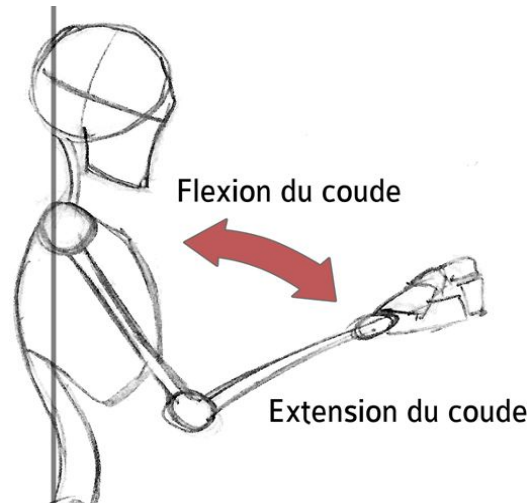


(b) Les mouvements dans le plan transversal de l'épaule [82].

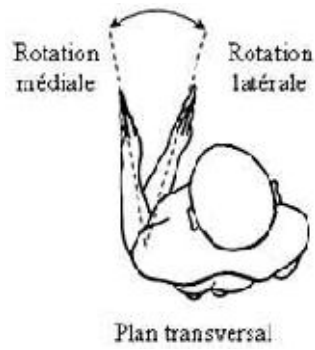


(c) Les mouvements dans le plan frontal de l'épaule [79].

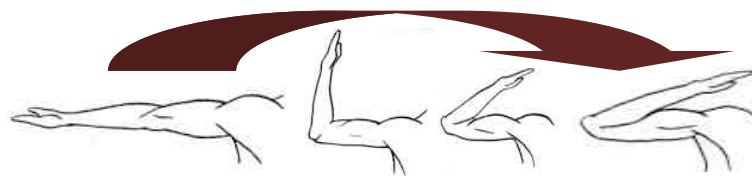
- Mouvement de l'articulation de coude dans les trois plans de références.



(a) Les mouvements dans le plan sagittal du coude.



(b) Les mouvements dans le plan transversal du coude

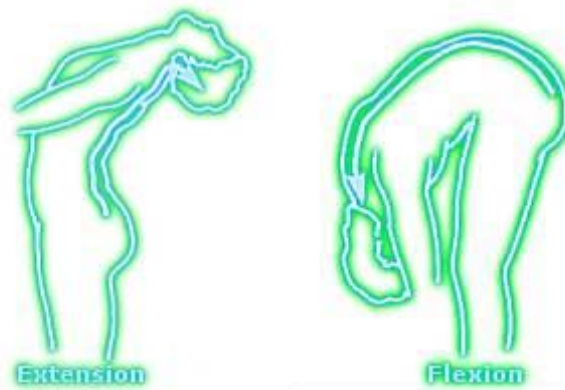


(c) Les mouvements dans le plan frontal du coude.

- Mouvement de l'articulation de la colonne vertébrale dans les trois plans de références.



(a) Les mouvements dans le plan frontal de la colonne vertébrale.

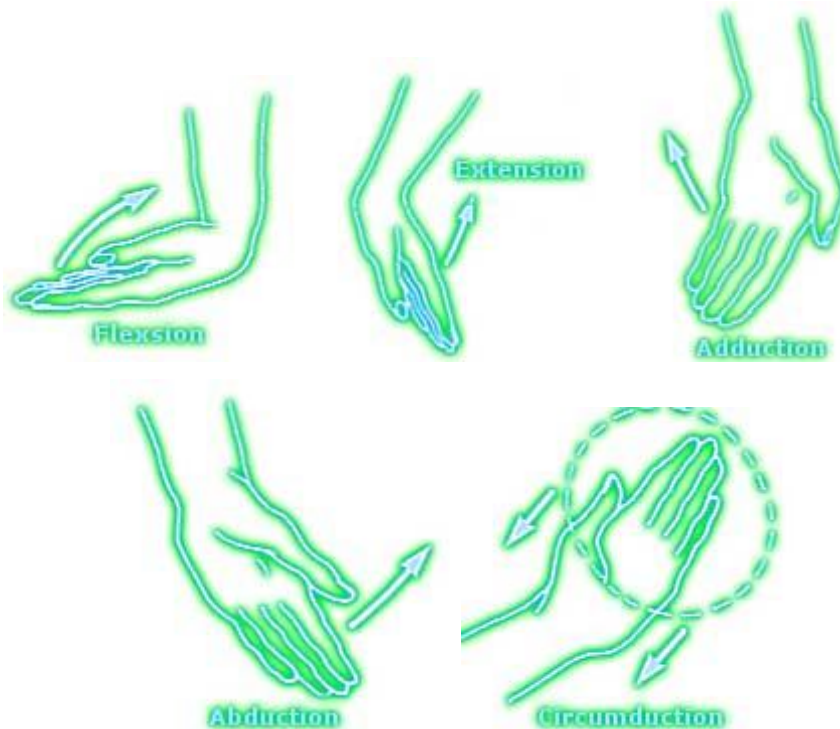


(b) Les mouvements dans le plan sagittal de la colonne vertébrale.



(c) Les mouvements dans le plan transversal de la colonne vertébrale.

- Mouvement de l'articulation du poignet dans les trois plans de références.



(a) Les mouvements dans les trois plans de références.

Les mouvements que nous avons montrés au-dessus ce sont ceux les principaux, il existe plusieurs d'autres exécutés dans d'autres plans secondaires. Une bonne connaissance des mouvements anatomiques est nécessaire pour réaliser une analyse descriptive correcte des mouvements humains.

#### III.4.4. Modèle de l'ensemble (Le bras, l'épaule et la colonne vertébrale)

Il existe plusieurs modèles biomécaniques de la partie haute du corps humain qui décrivent ses mouvements anatomiques [74][75][76][77]. Tous les modèles se basent principalement sur les articulations présentées dans la section précédente et chacun modélisé par certains nombre différent d'articulations selon l'application utilisée. Dans notre application, nous avons opté pour le modèle à 21 degré de libertés (DDL) proposé par [83]. Ce modèle décrit la partie haute du bas de la colonne vertébrale jusqu'à la main, la personne utilise un fauteuil roulant pour le déplacement donc les membres inférieurs sont inactifs. Ce modèle inclut trois parties principales : la colonne vertébrale (11 DDL), l'épaule (2 DDL) et le bras (8 DDL) (voir Figure III.14). Le point que nous désirons commander constitue le centre de la paume correspond à la 21ème articulation.

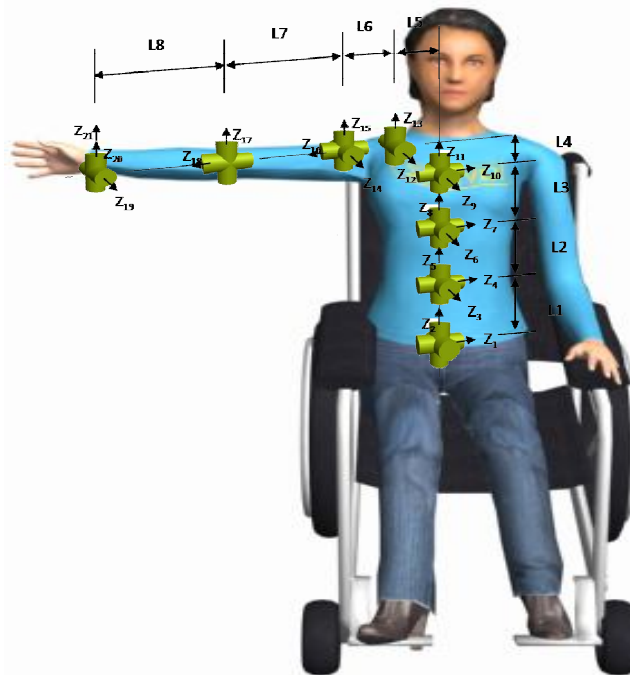


Figure III.14. Modélisation des bras-épaules-colonne vertébrale.

#### III.4.5. Modèle du fauteuil roulant

Le fauteuil roulant se déplace sur le sol par trois degrés de liberté : un degré en rotation et deux en translation. Nous tenons compte du caractère du non-holonome puisque le placement et la manière de se déplacer du couple dans l'environnement nous intéressent. Nous considérons que la personne est capable de se mettre en position si celle-ci est atteignable. Le fauteuil roulant est un véhicule à base

mobile non-holonomie avec des contraintes sur ses mouvements. Il prend en compte les contraintes de non-holonomie.

$$\Delta y \cos(\theta) - \Delta x \sin(\theta) = 0 \tag{III.1}$$

Cette contrainte indique la tangente de la direction le long de toute trajectoire faisable, et la limite de courbure de la trajectoire. En général, la position d'un véhicule non-holonomie (rouler sans glissement) est décrite par deux paramètres de position  $(x, y)$  et un paramètre d'orientation  $\theta$ . La contrainte de non-holonomie indique que la tangente (la dérivée de la coordonnée  $y$  sur la dérivée de la coordonnée  $x$ ) de la trajectoire de déplacement doit être portée par la direction du véhicule (la tangente de  $\theta$ ), comme montrée par l'équation (III.1).

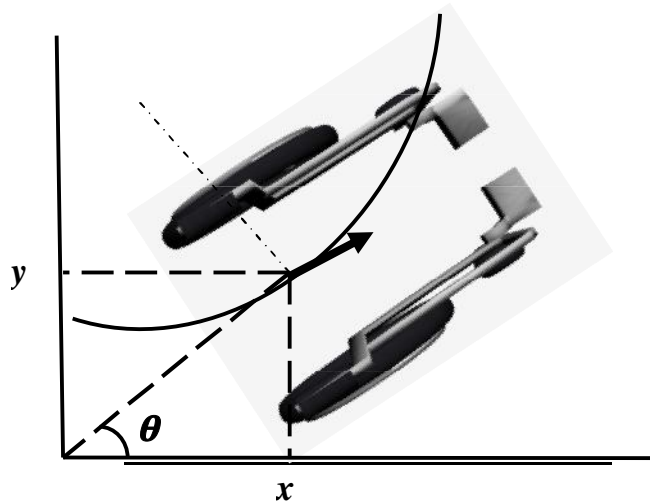
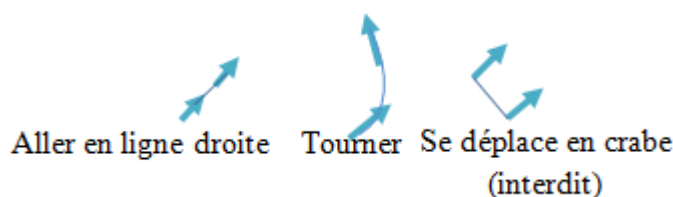


Figure III.15. Modèle du fauteuil roulant

Puisque nous ne considérons que l'évitement d'obstacles et la non-holonomie comme contraintes à respecter durant la simulation, ni la position des roues de l'avant ni la vitesse ne sont pertinentes. Donc, on aura besoin d'un modèle cinématique de la base mobile à trois degrés de libertés qui décrivent la configuration (position  $(x, y)$  + l'orientation  $\theta$ ) dans l'espace de déplacement. Pratiquement, le déplacement se fait par la contribution de ces trois paramètres  $(x, y, \theta)$ . D'après la contrainte de non-holonomie présentée dans l'équation (III.1), il y aura deux types de trajectoires autorisées au fauteuil roulant pour faire le déplacement

$$\begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = \lambda \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 0 \end{bmatrix} + \mu \begin{bmatrix} \cos\theta \\ \sin\theta \\ 1 \end{bmatrix} + v \begin{bmatrix} -\sin\theta \\ \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \tag{III.2}$$



Les paramètres  $\lambda$ ,  $\mu$  et  $\nu$  sont des constantes.

Selon l'équation (III.2), on a deux types de déplacements autorisés ou bien faisables. Dans le premier type,  $\Delta\theta$  est égale à zéro (la valeur de  $\theta$  est une constante  $C$ , par conséquent, il y a pas de rotation), donc on aura un déplacement selon l'axe  $x$  d'une valeur  $D1$  ( $D1$  est égale à  $\lambda\cos C$ ) et selon l'axe  $y$  d'une valeur  $D2$  ( $D2$  est égale à  $\lambda\sin C$ ), ce qui implique un déplacement en ligne droite d'une valeur  $D3$  qui est égale à  $\sqrt{(\lambda\sin C)^2 + (\lambda\cos C)^2}$ . Dans le deuxième type  $\Delta\theta$  n'est plus nulle (la valeur de  $\theta$  n'est plus une constante, elle varie durant le déplacement), par conséquent, la base mobile se déplace avec rotation dans le plan  $(x, y)$ .

Il est clair que les deux premiers types de déplacements respectent la contrainte de non-holonomie décrite par l'équation (III.1). Si on prend le premier type de déplacement par exemple, les trois paramètres  $\Delta x$ ,  $\Delta y$  et  $\Delta\theta$  seront remplacées par ses trois valeurs  $\lambda\cos C$ ,  $\lambda\sin C$  et  $C$ , respectivement, et on trouve :  $\sin(C)\cos(C) - \cos(C)\sin(C) = 0$  qui est bien satisfaite. Par contre, le dernier type de déplacement (déplacement en crabe) ne satisfait pas l'équation III.2 ( $\cos(C)\cos(C) + \sin(C)\sin(C) \neq 0$ ).

Comme il est mentionné précédemment, nous souhaitons vérifier l'accessibilité des dispositifs de manœuvre d'un environnement d'une personne assise sur son fauteuil roulant. Le couple humain-dispositif de mobilité se déplace sur le sol avec trois degrés de liberté  $(x, y, \theta)$ : un degré pour la rotation et deux pour la translation. Finalement, nous obtenons les 24 degrés de liberté de notre modèle qui est décrit dans la figure III.16.

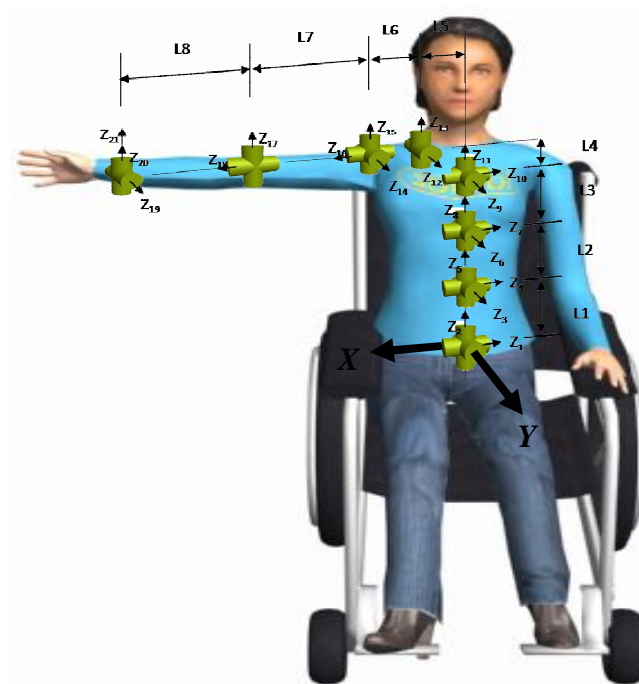


Figure III.16. Couple personne-fauteuil roulant.

### III.4.6. Modèle cinématique direct et inverse d'une chaîne articulaire ouverte

La cinématique directe d'une chaîne articulaire est une méthode classique utilisée beaucoup dans le domaine de la robotique pour déterminer la position et l'orientation actuelle de l'organe terminal (le centre de la paume) à partir des variables articulaires  $q_i$  connus. Cette transformation peut être exprimée par la fonction suivant :

$$X = f(q) \quad (\text{III.3})$$

Avec  $X$  la matrice homogène qui décrit la position et l'orientation désirés,  $q = [q_1 \dots q_n]^T$  vecteurs contenant les variables articulaires et  $f$  la fonction qui décrit la configuration de la chaîne articulaire (Figure III.13). On utilise la matrice de transformation homogènes  $T_i^n$  [84][85][86] qui représente la transformation entre l'articulation  $A_i$  et  $A_n$  qui peut être exprimée comme suit :

$$A_i = A(q_i) \quad (\text{III.4})$$

$$T_i^n = A_i * A_{i+1} \dots A_{n-1} * A_n \quad (\text{III.5})$$

La cinématique inverse est l'opération inverse, elle consiste à déterminer l'ensemble des variables articulaires  $q_i$  qui permettent d'apporter l'organe terminal à la position et l'orientation désirées  $X$ . Ce problème résoud l'inverse de l'expression de la cinématique directe (III.3).

$$q = f^{-1}(X) \quad (\text{III.6})$$

Généralement, ce problème est assez difficile à résoudre car il est considéré comme problème non linéaire. Il existe différents approches pour résoudre ce genre de problème sauf que les résultats ne sont pas toujours satisfaisants surtout si la chaîne articulaire se compose d'un nombre important de DDL. Dans notre travail, nous avons utilisé une nouvelle méthode plus efficace que l'on va détailler dans le chapitre suivant.

### III.4.7. La méthode de représentation de Denavit-Hartenberg

Pour décrire les relations de translation et de rotation entre les liens adjacents de la chaîne cinématique ouverte, la notation DH, Denavit et Hartenberg (1955), a été utilisée en raison de ses qualités dans la manipulation de grands nombres de degrés de liberté. Initialement considérée pour représenter la relation systématique entre deux systèmes de coordonnées, elle n'a été utilisée qu'au début des années 1980 avec l'apparition des moyens informatiques puissants. Cette notation est utilisée pour mettre systématiquement en place un système de coordonnées (body-joint frame) pour chaque maillon de la chaîne articulée en robotique [87].

Nous utiliserons cette méthode pour interpréter mathématiquement la cinématique humaine. La méthode est actuellement utilisée en grande partie dans l'analyse et le contrôle des manipulateurs



robotisés et a donné de bons résultats dans le domaine du mouvement humain, en particulier pour une meilleure compréhension du mouvement mécanique de l'être l'humain [69] [70].

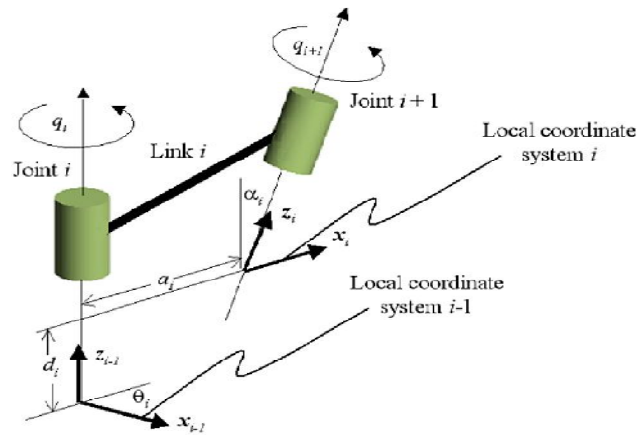


Figure III.17. Système de convention des articulations et ses paramètres.

La méthode DH, est basée sur la caractéristique de la configuration de liaison (i) et en ce qui concerne la liaison (i-1) par une matrice (4x 4) de transformation homogène représentant le système de coordonnées de chaque liaison. On peut obtenir le vecteur global de la position  $f(q)$ , par les multiplications homogènes de la matrice (4x4)  ${}^{i-1}DH_i$  définie par Denvit-Harterberg (DH).

La relation du référentiel  $\{i-1\}$  au référentiel  $\{i\}$  peut être représentée par la matrice de transformations homogènes  ${}^{i-1}DH_i$

$${}^{i-1}DH_i(q_i) = \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\cos\alpha_i \sin\theta_i & \sin\alpha_i \sin\theta_i & a_i \cos\theta_i \\ \sin\theta_i & \cos\alpha_i \cos\theta_i & -\sin\alpha_i \cos\theta_i & a_i \sin\theta_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.7})$$

Dans l'équation (III.5),  $q_i$  est l'angle de l'articulation créée entre les axes deux  $x_{i-1}$  et  $x_i$  pour les articulations rotoïdes,  $d_i$  est la plus courte distance offset entre les deux axis  $x_{i-1}$  et  $x_i$ ,  $a_i$  est la distance entre les deux axis  $z_{i-1}$  et  $z_i$ , et  $\alpha_i$  est l'angle offset entre les axes  $z_{i-1}$  et  $z_i$ .

La matrice  ${}^0DH_i$  représente la  $i^{\text{ème}}$  coordonnée articulaire par rapport au repère global ( $0^{\text{ème}}$ )

$${}^0DH_i = {}^0DH_1(q_1) {}^1DH_2(q_2) \dots {}^{i-1}DH_i(q_i) \quad (\text{III.8})$$

Grace à l'équation (III.9), on peut décrire un vecteur  $V_{R_i}$  fixé au  $i^{\text{ème}}$  repère local, en coordonnées homogènes par rapport au repère  $R_0$  comme suit :

$$V_{R_0} = {}^0DH_n * V_{R_i} \quad (\text{III.9})$$

#### III.4.8. Modélisation de l'environnement

Dans le but de la réhabilitation de l'espace de vie à son occupant, la représentation 3D est très utile car elle nous permet de visualiser l'espace de travail avant et après la modification, repérer les points

3D à évaluer et permet aussi la discussion objective entre l'occupant et la personne chargée de l'adaptation afin d'avoir des meilleurs résultats.

L'évaluation de l'accessibilité se fait généralement dans environnement virtuel 3D, pour cela nous avons besoin de représenter l'habitat à évaluer selon les contraintes physiques de l'occupant. Plusieurs méthodes ont été proposées dans la littérature pour faire la construction des pièces en 2D et en 3D, telles que : la reconstruction directe par système de scanning, la reconstruction par photogrammétrie qui consiste à associer des données 2D pour reconstruire l'information en 3D (Photo modeler), et la reconstruction 3D à partir de logiciel comme 3D Max, Maya, Blender et unity ...etc.

Dans notre travail, nous avons utilisé le logiciel Visual Studio pour créer des environnements d'expérience. Ce logiciel nous a permis de manipuler facilement le design de l'habitat selon les besoins de notre simulation. Contrairement aux évaluations statiques [88][89], dans notre cas les éléments de manœuvre sont tenus en considération comme les portes, fenêtres, tiroirs ... etc.

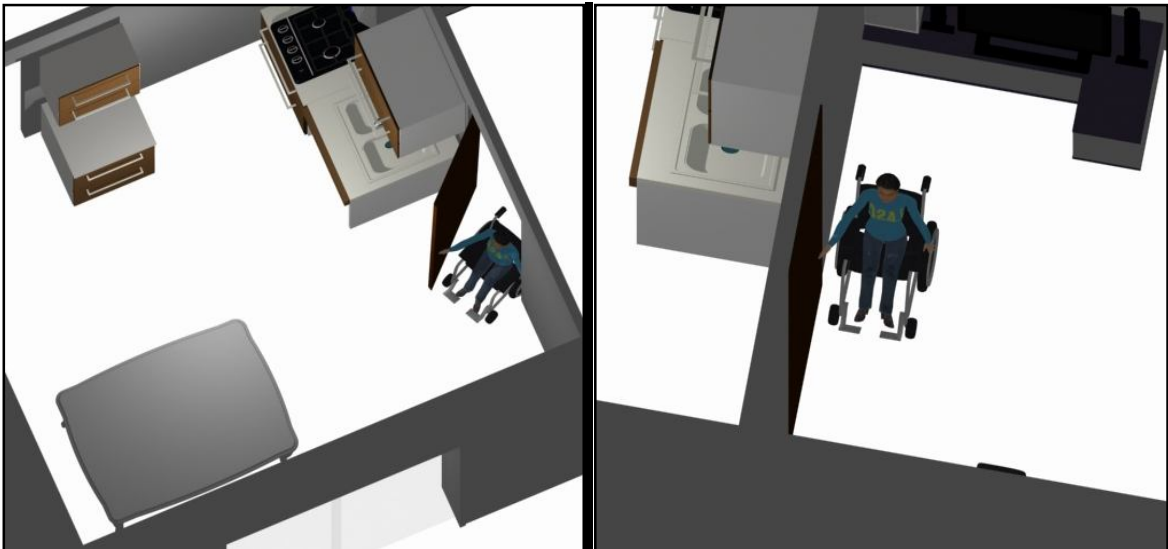


Figure III.18. Exemples d'un environnement d'expérience.

### III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le modèle biomécanique et articulaire des membres supérieurs du corps de la personne ainsi que ses mouvements principaux. La personne utilise le fauteuil roulant comme moyen de déplacement, dans ce cas les membres inférieurs étant inactifs et ne participent pas à la préhension. L'évaluation de l'accessibilité est liée directement aux capacités physiques de la personne. Pour cela, il nous faut dans premier temps comprendre le mécanisme de mouvements des différents segments et déterminer les limites articulaires prises en considération dans l'évaluation. La modélisation 3D de l'environnement d'expérience nous permet de créer un prototype virtuel d'un environnement réel, sur lequel nous allons effectuer nos tests. Dans notre cas, nous avons créé un outil de simulation en utilisant le logiciel Visual Studio C++. La méthodologie du travail et

les résultats de l'interaction de la personne avec son environnement virtuel seront présentés dans les chapitres suivants.

## Chapitre IV : Méthodologie de travail

---

### IV.1. Introduction

L'objectif du présent travail est l'évaluation de l'accessibilité des éléments de manœuvre, de commande, de service ...etc. dans un lieu de vie pour une personne à mobilité réduite assise sur un fauteuil roulant. Notre travail se catégorise dans le domaine d'analyse et de simulation des mouvements humains sauf que dans notre cas, les contraintes du travail mis en jeu sont différentes. Les contraintes dynamiques telles que : la dépense d'énergie musculaire, les charges nécessaires à chaque articulation ...etc. qui ont été utilisées pour prédire des mouvements réels ne seront pas prises en considération. Généralement, la personne exécute la configuration (fauteuil roulant + partie haute) qui lui apparaît la plus confortable. Il suffit que les configurations résultantes soient faisables (faisables = respectent les contraintes de la non-holonomie qui sont liées à la base mobile et les limites articulaires qui sont liées au structure articulée de la personne).

Notre problématique est de générer des postures (configurations) faisables du couple personne-fauteuil roulant qui permettent à la personne de manipuler/atteindre un élément de manœuvres/commande/services (porte, fenêtre, tiroir, interrupteur ... etc.) dans un espace de vie individuel. En général, les éléments de manœuvre/commande nécessitent une manœuvre du fauteuil roulant, un mouvement des membres supérieurs du corps ou bien les deux simultanément. Dans notre simulation, toutes les combinaisons de mouvements (personne-fauteuil) sont envisagées, le tableau 1 montre les différents types de mouvements.

Exemples de mouvements	Main seule	Main et Fauteuil	Mouvement de la main	
			Linéaire	Non linéaire
-Ouverture/fermeture d'une porte coulissante. -Ouverture/fermeture d'une fenêtre coulissante.	Oui (prendre la poignée)	Oui (déplacer la porte)	Oui	Non
-Ouverture/fermeture d'une fenêtre. -Ouverture/fermeture d'une porte.	Oui (prendre la poignée)	Oui (déplacer la porte)	Non	Oui
-Prendre/déposer un objet ; un téléphone etc.	Oui (prendre/déposer l'objet)	Oui (se déplacer)	Oui	Oui
Ouverture/fermeture d'un tiroir.	Oui (tirer/repousser le tiroir)	Non	Oui	Non
-Brancher/Débrancher des prises d'alimentation ou de téléphones.	Oui (brancher/débrancher la prise)	Non	Oui	Non
-Appuyer sur l'interrupteur de commande d'éclairage.	Oui (appuyer/lâcher le doigt)	Non	Oui	Non

Tableau IV.1. Type des mouvements personne-fauteuil roulant.

Afin que nous puissions définir le contexte de notre travail ainsi que les contraintes prises en considération, nous allons montrer un exemple d'une opération simple effectuée quotidiennement par la personne (voir figure IV.1). Pour exécuter cette opération, la personne doit être rapprochée de l'objet pour le prendre de la première surface puis se déplace à l'aide du fauteuil roulant pour le déposer dans la deuxième surface. Dans la première posture, la personne doit exécuter une configuration (fauteuil + la partie haute du corps) faisable qui lui permet de saisir l'objet, ensuite

(posture 2) à partir de cette configuration, il doit exécuter une autre qui lui permet de déposer l'objet sur l'autre surface de la table. Pour passer de la première posture à la deuxième, la personne doit effectuer une trajectoire de la main et une autre par le fauteuil roulant. Ces deux trajectoires doivent normalement respecter les limites de la chaîne articulaire et la non-holonomie du fauteuil roulant pour que le mouvement soit exécutable réellement. Dans ce cas, il nous faut générer une configuration (personne+fauteuil roulant, si elle existe) permettant à la personne de prendre l'objet et qu'elle soit faisable, puis à partir de celle-ci générer une autre (si elle existe) pour déposer l'objet, à condition qu'on vérifie (sans calcul) l'existence d'une trajectoire exécutable par la main/fauteuil roulant. Peu importe sa forme (car on est sûr et certain que la personne choisira la trajectoire lui apparaît la plus adéquate et confortable), mais qu'elle permette à la personne de déplacer l'objet/fauteuil roulant de la posture initiale jusqu'à la posture finale. Donc, nous considérons que si la configuration/translation existent (respectent les contraintes), elles sont exécutables physiquement par la personne.

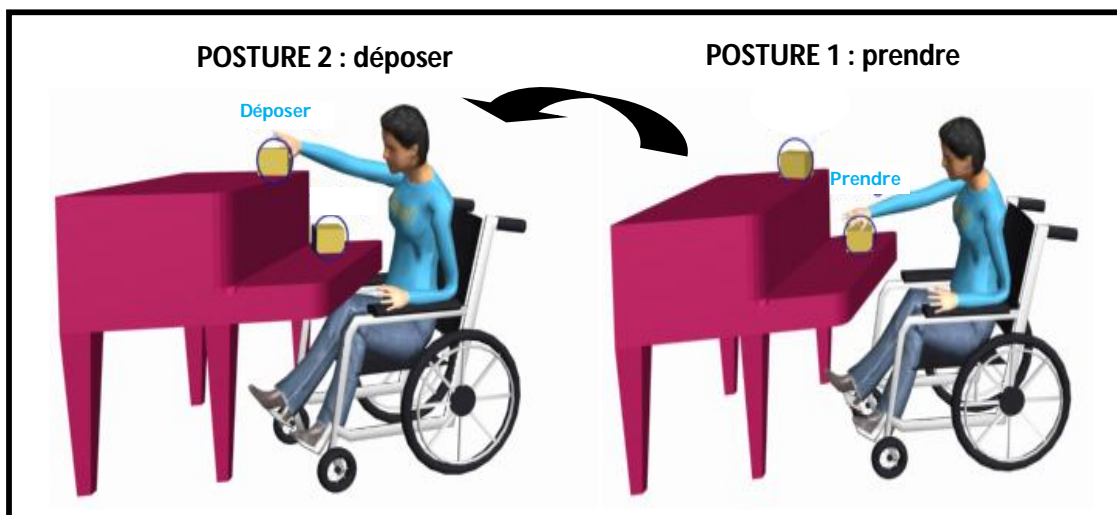


Figure IV.1. Prendre/déposer un objet.

En revanche, les caractéristiques particulières comme la minimisation de l'énergie ou le confort du mouvement ne sont pas prises en considération. L'intérêt principal de notre approche est d'analyser en fonction de la simulation les différentes solutions envisageables pour respecter l'exigence d'accessibilité (par exemple : un espace est laissé disponible pour la manœuvre du fauteuil devant la porte, la poignée de porte est atteignable et facilement utilisable par la personne en fauteuil ...etc.) en évaluant les différentes conséquences en termes de faisabilité.

Selon l'exemple présenté dans la figure IV.1 deux problèmes auront été abordés lors de notre étude d'évaluation de l'accessibilité: l'inverse cinématique des membres supérieures (manipulation) et la planification de trajectoire du fauteuil roulant (navigation). Dans ce qui suit nous allons présenter les approches utilisées pour résoudre l'inverse cinématique d'une chaîne articulée ayant plusieurs degrés de liberté, celles utilisées pour la planification de trajectoire d'une base mobile non-holonyme et notre nouvelle approche proposée.

## IV. 2. Problème de la cinématique inverse

Le problème de cinématique inverse revient à trouver la configuration des articulations de squelette permettant de positionner une articulation selon une orientation et/ou une translation définie. Pour cela, on a besoin de résoudre l'équation :

$$[\theta] = f^{-1}([X]) \quad \text{IV.1}$$

Où  $X = [x, y, z]$  est la position désirée de l'extrémité (tâche), attachée à l'espace du travail  $\{n\}$  et  $f^{-1}$  est la fonction qui calcule le vecteur de configuration  $\theta = [\theta_1 \dots \theta_n]^T \in R^n$  compte tenu de  $X$ . Le but de l'inverse cinématique est de calculer le vecteur  $\theta$  pour que l'extrémité de la chaîne articulaire soit à la position souhaitée  $X$ , voir la figure IV.2.

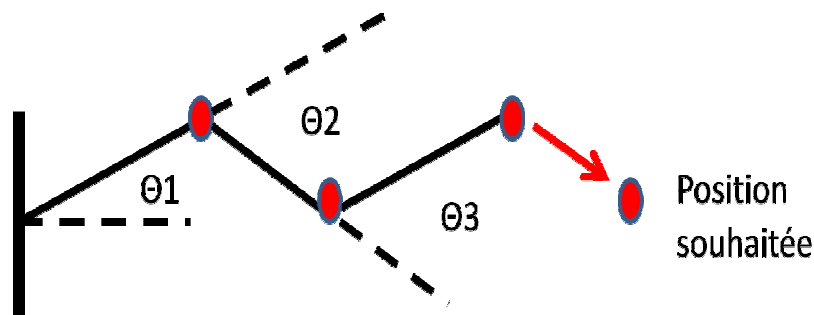


Figure IV.2. Cinématique inverse.

### IV.2.1. Traitement de multiples contraintes et résolution de problème de conflit

Le contrôle d'une chaîne articulaire par l'attribution d'une seule tâche n'est pas pratique. De l'autre côté, l'utilisation de plusieurs tâches simultanément pourra créer un conflit. Parmi les méthodes utilisées pour générer ce conflit, on trouve celles proposées par [90][91][92]. Ces techniques formulent le problème comme un problème d'optimisation multicritères où la somme des différentes tâches est satisfaite. Des travaux plus récents s'intéressent à l'entremêlement de plusieurs niveaux de contraintes [93][94][95] à l'aide de niveaux de priorité. Cette dernière stratégie se base sur la priorité des tâches selon un ordre, la tâche la plus prioritaire est satisfaite en premier (voir Figure IV.3).

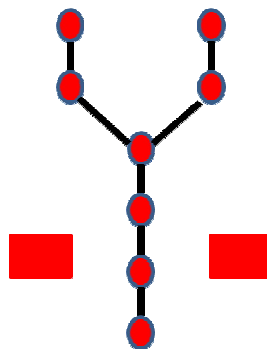


Figure IV.3. Configurations avec deux cibles.

## IV.2.2. Traitement de problèmes sous-contraintes et les problèmes sur contraintes

L'inverse cinématique est une technique généralement utilisée pour l'animation d'un personnage qui est représenté par une hiérarchie d'articulations entre lesquelles les distances sont fixes.

### IV.2.2.1. La redondance

On dit qu'une chaîne articulée est redondante lorsqu'il existe une ou une infinité de solutions du problème du modèle cinématique inverse. Ce problème est appelé sous-contraint ou redondant, dont le nombre des contraintes est inférieur au nombre de degrés de liberté. Cette redondance est dépendante de la tâche attribuée, lorsque cette dernière nécessite moins de degrés de liberté que ceux disponibles sur la structure.

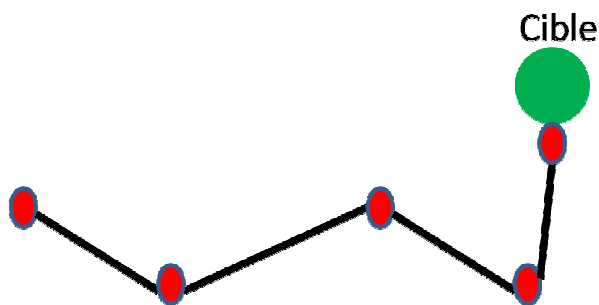


Figure IV.4. Problème à une infinité de solutions.

### IV.2.2.2. N'a pas de solution exacte

Ce problème se pose lorsque la tâche objective ne peut pas se réaliser à cause d'un conflit non satisfait, ce problème est dit sur contraint.

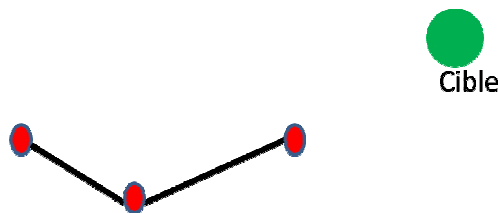


Figure IV.5. Problème n'a pas de solution (cible inatteignable).

### IV.2.2.3. Une solution unique

Généralement, ce problème ne se pose pas et n'existe pas souvent en pratique.

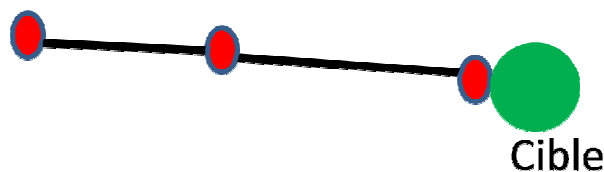


Figure IV.6. Problème à une seule solution.



### **IV.2.3. Limites angulaires**

Il est obligatoire de tenir en compte des limites angulaires des articulations pour avoir des postures similaires à celles de l'être humain. Contrairement au domaine de la robotique où l'atteinte des limites articulaires mécaniques n'est pas situable. Chez l'être humain, les postures de repos des différentes parties du corps sont atteintes aux limites, comme par exemple : le genou de l'homme en position debout. Renforcer les limites articulaires est un facteur obligatoire dans n'importe quelle méthode de cinématique inverse avant de l'admettre et d'en avoir tenu compte.

### **IV.2.4 Obstacles**

Comme dans les environnements réels, les environnements virtuels aussi contiennent des obstacles que la personne doit éviter pour réussir son déplacement. Dans la cinématique inverse, l'évitement d'obstacle est un problème très connu. La cinématique inverse doit prendre en considération le problème d'évitement de collision lors de la génération des postures de mouvements pour que les mouvements soient faisables.

L'une des solutions proposées pour résoudre ce genre de problème est l'utilisation d'un ordre de priorités au niveau des articulations. La priorité la plus élevée sera attribuée à l'extrémité de la chaîne articulaire, alors que la moins élevée sera attribuée à l'articulation la plus proche de l'obstacle [96][97]. L'inconvénient de cette technique est le temps de calcul très élevé. Pour cela, elle n'est pas utilisable dans des applications d'animation en temps réel [98].

## **IV.3. Méthodes de résolution de l'inverse cinématique**

Après une brève description des principaux problèmes de l'inverse cinématique, nous allons présenter dans cette section les principales méthodes mathématiques proposées dans la littérature pour résoudre ces problèmes.

### **IV.3.1. Méthodes analytiques**

Les méthodes analytiques sont des méthodes très rapides. Elles sont applicables seulement lorsque la chaîne cinématique contient un nombre réduit de degrés de liberté [99][100]. L'idée consiste à modéliser le système articulé avec un ensemble d'équations non linéaires et la résolution peut être trouvée par la résolution de ces équations. Dans notre cas le nombre de degrés de liberté de notre système sont élevés ce qui rend cette méthode inapplicable.

Si on prend à titre d'exemple le domaine d'animation des personnages virtuels, on trouve la méthode proposée par Korein [101], pour contrôler la position du bras en utilisant quatre degrés de liberté et en utilisant sept degrés de liberté pour contrôler sa position/orientation. On trouve aussi la méthode de la cinématique inverse séquentielle "Sequential Inverse Kinematics (SIK)" d'Unzueta [102], dont l'auteur a essayé de reconstruire la posture d'un personnage virtuel en temps réel par un nombre réduit d'articulations.

### **IV.3.2. Méthodes de linéarisation**

Dans cette classe de solveurs, le problème se formule comme un problème de linéarisation. Il consiste à linéariser les équations non linéaires afin de calculer l'inverse de la matrice Jacobéenne qui est en général singulière. Dans les différentes approches proposées, les chercheurs ont essayé d'approcher la solution de l'inverse de la matrice Jacobéenne par des incréments successifs en considérant que le système est linéaire autour du point de fonctionnement.

La méthode la plus connue est celle proposée par Whitney [103]. Cette approche consiste à calculer la configuration de l'extrémité qui est proche de la cible, en ajoutant la variation de vitesse de chaque jointure à la configuration initiale. Buss [15], a introduit une forme particulière pour calculer l'inverse de la matrice Jacobéenne dite : pseudo-inverse. Le calcul ici se fait par un algorithme de décomposition en valeurs singulières. L'avantage principal de cette méthode est qu'elle fournit une solution de norme minimale lorsqu'elle existe, sinon une solution optimale au sens des moindres carrés. L'autre solution est de transposer la matrice au lieu de l'inverser, l'inconvénient de cette approche est que les résultats fournis sont moins réalistes [104].

### **IV.3.3. Méthodes d'optimisation**

Les méthodes d'optimisation constituent la troisième classe de solveurs de problème de la cinématique inverse, sont les plus adaptées lorsque le système articulé possède de nombreux degrés de liberté. Le problème se formule comme un problème de minimisation d'une ou plusieurs fonctions de coût. Plusieurs approches ont été développées dans la littérature telles que : la descente de gradient avec des adaptations particulières [91][92]. Ces algorithmes sont efficaces mais ils amènent souvent à des minimaux locaux. Pour diminuer le risque de tomber dans un minimum local, les chercheurs ont mis au point de nouvelles méthodes telles que : les méthodes quasi-newton du type BFGS qui résolvent le problème en approximant le calcul de l'inverse cinématique, l'algorithme Cyclique Coordinate Descent (CCD) [105] qui se base sur un calcul incrémental des variables de l'extrémité du système articulé vers la base en minimisant l'erreur entre le point (et l'orientation) à atteindre et le point (et l'orientation) réellement atteint. Cependant, le problème du minimum local peut survenir si les variables articulaires sont limitées, se fait rend la convergence autour du point cible lente et augmente ainsi le risque de tomber dans un minimal local.

## **IV. 4. Planification de trajectoire d'une base mobile**

La planification de trajectoires d'une base mobile dans un environnement connu, a déjà fait l'objet de plusieurs études. Cette tâche est nécessaire pour assurer le déplacement de la base mobile d'un point initial à un point final. Dans le domaine scientifique, pas mal des algorithmes ont été proposés pour résoudre ce problème.

### **IV.4.1. Méthode par décomposition de l'environnement en cellule**

Dans cette catégorie, on trouve la méthode de [106], cette méthode consiste à décomposer l'environnement d'un robot à des cellules pour créer des régions connexes adjacentes. Ce qui permet

de travailler sur la discrétisation de l'environnement pour calculer la trajectoire de robot. Il existe plusieurs techniques qui utilisent cette discrétisation telle que : la partition de Voronoï [107], les graphes de visibilité [108], le chemin d'un graphe [109], la trajectoire optimale [110], les trajectoires dynamiques au fur et à mesure de l'évolution de l'environnement [111] ... etc. Les avantages de ces algorithmes sont :

- Faciles à implémenter.
- Le choix réduit des possibilités de déplacement créées par les grilles.

Cependant, dans l'application réelle cette technique n'est pas applicable puisqu'elle ne considère pas les contraintes cinématiques du robot (accélération, vitesse, vitesse angulaire maximale, encombrement, ...etc.), ce qui permet au planificateur de trouver des trajectoires que ne seront pas exécutable.

#### **IV.4.2. La méthode de champ potentiel**

Cette méthode [112], considère le robot ou la base mobile comme un objet soumis à un champ de forces répulsives et attractives. La trajectoire dans ce cas était donnée par un vecteur contenant les points de déplacement dans l'environnement. Un obstacle génère un champ de potentiel répulsif tandis que l'objectif à atteindre génère un champ de potentiel attractif. L'avantage de cette méthode réside dans les applications en temps réel parce que l'algorithme est réactif. Les deux inconvénients primordiaux sont : le risque élevé de tomber dans les minima locaux à cause de la convexité de l'environnement et le problème d'oscillation qui ne peut donc pas tenir en compte les contraintes du robot.

#### **IV.4.3. La méthode de la fenêtre dynamique**

Cette méthode [113], permet de trouver la commande optimale à envoyer au robot en minimisant une fonction de coût (minimisation du temps de parcours, de l'énergie dépensée, maximisation de la vitesse ...etc.) après un calcul des vitesses du robot pour que celui-ci puisse éviter les obstacles. Parmi les défauts de cette technique est le manque de la flexibilité.

#### **IV.4.4. La méthode de la bande élastique**

Une bande élastique relie le robot et le point objectif, elle se déforme à chaque obstacle et elle permet de créer une trajectoire sans obstacle pour le robot [114].

#### **IV.4.5. Méthodes basées sur la logique floue**

Les méthodes de planification basant sur la logique floue [115] utilisent des variables linguistiques. Ces variables sont inspirées des grandeurs physiques par exemple : une distance ou un obstacle peut s'exprimer par un variable linguistique petit, moyen ou grand. Dans ce cas, une seule variable physique peut avoir plusieurs valeurs à la fois par exemple : la distance peut être à la fois petite et grande (30% petite et 70% grande).

La commande dans ce cas est exprimée par des variables linguistiques qui vont être reconverties en grandeurs physiques lors de la défuzzification. Ici le raisonnement ne sera pas fait au niveau des grandeurs physiques, ainsi on ne dit pas que la distance a une certaine valeur mais à l'image de raisonnement humain que l'action se fait au fur et à mesure de la situation actuelle par exemple : je réduis la vitesse si la distance par rapport à l'obstacle est toute petite. Les trajectoires calculées par ces méthodes sont plus progressives.

#### **IV.4.6. Planification par la méthode de juxtaposition de splines polynomiales et la méthode de DKP : Deterministic Kinodynamic Planning**

La trajectoire dans la méthode de juxtaposition est générée au bout des splines ou polynômes par l'algorithme de Defoort [116][117]. Le bout de trajectoire est paramétré par des polynômes de troisième degré dont les coefficients des degrés zéro représentent la position et la vitesse initiale et le reste des coefficients de deuxième et troisième degré du polynôme sont optimisées par certains algorithmes tels que celui proposé en [118]. En revanche, l'optimisation des paramètres de polynôme permet de choisir selon le critère imposé la trajectoire optimale.

La méthode de DKP est assez complexe [119], elle peut être décomposée en deux parties. La première partie sert à déterminer localement les bouts de trajectoire par la juxtaposition. Une fois terminé, on obtiendra des solutions locales sous forme d'un arbre. Dans la deuxième partie, on va choisir les bouts de trajectoire optimale à suivre par le robot et qui résolvent le problème.

L'avantage de cette technique est qu'elle permet de prendre en considération toutes les contraintes cinématiques du robot, ainsi que la grande diversité des bouts de polynômes qui permet de trouver une solution même dans les zones les plus complexes.

#### **IV.5. Notre approche**

Notre approche consiste à évaluer l'accessibilité d'un élément de manœuvre pour une personne en fauteuil roulant qui souffre (ou ne souffre pas) des dégradations au niveau de ses articulations. Les chercheurs qui ont proposé des approches théoriques [120][121][122][123] sur la conception universelle de l'environnement pour des personnes à mobilité réduite (UD : universal design), ont résumé les problèmes rencontrés à des problèmes liés au choix du fauteuil roulant, à la conception de l'environnement et à la capacité résidentielle de la personne elle-même.

Selon les approches théoriques, le mauvais choix du fauteuil (l'aide technique utilisée) permet de créer des nouvelles contraintes au niveau des mouvements de la personne et de nouveaux obstacles au niveau de la mobilité du fauteuil. La conception inadaptée de l'environnement tel que : la dégradation au niveau du sol et ses conséquences sur l'utilisation de l'aide technique à la mobilité, les mauvaises dimensions de l'espace de manœuvre devant les éléments d'accès et de commande ...etc. diminuent l'autonomie de la personne. Les modifications ajoutées à l'aide technique par les utilisateurs elles-mêmes permettent à décompenser les déficiences articulaires. Ces améliorations (du point de vue

utilisateurs) sont parfois liées au fauteuil roulant (par exemple : ajouter un coussin sur le siège pour atteindre certains points) et des fois liées à l'environnement [60][59].

**Le principe général de notre approche consiste à vérifier dans un lieu 3D virtuel, l'existence des postures/configurations (personne + fauteuil roulant) qui peuvent assurer une manipulation (ouvrir/franchir/fermer) simple d'un élément de manœuvre (on prend à titre d'exemple: les portes pivotantes).**

#### IV.5.1. Algorithme

##### A. Aperçu

Notre algorithme est constitué de plusieurs parties qui sont présentées dans la figure IV.7. Afin qu'on puisse simuler l'action de la manipulation d'un objet dans un environnement virtuel 3D, nous avons intégré la solution de l'inverse cinématique directement au calcul de la trajectoire de la base mobile (fauteuil roulant). Avant d'entamer les détails du principe de fonctionnement de notre approche, nous allons considérer les points suivants :

- 21 degrés de liberté décrivant la structure articulée de la personne (du bas de la colonne vertébrale jusqu'à la main). Chaque degré de liberté est contraint par des limites correspondantes aux débattements maximum des articulations (voir sommaire Tableau A.1).

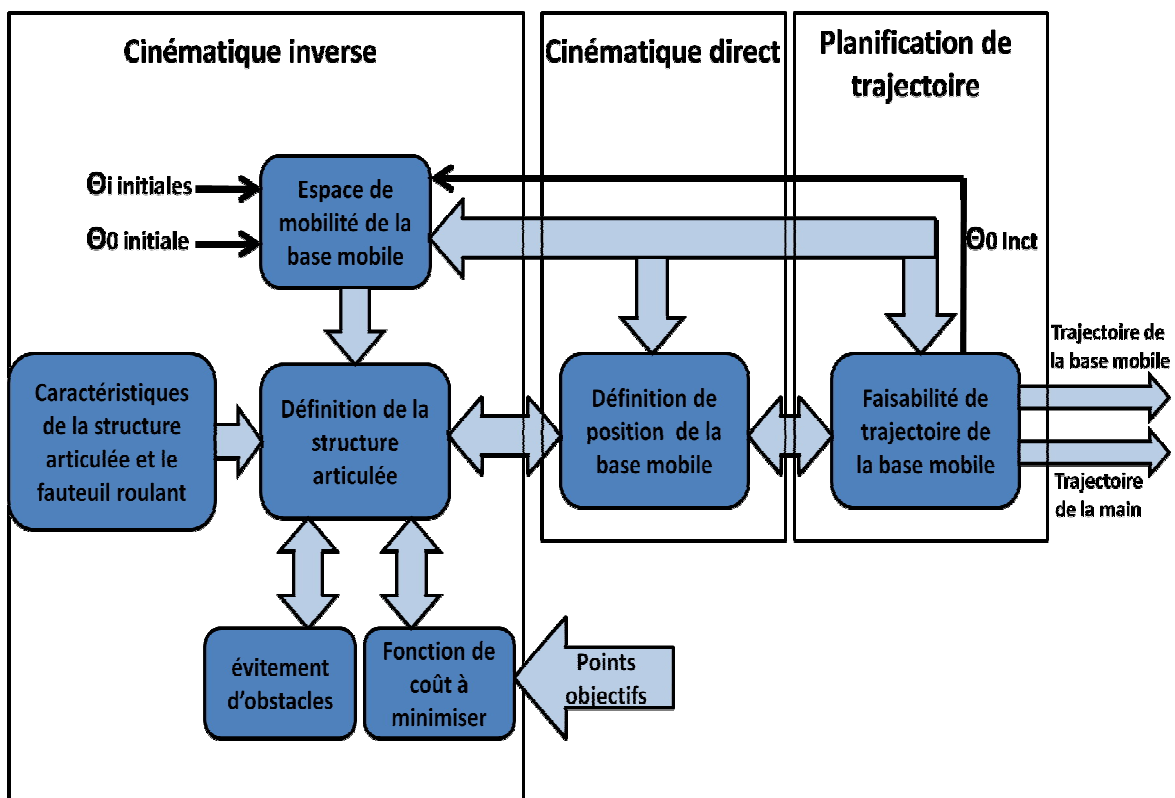


Figure IV. 7. Aperçu de différentes parties de l'algorithme proposé.

- 3 degrés de liberté pour le déplacement du couple personne-fauteuil roulant parallèlement au sol. Le déplacement est contraint par la non-holonomie (voir l'équation III.1).
- Les caractéristiques particulières comme le confort du mouvement et la minimisation de l'énergie musculaire ...etc. ne sont pas prises en considération. Nous considérons que si la configuration du couple personne-fauteuil existe, elle est exécutable par la personne.
- La précision des calculs n'est pas primordiale puisque nous considérons que la compliance du corps humain peut compenser ces erreurs.
- L'optimisation de trajectoire du fauteuil roulant n'est pas considérée, il nous suffit de vérifier son existence, puisque la personne elle-même peut choisir la trajectoire que lui apparaît la plus confortable. L'optimisation de trajectoire n'est pas prise en considération puisqu'elle limite le nombre des solutions existantes et prend un temps de calcul important, alors que notre objectif est de vérifier la faisabilité de l'opération si elle existe quelle que soit la forme de la trajectoire.

### **B. Planification et Cinématique Inverse Intégrées**

L'inverse cinématique est définie en minimisant l'erreur entre la position et l'orientation du point cible et la position et l'orientation de la main de la personne en prenant en considération l'espace de mobilité du fauteuil roulant. Le principe consiste à atteindre un objet dans une zone donnée en considérant l'encombrement du fauteuil roulant et l'espace de mobilité  $C(x, y, z)$  (voir l'équation IV.2).

$$f([\theta]) = [X] - C(x, y, z) \quad \text{IV.2}$$

La résolution de l'équation IV.2 se fait en utilisant le principe de [124], dont les valeurs des articulations de la structure articulée de la personne  $\theta_i$  sont définies par un incrément prédéfini  $Inc(i)$ , à partir de la base vers l'extrémité. Le calcul des variables  $\theta_i$  se fait en minimisant la fonction de coût  $\varepsilon$  qui est l'erreur entre la main de la personne et la surface correspond à l'espace de mobilité plus le point cible.

$$\varepsilon = f([\theta]) - [X] + C(x, y, z) \quad \text{IV.3}$$

Le problème de générer des postures faisables et sans collision avec l'environnement est fortement présent dans les algorithmes de planification de trajectoires d'un manipulateur mobile [125][126][127]. Généralement, le travail sur les deux opérations (la trajectoire de la main et de la base mobile) séparément ou l'un après l'autre baisse considérablement le rendement des méthodes de planification de trajectoires dans ce cas. Le fait d'introduire l'espace de mobilité dans le calcul de l'inverse cinématique (équation IV.3) est très avantageux, il nous permet à la fois de reproduire des postures sans collision, diminue considérablement le temps de calcul et offre une trajectoire de la main totalement faisable.

La définition de l'orientation du fauteuil rouant (la valeur de  $\theta_0$ ) ne subit pas le même principe de calcul des valeurs  $\theta_i$  de la structure articulée. Nous proposons un nouvel incrément  $Inc0$ , dont la valeur est définie par l'équation suivante:

$$Inc0 = Dr1 * \theta_{0act} + Dr2 * \min\{|\theta_{0act} - \{\theta_{0act}(C_{0act}) \cap \{\theta_0(C_0) \dots \theta_0(C_{i-1}) \dots \theta_0(C_m)\}\}|\} \quad IV.4$$

Selon l'équation IV.4 la valeur du  $Inc0$  est égale à la différence minimale entre la valeur actuelle de  $\theta_0$  ( $\theta_{0act}$ ) et la valeur de  $\theta_0$  de l'espace de mobilité qui possède une intersection avec l'espace de mobilité actuel (voir paragraphe IV. 5.2). Le fait de tenir compte de l'intersection entre deux espaces de mobilité successifs contenant deux positions successives du fauteuil roulant, nous permet de créer un espace de mobilité qui referme au moins une trajectoire faisable de fauteuil roulant [106]. Comme nous avons mentionné plus haut, la trajectoire est censée être choisie par la personne, dans ce cas l'optimalité et la forme de trajectoire n'auront pas été envisagés dans notre simulation.

La position du fauteuil roulant dans l'espace de mobilité est calculée directement par la cinématique directe une fois que les  $\theta_i$  sont définis. Le problème rencontré à ce stade est la nécessité d'avoir la position et l'orientation exactes de la main dans l'espace  $(x, y, z)$  afin qu'on puisse déterminer la position exacte du fauteuil roulant dans l'espace de mobilité. Par contre, pour déterminer la position et l'orientation de la main, il faut que l'erreur  $\epsilon$  (équation IV.3) soit égale à 0, ce qui est généralement difficile avec une structure articulée redondante possédant plusieurs degrés de liberté. Il est supposé dans notre simulation que l'erreur  $\epsilon$  acceptée doit être inférieure ou égale à 0.02 centimètres, qui est une valeur très petite par rapport à l'échelle humaine et facilement compensable dans le cas réel. Pour résoudre ce problème, on considère que l'erreur soit égale à 0 centimètre si elle est inférieure ou égale à 0.02 centimètres en simulation, de ce fait, on sera capable de localiser les coordonnées  $(x, y, z)$  de la main et les coordonnées  $(x, y, z)$  du fauteuil roulant dans l'espace de mobilité par la cinématique directe. Cette approche est adaptable à n'importe quelle structure articulaire montée sur une base mobile.

---

### Procédure : Planification et Cinématique Inverse Intégrés

---

**Données:** Structure articulée, Espaces de mobilité  $C(i)$ , Fauteuil roulant.

**1. Initialisation aléatoire:** Variables articulaires  $\theta_i$ , compteur:  $Cter1, Cter2, Hn, Hi$ .

**2. Faire** pour chaque point  $Hi$

**2.1.**  $Cter1 = Cter1 + 1$

**2.2. Définir** la cinématique inverse par rapport au point de manipulation  $Hi$ .

**2.3. Si** ( $\epsilon > 0.02$ )

Donc on écrit que le point de manipulation  $Hi$  n'est atteignable et on passe au point suivant

$Hi+1$  (passer à ligne **2.1**)

**2.4. Sinon** ( $\epsilon \leq 0.02$ , le point de manipulation  $Hi$  est atteignable)

---

---

**2.4.1. Définir** la configuration du fauteuil roulant

**2.4.2. If** ( $C(i - 1) \cap C(i) = \emptyset$ )

Donc écrire il n'existe pas une région commune, il n'y a pas une trajectoire faisable, passer point suivant (passer à la ligne **2.1**).

**2.4.3. Sinon** ( $C(i - 1) \cap C(i) \neq \emptyset$ )

$Cter2 = Cter2 + 1$ .

**2.4.3.1. Si** ( $Cter1 > Hn$ )

Passer au point de manipulation suivant (passer à la ligne **2.1**)

**2.4.3.2. sinon** ( $Cter1 \leq Hn$ )

**2.4.3.2.1. Si** ( $Hn = Cter2$ )

L'élément de manœuvre est accessible, sortir du fichier

**2.4.3.2.2. Si** ( $Hn \neq Cter2$ )

L'élément de manœuvre n'est pas accessible, sortir du fichier

Tant que ( $Cter2 \leq Hn$ )

---

$Hn$  représente vecteur qui contient les points de manipulation à atteindre (points de contact) par la personne,  $Cter1$  est un compteur des points testés,  $Cter2$  compteur des points accessibles.

---

La posture (personne+fauteuil roulant) est retenue une fois que le point de contact est atteignable et que la configuration (position+orientation) + déplacement du fauteuil dans l'espace de mobilité admissible  $C$  sont exécutables. Selon les opérations de l'algorithme, l'élément de manœuvre est considéré accessible si la personne peut atteindre tous les points de contact  $Hi$  qui créent la trajectoire de manipulation de l'élément de manœuvre. En fait, les points de manipulation (contact) de ces éléments sont prédéfinis et ils représentent le contact  $(x,y,z)$  de la main avec l'élément lors la manipulation. La trajectoire résultante après une manipulation au niveau des points de contact se divise en un ensemble des points adjacents séparés par un pas préfini ( $P_{initial} \dots P_{final}$ ). Pratiquement, pour réussir la manipulation d'un élément de manœuvre, tous les points de contact doivent être atteignables. Cette vérification se fait par la condition  $Cter2 = Hn$ . Une fois cette égalité vérifiée (c-à-d le nombre des points de contact atteignables  $Cter2$  est égal au nombre des points de contact prédéfinis  $Hn$ ) on dit que l'élément est accessible sinon l'élément n'est pas accessible. Cependant, il est possible dans certains cas de considérer que l'élément est accessible malgré que l'égalité ( $Cter2 = Hn$ ), ne soit pas vérifiée, puisque la distance qui sépare les points de contact est de l'ordre de quelques unités (dans le cas réel, l'ordre est de quelques centimètres). En conséquence, si un point de contact inatteignable se trouve entre deux points atteignables, on peut la considérer comme point atteignable.

Si on prend la porte pivotante comme un titre d'exemple d'un élément de manœuvre, on constate que la trajectoire créée au niveau de la poignée par les points de contact est un demi-cercle, pour ouvrir/traverser/fermer la porte, la personne doit prendre la poignée et essayer de tourner la porte avec une manœuvre simultanée du fauteuil roulant, cette action peut se diviser en trois sous opérations



principales. Le contact avec la porte peut se faire en choisissant la bonne posture de structure articulée (cinématique inverse), la bonne configuration et la bonne manœuvre du fauteuil roulant. Ces trois opérations principales constituent notre algorithme.

*Opération 1 : Inverse cinématique*

C'est la première étape dans notre algorithme, dans cette étape on détermine la posture de la partie haute du corps en utilisant le principe de [124], dont le but est de déterminer l'inverse cinématique en tenant en compte de l'évitement d'obstacles de la main en une seule opération. La cinématique inverse se calcule par rapport l'espace de mobilité qui contient le point cible au lieu du point cible lui-même. Chaque point de contact correspond à une position/orientation de l'élément de manœuvre, les postures sont calculées successivement selon l'ordre normal proposé des points ( $P_{initial} \dots P_{final}$ ).

*Opération 2 : Configuration du fauteuil roulant*

La configuration du fauteuil roulant se détermine par la position et l'orientation de la main. Dans cette étape, on tient compte de la position du fauteuil. Comme nous avons expliqué auparavant, la position du fauteuil se calcule par rapport à la position  $(x, y, z)$  et à l'orientation  $(\theta_{21})$  de la main par la cinématique directe.

*Opération 3 : Déplacement du fauteuil roulant (trajectoire)*

Notre étude est orientée spécifiquement vers les personnes qui utilisent le fauteuil roulant comme moyen de déplacement et dont l'objectif est d'évaluer avec exactitude l'accessibilité des éléments manipulables dans un lieu de vie personnel. Ceci en parcourant toutes les solutions possibles et en considérant les facteurs suivants : l'espace de manœuvre admissible, la conception de l'aide technique à la mobilité utilisée, la conception et le type de l'élément de manœuvre.

Notre approche contraire au domaine de la robotique qui utilise généralement des **commandes** prédéfinies pour planifier et optimiser la trajectoire du robot. Dans notre application, on ne tient compte que de la faisabilité de la trajectoire en tenant en compte des contraintes de non-holonomie et d'évitement d'obstacles. Pour avoir une trajectoire faisable entre deux configurations successives du fauteuil roulant, il faut que la trajectoire soit totalement dans l'espace de mobilité admissible et que les deux configurations du fauteuil appartiennent au même espace de mobilité  $C$ .

La propriété [106] proposée par Latombe (1991) dit : s'il y a deux configurations d'une base mobile appartenant au même domaine connecté alors il existe au moins une trajectoire faisable qui appartient à ce domaine reliant ces deux configurations. En utilisant cette propriété on peut vérifier successivement la faisabilité du déplacement du fauteuil dans l'espace de mobilité. Le choix de cette méthode vient du caractère de l'être humain qui cherche généralement le confort lorsqu'il fait ses mouvements et aussi d'avoir des résultats universels en utilisant des configurations qui ne sont pas prédéfinies.

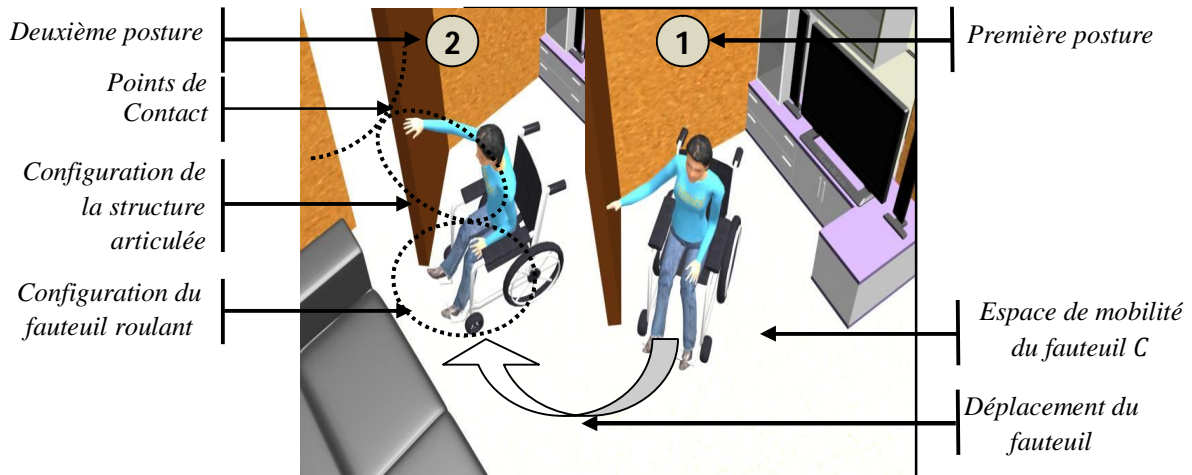


Figure IV.8. Exemple de fermeture d'une porte pivotante.

## IV. 5.2. Calcul de l'espace de mobilité admissible (polygones de configurations)

### IV.5.2.1. Introduction

Il existe plusieurs méthodes pour faire la détection des collisions dans un environnement, mais généralement la plus utilisée est la somme et la différence de Minkowski. Grâce à cette méthode, nous allons calculer les polygones de configuration qui correspondent à l'espace de mobilité admissible. Nous nous intéressons au calcul des polygones de configurations pour un fauteuil roulant que nous le considérons être rectangulaire (mais tout autre type de polygone peut être utilisé). Le calcul sera fait avec plusieurs dimensions du fauteuil selon les besoins de l'expérience. Contrairement aux environnements statiques pour lesquels le polygone enveloppe (voir la figure IV.10) est fixe, notre environnement du travail sera dynamique à cause de la présence des éléments de manœuvre dont les mouvements affectent la forme globale du polygone enveloppe. Le modèle mathématique du fauteuil roulant est défini par trois degrés de liberté  $(x, y, \theta_0)$  (voir la figure III.14), qui déterminent la configuration de l'espace de mobilité. Le  $z$  n'a aucune influence sur la forme de l'espace calculé, il est fixe selon le modèle de fauteuil roulant utilisé, par contre il a un grand effet sur l'évaluation de l'accessibilité.

### IV.5.2.2. La somme de Minkowski

La somme de Minkowski est utilisée pour plusieurs applications telles que : planification de trajectoire d'un robot mobile, design par ordinateur assisté ...etc., elle est aussi utilisée fondamentalement dans le but de traiter les collisions d'une base mobile. Le principe de l'opération est simple, il est basé sur la somme binaire de deux formes (polygones) pour avoir une nouvelle forme [128].

Etant donné deux ensembles  $P, Q \in \mathbb{R}^d$ , leur somme de Minkowski notée par  $A \oplus B$ , sera calculée comme suit :

$$P \oplus Q = \{p + q | p \in P, q \in Q\} \quad \text{IV.6}$$

Graphiquement, la somme de Minkowski de deux polygones convexes  $P$  et  $Q$  avec  $m, n$  sommets respectivement, est un nouveau polygone délimité par  $m+n$  sommets. L'opération se fait par le balayage d'un de deux polygones par l'autre en considérant un point de référence particulier (Figure IV.9).

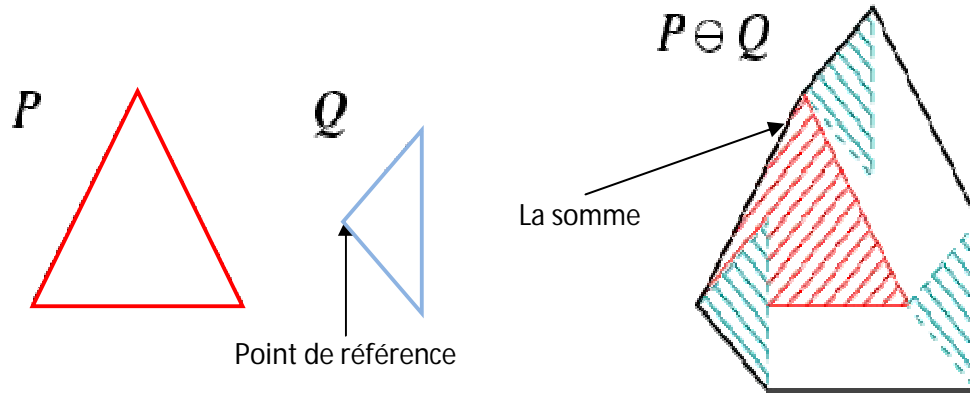


Figure IV.9. La somme de Minkowski.

#### IV.5.2.3. La différence de Minkowski

On peut la considérer comme l'opération inverse de la somme. Il existe certains algorithmes pour calculer cette opération telle que [129] et [130]. Elle est définie de la manière suivante :

$$P \ominus Q = \bigcap_{q \in Q} \{p - q | a \in Q\} \quad \text{IV.7}$$

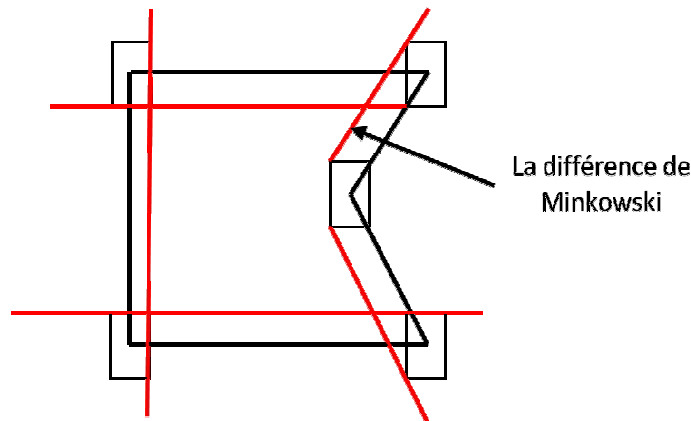


Figure IV.10. La différence de Minkowski.

#### IV.5.2.4 Calcul de l'espace de mobilité : polygones de configuration

Pour déterminer les polygones de configurations les deux opérations de Minkowski sont nécessaires. Le polygone  $Q$  (figure IV.9) représente le fauteuil roulant, le point de référence sera le centre de rotation. Deux types de polygone peuvent être le polygone  $P$ , soit de type enveloppe correspondant à l'univers à l'intérieur duquel le fauteuil va naviguer et un polygone représentant un obstacle qui doit être évité. La somme est appliquée aux polygones obstacles et la différence au polygone enveloppe. Le calcul sera fait pour chaque orientation du fauteuil roulant  $\theta_0$  et pour chaque orientation des éléments de manœuvre. Les polygones résultants correspondent à l'espace de mobilité admissible (polygones d'évolution), la construction de ce dernier est effectuée par un balayage du

point de référence du polygone du fauteuil sur le polygone enveloppe/obstacle Q. Le résultat de ce balayage est un ensemble de droites, qui s'appellent les droites candidates. Les droites retenues selon le type de polygone Q de la manière suivante (figure IV.11): si le polygone Q est un polygone enveloppe les droites retenues seront celles qui se situent à l'intérieur du polygone et s'il est de type obstacle les droites retenues seront celles qui se situent à l'extérieur du polygone. Les sommets du nouveau polygone seront formés par les intersections entre les droites retenues en ajoutant en chaque sommet les limites du polygone P lorsque le point de référence est appliqué à ce sommet.

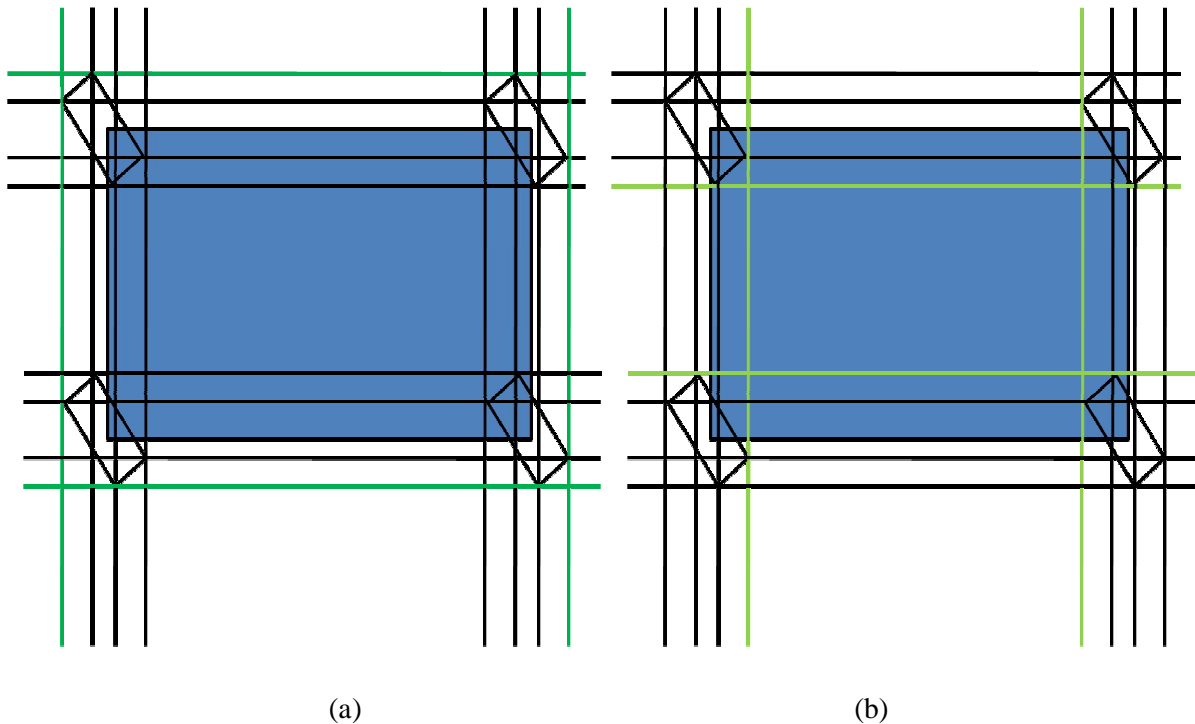


Figure IV.11. Les droites candidates : (a) polygone obstacle, (b) polygone enveloppe.

Afin de mettre au point la construction du nouveau polygone d'évolution, il faut que nous définissions les sommets qui limitent les droites candidates choisies. La deuxième étape dans la construction de l'espace de mobilité est le choix des sommets, qui représentent graphiquement les intersections résultantes entre les différentes droites. Plusieurs types d'intersection peuvent être trouvées (voir le tableau IV.2).

Le polygone d'évolution résultant doit subir certaines vérifications afin qu'il soit un espace de mobilité admissible au fauteuil roulant.

- Le polygone P représentant le fauteuil translaté sur un point test du polygone Q avec l'orientation donnée n'est pas en intersection avec le polygone d'évolution, sinon l'arc dont l'extrémité est testée est éliminé.
- Il faut qu'à la fin de la vérification, on obtienne deux arcs par sommet.
- Le chemin de polygone doit relier le point de départ par lui-même en passant par plusieurs autres points.

Le type d'intersection	Les sommets choisis	Graphiquement
Intersection franche	$B1 \leftrightarrow E1$ devient $B1 \leftrightarrow I$ $B2 \leftrightarrow E2$ devient $B2 \leftrightarrow I$ Arcs supplémentaires $E1 \leftrightarrow I$ et $E2 \leftrightarrow I$	
Intersection avec extrémité	$B1 \leftrightarrow E1$ devient $B1 \leftrightarrow E2$ et $E1 \leftrightarrow B2$ $B2 \leftrightarrow E2$ n'est pas modifié Si $B2$ est sur $E1$ ou $B1$ alors ces deux sommets fusionnent	
Intersection sur deux points ou droites colinéaires	$B1 \leftrightarrow E1$ devient $E1 \leftrightarrow B2$ $B2 \leftrightarrow E2$ devient $B1 \leftrightarrow B2$ Arc supplémentaire $B1 \leftrightarrow B2$ Si $B1$ et $B2$ sont l'un sur l'autre alors ils fusionnent.	

Tableau IV.2. Type d'intersection.

Il arrive que plusieurs polygones résultants des opérations de Minkowski soient en intersection. Pour résoudre ce problème, on a deux méthodes, soit les **fusionner (union)**, soit **d'exclure** l'un de l'autre (cas du polygone de configuration enveloppe en intersection avec un polygone de configuration de type obstacle).

La **fusion** de deux polygones se fait en considérant tous les arcs et les sommets en question et on modifie les liens et les sommets qui relient les arcs selon le type d'intersection (tableau IV.2), éliminer les arcs qui se trouvent dans un polygone et reconstituer le nouveau polygone avec les sommets et les arcs calculés.

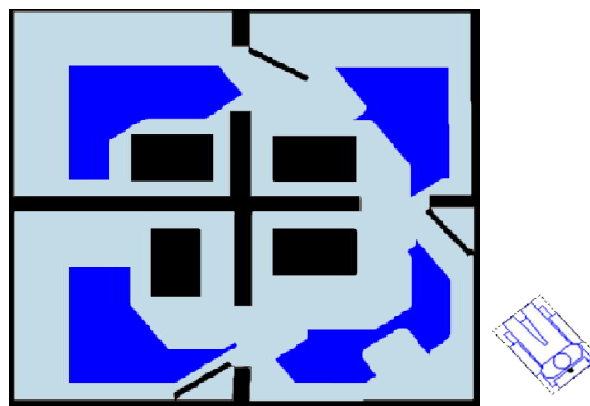


Figure IV.12. Espace de mobilité admissible lorsque l'enveloppe est un plan d'appartement et le fauteuil un polygone rectangulaire dont le point de référence est situé au centre avec orientation donnée des portes pivotantes. A droite se trouve le fauteuil avec une orientation donnée.

**L'exclusion** d'un polygone dans un autre survient lorsqu'un polygone de type obstacle est en intersection avec un polygone de type enveloppe. Il existe deux cas, soit toute la somme de Minkowski est incluse dans le polygone enveloppe, ou bien soit une partie. Dans le premier cas, il n'existe pas une intersection et le polygone est considéré comme absorbé. Dans le deuxième cas, les sommets et les

arcs résultants de la somme de Minkowski et qui sont en intersection avec les sommets et les arcs résultants de la différence sont identiques.

### IV. 5.3. Outil de simulation

L'outil de simulation est basé sur Visual Studio C++, il se divise en trois blocs. Le premier est utilisé pour la modélisation de l'espace de mobilité du fauteuil roulant (calcul des polygones d'évolution), la structure articulée de la personne, le fauteuil roulant et l'environnement 3D. Le deuxième est utilisé pour fixer les différentes contraintes considérées en simulation. Le dernier bloc est réservé au calcul, il contient l'algorithme et d'autres sous-blocs de calcul. Le dernier bloc joue le rôle d'une interface entre les éléments de deux premiers blocs.

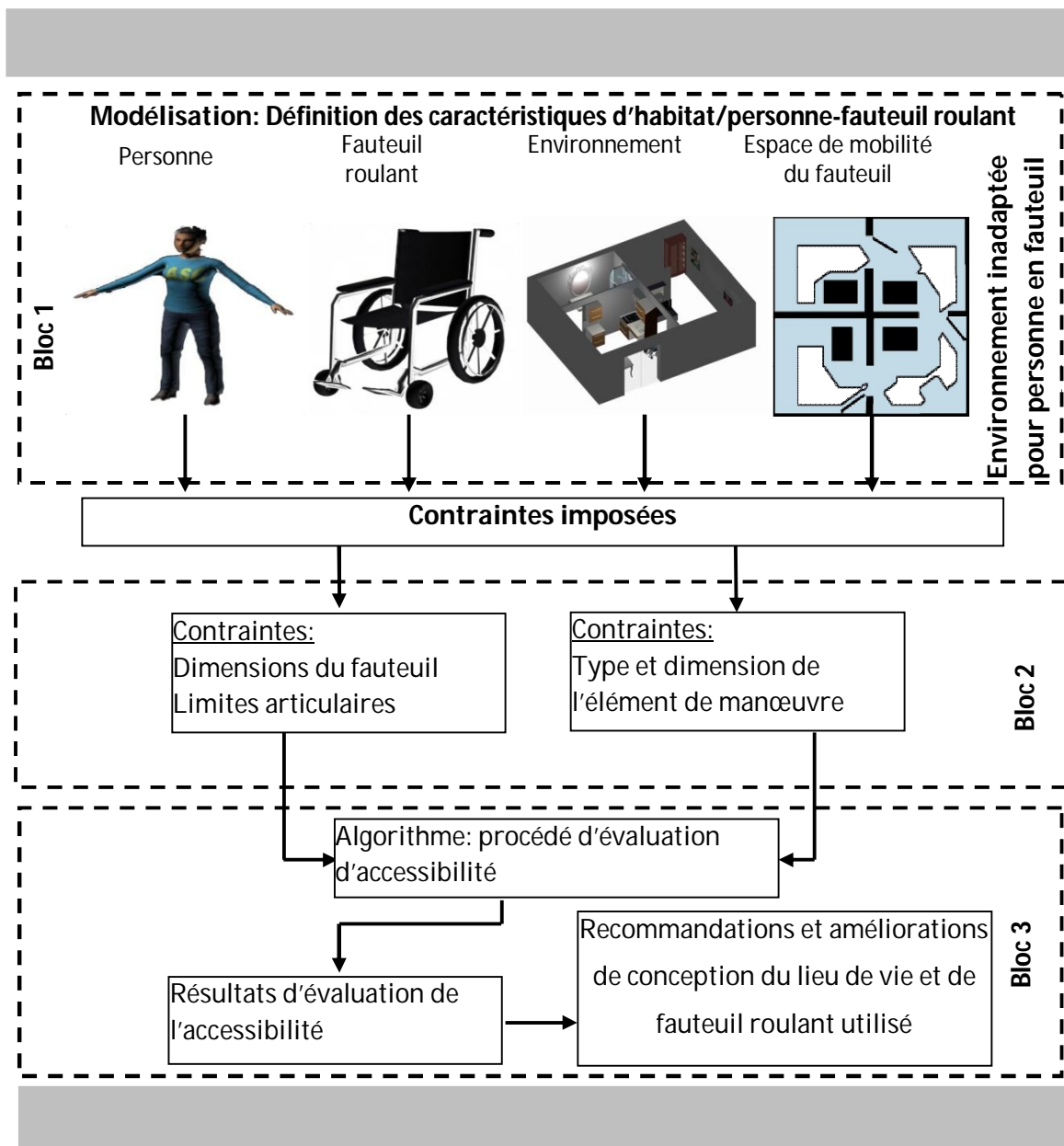


Figure IV.13. Outil de simulation.

#### **IV.4. Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons abordé le principe général de notre approche ainsi que l'algorithme de simulation. L'algorithme est du type incrémental qui minimise une fonction de coût. Les limites articulaires de la personne ont été prises en considération ainsi que l'évitement d'obstacles et la non-holonomie du fauteuil roulant. Notre algorithme est applicable à tous les types du fauteuil roulant dont l'espace de mobilité doit être recalculé selon le type choisi. Dans notre étude, nous ne considérons que les formes rectangulaires du fauteuil roulant pour calculer les polygones d'évolutions correspondant ainsi les polygones  $P$  soient toujours convexes. Le calcul de l'espace mobilité du fauteuil roulant se base principalement sur les opérations de Minkowski, la présence des éléments de manœuvre telle que les portes dans le polygone enveloppe augmente le temps du calcul puisque au lieu d'un seul polygone enveloppe, on aura plusieurs selon l'orientation de l'élément de manœuvre. La forme du fauteuil roulant a une influence sur la forme de l'espace de mobilité admissible ainsi sur l'évaluation de l'accessibilité et les zones d'atteindre des objets.

Dans le chapitre suivant nous, allons montrer les performances de notre algorithme par une comparaison avec d'autres méthodes. Nous allons aussi montrer les résultats détaillés de l'évaluation de l'accessibilité à la mobilité ainsi qu'à la préhension.

## Chapitre V : Résultats et discussions

---

### V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différents tests que nous avons effectués et les résultats de l'évaluation d'accessibilité des éléments de manœuvre, de commande et de service pour une personne à mobilité réduite assise sur une chaise roulante. Ces résultats seront présentés dans le cadre de deux études principales. La première a pour objectif de définir une relation entre la conception du fauteuil roulant, l'espace de manœuvre et les zones d'atteintes. La deuxième a pour objectif de définir une relation entre les capacités résiduelles articulaires de la personne et les trois paramètres de la première étude. L'analyse des résultats des deux études, nous permet de proposer de manière globale selon la capacité résiduelle et la tranche d'âge de la personne, les valeurs minimales et maximales des espaces de manœuvre du fauteuil roulant, les hauteurs (positions) admissibles des éléments de commande/service/ ainsi que la conception du fauteuil roulant et l'élément de manipulation appropriée. Ces résultats nous permettront la mise au point des règles universelles sur l'accessibilité des éléments de manœuvre pour toute personne assise sur une chaise roulante qui souffre ou pas des dégradations articulaires.



## V.2. Etude comparative

Dans cette section, nous allons présenter les résultats des études préliminaires qui montrent les performances de notre approche. L'étude comparative que nous l'avons faite, concerne la simulation des mouvements humains d'une personne assise sur une chaise roulante lorsqu'elle exécute des tâches de manipulation quotidiennes. Comme nous l'avons présenté dans le chapitre précédent, notre algorithme est destiné au calcul des postures de la partie haute lors du déplacement du fauteuil roulant dans un espace virtuel 3D. La définition des postures d'une chaîne articulaire redondante se fait par le calcul de l'inverse cinématique et généralement par l'une des méthodes suivantes : méthodes analytiques, méthodes de linéarisation et méthode d'optimisation ou incrémentale. Chaque méthode possède des avantages et des inconvénients (voir chapitre IV, paragraphe IV.3). Le déplacement du fauteuil roulant ou tout autre type de base mobile est défini par l'une des méthodes de planification des trajectoires (voir chapitre IV, paragraphe IV.4).

Notre approche est du type incrémental, nous avons choisi cette classe de résolution parce que le système redondant n'a pas une solution unique et l'utilisation d'une méthode incrémentale peut approximer la solution avec des critères imposés et peut aussi réduire le fait de tomber dans des minimaux locaux. L'idée d'intégrer le calcul des positions du fauteuil roulant avec les mouvements de la partie haute est assez nouvelle. Ce fait a décru le nombre des solutions possibles de l'inverse cinématique, mais de l'autre côté cette opération a réduit considérablement le temps de calcul avec une marge de précision assez acceptable. La comparaison présentée dans ce chapitre a été faite avec des approches du domaine de la robotique, les contraintes dynamiques et cinématiques ne sont pas prises en considération. Les algorithmes sont simulés dans les mêmes conditions avec cinq scénarios différents. Le modèle que nous avons utilisé est celui proposé par [83] à partir duquel nous avons extrait un modèle avec 21 degrés de liberté, de la taille vers la paume de la main droite. Le déplacement se fait par une chaise roulante dont sa forme est rectangulaire qui se déplace en parallèle au sol avec trois degrés de liberté  $(x, y, \theta)$  (voir figure III.14).

Pratiquement, le choix d'une méthode de résolution dépend de l'application abordée. Dans notre application (évaluation d'accessibilité), les critères qui peuvent être utilisés pour choisir la méthode de résolution sont les suivants :

- L'efficacité (ex : vitesse).
- La robustesse et la globalité.
- Faisabilité (caractère naturel des résultats).
- La complexité de la méthode.

La première étude comparative a été faite entre notre approche et les algorithmes de Cartesian RRT Planner [131], IKBiRRT [132] et RRT -IK [131]. Les algorithmes sont implantés sur un PC de type i3 cadencé de 2.30 GHz. Pour notre algorithme, le calcul a été fait selon les conditions d'arrêt et les caractéristiques suivantes :

- La valeur minimale de l'erreur  $\epsilon$  est fixée à  $2 \times 10^{-3}$  mètre.

- Un nombre maximal des itérations est fixé à 1000.
- Un nombre maximal des essais est fixé à 80.

En plus de ces conditions, nous avons aussi les paramètres implicites  $Dr1$  et  $Dr2$  (équation IV.4), ces derniers sont utilisés pour adapter la direction de déplacement du fauteuil roulant, dont ses rôles est d'éviter de tomber dans un minima local.

Dans ce qui suit, nous allons discuter les résultats obtenus selon les caractéristiques suivantes :

- Le temps de calcul : correspond au temps nécessaire pour accomplir l'opération.
- Le taux de réussite : correspond au pourcentage de réussite par rapport au nombre des essais.
- Nombre d'essais : correspondent au nombre maximal d'essais pour chaque opération.

### V.2.1. Base fixe

#### V.2.1.1. Scénario 1 : prendre/déposer un objet dans une librairie

La première opération effectuée a été l'atteinte d'un objet dans un tiroir, il s'agit de trouver la posture appropriée de la partie haute ainsi que la bonne configuration de la base mobile. L'objet à atteindre se caractérise par sa position et son orientation. Selon les résultats obtenus, le taux de réussite des trois approches est très élevé et le temps de calcul est assez rapide. Ce fait signifie que les trois algorithmes ont réussi à atteindre l'objet sans tomber dans les minima locaux. On rappelle que les articulations sont limitées par deux valeurs minimales et maximales (voir annexe, tableau A.2). Si on prend comme exemple notre algorithme on peut constater que le taux de réussite ainsi que le temps de calcul sont liés au choix des valeurs initiales. Autrement dit, on peut augmenter le taux de réussite et diminuer le temps de calcul en choisissant les bonnes valeurs initiales.

Algorithme	Y compris la base mobile	Temps de calcul approximatif	Limites articulaires	Essais	Réussite
Notre approche	oui	0.10 s	oui	80	100%
Cartesian RRT Planner	oui	2.90 s	oui	100	100%
IKBiRRT	oui	3.31 s	oui	100	100%
RRT -IK	oui	4.05 s	oui	100	100%

Tableau V.1. Résultats du premier scénario.

#### V.2.1.2. Scénario 2 : déposer un objet dans un cabinet

Dans notre application, l'évaluation d'accessibilité concerne tous les types des objets manipulables dans un lieu de vie. Les objets en question peuvent se situer sur différentes hauteurs et peuvent être atteintes à partir de manipulations différentes du fauteuil roulant (en parallèle, de face ...etc.). Dans ce deuxième scénario, nous avons augmenté la hauteur de l'objet à atteindre en le mettant dans un cabinet et nous avons calculé la posture de la personne + la position/orientation de la base mobile à partir

d'une posture initiale de repos. Les résultats obtenus (tableau V.2), montrent un taux de réussite très élevé pour les quatre algorithmes (entre 85% et 100%). Mais en comparant les temps de calcul, on trouve que notre approche est assez rapide par rapport aux autres algorithmes (0.20 s pour accomplir la tâche). On peut interpréter cette rapidité par le fait que notre approche ne cherche pas la trajectoire/configuration optimale, alors que ce n'est pas le cas pour les autres algorithmes qui ont tenu en considération l'optimalité de la trajectoire/configuration calculée.

Algorithme	Y compris la base mobile	Temps de calcul approximatif	Limites articulaires	Essais	Réussite
<b>Notre approche</b>	oui	0.20 s	oui	80	100%
<b>Cartesian RRT Planner</b>	oui	17.5 s	oui	100	85%
<b>IKBiRRT</b>	oui	1.9 s	oui	100	100%
<b>RRT -IK</b>	oui	7.50 s	oui	100	100%

Tableau V.2. Résultats obtenus du deuxième scénario.

### V.2.1.3. Scénario 3 : prendre/déposer un objet de deux surfaces différentes

Dans ce scénario, nous avons augmenté la distance entre les deux points à atteindre (sur le plan  $(x, y)$ ), la chaîne articulaire dans ce cas doit atteindre deux points appartenant aux deux surfaces distinctes. L'espace de travail ne contient aucun obstacle. Suivant le tableau V.3, le temps de calcul de notre approche et celle RRT-IK est assez court (0.90s et 1.40s respectivement) avec un taux de réussite très élevé (100%). Les deux autres approches Cartesian RRT Planner et IKBiRRT, prennent environ 31 secondes pour terminer l'opération avec un taux de réussite faible (entre 30% et 42%). On constate d'après cet exemple que notre approche combine entre deux caractéristiques importantes : la rapidité et la fiabilité.

Algorithme	Y compris la base mobile	Temps de calcul approximatif	Limites articulaires	Essais	Réussite
<b>Notre approche</b>	oui	0.90 s	oui	80	100%
<b>Cartesian RRT Planner</b>	oui	31.72 s	oui	100	30%
<b>IKBiRRT</b>	oui	32.51s	oui	100	42%
<b>RRT -IK</b>	oui	1.40 s	oui	100	100%

Tableau V.3. Résultats obtenus du troisième scénario.

### V.2.1.4. Discussions

Suivant les résultats de trois scénarios traités, notre approche ayant globalement les conditions requises pour notre application du côté rapidité, précision et fiabilité. Du côté rapidité, le temps de calcul est assez rapide pour définir la configuration de la structure articulée (personne + fauteuil

roulant). Les tâches attribuées ont été accomplies à 100% pour les trois scénarios abordés. Notre algorithme a résolu tous les scénarios sans tomber fréquemment dans des minima locaux et les postures et les trajectoires de la main résultantes appartiennent à l'espace de travail (l'évitement d'obstacles est vérifié). Du point de vue précision, notre algorithme nécessite un nombre maximal d'essais égale à 80 et une erreur maximale égale à  $2 \times 10^{-3}$  mètre, ce qui montre l'efficacité et la fiabilité de notre approche.

### V.2.2. Base mobile

Dans cette partie de comparaison, nous allons simuler les déplacements du fauteuil roulant selon des trajectoires prédéfinies de la main. Comme nous avons mentionné plusieurs fois, la manipulation des éléments de manœuvre nécessite une combinaison de la trajectoire de la main et celle du fauteuil roulant. Cette combinaison a été abordée la première fois dans ce domaine par Farello et al. [138][64], qui a proposé un fauteuil roulant monté par un bras robotique (WMRA : wheelchair-mounted robotic arm) pour exécuter les opérations quotidiennes d'une personne en fauteuil roulant qui souffre des dégradations physiques des membres supérieurs. L'objectif de la comparaison consiste à montrer l'efficacité de notre approche lorsque les deux trajectoires sont mises en exécution simultanément, ainsi que le concept général de notre application.

Les trois premiers scénarios (4,5 et 6) ont pour objectif : la simulation des trajectoires principales de la main (cercle, carrée et ligne droite). Pour chaque scénario nous allons présenter : l'erreur entre la trajectoire exécutée par la main et celle désirée, la durée globale de l'exécution et la trajectoire de la main et celle du fauteuil roulant dans l'espace  $(x, y, z)$ . L'erreur a été calculée entre la position et l'orientation de la main et la position et l'orientation des points à atteindre.

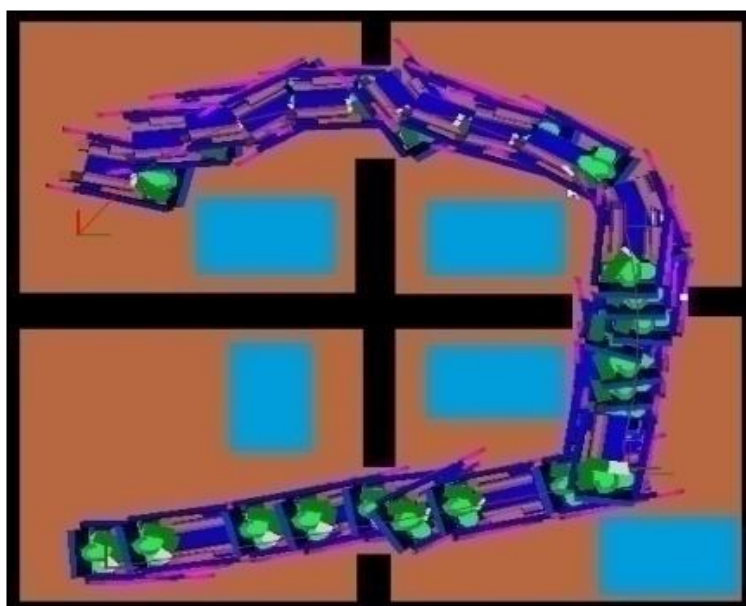


Figure V.1. Trajectoire du suivi sous forme carrée.

### V.2.2.1. Notre approche

- **Scénario 4 : Suivre une trajectoire sous forme carrée**

Dans ce scénario la personne doit suivre par sa main une trajectoire sous forme carrée dans un environnement encombré. La trajectoire est constituée d'un nombre fixe des points dynamiques (NPD), dont la distance qui sépare deux points successifs est de l'ordre de quelques millimètres. L'erreur acceptable entre la main et chaque point dynamique est égale à  $2 \times 10^{-3}$  mètre et les configurations du fauteuil roulant sont calculées selon notre algorithme (voir chapitre IV, paragraphe IV.5.1).

Suivant les résultats obtenus, on constate que le suivi de trajectoire (voir figure V.1) a été accompli avec des erreurs assez faibles et une durée assez réduite (voir figures V.2 et V.3).

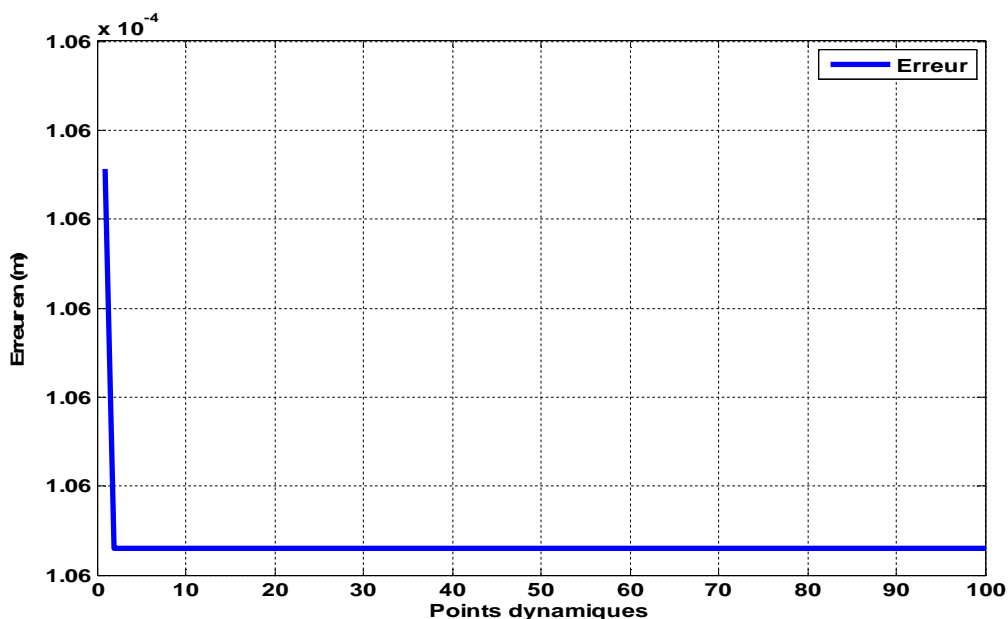


Figure V.2. Erreur entre la trajectoire de la main et la trajectoire désirée (position+orientation).

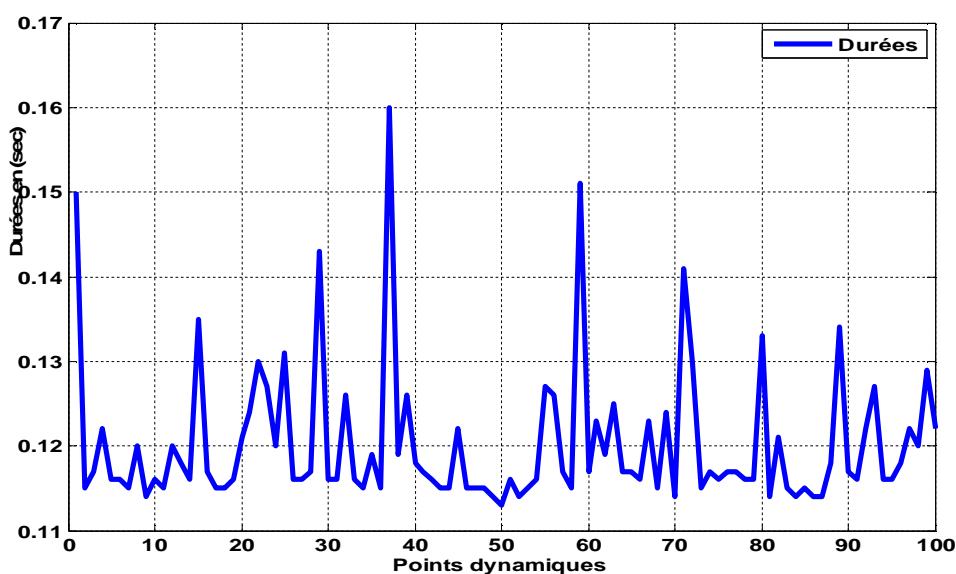


Figure V.3. Durées d'exécution (trajectoire sous forme carrée).

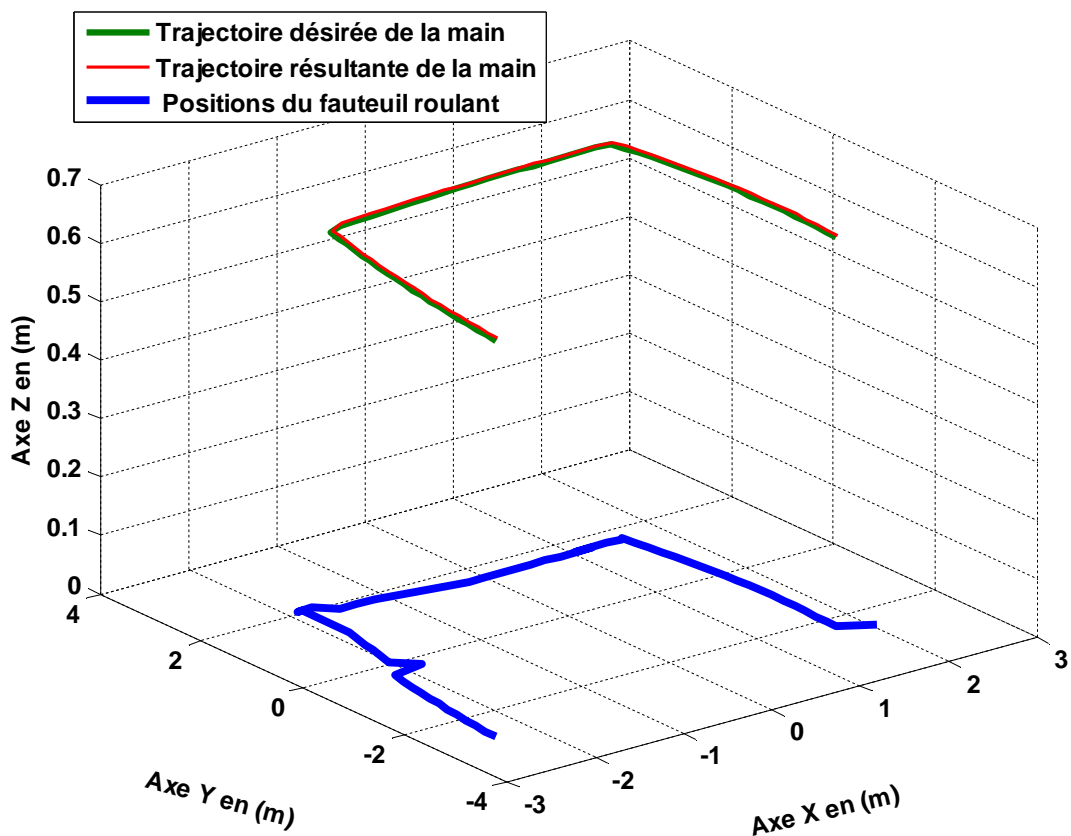


Figure V.4. Les positions du fauteuil roulant vs. Les trajectoires de la main.

- **Scénario 5 : Suivre une trajectoire sous forme cercle**

Les résultats obtenus pour cette forme de trajectoire possèdent les mêmes caractéristiques que celles du premier scénario. L'erreur est de l'ordre de  $10^{-3}$  mètres (voir figure V.6), à l'échelle humaine est une erreur très acceptable aussi pour une opération du suivi.

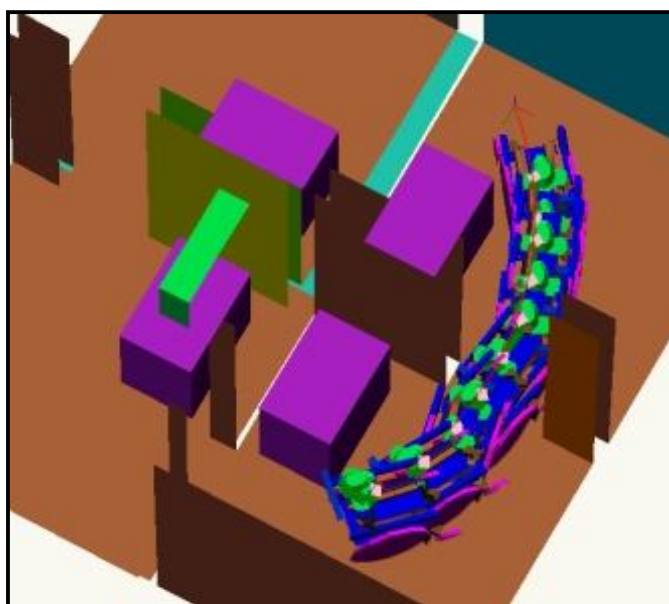


Figure V.5. Trajectoire à suivre sous forme cercle.

La trajectoire du fauteuil roulant résultante crée la même forme que celle de la main (voir figure V.8). Ce résultat peut être interprété par la méthode que nous avons utilisée pour définir les configurations du fauteuil roulant (voir chapitre IV). Le fait d'utiliser les valeurs articulaires de la posture précédente pour réinitialiser la prochaine semble être efficace, grâce à ceci on remarque que l'erreur est globalement stable pendant le suivi.

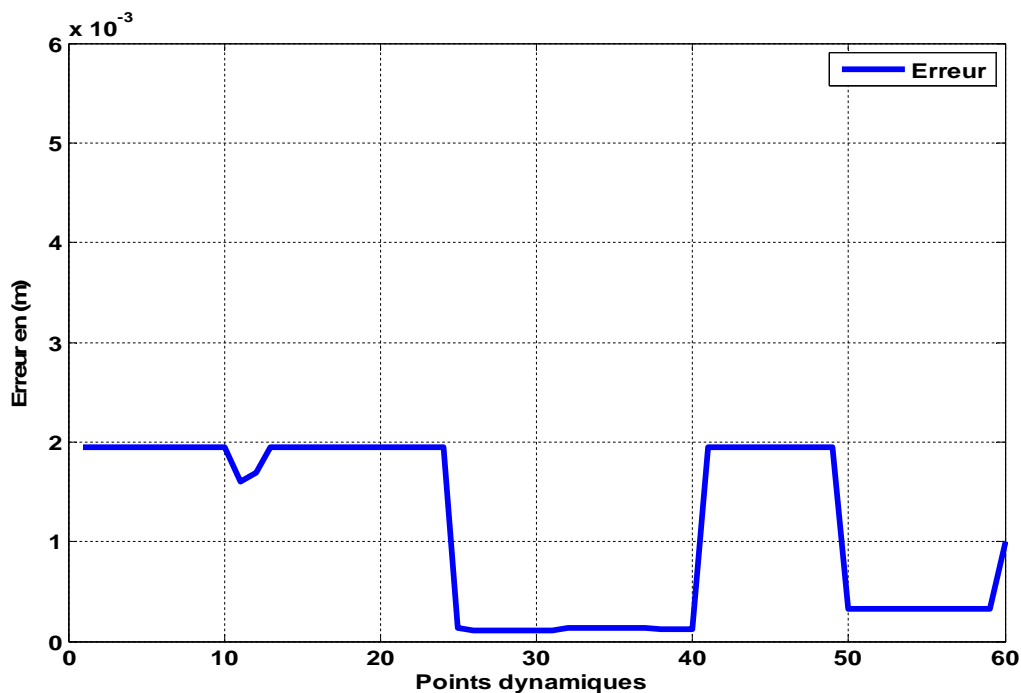


Figure V.6. Erreur entre la trajectoire résultante de la main et la trajectoire désirée (position+orientation).

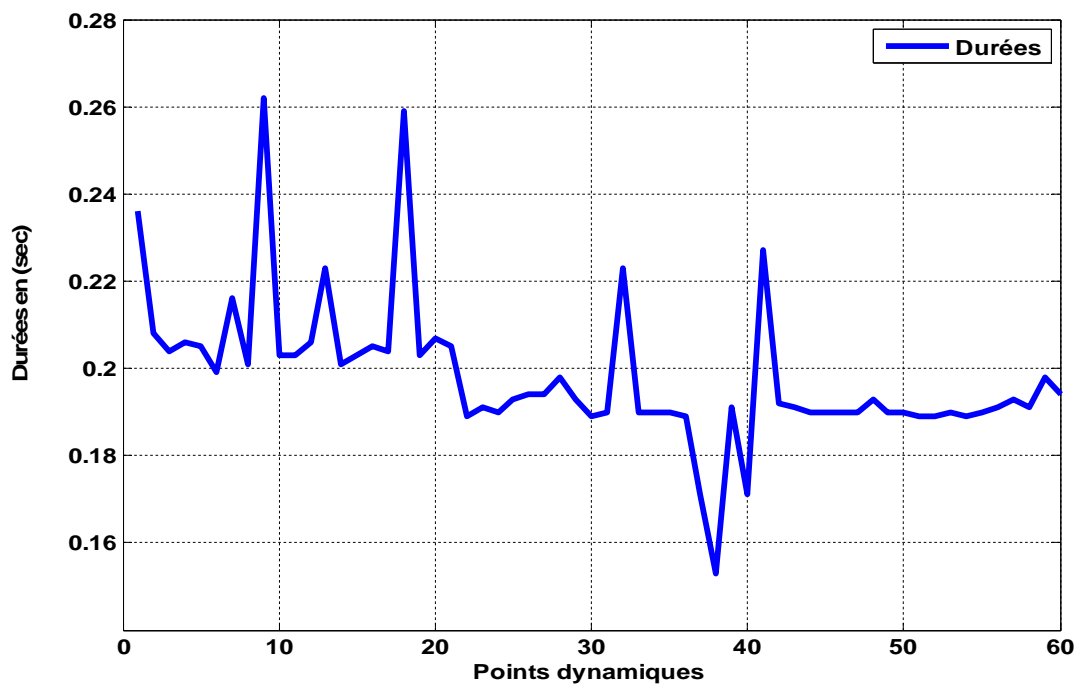


Figure V.7. Durées d'exécution (trajectoire sous forme cercle).

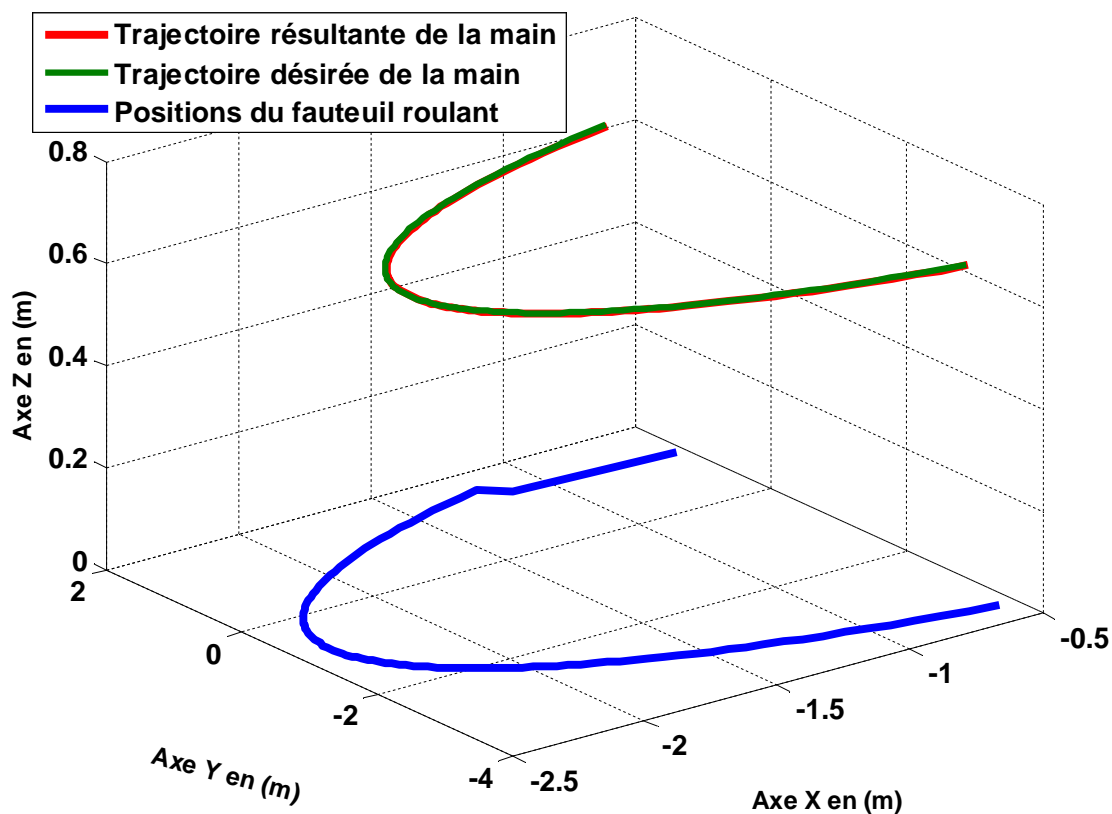


Figure V.8. Les positions du fauteuil roulant vs. Les trajectoires de la main.

- **Scénario 6 : Suivre une trajectoire sous forme droite**

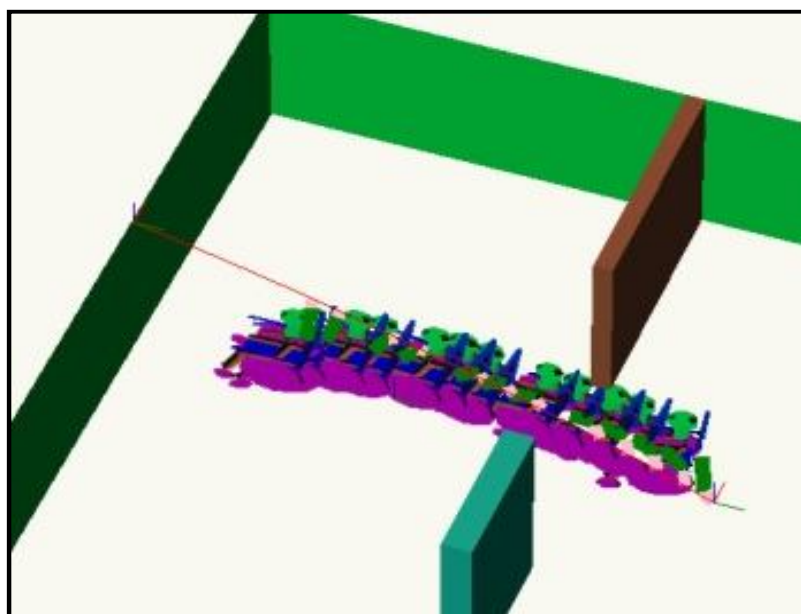


Figure V.9. Trajectoire à suivre sous forme ligne droite.

Généralement, le suivi d'une trajectoire sous forme une ligne droite dans un espace non encombré est très simple. Les résultats obtenus dans ce cas, montrent clairement l'efficacité de l'algorithme proposé de côté précision et rapidité (voir figure V.12). L'erreur obtenue est très faible ( $10^{-4}$  mètres)



et à l'échelle humaine avec la conformité du corps de la personne elle peut être considérée nulle (voir figure V.10). Dans notre simulation, en plus de la faisabilité des mouvements de la partie haute et le déplacement du fauteuil roulant, on tient compte de la précision au calcul. Par contre, la rapidité (voir figure V.11) n'est pas envisagée tant qu'on ne fait pas une application en temps réel, mais elle reste un facteur important pour évaluer les performances des algorithmes.

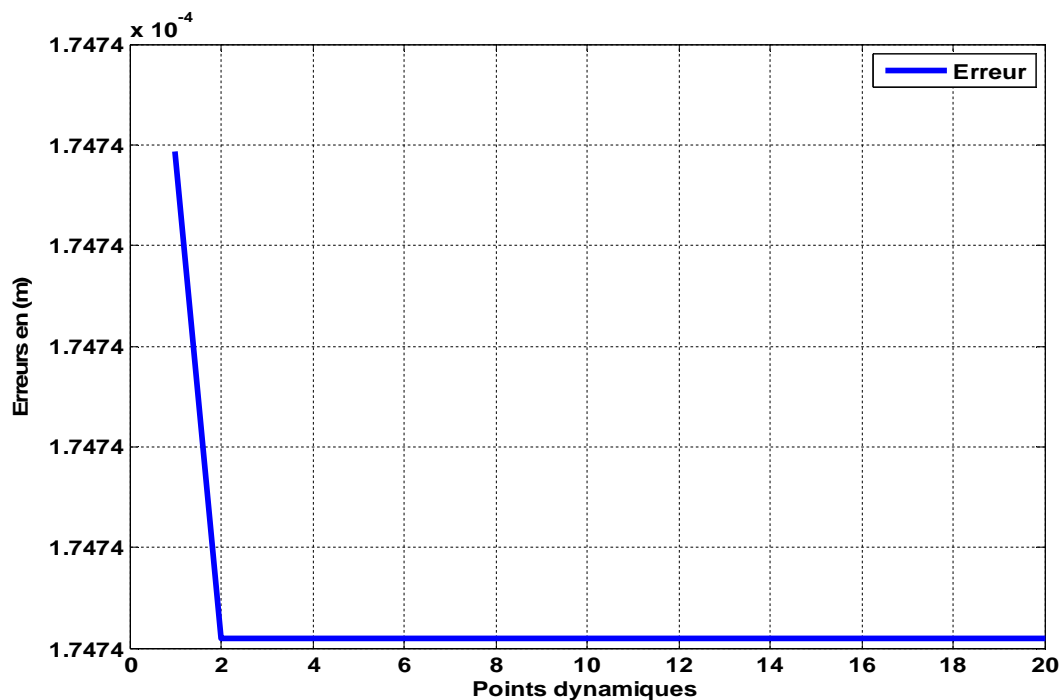


Figure V.10. Erreur entre la trajectoire résultante de la main et la trajectoire désirée (position+orientation).

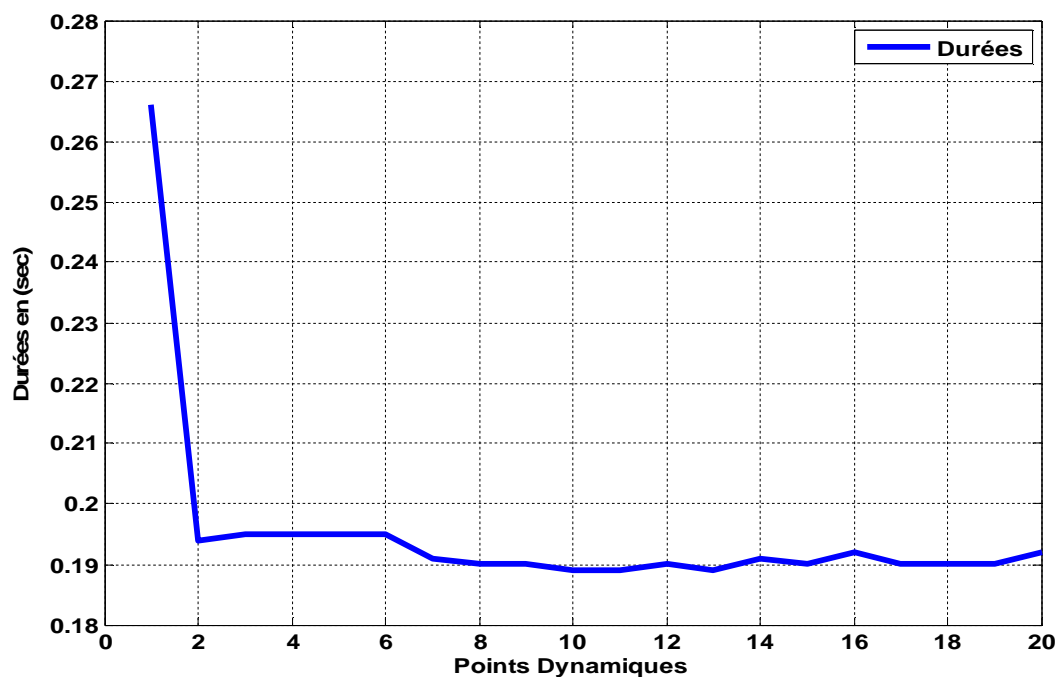


Figure V.11. Durées d'exécution (trajectoire sous forme ligne droite).

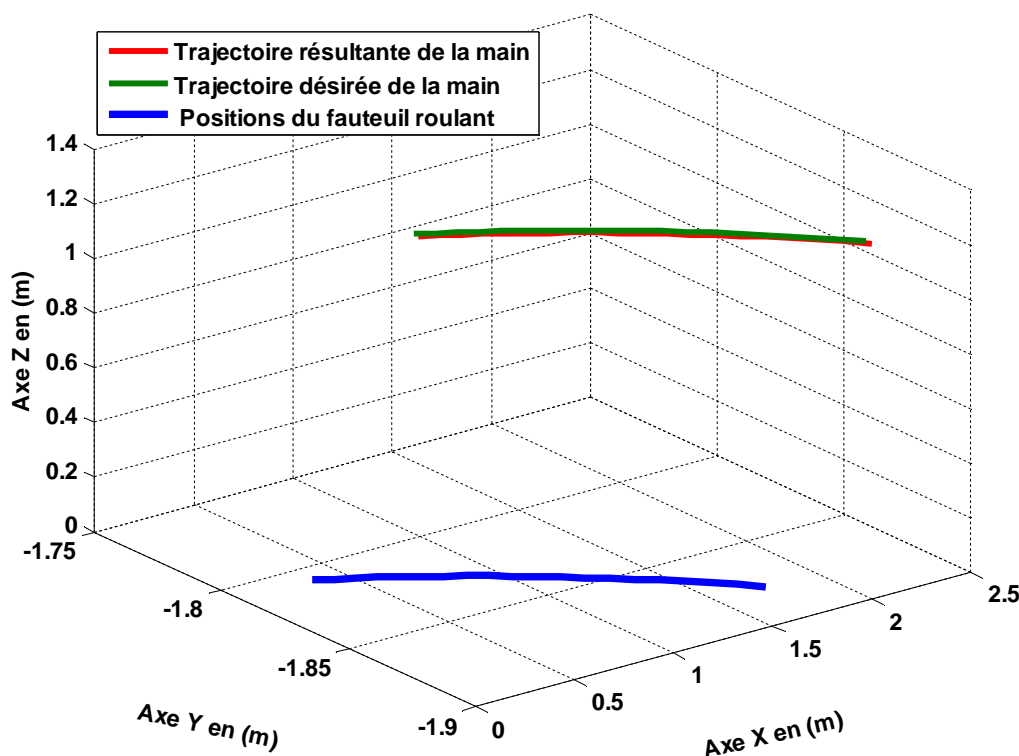


Figure V.12. Les positions du fauteuil roulant vs. Les trajectoires de la main.

#### V.2.2.2. Comparaison avec une approche dans le même domaine d'application

- **Scénario 7 : Ouverture d'une porte pivotante**

Pour accomplir les activités quotidiennes, les trajectoires exécutées par la main de la personne peuvent être partitionnées en sous-trajectoires (arc d'un cercle, droite ...etc.). De l'autre côté, la trajectoire du fauteuil roulant doit être à la limite faisable, dont sa forme est dépendante de celle de la trajectoire principale de la main ou l'inverse. Afin de réussir le suivi de la trajectoire de la main la définition des positions/orientations du fauteuil roulant dans l'espace de mobilité est importante. Dans notre approche, l'utilisation des sous-trajectoires adjacentes est très avantageuse, elles facilitent le calcul des valeurs articulaires ainsi que la position et l'orientation du fauteuil lorsque les points dynamiques de sous-trajectoire possèdent la même forme de distribution dans l'espace 3D.

Après avoir montré les résultats du suivi de différentes formes de trajectoire, nous allons présenter dans cette section les résultats de simulation de l'ouverture d'une porte pivotante à travers notre approche et celle de Farelo et al. [133]. Selon notre approche, la trajectoire du suivi est proposée à la main alors que les positions et l'orientation du fauteuil sont calculées suivant les structures articulées obtenues (voir chapitre IV paragraphe IV.5.1). Par contre, dans l'approche proposée par Farelo, la trajectoire du suivi a été proposée au fauteuil roulant alors que celle de l'«end-effecteur» a été obtenue par la résolution de la matrice jacobienne de la structure articulée [134]. L'opération d'ouverture de la porte pivotante a été séparée en deux sous opérations : le rapprochement de la poignée de la porte (effectuée par un suivi d'une ligne droite) et l'ouverture de la porte (effectuée par

le suivi d'un arc de cercle). La hauteur des points dynamiques est fixée à 0.90 mètre (dont la hauteur du siège de fauteuil est fixée à 0.40 mètres).

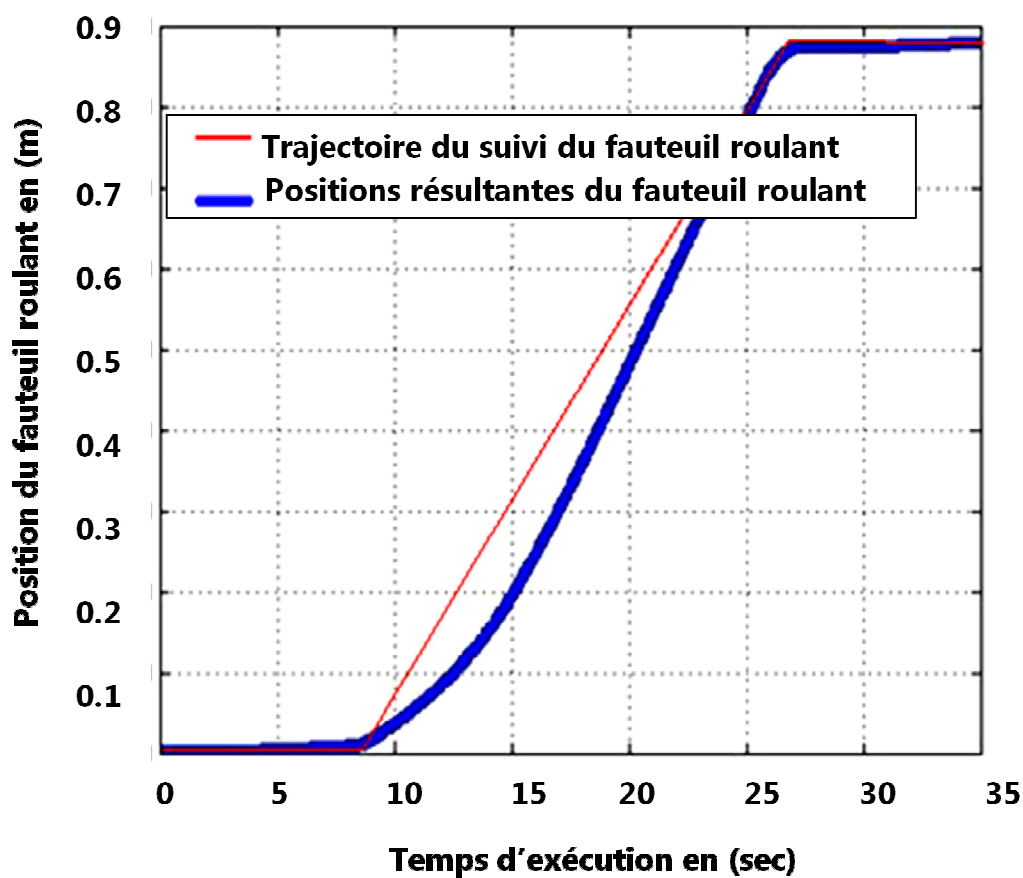


Figure V.13. Positions du fauteuil roulant résultant par rapport aux positions du suivi (méthode de Farel et al.).

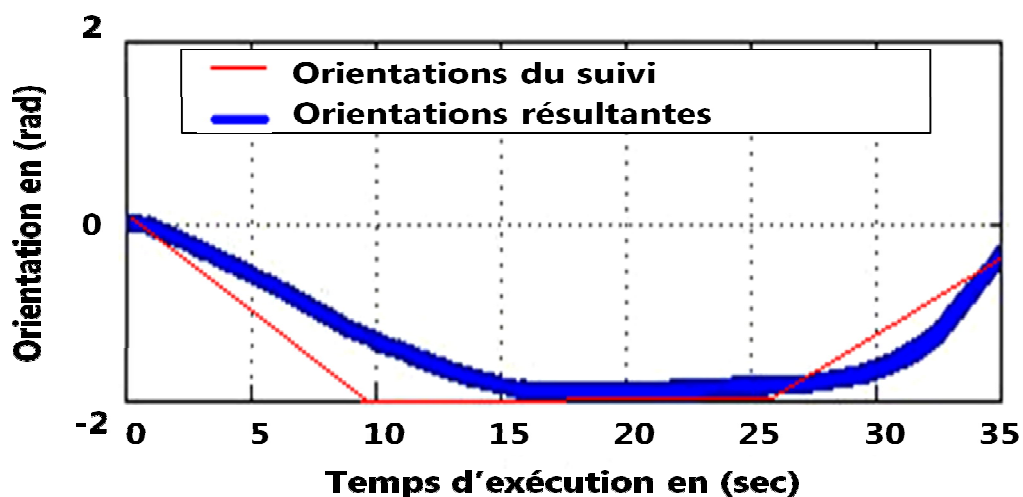


Figure V.14. Orientation du fauteuil roulant résultante et du suivi (par la méthode de Farel et al.).

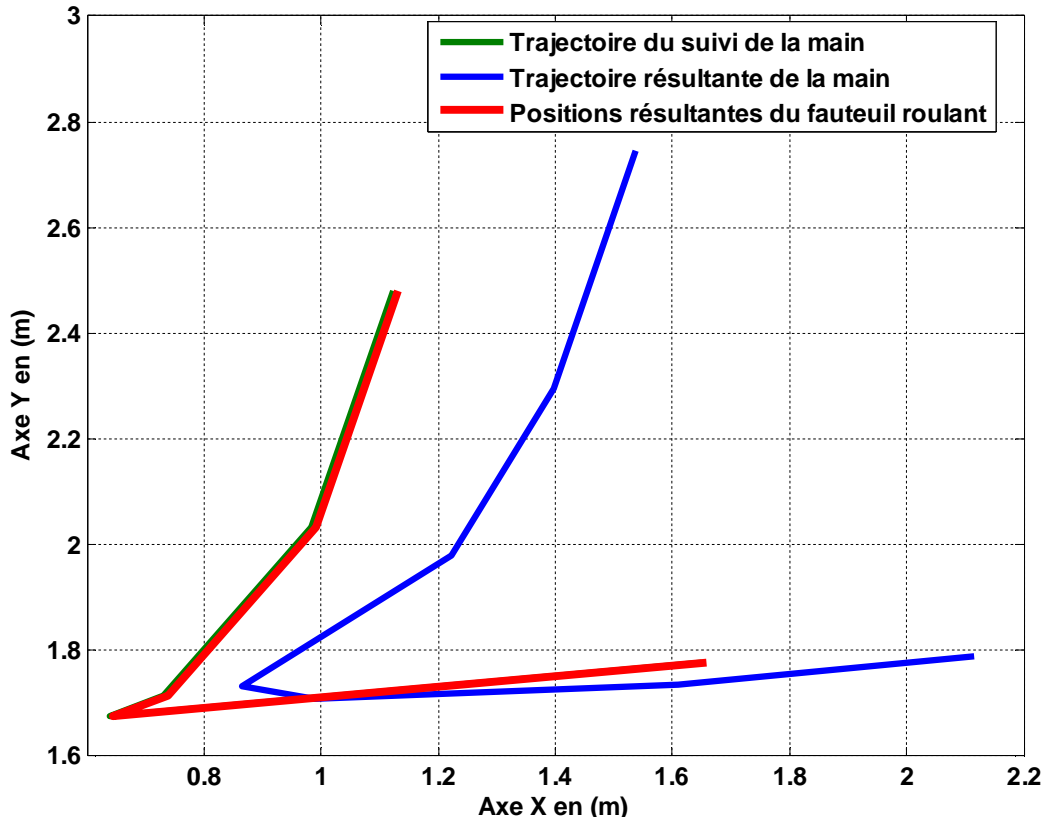


Figure V.15. Positions du fauteuil roulant, de la main et du suivi (par notre méthode).

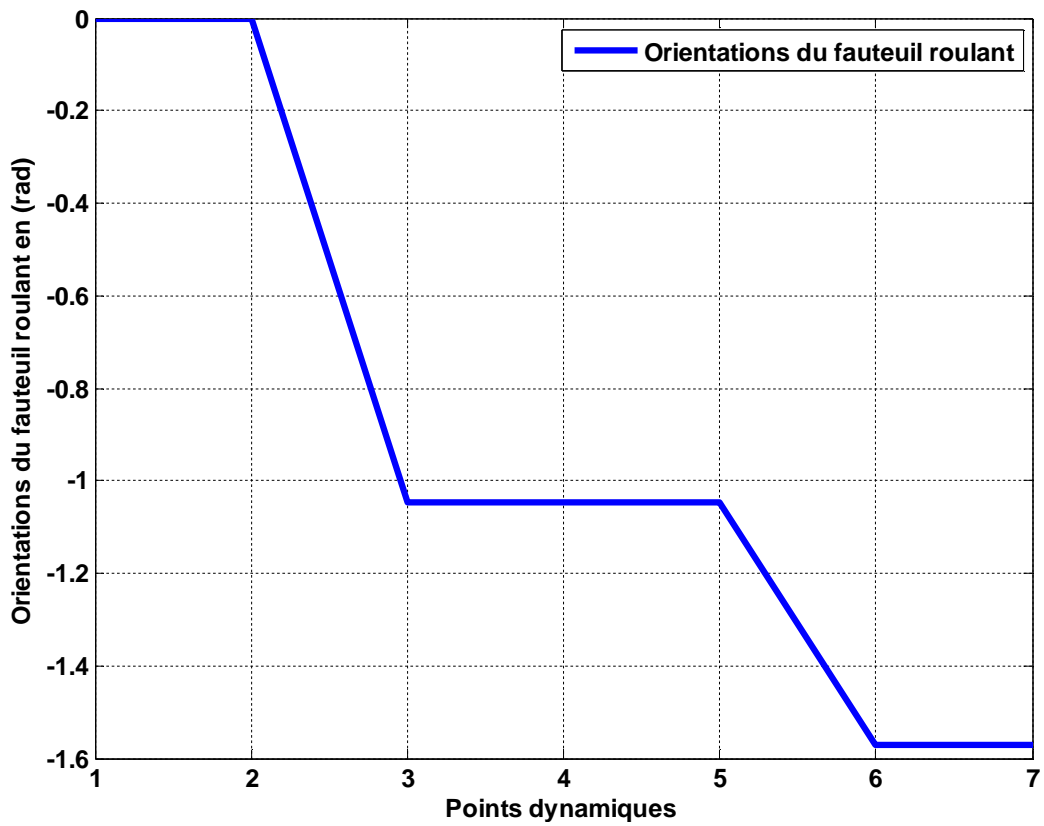


Figure V.16. Orientation du fauteuil roulant résultante (par notre approche).

Comme nous avons mentionné auparavant l'opération d'ouverture de la porte se réalise en deux étapes principales, se rapprocher puis tourner de la porte. Les positions et les orientations du fauteuil roulant résultant par la méthode de Farelo et al. sont approximativement similaires à celles du suivi, avec une erreur pratiquement acceptable (voir figure V.13 et V.14). Le temps de l'exécution de l'opération (35 secondes) pour une application en temps réel est pratiquement réalisable, par contre pour une simulation sur un ordinateur il n'est pas assez rapide.

Dans notre approche, la trajectoire du suivi a été proposée pour la main. Suivant les résultats présentés dans les figures (V.15, V.16 et V.17), on peut voir que la personne a suivi parfaitement la trajectoire proposée avec une erreur qui est égale en moyenne à  $2 \times 10^{-3}$  mètres et un temps d'exécution assez court qui est égal en moyenne à 0.7 secondes. Regardons à la trajectoire qui a été effectuée par le fauteuil roulant, on peut voir clairement le rapprochement selon une ligne droite [0.86 m, 2.11 m] sur l'axe  $X$  et la rotation effectuée pour ouvrir la porte sous forme un arc de cercle [1.73 m, 2.74 m] selon l'axe  $Y$ .

La comparaison que nous avons présentée dans cette section a été effectuée dans le cadre de notre application. L'objectif était de montrer l'efficacité de notre approche du côté précision et rapidité par rapport à des approches ayant le même intérêt et le même domaine d'application (évaluation de l'accessibilité des espaces de vie pour des personnes à mobilité réduite).

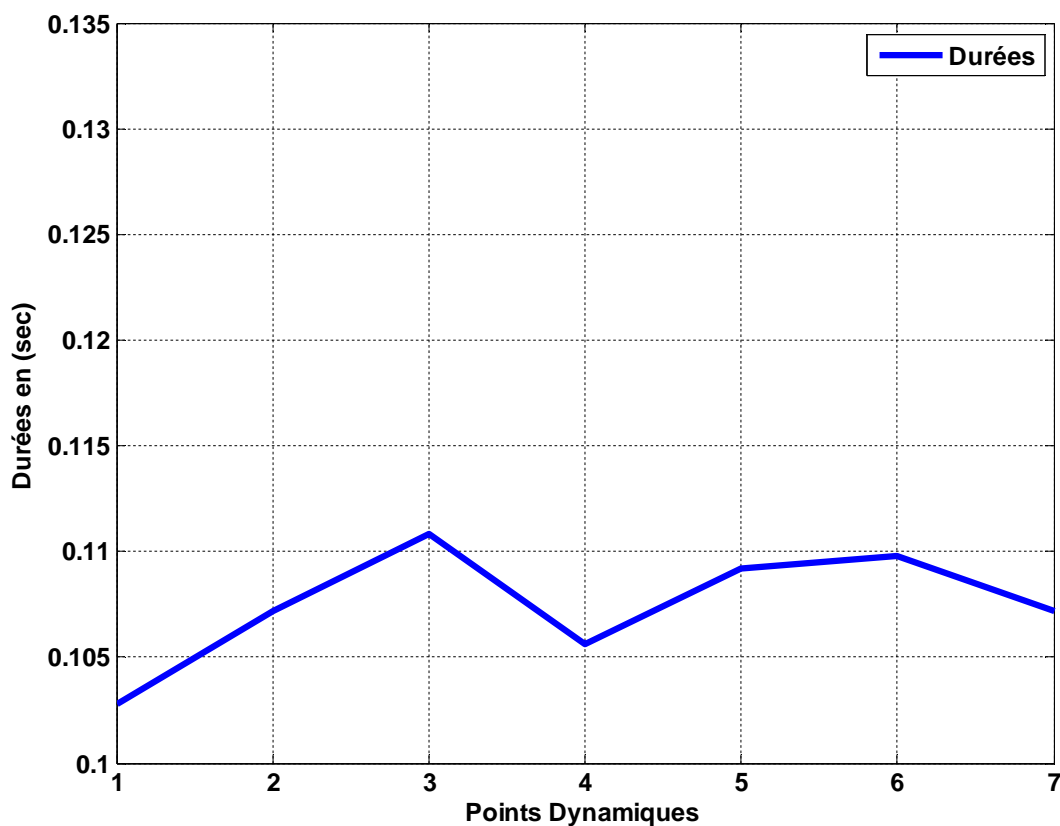


Figure V.17. Temps d'exécution (par notre approche).

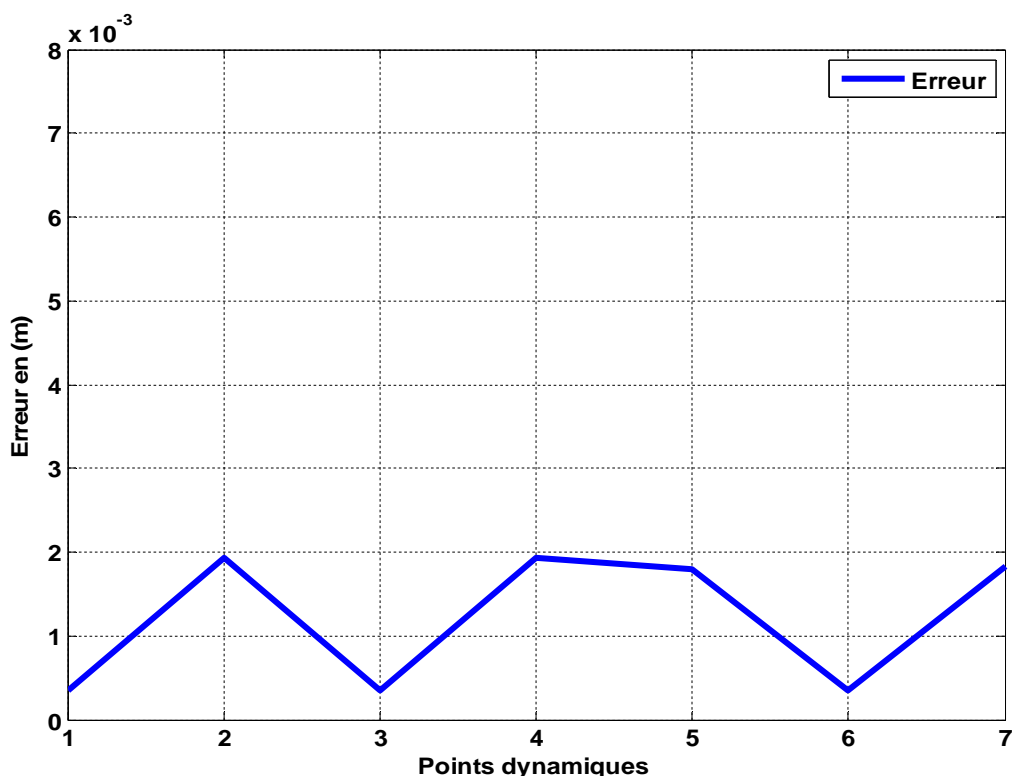


Figure V.18. Erreur entre la trajectoire de la main résultante et celle du suivi (par notre approche).

### V.3. Test d'accessibilité à la préhension et à la mobilité : paramètres d'accessibilité d'un élément de manœuvre

Nous avons sélectionné la porte pivotante comme titre d'exemple pour illustrer les caractéristiques des paramètres qui doivent être tenues en considération pour l'évaluation de l'accessibilité des éléments manipulables. La personne se déplace à l'aide d'un fauteuil roulant d'une base rectangulaire, dont ses dimensions sont présentées dans la figure V.19.

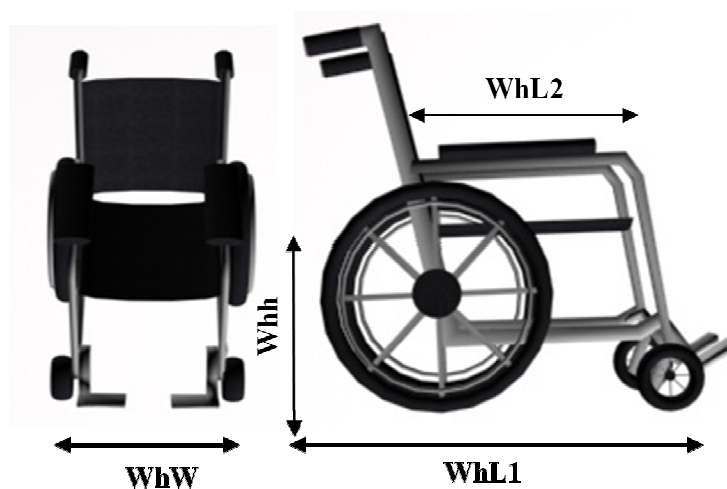


Figure V.19. Dimensions du fauteuil roulant.

On désigne par WhW la largeur du fauteuil roulant, WhL1 sa longueur au niveau du sol ( $Z=0$ ), WhL2 sa longueur au niveau du siège et par Whh la hauteur du siège qui a été fixée au 0.40 mètres pour toutes les simulations, les autres dimensions sont variables.

Les résultats obtenus dans cet exemple appartiennent à une personne ayant des limites articulaires normales (voir Annexes, Tableau A.2) et ils s'effectuent selon le protocole de simulation suivant :

- 24 degrés de liberté pour la structure articulée (personne et système de mobilité).
- Chaque degré de liberté est contraint par des limites correspondant aux débattements maximum des articulations (voir annexe, Tableaux A.2, A.3 et A.4).
- Un seul fauteuil roulant a été utilisé avec les dimensions suivantes: WhW=0.60 m, WhL1=0.90 m, WhL2=0.40 m.
- Seulement la deuxième étape de l'ouverture de la porte lorsque la personne est devant la porte a été prise en considération. La première étape (se rapprocher vers la porte) n'est pas considérée car elle ne fait pas partie de l'opération de manœuvre.
- Les caractéristiques de l'opération de manœuvre sont définies par des valeurs minimales/maximales.
- Les éléments de manœuvre sont considérés sans poids.
- Le couple humain-fauteuil roulant de mobilité se déplace dans un polygone rectangulaire parallèle au sol (3 degrés de liberté).
- Il n'est pas pris en considération de caractéristiques particulières comme la minimisation de l'énergie ou le confort. Nous considérons que si une posture existe elle est exécutable par la personne.
- La précision des calculs n'est pas primordiale puisque nous considérons que la conformité du corps humain peut compenser ces erreurs.

Les conditions d'arrêt de l'algorithme ainsi que les caractéristiques du PC utilisées en simulation restent les mêmes.

### **V.3.1. Valeurs minimales de l'espace de manœuvre d'un fauteuil roulant : porte pivotante à pousser**

Pour ouvrir/franchir/fermer la porte pivotante présentée dans la figure V.20, les dimensions de l'espace de manœuvre qui se situent dans ce cas à la longueur/largeur du couloir doivent être convenables par rapport aux dimensions du fauteuil roulant. Dans ce qui suit, nous allons utiliser **LAM** pour désigner la largeur de l'espace de manœuvre, **LOM** pour sa longueur, **LAP** pour la largeur de la porte, le HH pour la hauteur de préhension (la poignée de la porte).

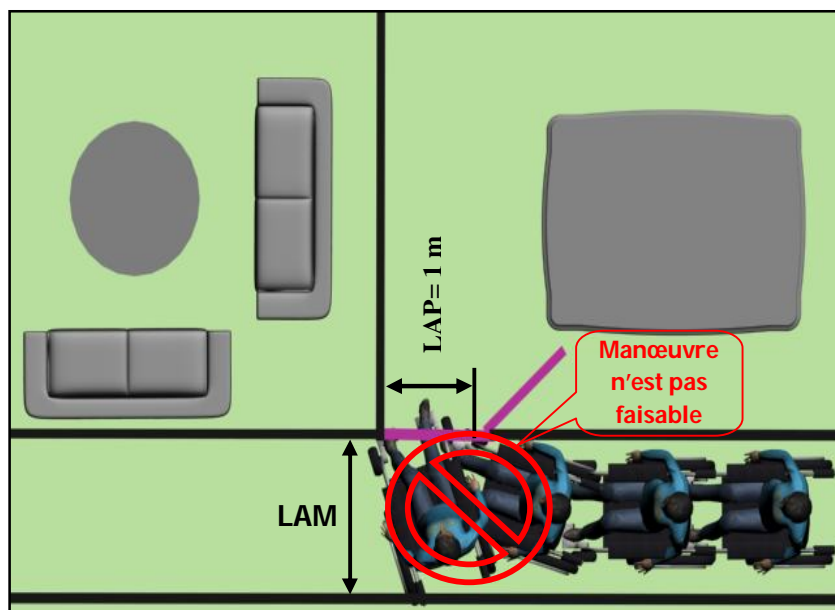


Figure V.20. Exemple d'une porte pivotante à pousser non franchissable.

Pour calculer la valeur minimale du LAM pour un LAP égale à 0.88 m, nous avons varié la valeur du LAM dans l'intervalle [60 m, 1.90 m]. La borne supérieure de l'intervalle correspond à une valeur supérieure à celle de la diagonale du fauteuil roulant (1.08 m), cette valeur assure pratiquement une manœuvre minimale au fauteuil roulant sans introduire le volume du bras de la personne. La borne inférieure correspond à la largeur WhW du fauteuil roulant. Les résultats de simulation sont présentés dans la figure V.21.

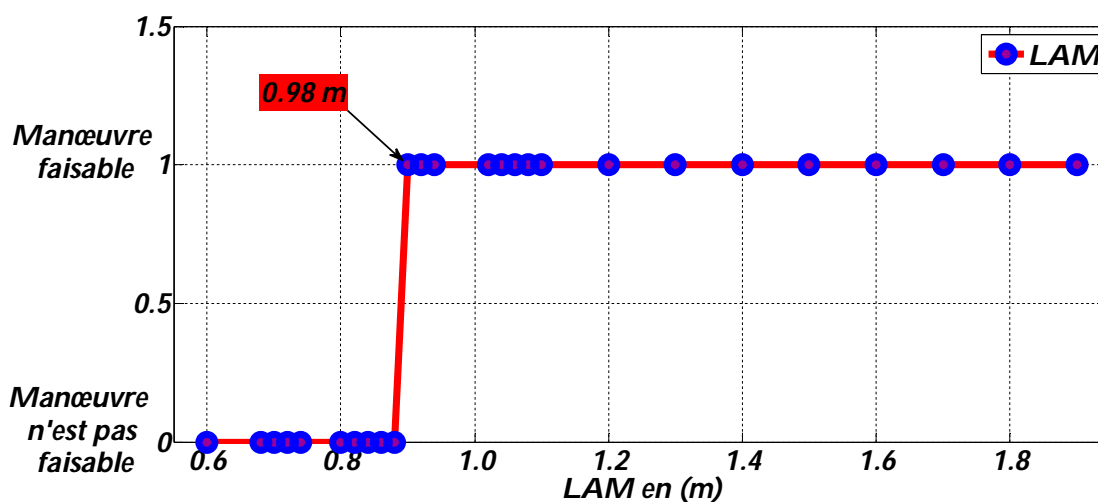


Figure V.21. Faisabilité de manipulation de la porte en fonction des différentes valeurs de LAM.

Selon la courbe présentée dans la figure V.21, la porte doit être manœuvrée lorsque la valeur de LAM est supérieure ou égale à 0.98 m. De la même manière, nous avons calculé la valeur minimale du LOM qui est égale dans ce cas à 1.20 m.



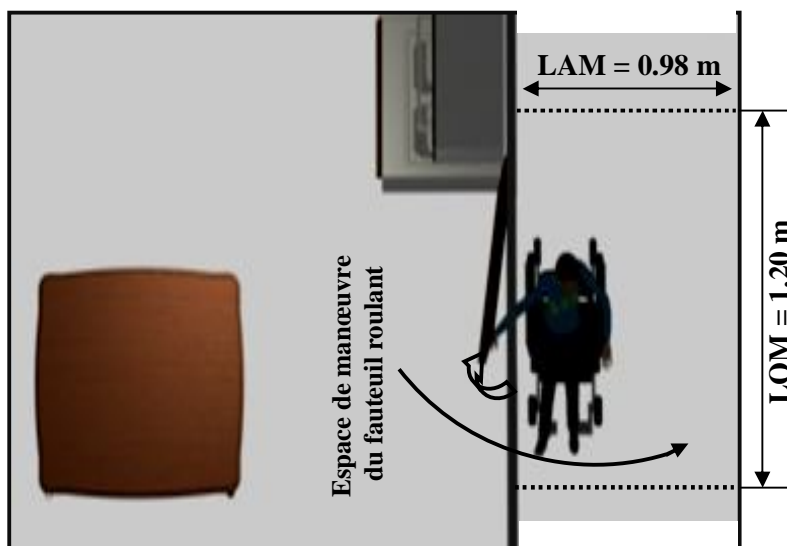


Figure V.22. L'espace de manœuvre d'une porte pivotante à pousser (LAP = 0.88 m).

### V.3.2. Valeurs minimales de l'espace de manœuvre d'un fauteuil roulant : porte pivotante à tirer

De la même manière, nous avons calculé les dimensions de l'espace de manœuvre du fauteuil roulant, dont le LAP dans ce cas est égal à 0.98 m. Nous avons remarqué que la manœuvre du fauteuil roulant est réalisable lorsque les valeurs de LAM et LOM sont supérieures ou égales à 1.64 m et 2.05 m respectivement. La figure V.23 montre les résultats de simulation.

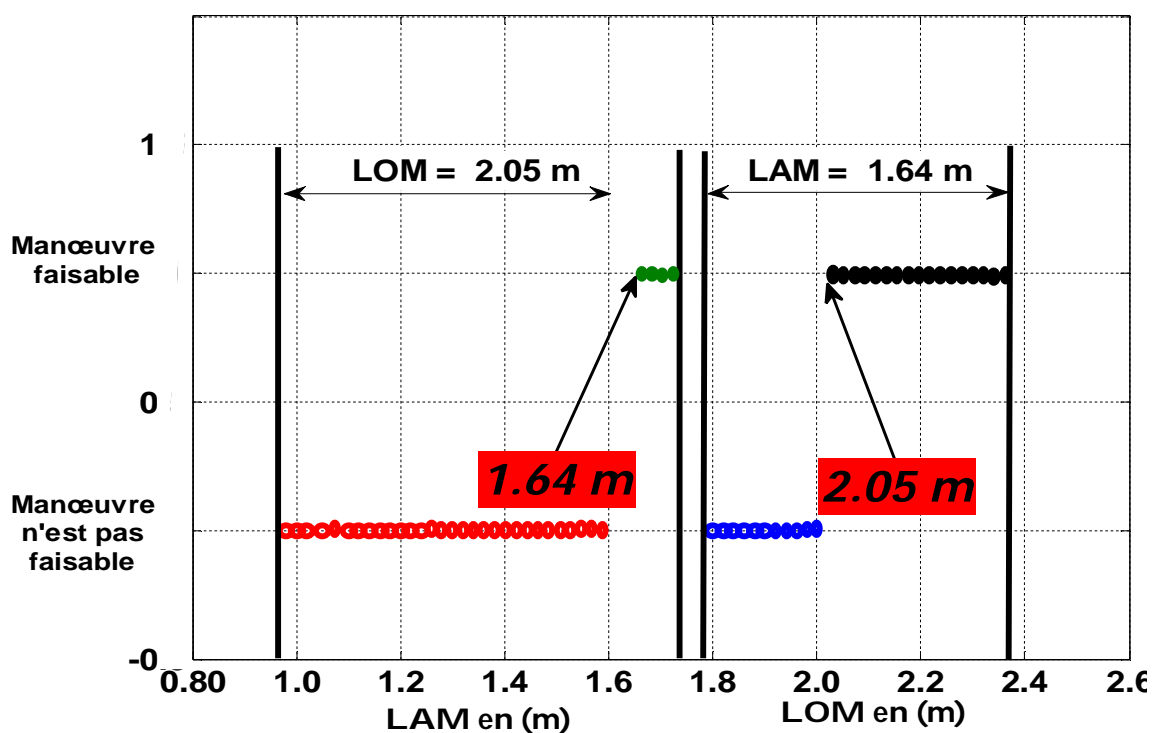


Figure V.23. L'espace de manœuvre d'une porte pivotante à tirer.

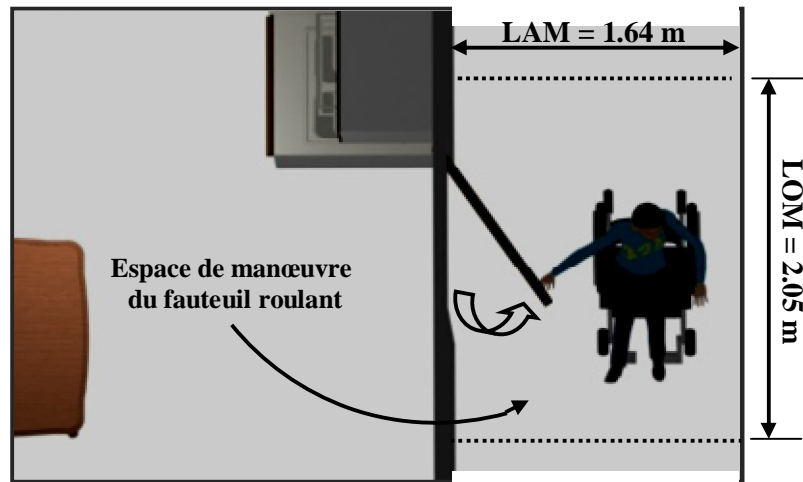


Figure V.24. L'espace de manœuvre d'une porte pivotante à tirer (LAP = 0.98 m).

### V.3.3. Hauteurs minimales et maximales de poignée

La hauteur de poignée doit être installée de manière qu'elle soit plus facile à atteindre et manipuler. Pour avoir les hauteurs admissibles dans minimum d'espace de manœuvre, on a testé plusieurs valeurs de la hauteur de poignée (HH). La figure V.25, présente l'intervalle des valeurs admissibles de la poignée.

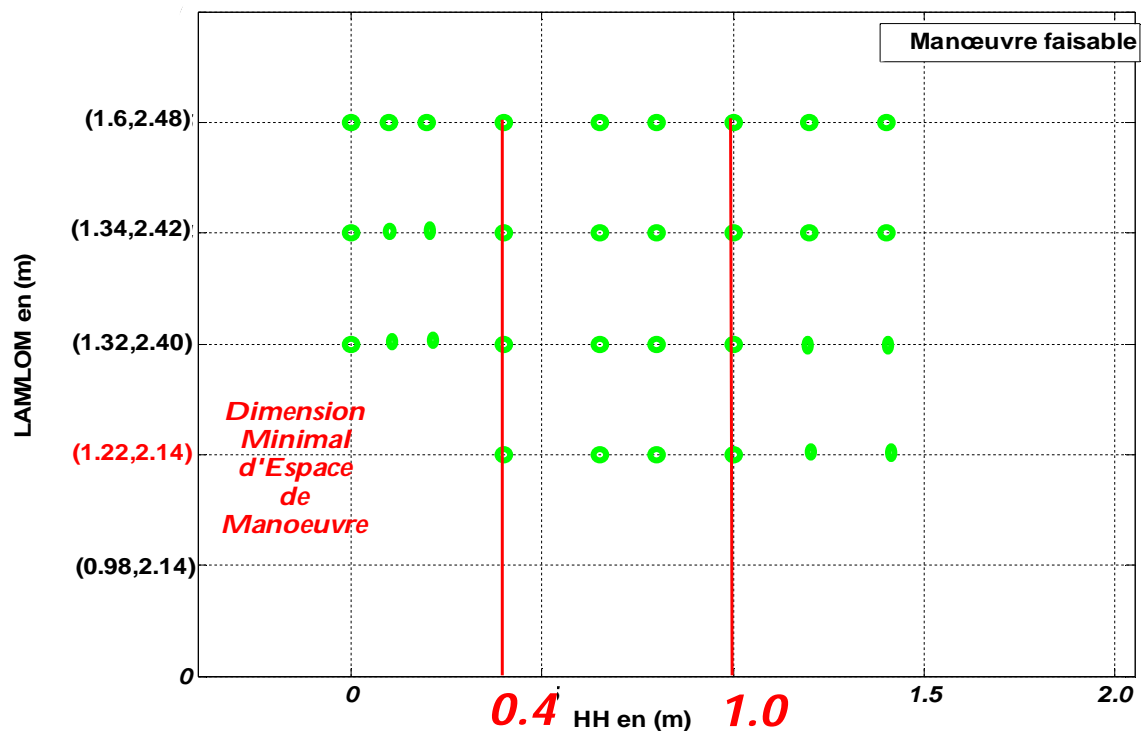


Figure V.25. Hauteurs admissibles de la poignée par rapport à l'espace de manœuvre minimal.

Dans la figure V.25, nous remarquons que l'ouverture de la porte se réalise pour toutes les hauteurs admissibles de la poignée lorsque les valeurs de LAM et LOM sont supérieures ou égales à 1.32 m et 2.40 m respectivement. Lorsque les valeurs de LAM et LOM sont inférieures à 1.32 m et 2.40 m

respectivement. Suivant les configurations de la chaîne articulaire obtenues, on peut dire que les hauteurs de la poignée entre 0.4 m et 1.0 m sont les plus appropriées pour manipuler la porte dans un espace de manœuvre minimal (1.22 m, 2.14 m).

A partir des résultats obtenus de manipulation de la porte pivotante, on peut extraire les paramètres principaux contribuant à l'évaluation d'accessibilité des éléments de manœuvre. Les paramètres seront sélectionnés selon l'influence qu'ils ont apportée à l'opération de manipulation. Les paramètres suivants ont la plus grande influence sur la réussite de l'opération de manœuvre :

Paramètre 1 : *l'espace de manœuvre du fauteuil roulant* (LAM et LOM). Il doit être convenable par rapport aux dimensions du fauteuil roulant, dont ses dimensions se varient selon le type de la porte utilisée. Cet espace est nécessaire devant toute porte, portail, portillon situé le long d'un cheminement extérieur, toute porte ouvrant sur les parties communes, toute porte d'un local collectif, toute porte à ouverture par effacement du ou des vantaux et dans un sas, d'un établissement recevant du public, bâtiments d'habitation collective et maison individuelle [135].

Paramètre 2 : *la hauteur de l'élément de contact de manipulation* (ex : la poignée). En fait, la hauteur de ce dernier affecte directement la dimension de l'espace de manœuvre. Il existe plusieurs aspects qui peuvent être considérés afin de bien faciliter l'utilisation de celle-ci, entre autres, son installation et son type utilisé. Le premier aspect sera l'objectif de cette étude.

Paramètre 3 : *dimensions du fauteuil roulant* : le fauteuil roulant utilisé peut ajouter d'autres contraintes aux mouvements de la partie haute, comme il peut aussi créer des douleurs chez la personne lorsque le design n'est pas confortable et ne convient pas au volume du corps ni aux contraintes articulaires [59].

Paramètre 4: *limites articulaires* : les limites articulaires ne sont pas les mêmes pour chaque personne. Elles peuvent être dégradées avec l'âge ou d'une autre maladie, dans les deux cas le champ de préhension sera diminué ainsi que l'accessibilité à la préhension.

Paramètre 5 : *la direction de manipulation (le sens de manipulation)* : la direction de manipulation affecte directement la forme de l'espace de manœuvre du fauteuil ainsi que ses dimensions. La direction de manipulation dans l'exemple précédent de la porte était en parallèle. Il y a aussi la manipulation devant, lorsque la personne se rapproche en suivant une ligne droite perpendiculaire à la porte. Généralement, la direction de manipulation se fait selon la position et l'orientation de l'élément de manœuvre dans l'habitat.

Après la sélection des paramètres, nous avons étudié leur contribution et leur influence sur l'accessibilité à la préhension et à la mobilité par rapport aux éléments de manœuvre.

#### **IV.4. Résultats de la première étude: relation entre la conception du fauteuil roulant, l'espace de manœuvre et les zones d'atteintes**

Dans cette partie, nous avons discuté la relation entre le volume occupé par un fauteuil roulant, l'espace de manœuvre et les zones d'atteinte correspondants. Les résultats obtenus ont été séparés en

deux parties. La première partie est relative au calcul de la dimension de l'espace de manœuvre du fauteuil, et la deuxième partie au positionnement de cet espace devant l'élément de manipulation. Les résultats obtenus correspondent à une personne ayant des limites articulaires normales (voir Annexes, Tableau A.2).

#### V.4.1. Dimension de l'espace de manœuvre du fauteuil et les hauteurs de préhension admissibles

##### V.4.1.1. Porte pivotante à tirer et à pousser

Pour réussir l'opération de manipulation de la porte pivotante à tirer, la relation qui relie les variations des dimensions appropriées du fauteuil roulant avec celle de la porte pivotante et de l'espace de manœuvre a été déterminée. L'opération d'ouverture de la porte pivotante à tirer a été simulée de la manière suivante. Premièrement, nous avons fixé une largeur (LAP) franchissable ( $LAP \geq WhW$ ) par un volume prédéfini du fauteuil roulant ( $WhW$ ,  $WhL1$ ,  $WhL2$ ). Ensuite, on varie successivement les valeurs de LAM et LOM pour trouver celles minimales qui garantissent une manœuvre réalisable par le fauteuil roulant. On tient à répéter cette procédure du calcul pour plusieurs valeurs de la porte, du fauteuil roulant et de l'espace de manœuvre.

L'analyse des résultats obtenus tient au fait que la variation de (LAP+LAM) en fonction de ( $WhW + WhL1$ ) est une fonction linéaire (voir figure V.26). Cette relation a été prouvée par le calcul du coefficient linéaire de Pearson  $r$  ( $r = +0.80$ ), dont la valeur absolue (0.80) représente la linéarité de la relation (de type  $Y = a \times X + b$ ) et le signe positive (+) représente le sens d'évolution. La fonction expérimentale quantitative de cette relation se figure sur le tableau V.4, ligne 1.

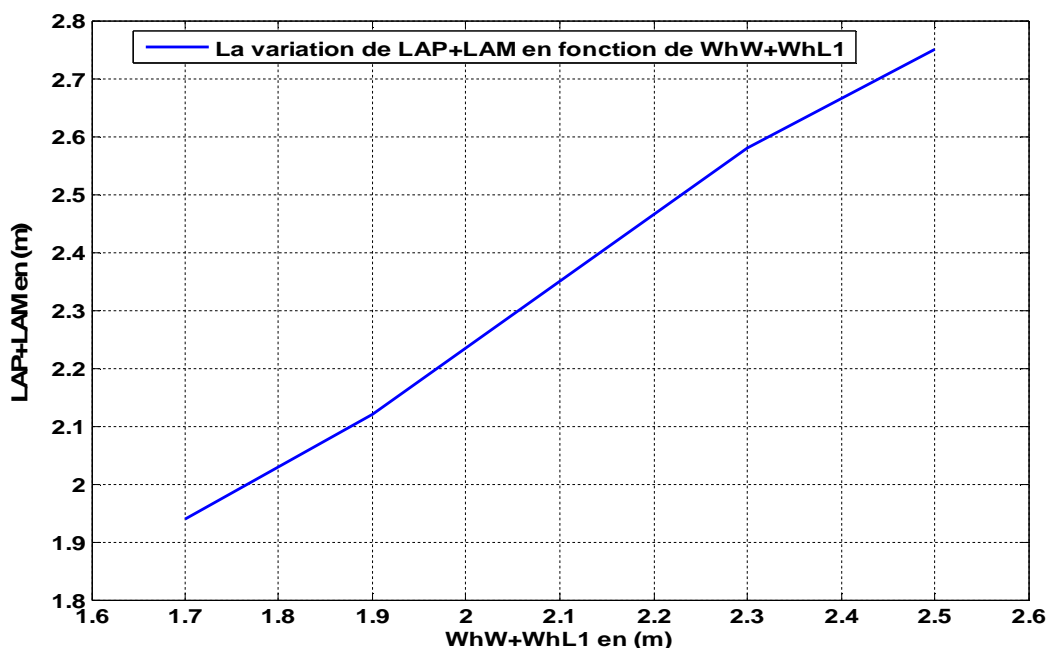


Figure V.26. La variation de LAM+LAP en fonction de  $WhW+WhL1$ .

Dans le cas de la porte à pousser, la variation de (LAM + LOM) en fonction de ( $WhW + WhL1$ ) est une relation linéaire, dont le coefficient de Pearson  $r$  égale à +0.75. La relation expérimentale et

qualitative obtenue dans le tableau V.4, ligne 2. Dans ce cas, la largeur de l'espace de manœuvre est réduite par rapport à celle de la porte à tirer (voir figure V.27). Pratiquement, cette différence est raisonnable parce que la porte dans ce cas s'ouvre dans le sens opposé à la personne.

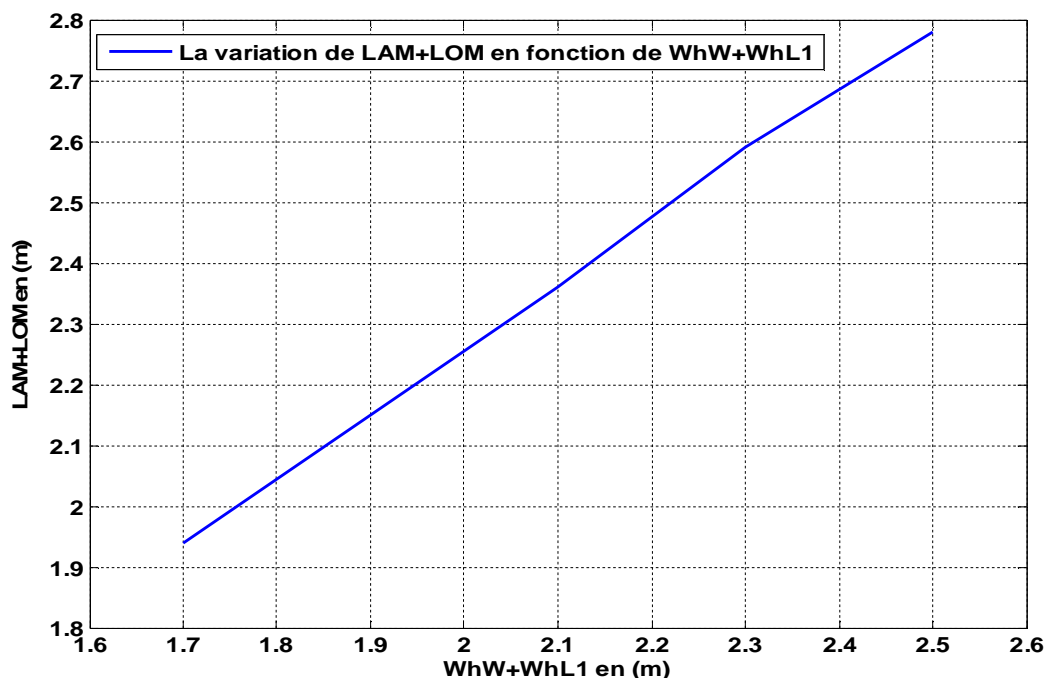


Figure V.27. La variation de LAM+LOM en fonction de WhW+WhL1.

#### V.4.1.2. Poignée

En suivant la même procédure, nous avons simulé les valeurs atteignables de la poignée en fonction des dimensions du fauteuil roulant et l'espace de manœuvre correspond.

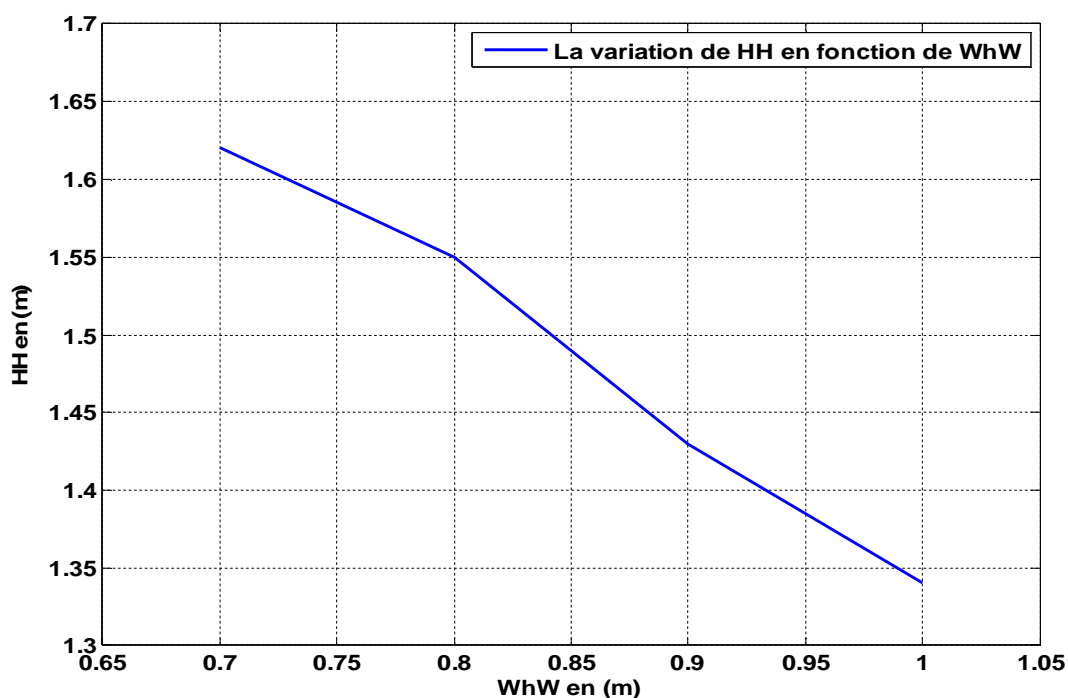


Figure V.28. La variation de HH en fonction de WhW et WhW+WhL1.

Suivant les résultats obtenus, nous avons trouvé que la hauteur atteignable de poignée (HH) diminue lorsque la largeur de l'espace de manœuvre augmente (LAM). Par contre, la valeur de LOM n'a aucune influence sur la variation de HH. La relation extraite dans ce cas relie la variation de HH et la variation de LAM. Selon le coefficient de Pearson qui est égale à -0.75, est une relation linéaire avec une pente négative (figures V.28). La relation expérimentale quantitative se figure dans le tableau V.4, ligne 3.

Type de porte	Relation descriptive		Conditions d'accessibilité de l'élément de manœuvre
	Type de la fonction	La fonction quantitative	
Porte pivotante à pousser	$Y = aX + b$	$Y_p \simeq X_p + 27$ <i>Y<sub>p</sub> représente la somme de LAP + LAM, X<sub>p</sub> la somme de WhW + WhL1.</i>	<i>L'ouverture et le franchissement de la porte pivotante à pousser est réalisable si LAP+LAM et WhW+WhL1 vérifient l'équation ci-contre.</i>
Porte pivotante à tirer	$Y = aX + b$	$Y_t \simeq X_t + 210$ <i>Y<sub>t</sub> représente la somme de LAM + LOM, X<sub>t</sub> la somme de WhW + WhL1.</i>	<i>L'ouverture et le franchissement de la porte pivotante à tirer est réalisable si les valeurs de LAM et LOM vérifiées l'équation ci-contre et si : LAM+LOM&gt;2*LAP+WhL1+WhW</i>
Porte pivotante à tirer et à pousser	$Y = aX + b$	$H_p \simeq -\left(\frac{1}{3}\right) * LAM + 183$ <i>H<sub>p</sub> Représente la hauteur de la poignée de la porte.</i>	<i>L'ouverture et le franchissement de la porte pivotante est réalisable par la personne, si l'équation ci-contre est valide dans intervalle suivante : 40 cm ≤ H<sub>p</sub> ≤ 95 cm.</i>

Tableau V.4. Exemples des relations expérimentales qualitatives obtenues entre les dimensions de la porte pivotante et les espaces de manœuvre et hauteurs de poignée correspondants.

#### V.4.1.3. Porte coulissante

La porte coulissante représente le deuxième type des portes le plus utilisé. Elle se caractérise par l'absence d'un espace de manœuvre au moment de l'ouverture et de la fermeture, ce qui la met en mesure d'être facile à manipuler et à installer. Les résultats obtenus (figure V.29) montrent que les variations des dimensions de l'espace de manœuvre du fauteuil en fonction des dimensions du fauteuil roulant. Pour la manipulation en face, la porte coulissante peut être manœuvrée dans un espace d'usage minimal, dont sa longueur doit être supérieure à la largeur du fauteuil roulant. Par contre, nous avons constaté suivant les manœuvres réalisées par le fauteuil que les hauteurs atteignables de poignée

dans un espace de manœuvre minimal sont limitées et varient selon les dimensions du fauteuil roulant. Cette variation ne suis aucune relation particulière mais elle reste relative aux capacités articulaires de la personne (ex : pour un  $WhL1 = 0.9$  m et  $WhW = 0.6$  m, on a les valeurs suivantes : un LOM est égal à 0.97 m, un LAM est égal à 0.67 m et un intervalle des hauteurs atteignables qui s'étendent de 0 m à 0.85 m).

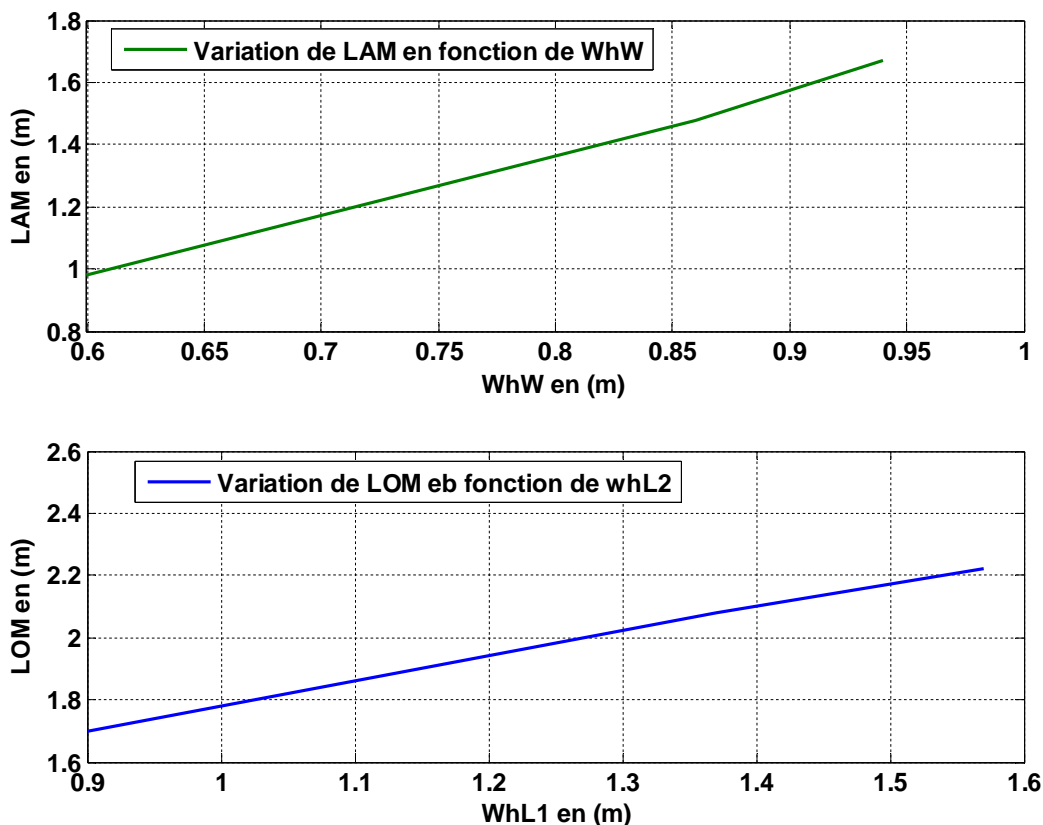


Figure V.29. Porte coulissante : relation entre les dimensions du fauteuil et l'espace de manœuvre correspond (manipulation en parallèle).

#### V.4.1.4. Eléments de service et commande

##### A. Approche parallèle

La figure suivante (figure V.30) représente les hauteurs maximales et minimales de préhension des dispositifs de commande et de service (les interrupteurs, boîtes aux lettres, téléphones, distributeurs), les dispositifs d'arrêt d'urgence (vannes d'arrivée d'eau, de gaz), les dispositifs de manœuvre (poignée des portes, fenêtres) ...etc. Le calcul a été fait dans un espace de manœuvre minimal (voir figure V.30) sans déplacement du fauteuil roulant comme l'indique le tableau IV. Les courbes présentées dans la figure V.30, montrent que la hauteur maximale de préhension diminue lorsque la largeur du fauteuil ( $WhW$ ) augmente. Ces hauteurs dépendent aussi des capacités articulaires de la personne. Pour une personne ayant des capacités articulaires normales (voir annexe, tableau A.2), la hauteur maximale de préhension est entre 1.55 m et 1.62 m.

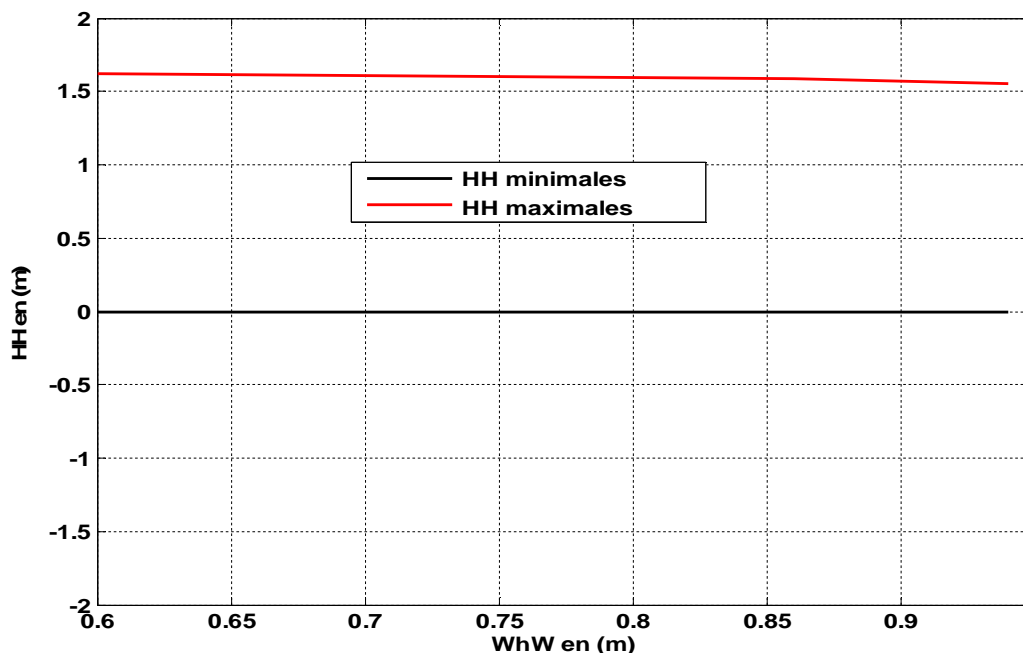


Figure V.30. Hauteurs de préhension selon l'approche en parallèle.

### B. Approche en face

Dans ce cas, la personne doit se mettre devant le dispositif pour l'atteindre. Cette position peut survenir lorsque le dispositif est installé au fond d'un couloir où la manœuvre du fauteuil est pratiquement irréalisable. Nous avons remarqué suivant les simulations que lorsqu'on augmente la longueur du fauteuil, la hauteur diminue. Pour une personne ayant des capacités articulaires normales, la hauteur minimale de préhension est égale à 0.07 m alors que celle maximale est égale à 1.29 m (voir figure V.31).

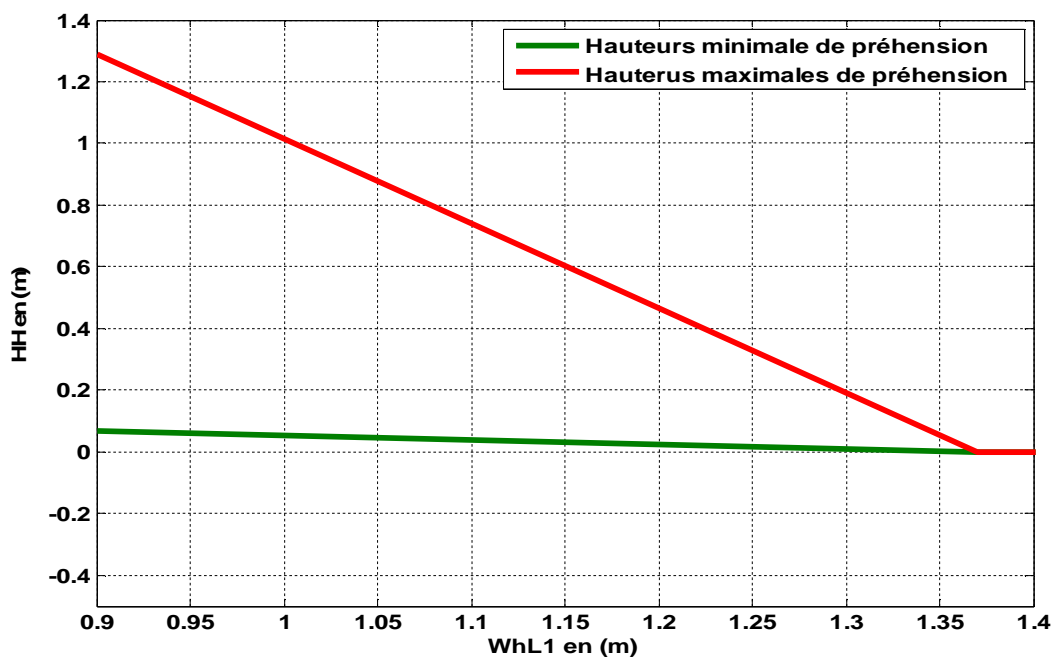


Figure V.31. Hauteurs de préhension selon l'approche devant.



#### V.4.1.5. Cas particuliers

##### A. Sonnette de la porte d'entrée

La figure V.32 montre un cas particulier d'un dispositif de service (sonnette de porte d'entrée). La distance  $D$ , par rapport à l'angle rentrant de parois doit être suffisamment grande pour que le bouton soit facile à atteindre. Nous avons simulé l'opération d'atteinte avec plusieurs dimensions du fauteuil roulant, la relation extraite entre les dimensions du fauteuil et les valeurs de la distance  $D$  n'a pas une forme linéaire, par contre la valeur moyenne de la distance est égale à 0 m pour une personne ayant des capacités articulaires normales.

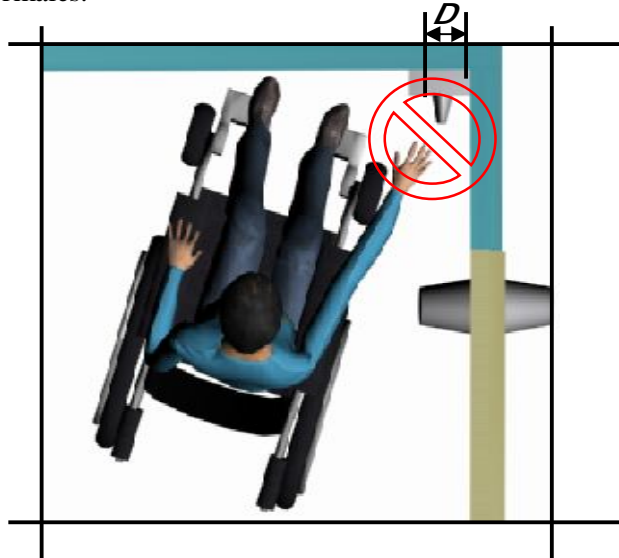


Figure V.32. Bouton par rapport à l'angle rentrant de parois.

##### B. Système de control d'accès

Le positionnement judicieux du système de contrôle d'accès permet à la personne en fauteuil roulant de le manipuler facilement et à l'occupant de voir qui s'annonce (figure V.33). Les valeurs moyennes de LOM, LAM et HH obtenus par notre simulation avec le type du fauteuil roulant utilisé sont les suivants:

- Pour une manipulation en parallèle, le LAM et le LOM doivent être supérieurs ou égaux à 0.65 et 1 m respectivement, la HH doit être égale à 0.65 m.
- Pour une manipulation en face, le LAM et le LOM doivent être supérieurs ou égaux à 0.98 m et 0.67 m respectivement, la HH doit être égale à 0.85 m.

#### V.4.2. Positionnement de l'espace de manœuvre du fauteuil roulant devant une porte

Le positionnement de l'espace de manœuvre du fauteuil roulant devant l'élément de manœuvre doit permettre à la personne en fauteuil roulant d'ouvrir, de franchir et de fermer une porte ou tout autre type des dispositifs de manœuvre de manière autonome. En fonction du sens de manipulation du fauteuil roulant (devant ou en parallèle), nous avons trois positions possibles de l'espace de manœuvre du fauteuil roulant (voir figure V.34).

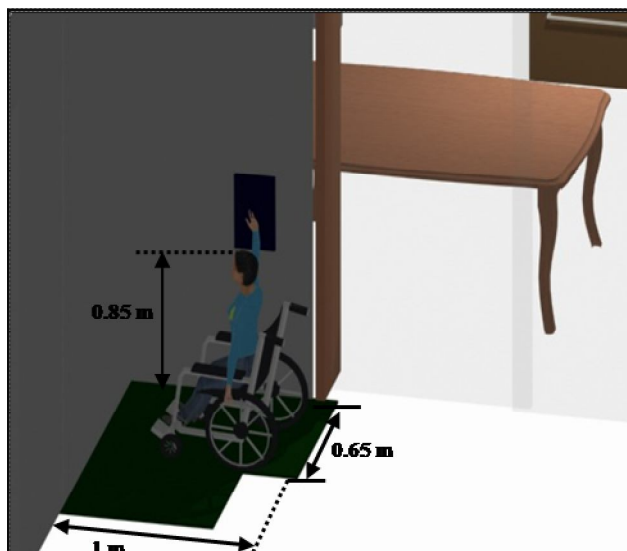
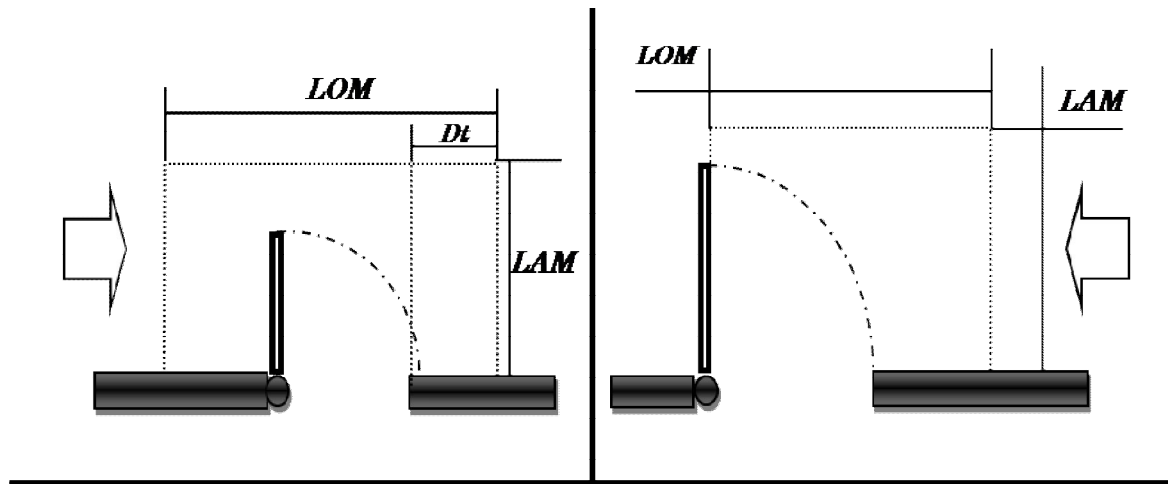


Figure V.33. Hauteur et espace de manœuvre du système de contrôle d'accès, approche parallèle.

Nous avons remarqué d'après les résultats de simulation que le positionnement de l'espace de manœuvre dépend principalement du sens de manipulation du fauteuil et le type de la porte manipulée. Alors que, ses dimensions dépendent du volume du fauteuil et le type de la porte manipulée. Pour une porte pivotante à pousser et à tirer l'espace de manœuvre doit respecter les règles suivantes :

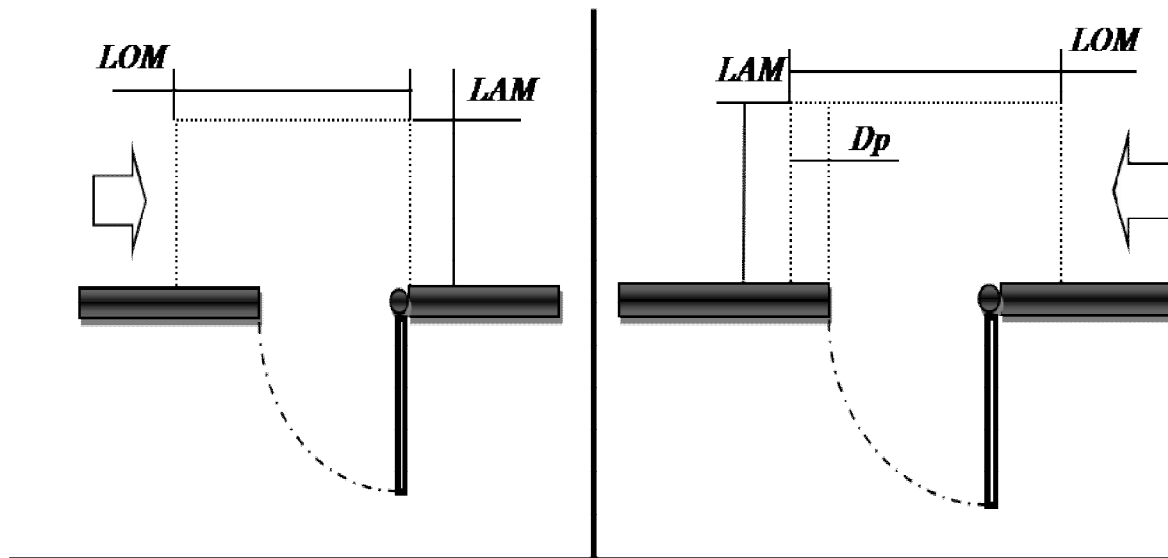
- Porte pivotante à tirer : sens de manipulation du côté charnières : les valeurs de LOM et LAM doivent respecter la relation présentée dans le tableau V.4, ligne 1, et leur position doit s'étendre selon l'image droite de la figure V.34 (a), la valeur de  $Dt$  doit être supérieure ou égale à  $WhL2$ .
- Porte pivotante à tirer : sens de manipulation du côté poignée : les valeurs de LOM et LAM doivent respecter la relation présentée dans le tableau V.4, ligne 1, et leur position doit s'étendre selon l'image gauche de la figure V.34 (a).
- Porte pivotante à pousser : sens de manipulation du côté charnières : les valeurs de LOM et LAM doivent respecter la relation présentée dans le tableau V.4, ligne 2, et leur position doit s'étendre de manière que la valeur de  $Dp$  soit supérieure ou égale de  $(WhL1-WhL2)$  selon l'image droite de la figure V.34 (b).
- Porte pivotante à pousser : sens de manipulation du côté poignée : les valeurs de LOM et LAM doivent respecter la relation présentée dans le tableau V.4, ligne 2, et leur position doit s'étendre selon l'image gauche de la figure V.34 (b).
- Porte pivotante à pousser : sens de manipulation en face : les valeurs de LOM et LAM doivent respecter la relation présentée dans le tableau V.4, ligne 2, et leur position doit s'étendre selon l'image droite de la figure V.34 (c).

- Porte pivotante à tirer : sens de manipulation en face : les valeurs de LOM et LAM doivent respecter la relation présentée dans le tableau V.4, ligne 1, et leur position doit s'étendre selon l'image gauche de la figure V.34 (c).
- Porte coulissante : sens de manipulation, du côté charnières : la position de l'espace de manœuvre doit s'étendre selon l'image droite de la figure V.35 (a).
- Porte coulissante : sens de manipulation du côté poignée : la position de l'espace de manœuvre doit s'étendre selon l'image gauche de la figure V.35 (a).
- Porte coulissante : sens de manipulation en face : la position de l'espace de manœuvre doit s'étendre selon la figure V.35 (b).



Note :  $Dt \approx WhL2$

(a)



Note:  $Dp \approx WhL1 - WhL2$

(b)

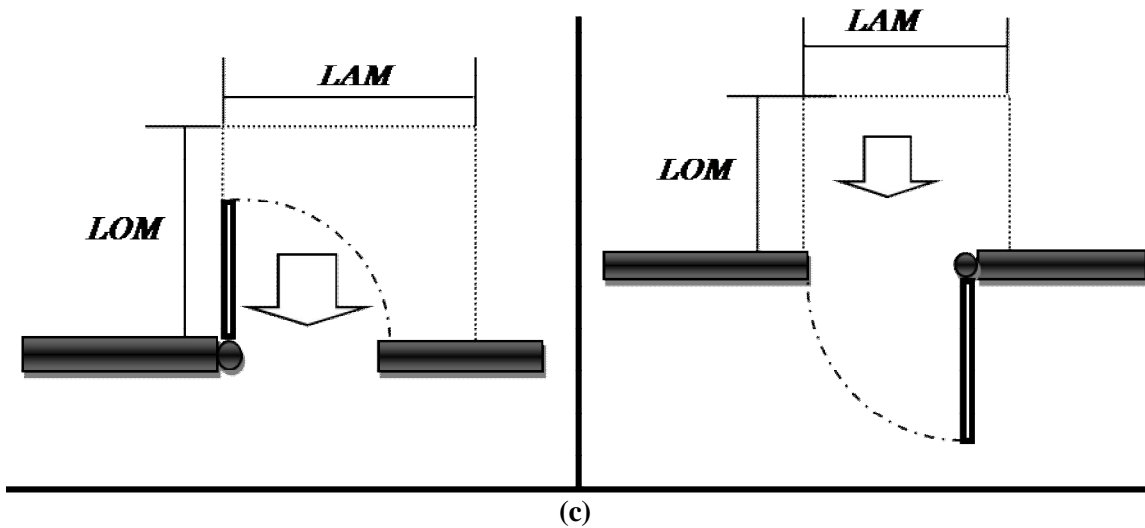


Figure V.34. Positionnement de l'espace de manœuvre d'une porte pivotante à pousser et à tirer.

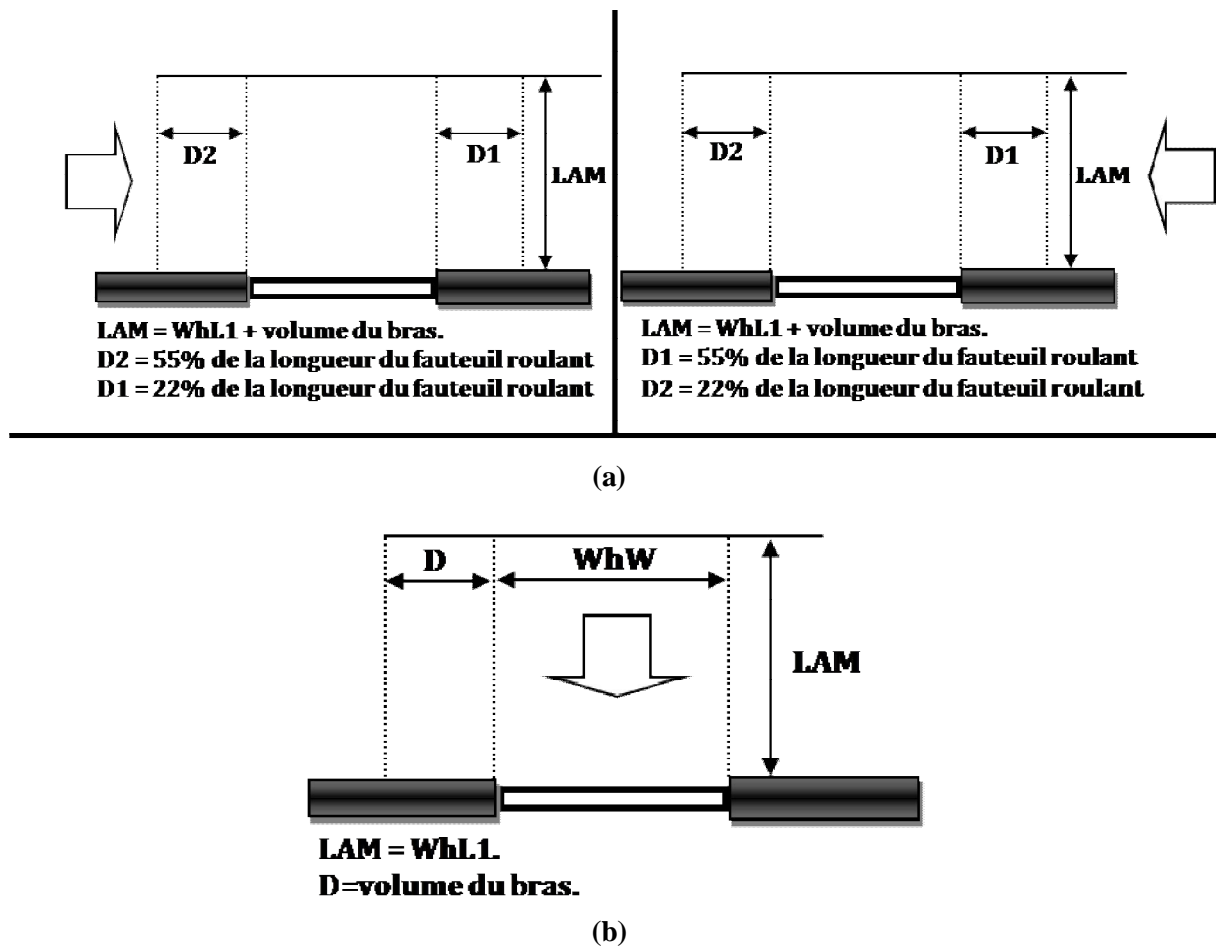


Figure V.35. Positionnement de l'espace de manœuvre d'une porte coulissante.

#### V.4.3. Discussion

Dans cette étude, nous avons obtenu les relations expérimentales reliant les cinq paramètres principaux qui contribuent à la manipulation d'un élément de manœuvre. Ces relations, nous ont

permis de comprendre les variations d'un paramètre par rapport à un autre, l'influence de chacun sur l'autre et sur la procédure de manipulation. Les portes, sont des éléments de manœuvre primordiaux dans l'espace de vie individuel ou publique. Pratiquement, leur manipulation nécessite des mouvements du corps avec des déplacements simultanés du fauteuil roulant. Le calcul de l'espace de manœuvre du fauteuil roulant est dépendant des dimensions du fauteuil roulant, de la hauteur de la poignée et des capacités articulaires de la personne. Pour une porte pivotante à tirer d'une LAP = 0.98 m et un fauteuil roulant avec un WhW = 0.6 m, un WhL1 = 0.90 m et un WhL2 = 0.40 m, nous avons un espace de manœuvre d'une largeur et une longueur minimales égaux à 1.60 m et 2.50 m, respectivement. Dans le cas d'une porte à pousser et pour les mêmes valeurs du fauteuil avec une porte de 0.88 m, nous avons un espace de manœuvre d'une largeur et d'une longueur minimales égales à 0.90 m et 2.50 m, respectivement. Les hauteurs atteignables de la poignée qui correspondent à l'espace minimale de manœuvre du fauteuil trouvées sont limitées entre 0 m et 1.62 m pour la porte à pousser et entre 0 m et 1.55 m pour la porte à tirer. D'après ces résultats, nous remarquons que les paramètres de manipulation sont liés l'un à l'autre. On ne peut pas fixer l'un sans tenir compte de l'autre. Le résultat le plus significatif de cette étude est que la relation globale reliant les variations des paramètres de manipulation est basée principalement sur les capacités articulaires de la personne, ce que nous permet de donner des règles plus détaillées sur l'accessibilité à la mobilité et à la préhension pour une personne à mobilité réduite.

Si on prend les résultats adoptés par les États-Unis [24], les dimensions de l'espace de manœuvre pour la porte pivotante à pousser avec une manipulation en parallèle ont été fixées à 1.37 m pour la longueur et 1.06 pour la largeur. Pour la porte à tirer, elles sont fixées à 1.21 m pour la largeur et à 0.61 m pour la longueur. En France [23], ces dimensions ont été fixées à 1.70 m pour la longueur et à 1.40 pour la largeur pour la porte pivotante à pousser, et à 2.20 m pour la longueur et à 1.40 m pour la largeur pour la porte pivotante à tirer. L'installation d'un dispositif de commande (ex : téléphone ou système de contrôle d'accès), on a selon l'approche américaine, la hauteur est égale à 0.68 m avec un espace de manœuvre du fauteuil d'une largeur et longueur égales à 0.76 m et 1.22 m, respectivement pour la manipulation en parallèle, et égales à 1.22 m et 0.76 m, respectivement pour la manipulation en face. Dans le cas de l'approche française, la hauteur est égale à 0.90 m avec un espace de manœuvre du fauteuil d'une largeur et longueur égales à 0.80 m et 2.20 m, respectivement pour la manipulation en parallèle, et égales à 2.20 m et 0.80 m respectivement pour la manipulation en face.

Nous remarquons que les valeurs dans les deux cas (États-Unis et France) sont calculées géométriquement sans tenir compte des capacités articulaires de la personne ni son état de santé ni sa tranche d'âge. À la limite, un tel espace de manœuvre ne pourra être satisfaisant pour toute personne à mobilité réduite, surtout celle qui souffre de maladies chroniques ou des déficiences liés au vieillissement dont leur hauteur de préhension limite l'espace de manœuvre. Selon notre étude, nous remarquons qu'il y a une grande différence entre les valeurs obtenues par notre approche avec une seule dimension du fauteuil roulant et une seule capacité articulaire et celles adoptées par les deux

pays de France et de États-Unis. Cette différence signifie que la prescription d'accessibilité des éléments de manipulation ne répond pas spécifiquement aux besoins des personnes à mobilité réduite. L'analyse des résultats obtenus par des méthodes de classification permet de comprendre l'influence et la contribution de chaque paramètre à la manipulation. Ce fait, permet aux ingénieurs de réhabilitation de mettre au point les prescriptions spécifiques de l'habitat afin de répondre universellement aux besoins des personnes à mobilité réduite. La conclusion importante que nous avons retenue de cette première étude est l'importance de tenir compte de la personne et son aide technique dans la procédure de construction/réhabilitation des espaces de vie et éléments de manipulation.

Prescriptions	Approches	interprétation
<ul style="list-style-type: none"> <li>- La largeur du couloir + largeur de porte doit être supérieure ou égale à 2 m.</li> <li>- <b>Porte pivotante à pousser</b>: espace de manœuvre égale à 1.7mX1.4m.</li> <li>- <b>Porte pivotante à tirer</b>: espace de manœuvre égale à 2.2mX1.4m.</li> <li>- <b>La poignée de la porte</b> doit être installée entre 0.4 m et 1.3 m.</li> <li>- <b>Hauteurs des équipements</b> et des <b>dispositifs de commande</b> doivent respecter la règle : <math>0.90\text{ m} \geq \text{HH} \leq 1.30\text{ m}</math>.</li> </ul>	<p>Prescriptions adoptées en France [23].</p>	<p>- Les valeurs des espaces de manœuvre du fauteuil ainsi que les hauteurs de préhension sont spécifiques. Elles sont calculées sans considérer la personne ni le sens de manipulation du fauteuil roulant.</p>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- <b>Porte pivotante à pousser</b> : espace de manœuvre doit être égal à :               <ol style="list-style-type: none"> <li>a. Manipulation en face: LAM = 1.22 m et LOM = LAP + 0.30m.</li> <li>b. Manipulation du côté de charnières : LAM = 1.07 et LOM = 1.37 m.</li> <li>c. Manipulation du côté poignée: LAM = 1.07 m et LOM = 0.61 m + LAP.</li> </ol> </li> <li>- <b>Porte pivotante à tirer</b> : espace de manœuvre doit être égal à :               <ol style="list-style-type: none"> <li>1- Manipulation en face: LAM = 1.52 m et LOM = LAP + 0.46m.</li> <li>2- Manipulation du côté de chainières: LAM = 1.06 et LOM = LAP + 0.91 m.</li> <li>3- Manipulation du côté poignée: LAM = 1.22 m et LOM = 0.61 m + LAP.</li> </ol> </li> <li>- <b>Hauteur de préhension</b>:               <ol style="list-style-type: none"> <li>1- <b>Poignée</b>, Manipulation en face : doit être égale à [0.51 m, 1.22 m].</li> <li>2- <b>Poignée</b>, Manipulation en parallèle : doit être égale à [0.38</li> </ol> </li> </ul>	<p>Prescriptions adoptées en États-Unis [24].</p>	<p>- La relation entre l'espace de manœuvre (la hauteur de préhension) et le fauteuil roulant (la personne) n'est pas définie. Les valeurs sont très spécifiques et les limites articulaires ne sont pas considérées.</p>

m, 1.22 m]. <b>Hauteur des équipements et des dispositifs de commande</b> doit être égale à 0.68 avec un LAM minimal égale à 0.76 et un LOM minimal égal à 1.22 (pour les deux sens manipulations).		
--	--	--

Tableau V.5. Exemples des prescriptions des éléments de manœuvre adoptées en France et États-Unis.

**V.5. Résultats de la deuxième étude : la relation entre les capacités résiduelles articulaires (l'âge de la personne et les dimensions du fauteuil roulant, l'espace de manœuvre et les zones d'atteintes**

Les résultats suivants, portent sur l'étude qui a été faite sur des personnes à mobilité réduite à des âges différents. Pour étudier l'influence de la dégradation des capacités articulaires de la partie haute (causée par le vieillissement ou autres maladies chroniques) sur l'accessibilité à la préhension et à la mobilité, nous avons sélectionné selon la tranche d'âge trois types de personnes ayant trois capacités articulaires différentes (voir Annexe, tableaux A.2, A.3 et A.4). Nous avons calculé les hauteurs de préhension des éléments de manipulation (de commande et de service) ainsi que l'espace de manœuvre du fauteuil roulant correspondant, pour chaque capacité articulaire et avec trois types de fauteuils roulant (standard, grand et plus grand).

**V.5.1. Portes**

Le tableau V.6, présente les résultats obtenus des portes (on prend à titre d'exemple la porte pivotante à tirer). Pour les autres types des portes voir l'Annexe, tableau A.5.

<b>Caractéristiques de l'élément de manœuvre</b>			
<b>Catégorie des Personnes</b>	<b>LAP en mètre</b>	<b>[LAM, LOM] en mètre</b>	<b>HH de poignée en mètre</b>
15– 35 ans (1)	1	[2.50, 1.60]	[0, 1.55]
45 – 60 ans (2)	1	[2.50, 2]	[0.14, 1.46]
60 – 75 ans (3)	1	[2.50, 2.15]	[0.19, 1.25]
<b>Grand: WhW = 0.86 m, WhL1 = 1.37 m, WhL2 = 0.80 m</b>			
15– 35 ans	1	[2.50, 1.95]	[0.07, 1.48]
45 – 60 ans	1	[2.50, 2.16]	[0.17, 1.41]
60 – 75 ans	1	[2.65, 2.37]	[0.23, 1.22]
<b>Plus grand: WhW = 0.94 m, WhL1 = 1.57 m, WhL2 = 0.90 m</b>			
15– 35 ans	1	[2.05, 1.65]	[0, 1.63]
45 – 60 ans	1	[2.20, 1.95]	[0.10, 1.57]

60 – 75 ans	1	[2.30, 2]	[0.14, 1.28]
<b>Standard: WhW = 0.60 m, WhL1 = 0.90 m, WhL2 = 0.40 m</b>			

Tableau V.6. Espaces de manœuvre et hauteurs de préhension pour les trois types des personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant (porte pivotante).

Pour la même dimension du fauteuil roulant, nous avons différents espaces de manœuvre et hauteurs de poignée. Les espaces de manœuvre du fauteuil roulant varient d’une catégorie à l’autre, dans le cas du fauteuil grand on a : pour la catégorie (1) [2.50 m, 1.60 m], pour la catégorie (2) [2.50 m, 2 m] et pour la catégorie (3) [2.50 m, 2.15 m]). Il est clair que cet espace augmente lorsque la dégradation articulaire est importante (voir Annexe, tableau A.4). Pour la dernière catégorie de personnes (60-75 ans) nous avons pour le fauteuil du type grand, un espace de manœuvre égal à [2.50 m, 2.15 m]. Ce dernier représente l’espace de manœuvre minimale qui doit être considéré pour réussir la manipulation de la porte. Alors que, pour la première catégorie (15-35 ans, personnes ayant limites articulaires normales) nous avons un espace égal à [2.50 m, 1.60 m]. De point de vue géométrique (sans tenir compte de la personne ni ses capacités articulaires), les deux espaces doivent être égaux. Par contre dans notre cas, où la personne est introduite à la procédure de manipulation, l’espace de manœuvre n’est plus dépendant de la dimension du fauteuil mais il est dépendant aussi de la capacité articulaire de la personne. Nous avons remarqué que la distance occupée par le bras de la personne au moment d’atteindre la poignée est plus grand chez les personnes de la troisième catégorie que chez celles de la première et la deuxième catégorie. Cela s’explique peut-être par le fait que les personnes ne sont pas capables de déplier suffisamment les articulations de leur coude et leur épaule, ce qu’il leur oblige à mettre le fauteuil roulant à certaine distance afin de leur permettre d’atteindre la poignée. Les hauteurs de poignée (HH) présentées dans la troisième colonne du tableau V.5, sont les hauteurs de préhension minimales et maximales qui doivent être tenues en considération par les ingénieurs de réhabilitation. Ils varient selon les capacités articulaires et selon la dimension du fauteuil roulant.

**V.5.2. Hauteurs de préhension des éléments de service et commande : manipulation en face**

Catégorie des Personnes Selon la tranche d’âge	WHW = 0.60 m WHL1 = 0.90 m WHL2 = 0.40 m	WHW = 0.86 m WHL1 = 1.37 m WHL2 = 0.80 m	WHW = 0.94 m WHL1 = 1.57m WHL2 = 0.90 m	<b>Hauteurs admissibles des équipements/dispositifs en mètre</b>
15 – 35 ans	[0.07 m, 1.29 m]	Inatteignable	Inatteignable	
45 - 60 ans	[0.10 m, 1.20 m]	Inatteignable	Inatteignable	
60 – 75 ans	[0.43 m, 0.95m]	Inatteignable	Inatteignable	

Tableau V.7. Hauteurs admissibles des équipements/dispositifs pour les trois catégories des personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant.



Les résultats du tableau V.7, présentent les hauteurs de préhension des dispositifs de commande/service. Nous remarquons que les gens qui souffrent des dégradations de type 1 et 2, ne sont pas capables d'atteindre leurs dispositifs lorsque le fauteuil est du type grand et plus grand, par contre nous avons des hauteurs admissibles pour le type standard.

Deux remarques ont été retenues de cette simulation, la première concernant l'influence du positionnement des dimensions du fauteuil roulant sur l'opération de manipulation et la deuxième concernant le choix du fauteuil roulant par rapport aux capacités de la personne. Afin de répondre aux besoins des personnes dans ce cas, nous proposons d'inclure les capacités articulaires à la conception du fauteuil roulant, pour garantir un design approprié et pour éviter le risque de tomber dans des cas d'inatteignabilité. Pour avoir un modèle approprié on doit tenir compte des avis des personnes concernées au fur et à mesure. Le paramètre de limite articulaire doit être prioritaire dans les prescriptions de l'accessibilité des éléments de manœuvre afin d'améliorer l'efficacité de la manipulation de cette catégorie de personnes.

### V.5.3. Équipements de service/commande installés l'angle rentrant d'un portail

La distance  $D$  représente la distance par rapport à l'angle rentrant des parois d'une sonnette ou tout autre équipement de commande installé à l'entrée d'un portail (voir figure V.30). Nous avons calculé cette distance pour chaque catégorie de personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant. Dans cet exemple, nous avons eu les mêmes remarques des exemples précédents, la distance  $D$  varie d'une catégorie à une autre et selon le type du fauteuil roulant utilisé. La différence significative a été remarquée entre la première et troisième catégorie. Si on prend la valeur de la distance  $D$  adoptée dans les prescriptions en France [23] ( $D = 0.40$  m), on trouve que les personnes des trois catégories peuvent seulement atteindre le point de contact lorsqu'ils utilisent le fauteuil roulant de type standard (distance commune minimale égale à 0.30 m). Donc la distance ( $D = 0.40$  m) est applicable pour toute personne qui utilise un fauteuil de type standard ou inférieure. Par contre, si la personne utilise un fauteuil de type grand ou plus grand, le point de contact du dispositif devient hors de portée de la main.

Catégorie des Personnes Selon tranche de l'âge	WHW = 0.60 m WHL1 = 0.90 m WHL2 = 0.40 m HH = 0.85 m	WHW = 0.86 m WHL1 = 1.37 m WHL2 = 0.80 m HH = 0.85 m	WHW = 0.94 m WHL1 = 1.57m WHL2 = 0.90 m HH = 0.85 m	Distance ' $D$ ' par rapport à l'angle rentrant de parois en mètre
15 – 35 ans	0 m	0.73 m	0.83 m	
45 - 60 ans	0 m	0.80 m	0.87 m	
60 – 75 ans	0.30 m	0.85 m	0.97 m	

Tableau V.8. Distance ' $D$ ' par rapport à l'angle rentrant de parois pour les trois catégories des personnes avec les trois dimensions du fauteuil roulant (porte coulissante).

La dimension du fauteuil roulant n'est pas le seul paramètre qui affecte la valeur  $D$ , les capacités articulaires aussi contribuent significativement à la détermination de la valeur de  $D$ . Pour le type plus grand, les personnes des trois catégories atteignent le dispositif sur trois distances différentes (0.83 m, 0.87 m et 0.97 m). Afin d'avoir une valeur globale à la distance  $D$ , les deux paramètres (fauteuil et personne) doivent être combinés et considérés dans le calcul des prescriptions de l'accessibilité. D'après nos résultats, la valeur appropriée de la distance  $D$ , doit être supérieure ou égale à 0.97 m, valeur calculée en tenant compte des deux paramètres (fauteuil et capacités articulaires).

### V.5.4. Discussion

Les résultats de la deuxième partie montrent encore une fois que l'évaluation de l'accessibilité des éléments de manipulations doit être impérativement prendre en compte les capacités articulaires de la personne et le type de fauteuil roulant utilisé. D'après cette étude, nous proposons que les prescriptions et les règles adoptées doivent être reconstruites du point de vue des personnes concernées. Les différences notées entre nos résultats et celles adoptés par les gouvernements de certains pays prouvent encore notre proposition. De l'autre côté, l'étude qui a été faite par un groupe de chercheurs Mexicains et Colombiens sur la fiabilité des aides techniques par rapport aux capacités physiques des gens qui souffrent des maladies chroniques [59], renforce aussi notre point de vue. Les résultats de cette étude montrent quelques exemples de personnes qui avaient apporté des modifications à leurs aides techniques pour avoir un certain confort et afin qu'ils puissent réaliser les activités quotidiennes de façon plus facile (les modifications ont été faites par rapport à l'accessibilité à la préhension et à la mobilité, voir chapitre II). Suivant notre étude, l'accessibilité est affectée principalement par le choix du fauteuil roulant et les capacités physiques de la personne. La réhabilitation d'un lieu de vie en tenant compte ces deux paramètres augmente l'autonomie et rendre l'environnement plus accessible aux personnes à mobilité réduite quel que soit leur état de santé.

## Conclusion et perspectives

---

### 1. Conclusion

Dans cette thèse, nous avons étudié une application de l'évaluation de l'accessibilité à la préhension et à la mobilité (accessibilité des éléments de manœuvre) pour une personne à mobilité réduite utilisant un fauteuil roulant manuel. Les études bibliographiques des travaux concernant l'accessibilité du cadre bâti pour des personnes à mobilité réduite, nous ont permis d'identifier le manque de support d'informations fiables qui correspondent aux situations de l'application envisagée du point de vue des personnes à mobilité réduite, de leur état de santé, de leur capacité articulaire et de leur tranche d'âge ...etc. L'évaluation des prescriptions de l'accessibilité adoptées mondialement, nous a montré un manque de précision, d'efficacité au niveau d'utilisation des éléments de manœuvre par les personnes à mobilité réduite. Les considérations physiques de l'utilisateur par rapport aux aides techniques, conceptions environnementales (éléments de manœuvre, hauteurs de préhension, espace de manœuvre ...etc.) étaient totalement absentes, les personnes ont souhaité pouvoir disposer des améliorations et des nouveaux aménagements à leur logement ainsi qu'à leur aide technique à la mobilité. Ces évaluations nous ont permis aussi de souligner les paramètres principaux qui affectent directement l'accessibilité. Dans ce contexte quatre volets ont été traités :

- Simulation des opérations de manœuvre (ex : ouvrir une porte) par une personne assise sur un fauteuil roulant dans un espace virtuel 3D.
- Analyse et définition des relations expérimentales reliant les paramètres qui caractérisent l'accessibilité à la préhension et à la mobilité, d'un élément de manœuvre dans un lieu de vie conçu pour une personne saine.
- Analyse de l'influence des dégradations articulaires de la personne et les dimensions du fauteuil roulant utilisé sur l'accessibilité.
- Analyse et définition des relations expérimentales reliant les dégradations articulaires de la personne, les dimensions du fauteuil roulant, l'espace de manœuvre du fauteuil (accessibilité à la mobilité), les dimensions et les hauteurs de préhension des éléments de manœuvre/commande/service (accessibilité à la préhension).

Afin de simuler des opérations de manœuvre, nous avons développé un outil qui contient un environnement virtuel avec des éléments de manipulation. Ces environnements sont du type dynamique, elles contiennent un espace de mobilité du fauteuil roulant qui est dépendant de l'orientation de ce dernier et des positions/orientations des éléments de manipulation. Avec ces environnements, nous avons conçu un avatar virtuel décrivant la chaîne articulaire de la personne et son fauteuil roulant. Cet outil est très avantageux, il nous a permis de simuler en 3D l'opération de manœuvre et de fixer facilement les capacités articulaires, le volume du fauteuil roulant, celui de l'élément de manœuvre, le positionnement de ce dernier ainsi que la conception globale de l'habitat selon les besoins de simulation.

Nous avons porté le deuxième volet sur l'identification des paramètres principaux qui peuvent affecter l'opération de manœuvre par rapport au fauteuil roulant. Afin de mener une étude précise avec des résultats fiables, il était nécessaire de porter notre analyse sur des paramètres réels. En plus de la dimension du fauteuil roulant, nous avons identifié trois autres paramètres. Ils sont analysés l'un par rapport à l'autre afin d'avoir une description équationnelle claire sur la variation de leurs valeurs.

- 1- L'espace de manœuvre du fauteuil roulant.
- 2- La dimension et la hauteur du point de contact de l'élément de manipulation.
- 3- Dimension du fauteuil roulant.
- 4- Le sens de manipulation du fauteuil roulant.

Dans cette partie des résultats et en raison de prouver l'effet de l'ignorance de la personne dans les prescriptives d'accessibilité adoptées mondialement, nous avons simulé l'opération par rapport à une personne ayant des limites articulaires normales. Les résultats obtenus, nous ont permis de confirmer notre proposition sur le manque de fiabilité et la superficialité des résultats existants.

Dans la deuxième partie des résultats, nous avons porté notre analyse sur les dégradations des capacités articulaires de la personne et leur effet sur le choix du fauteuil roulant utilisé et les autres

paramètres d'accessibilité. Les dégradations articulaires ont été choisies selon trois tranches d'âge (15-35 ans, 45-60 ans et 60-75 ans), ces trois tranches d'âge décrivant trois types des limites articulaires. L'idée était de montrer les spécifications qui doivent être envisagées dans la réhabilitation et l'aménagement des habitats. Nous avons enregistré trois bases de données de l'accessibilité des éléments de manœuvre pour une personne à mobilité réduite. Le dynamisme de notre outil de simulation, nous a permis de varier selon les besoins, les limites articulaires de la personne, les dimensions du fauteuil, le positionnement de l'élément de manipulation, les hauteurs des éléments de commande/service ainsi que les conditions d'arrêt de l'algorithme de calcul. Cette évaluation d'accessibilité a apporté au domaine de réhabilitation et d'aménagement des habitats pour des personnes à mobilité réduite des résultats fiables où les avis des personnes concernées sont envisagés.

En conclusion, nous avons contribué essentiellement à créer un outil de simulation pour l'évaluation d'accessibilité destiné aux éléments de manipulation pour des personnes en fauteuil roulant qui souffrent ou pas des dégradations articulaires. Cet outil permet aux ingénieurs des réhabilitations, aux cliniciens, aux architectes, aux ergothérapeutes et tous les gens qui travaillent dans le domaine d'aménagement des habitats, d'avoir une base des données plus détaillées qui sert à répondre aux besoins spécifiques des personnes à mobilité réduite du côté accessibilité afin d'augmenter leur autonomie et réduire les risques dans leur vie quotidienne.

### **2. Perspectives**

Le travail qui a été présenté dans ce rapport de thèse constitue une plateforme de départ pour certaines réflexions qui représentent de nouvelles perspectives de recherches.

#### a) Au niveau de l'outil de simulation

- Améliorer les performances de l'outil de simulation afin de créer une application de test qui permet de visualiser le prototype virtuel de l'état du bâtiment avant et après la réhabilitation et qui facilite aussi l'intégration des spécifications proposées par la personne dans l'évaluation d'accessibilité.
- Augmenter le cercle des personnes concernées par l'évaluation d'accessibilité ainsi que le type de l'habitat à évaluer. Prendre en considérations des autres types d'handicaps et d'autres types des bâtiments tels que les hôpitaux et les centres des réadaptations où l'accessibilité est encore très utile à évaluer.

#### b) Au niveau des contraintes et domaine d'application

- Dans la suite de ce travail, nous envisageons d'utiliser des environnements plus réalistes où les éléments de manœuvre s'installent avec des poids réels. Les contraintes dynamiques pour simuler des mouvements réels de la personne telles que : les charges exercées aux articulations, l'énergie dépensée, le couple et les forces musculaires ...etc., dans ce cas doivent être considérées. Ce fait, va nous permettre de considérer un maximum de confort,

de sécurité et d'efficacité dans l'exécution des opérations de manipulation quotidiennes. Il nous permet aussi de mesurer les risques sanitaires qui peuvent engendrer un mauvais choix de l'un des paramètres des éléments de manœuvre installé.

## Annexe

Numéro d'articulation	$\theta$	$D$	$\alpha$	$a$
1	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
2	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
3	$\text{PI}/2$	L1	$\text{PI}/2$	0
4	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
5	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
6	$\text{PI}/2$	L2	$\text{PI}/2$	0
7	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
8	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
9	$\text{PI}/2$	L3	$\text{PI}/2$	0
10	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
11	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
12	$-\text{PI}/2$	L4	$\text{PI}/2$	L5
13	0	0	$\text{PI}/2$	0
14	0	0	$-\text{PI}/2$	L6
15	0	0	$\text{PI}/2$	0
16	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
17	0	L7	$-\text{PI}/2$	0
18	0	0	$\text{PI}/2$	0
19	$\text{PI}/2$	L8	$\text{PI}/2$	0
20	$\text{PI}/2$	0	$\text{PI}/2$	0
21	0	0	0	0

$L1=0.10\text{m}$ ,  $L2=0.10\text{ m}$ ,  $L3=0.10$ ,  $L4=0.05$ ,  $L5=0.10$ ,  $L6=0.10$ ,  $L7=0.30$ ,  $L8=0.30$ .

Longueur Main=0.20 m (pour le calcul de la position de l'organe terminal)

Tableau A.1. Tableau de Denavit-Hartenberg de la chaîne cinématique considérée.

Numéro des articulations	Limites normales En degrés (15-35 ans)	
	Min	Max
<b>0</b>	-180	180
<b>1</b>	-30	30
<b>2</b>	-15	10
<b>3</b>	-30	30
<b>4</b>	-15	15
<b>5</b>	-15	10
<b>6</b>	-15	15
<b>7</b>	-15	15
<b>8</b>	-15	10
<b>9</b>	-15	15
<b>10</b>	-15	15
<b>11</b>	-15	10
<b>12</b>	-15	15
<b>13</b>	-30	30
<b>14</b>	-90	90
<b>15</b>	0	120
<b>16</b>	-30	30
<b>17</b>	0	120
<b>18</b>	-30	30
<b>19</b>	-30	30
<b>20</b>	-90	90
<b>21</b>	-10	10

Tableau A.2. Les limites articulaires normales des personnes ayant un âge entre 15 ans et 35 ans.



Numéro des articulations	Limites normales En degrés (45-60 ans)	
	Min	Max
<b>0</b>	-180	180
<b>1</b>	-1	1
<b>2</b>	-9	9
<b>3</b>	-15	30
<b>4</b>	-7	7
<b>5</b>	-9	9
<b>6</b>	-5	5
<b>7</b>	-8	8
<b>8</b>	-9	9
<b>9</b>	-4	4
<b>10</b>	-7	7
<b>11</b>	-9	9
<b>12</b>	0	0
<b>13</b>	-6	6
<b>14</b>	0	16
<b>15</b>	-25	25
<b>16</b>	0	30
<b>17</b>	-15	15
<b>18</b>	0	30
<b>19</b>	-30	30
<b>20</b>	-90	90
<b>21</b>	-19	19

Tableau A.3. Les limites articulaires pathologiques des personnes ayant un âge entre 45 ans et 60 ans.

Numéro des articulations	Limites normales En degrés (60-75 ans)	
	Min	Max
<b>0</b>	-180	180
<b>1</b>	0	0
<b>2</b>	-9	9
<b>3</b>	-9	10
<b>4</b>	-5	5
<b>5</b>	-9	9
<b>6</b>	-5	5
<b>7</b>	-6	6
<b>8</b>	-9	9
<b>9</b>	-9	9
<b>10</b>	-2	2
<b>11</b>	-9	9
<b>12</b>	0	0
<b>13</b>	-2	2
<b>14</b>	0	4
<b>15</b>	-7	7
<b>16</b>	0	7
<b>17</b>	-3	3
<b>18</b>	0	4
<b>19</b>	-30	30
<b>20</b>	-90	90
<b>21</b>	-19	19

Tableau A.4. Les limites articulaires pathologiques des personnes ayant un âge entre 60 ans et 75 ans.

<b>Caractéristiques de l'élément de manœuvre</b>	<b>LAM en mètre</b>	<b>Dimensions minimales de l'espace de manœuvre pour ouvrir/franchir la porte</b> <b>En mètre</b>
<b>Catégorie des Personnes selon l'âge</b>		
15 – 35 ans	1.00	[2.08, 1.48]
45 - 60 ans	1.00	[2.08, 1.54]
60 – 75 ans	1.00	[2.08, 1.60]
<b>WhW= 0.86 m, WhL1=1.37 m, WhL2= 0.80 m</b>		
15 – 35 ans	1.00	[2.22, 1.67]
45 - 60 ans	1.00	[2.22, 1.73]
60 – 75 ans	1.00	[2.22, 1.80]
<b>WhW= 0.94 m, WhL1=1.57 m, WhL2= 0.90 m</b>		
15 – 35 ans	1.00	[1.70, 0.98]
45 - 60 ans	1.00	[1.70, 1.03]
60 – 75 ans	1.00	[1.70, 1.08]
<b>WhW= 0.60 m, WhL1=0.90 m, WhL2= 0.40 m</b>		

Tableau A.5. L'espace de manœuvre minimale d'une porte coulissante pour les trois types des limites articulaires et les trois types du fauteuil roulant.

Catégorie des Personnes selon l'âge	WhW= 0.60 m WhL1= 0.90 m WhL2= 0.40 m	WhW= 0.86 m WhL1=1.37 m WhL2= 0.80 m	WhW= 0.94 m WhL1=1.57 m WhL2= 0.90 m	Hauteurs admissibles des équipements/dispositifs en mètre
15 – 35 ans	[0, 1.62]	[0, 1.59]	[0, 1.55]	
45 - 60 ans	[0, 1.57]	[0, 1.53]	[0, 1.51]	
60 – 75 ans	[0.15, 1.30]	[0.16, 1.29]	[0.19, 1.25]	

Tableau A.6. Hauteurs admissibles des équipements de commande/services installés sur le mur (prises, interrupteurs interphones, vannes de gaz ...etc.) pour les trois types des limites articulaires et les trois types du fauteuil roulant (approche parallèle).

Catégorie des Personnes selon l'âge	WhW= 0.94 m WhL1= 1.57 m WhL2= 0.90 m	WhW= 0.86 m WhL1=1.37 m WhL2= 0.80 m	WhW= 0.60 m WhL1=0.90m WhL2= 0.40 m	Espaces de manœuvre et positions atteignables du système d'accès en mètre
15 – 35 ans	[1.65, 1.00] / [0.63, 1.00]	[1.45, 0.90]/ [0.35, 1.45]	[1.00, 0.65]/ [0.03, 1.65]	
45 - 60 ans	[1.65, 1.15] / [0.55, 0.43]	[1.45, 1.05]/ [0.36, 1.00]	[1.00, 0.80]/ [0.08, 1.44]	
60 – 75 ans	[1.65, 1.26] / [0.61, 0.83]	[1.45, 1.15]/ [0.42, 1.10]	[1.00, 1.00]/ [0.10, 1.38]	
<b>Rapprochement en parallèle</b>				
15 – 35 ans	Inatteignable	Inatteignable	[0.67, 0.97]/ [0, 0.85]	Espaces de manœuvre et positions atteignables du système d'accès en mètre
45 - 60 ans	Inatteignable	Inatteignable	[0.70, 1.00]/ [0, 0.80]	
60 – 75 ans	Inatteignable	Inatteignable	[1.00, 0.95]/ [0, 0.20]	
<b>Rapprochement en face</b>				

Tableau A.7. Hauteurs admissibles du système de contrôle d'accès des portes d'entrées et l'espace de manœuvre minimal du fauteuil roulant correspondant pour les trois types des limites articulaires et les trois types du fauteuil roulant.

## Bibliographique

- [1] L. DEVOLDER and A. WEILL- LAVESQUE, "Notice - Spécificités des services d'aide à la personne destinés aux adultes en situation de handicap - Centre Ressources : recherches sur le handicap," Montpellier, Rapport institutionnel, Nov. 2009.
- [2] "Classification internationale du fonctionnement, du handicap et de la santé (CIF ou CIF)." [Online]. Available: <http://www.who.int/icidh>.
- [3] M. Delcey, *Notion de situation de handicap (moteur). Les classifications internationales des handicaps. - Moteurline*. APF, 2002.
- [4] P. Fougeyrollas, "Classification québécoise: Processus de production du handicap | Réseau international sur le Processus de production du handicap." 1988.
- [5] J.-L. Korpès, "faut-il choisir entre ces deux classifications du handicap?" .
- [6] "Handicap et aides humaines : vie à domicile et accompagnement." France Repit.
- [7] A.-M. Asencio, P. Fiacre, and C. Peintre, "Les situations de handicap complexe. Besoins, attentes et modes d'accompagnement des personnes avec altération des capacités de décision et d'action dans les actes essentiels de la vie quotidienne - Centre Ressources : recherches sur le handicap," 2013.
- [8] A. Marseault, "ÉVALUATION DES BESOINS DE L'ÉLÈVE EN SITUATION DE HANDICAP ET CRITÈRES D'ATTRIBUTION D'UN AUXILIAIRE DE VIE SCOLAIRE - 2003," 2013.
- [9] "Sinking or Swimming? Supporting Parents with Learning Disabilities and their Children," Norah Fry Research Centre, United Kingdom, 2007.
- [10] D. LECOMTE, "Situation actuelle, Données économiques, Propositions de classification et de prise en charge," Rapport aides techniques, Mar. 2003.
- [11] "Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques , etudes et résultat, les personnes ayant un handicap visuel, les rapport de l'enquête handicap- incapacités – dépendance.," juillet-2005. [Online]. Available: <http://drees.social-sante.gouv.fr/etudes-et-statistiques/>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [12] C. COLIN, R. KERJOSSE, and =Ministère de l'Emploi et de la Solidarité. Direction de la Recherche des Etudes de l'Evaluation et des Statistiques. (D.R.E.E.S.). Paris. FRA, "Handicaps-Incapacités-Dépendance. Premiers travaux d'exploitation de l'enquête HID.," DREES, Paris, Jul. 2001.
- [13] "Direction de la recherche, des études, de l'évaluation et des statistiques , Vieillir chez soi : usages et besoins des aides techniques et des aménagements du logement - Études et résultats - Ministère des Affaires sociales et de la Santé," 07-Dec-2012. [Online]. Available: <http://drees.social-sante.gouv.fr/etudes-et-statistiques/publications/etudes-et-resultats/article/vieillir-chez-soi-usages-et-besoins-des-aides-techniques-et-des-amenagements-du>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [14] *Les enquêtes Handicap-Santé - Handicap et dépendance - Ministère des Affaires sociales et de la Santé.* .
- [15] M. MOKHTARI, "De la domotique à la maison intelligente : quels usages et services pour les personnes handicapées ?," in *Handicap et environnement : de l'adaptation du logement à l'accessibilité de la cité.*, Paris: Editions Frison Roche, 2005, pp. 123–135.
- [16] N. Noury, G. Virone, J. Ye, V. Rialle, and J. Demongeot, "Nouvelles directions en habitats intelligents pour la santé," *ITBM-RBM*, vol. 24, no. 3, pp. 122–135, Jun. 2003.
- [17] D. H. Stefanov, "LARES: An Intelligent Sweet Home for Assisting the Elderly and the Handicapped," *ResearchGate*, Mar. 2003.
- [18] C. N. Scanail, B. Ahearne, and G. M. Lyons, "Long-term telemonitoring of mobility trends of elderly people using SMS messaging," *IEEE Trans. Inf. Technol. Biomed. Publ. IEEE Eng. Med. Biol. Soc.*, vol. 10, no. 2, pp. 412–413, Apr. 2006.
- [19] X. Hong, C. Nugent, M. Mulvenna, S. McClean, B. Scotney, and S. Devlin, "Evidential fusion of sensor data for activity recognition in smart homes," *Pervasive Mob. Comput.*, vol. 5, no. 3, pp. 236–252, Jun. 2009.

- [20] F. Duchêne, "Fusion de Données Multicapteurs pour un Système de Télésurveillance Médicale de Personnes à Domicile," phdthesis, Université Joseph-Fourier - Grenoble I, 2004.
- [21] Arnaud Puret, "Project HM2PH - automatic generation of plans and virtual tour of habitats suitable for the disabled deficit," phdthesis, 2007.
- [22] J. Leloup, "Le projet HM2PH, habitat modulaire et mobile pour personnes handicapées: spécification d'un espace de vie adapté pour personne en déficit d'autonomie," Thèse de doctorat, Université François Rabelais (Tours). Ecole polytechnique universitaire, France, 2004.
- [23] *LOI n° 2005-102 du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation et la citoyenneté des personnes handicapées.* 2005.
- [24] "Americans with Disabilities Act," *United States Department of Labor*, 09-Dec-2015. [Online]. Available: <https://www.dol.gov/general/topic/disability/ada>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [25] "Americans with Disabilities Act," *United States Department of Labor*, 09-Dec-2015. [Online]. Available: <https://www.dol.gov/general/topic/disability/ada>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [26] "SOUTH AFRICA. PROMOTION OF EQUALITY AND PREVENTION OF UNFAIR DISCRIMINATION ACT, 2000." [Online]. Available: <http://www.ilo.org/dyn/natlex/docs/WEBTEXT/56231/65195/E00ZAF01.htm>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [27] AG, "Disability Discrimination Act 1992." [Online]. Available: <https://www.legislation.gov.au/Details/C2016C00763>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [28] UK 1995, "The Parliament of U.K. Disability Discrimination Act," 1995. [Online]. Available: <http://www.legislation.gov.uk/ukpga>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [29] Bouwbesluit 2003, "The Netherlands standard of accessibility Building Regulation Act," 2003. [Online]. Available: [www.wetten.nl](http://www.wetten.nl). [Accessed: 25-Oct-2016].
- [30] J. van Ypersele and B. Louveaux, *Le droit de l'urbanisme: en Belgique et dans ses trois régions.* Larcier, 2006.
- [31] C. of Europe, *Accessibility, principles and guidelines: adaptation of buildings in an accessible built environment.* Council of Europe, 1993.
- [32] "Bâtir un environnement accessible," *Atingo*. [Online]. Available: <http://www.atingo.be/>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [33] M. Lhuillier, "Toward Flexible 3D Modeling using a Catadioptric Camera," 2007, pp. 1–8.
- [34] J. Kim, "Development and Effectiveness Evaluation of a Virtualized Reality Telerehabilitation System for Accessibility Analysis of Built Environment," *ResearchGate*, Sep. 2005.
- [35] M. Dujardin, "Le scanner laser 3D : reconnaissance de formes et modélisation de déformations," other, Cabinet Lechène et associés - Bolbec (76), 2013.
- [36] T. Chaperon, "Segmentation de nuage de points 3D pour la modélisation automatique d'environnements industriels numérisés," phdthesis, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2002.
- [37] F. Goncalves, "Conception d'un environnement virtuel avec adaptation de l'immersion pour la simulation de conduite en fauteuil roulant," phdthesis, Université de Versailles-Saint Quentin en Yvelines, 2014.
- [38] C. V. Erren-Wolters, H. van Dijk, A. C. de Kort, M. J. Ijzerman, and M. J. Jannink, "Virtual reality for mobility devices: training applications and clinical results: a review," *Int. J. Rehabil. Res. Int. Z. Rehabil. Rev. Int. Rech. Readaptation*, vol. 30, no. 2, pp. 91–96, Jun. 2007.
- [39] Y. Morère, C. Fritsch, S. Remy, B. M. de Noordhout, and G. Bourhis, "Simulateur de conduite en fauteuil électrique : application à des personnes atteintes de sclérose en plaques," presented at the Handicap 2014 8<sup>ème</sup> Edition Paris, 11-13 juin 2014 « Les technologies d'assistance : de la compensation à l'autonomie », 2014.
- [40] Y. Morère, G. Bourhis, G. Guilmois, E. Taverne, and L. Coulombel, "ViEW : a simulator for the training and the evaluation of the control of an electric wheelchair," *AMSE Model. Meas. Control C*, vol. 73, no. 3, 2012.
- [41] F. Taychouri, E. Monacelli, Y. Hamam, and N. Chebbo, "Analyse d'accessibilité avec prise en compte de la qualité de conduite d'un fauteuil," *Sci. Technol. Pour Handicap*, vol. 1, no. 2, pp. 173–192, Dec. 2007.

- 
- [42] P. H. Batavia and I. Nourbakhsh, "Path planning for the Cye personal robot," in *2000 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2000. (IROS 2000). Proceedings*, 2000, vol. 1, pp. 15–20 vol.1.
- [43] T. Schouwenaars, B. de Moor, E. Feron, and J. How, "Mixed integer programming for multi-vehicle path-planning," *ResearchGate*, Jan. 2001.
- [44] F. Lingelbach, "Path planning using probabilistic cell decomposition," in *2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA '04*, 2004, vol. 1, pp. 467–472 Vol.1.
- [45] M. Khatib and R. Chatila, "An extended potential field approach for mobile robot sensor-based motions," presented at the *Intelligent Autonomous Systems*, 1995.
- [46] J.-M. Lien, S. L. Thomas, and N. M. Amato, "A general framework for sampling on the medial axis of the free space," in *Int. Conf. Robot. Autom. (ICRA)*, 2003.
- [47] C. S. Han, K. H. Law, J.-C. Latombe, and J. C. Kunz, "A performance-based approach to wheelchair accessible route analysis," *Adv. Eng. Inform.*, vol. 16, no. 1, pp. 53–71, Jan. 2002.
- [48] Jacques TISSEAU, "Réalité Virtuelle : autonomie in virtuo," phdthesis, Université de Rennes 1, France, 2001.
- [49] Fuchs, presse, and philippes, *Le Traité de la réalité virtuelle*. l'Ecole des Mines, 2006.
- [50] V. H. Nguyen, "Apport de la réalité virtuelle pour la rééducation fonctionnelle," phdthesis, Arts et Métiers ParisTech, 2010.
- [51] E. Klinger, "Apports de la réalité virtuelle à la prise en charge de troubles cognitifs et comportementaux," phdthesis, Télécom ParisTech, 2006.
- [52] P. M. G. Emmelkamp, M. Krijn, A. M. Hulsbosch, S. de Vries, M. J. Schuemie, and C. A. P. G. van der Mast, "Virtual reality treatment versus exposure in vivo: a comparative evaluation in acrophobia," *Behav. Res. Ther.*, vol. 40, no. 5, pp. 509–516, May 2002.
- [53] "Effectiveness of computer-generated (virtual reality) graded exposure in the treatment of acrophobia," *Am. J. Psychiatry*, vol. 152, no. 4, pp. 626–628, Apr. 1995.
- [54] B. O. Rothbaum, L. F. Hodges, R. Kooper, D. Opdyke, J. S. Williford, and M. North, "Virtual reality graded exposure in the treatment of acrophobia: A case report," *Behav. Ther.*, vol. 26, no. 3, pp. 547–554, 1995.
- [55] J. Wald and S. Taylor, "Preliminary research on the efficacy of virtual reality exposure therapy to treat driving phobia," *Cyberpsychology Behav. Impact Internet Multimed. Virtual Real. Behav. Soc.*, vol. 6, no. 5, pp. 459–465, Oct. 2003.
- [56] "Handicap 2014 » Les technologies d'assistance : de la compensation à l'autonomie." [Online]. Available: <http://ifraith.fr/handicap2014/>. [Accessed: 25-Oct-2016].
- [57] R. Otmani, A. Pruski, and K. Belarbi, "La réalité virtuelle comme outil pour l'évaluation, la visualisation et la validation de l'accessibilité d'un lieu de vie," presented at the *Conférence Handicap 2010*, Paris, 2010.
- [58] K. Abdel-Malek, W. Yu, J. Yang, and K. Nebel, "A mathematical method for ergonomic-based design: placement," *Int. J. Ind. Ergon.*, vol. 34, no. 5, pp. 375–394, Nov. 2004.
- [59] P. Herrera-Saray, I. Peláez-Ballestas, L. Ramos-Lira, D. Sánchez-Monroy, and R. Burgos-Vargas, "Usage problems and social barriers faced by persons with a wheelchair and other aids. Qualitative study from the ergonomics perspective in persons disabled by rheumatoid arthritis and other conditions," *Reumatol. Clin.*, vol. 9, no. 1, pp. 24–30, Feb. 2013.
- [60] M. Winance, "Universal design and the challenge of diversity: reflections on the principles of UD, based on empirical research of people's mobility," *Disabil. Rehabil.*, vol. 36, no. 16, pp. 1334–1343, 2014.
- [61] R. L. Mace, "Universal Design in Housing," *Assist. Technol.*, vol. 10, no. 1, pp. 21–28, Jun. 1998.
- [62] T. M. Crytzer, R. Cooper, G. Jerome, and A. Koontz, "Identifying research needs for wheelchair transfers in the built environment," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, pp. 1–7, May 2015.
- [63] B. G. Glaser and A. L. Strauss, *The Discovery of Grounded Theory: Strategies for Qualitative Research*. Aldine, 1967.
-

- [64] R. Alqasemi and R. Dubey, "Maximizing Manipulation Capabilities for People with Disabilities Using a 9-DoF Wheelchair-Mounted Robotic Arm System," in *2007 IEEE 10th International Conference on Rehabilitation Robotics*, 2007, pp. 212–221.
- [65] E.-K. Hong, B. E. Dicianno, J. Pearlman, R. Cooper, and R. A. Cooper, "Comfort and stability of wheelchair backrests according to the TAWC (tool for assessing wheelchair discomfort)," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 11, no. 3, pp. 223–227, Apr. 2016.
- [66] A. M. Karmarkar, D. M. Collins, A. Kelleher, D. Ding, M. Oyster, and R. A. Cooper, "Manual wheelchair-related mobility characteristics of older adults in nursing homes," *Disabil. Rehabil. Assist. Technol.*, vol. 5, no. 6, pp. 428–437, Nov. 2010.
- [67] "Anatomie intro - cours STAPS." [Online]. Available: [http://calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/anat/new/intro.htm#intro\\_biom](http://calamar.univ-ag.fr/uag/staps/cours/anat/new/intro.htm#intro_biom). [Accessed: 29-Oct-2016].
- [68] W. Karwowski, *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, vol. 3. CRC Press, 2001.
- [69] Zan Mi, "Task-based prediction of upper body motion," phdthesis, University of Iowa, 2004.
- [70] K. Farrell, "Kinematic human modeling and simulation using optimization-based posture prediction," *ResearchGate*.
- [71] S. Yoshimoto, "Ballerinas generated by a personal computer," *J. Vis. Comput. Animat.*, vol. 3, no. 2, pp. 85–90, Apr. 1992.
- [72] J. Shen, N. Magnenat Thalmann, and D. Thalmann, "Muscle-Based Human Body Deformation," presented at the Proc 3rd Conf. on CAD/CG, Beijing, 1993, pp. 95–100.
- [73] D. Thalmann, J. Shen, and E. Chauvineau, "Fast Realistic Human Body Deformations for Animation and VR Applications," in *Proceedings of the 1996 Conference on Computer Graphics International*, Washington, DC, USA, 1996, p. 166–.
- [74] F. X. Lepoutre, "Human posture modelisation as a problem of inverse kinematic of redundant robots," *Robotica*, vol. 11, no. 4, pp. 339–343, Jul. 1993.
- [75] W. Maurel, "3D modeling of the human upper limb including the biomechanics of joints, muscles and soft tissues," EPFL, 1999.
- [76] N. I. Badler, M. S. Palmer, and R. Bindiganavale, "Animation Control for Real-time Virtual Humans," *Commun ACM*, vol. 42, no. 8, pp. 64–73, Aug. 1999.
- [77] B. Kayis and P. A. Iskander, "A three-dimensional human model for the IBM/CATIA system," *Appl. Ergon.*, vol. 25, no. 6, pp. 395–397, Dec. 1994.
- [78] Z. E. Ouaaid, "Modélisation de la colonne vertébrale par la méthode des éléments finis basée sur la cinématique incluant le critère de la stabilité," *ResearchGate*.
- [79] Aneliya Manolova, "Description anatomique du mouvement." Avril-2012.
- [80] K. H. E. Kroemer, H. J. Kroemer, and K. E. Kroemer-Elbert, *Engineering Physiology*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [81] N. I. Badler, C. B. Phillips, and B. L. Webber, *Simulating Humans: Computer Graphics Animation and Control*. New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc., 1993.
- [82] S. J. Hall, *Basic biomechanics*. Mosby, 1995.
- [83] J. Yang and E.P. Pitarch, "Digital Human Modeling and Virtual Reality for FCS," The University of Iowa, Technical Report VSR-04.02, 2004.
- [84] M. Martinsen, "A generic system for real-time tracking and 3D visualization of medical robotic manipulators Master thesis," *ResearchGate*.
- [85] N. Courty, G. Dumont, S. Gibet, D. Gillard, J.-P. Jessel, and F. Multon, "AS Humain Virtuel, thème 2 : Mouvement et contrôle de mouvement," Technical Report, décembre 2004.
- [86] J. M. Selig, *Introduction Robotique*, First published. New York: Departement of Electrical and Electronic Engineering, South Bank Polytechnic, 1992.
- [87] A. Moussaoui, R. Otmani, and A. Pruski, "A comparative study of incremental algorithms for computing the inverse kinematics of redundant articulated," *J. Autom. Mob. Robot. Intell. Syst.*, no. Vol. 4, No. 3, pp. 3–9, 2010.
- [88] R. Otmani, A. Moussaoui, and A. Pruski, "A new approach to indoor accessibility," *Int. J. Smart Home*, vol. 3, no. 4, pp. 303–310, 2009.
- [89] A. Pruski, "A unified approach to accessibility for a person in a wheelchair," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 58, no. 11, pp. 1177–1184, Nov. 2010.



- 
- [90] A. Osyczka, *Multicriterion Optimisation in Engineering*. New York, NY, USA: Halsted Press, 1984.
- [91] R. Mukundan, "A Fast Inverse Kinematics Solution for an n-link joint chain," *ResearchGate*, Jan. 2008.
- [92] R. Muller-Cajar and R. Mukundan, "Triangulation - A New Algorithm for Inverse Kinematics," *Httpdigitallibywaikatoacnzconferencesivcnz07papersivcnz07-Pap.*, 2007.
- [93] P. Baerlocher and R. Boulic, "An inverse kinematics architecture enforcing an arbitrary number of strict priority levels," *Vis. Comput.*, vol. 20, no. 6, pp. 402–417, Aug. 2004.
- [94] L. Sentis and O. Khatib, "Synthesis of whole-body behaviors through hierarchical control of behavioral primitives," *Int. J. Humanoid Robot.*, vol. 02, no. 04, pp. 505–518, Dec. 2005.
- [95] B. Le Callennec and R. Boulic, "Interactive motion deformation with prioritized constraints," *Graph. Models*, vol. 68, no. 2, pp. 175–193, Mar. 2006.
- [96] A. A. Maciejewski and C. A. Klein, "Obstacle Avoidance for Kinematically Redundant Manipulators in Dynamically Varying Environments," *Int. J. Robot. Res.*, vol. 4, no. 3, pp. 109–117, Sep. 1985.
- [97] A. Fratu, L. Vermeiren, and A. Dequidt, "Using the redundant inverse kinematics system for collision avoidance," in *2010 3rd International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)*, 2010, pp. 88–93.
- [98] M. Kallmann, A. Aubel, T. Abaci, and D. Thalmann, "Planning Collision-Free Reaching Motions for Interactive Object Manipulation and Grasping," *Comput. Graph. Forum*, vol. 22, no. 3, pp. 313–322, Sep. 2003.
- [99] D. Tolani, A. Goswami, and N. I. Badler, "Real-Time Inverse Kinematics Techniques for Anthropomorphic Limbs," *Graph. Models*, vol. 62, no. 5, pp. 353–388, Sep. 2000.
- [100] M. Kallmann, "Analytical inverse kinematics with body posture control," *Comput. Animat. Virtual Worlds*, vol. 19, no. 2, pp. 79–91, May 2008.
- [101] J. U. Korein, *A Geometric Investigation of Reach*. Cambridge, MA, USA: MIT Press, 1985.
- [102] L. Unzueta, M. Peinado, R. Boulic, and Á. Suescun, "Full-body performance animation with Sequential Inverse Kinematics," *Graph. Models*, vol. 70, no. 5, pp. 87–104, Sep. 2008.
- [103] "Scalable Solutions for Interactive Virtual Humans that Can Manipulate Objects - IRIS Interactive Storytelling: A Web Based Bibliography - Aigaion 2.0." [Online]. Available: [http://iris.ofai.at:7777/iris\\_db/index.php/publications/show/527](http://iris.ofai.at:7777/iris_db/index.php/publications/show/527). [Accessed: 30-Nov-2016].
- [104] W. A. Wolovich and H. Elliott, "A Computational Technique for Inverse Kinematics," in *ResearchGate*, 1985, vol. 23, pp. 1359–1363.
- [105] L.-C. T. Wang and C. C. Chen, "A combined optimization method for solving the inverse kinematics problem of mechanical manipulators," *ResearchGate*, vol. 7, no. 4, pp. 489–499, Sep. 1991.
- [106] J.-C. Latombe, *Robot Motion Planning*, vol. 124, 11 vols. Boston, MA: Springer US, 1991.
- [107] H. Choset, "Sensor based motion planning : the hierarchical generalized Voronoi graph," phd, California Institute of Technology, 1996.
- [108] B. Chazelle and L. J. Guibas, "Visibility and intersection problems in plane geometry," *Discrete Comput. Geom.*, vol. 4, no. 6, pp. 551–581, Dec. 1989.
- [109] K. Shin and N. McKay, "A dynamic programming approach to trajectory planning of robotic manipulators," *IEEE Trans. Autom. Control*, vol. 31, no. 6, pp. 491–500, Jun. 1986.
- [110] P. E. Hart, N. J. Nilsson, and B. Raphael, "A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths," *IEEE Trans. Syst. Sci. Cybern.*, vol. 4, no. 2, pp. 100–107, Jul. 1968.
- [111] A. Stentz, "Optimal and Efficient Path Planning for Partially Known Environments," in *Intelligent Unmanned Ground Vehicles*, M. H. Hebert, C. Thorpe, and A. Stentz, Eds. Springer US, 1997, pp. 203–220.
- [112] O. Khatib, "Real-time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots," *Int J Rob Res*, vol. 5, no. 1, pp. 90–98, Apr. 1986.
- [113] D. Fox, W. Burgard, and S. Thrun, "The dynamic window approach to collision avoidance," *IEEE Robot. Autom. Mag.*, vol. 4, no. 1, pp. 23–33, Mar. 1997.
- [114] S. Quinlan, "Real-Time Modification of Collision-Free Paths," Stanford University, Stanford, CA, USA, 1995.
- [115] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Inf. Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338–353, Jun. 1965.
-

- 
- [116] M. Defoort, "Contributions à la planification et à la commande pour les robots mobiles coopératifs," phdthesis, Ecole Centrale de Lille, 2007.
- [117] M. Defoort, A. Kokosy, T. Floquet, W. Perruquetti, and J. Palos, "Motion planning for cooperative unicycle-type mobile robots with limited sensing ranges: A distributed receding horizon approach," *Robot. Auton. Syst.*, vol. 57, no. 11, pp. 1094–1106, Nov. 2009.
- [118] A. L. Tits, C. Lawrence, and J. L. Zhou, "User's Guide for CFSQP Version 2.5: A C Code for Solving (Large Scale) Constrained Nonlinear (Minimax) Optimization Problems, Generating Iterates Satisfying All Inequality Constraints," *ResearchGate*, Feb. 1999.
- [119] F. Gaillard, M. Soullignac, C. Dinont, and P. Mathieu, "Deterministic Kinodynamic Planning," *ResearchGate*, Jan. 2010.
- [120] C. Pope, "Qualitative research methods: a health focus PL Rice, D Ezzy. Oxford: Oxford University Press, 1999, pp. 291. ISBN: 0 195 50610 3," *Int. J. Epidemiol.*, vol. 30, no. 1, pp. 185–185, Feb. 2001.
- [121] N. Mays and C. Pope, "Assessing quality in qualitative research," *BMJ*, vol. 320, no. 7226, pp. 50–52, Jan. 2000.
- [122] I. Peláez-Ballestas and R. Burgos-Vargas, "La aproximación cualitativa en salud: una alternativa de investigación clínica de las enfermedades reumáticas," *Reumatol. Clínica*, vol. 1, no. 3, pp. 166–174, Sep. 2005.
- [123] P. M. Hudelson and W. H. O. D. of M. Health, "Qualitative research for health programmes," 1994.
- [124] A. Moussaoui, R. Otmani, and A. Pruski, "A comparative study of incremental algorithms for computing the inverse kinematics of redundant articulated," *J. Autom. Mob. Robot. Intell. Syst.*, no. Vol. 4, No. 3, pp. 3–9, 2010.
- [125] D. Bertram, J. Kuffner, R. Dillmann, and T. Asfour, "An integrated approach to inverse kinematics and path planning for redundant manipulators," in *Proceedings 2006 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2006. ICRA 2006.*, 2006, pp. 1874–1879.
- [126] K. Gochev, V. Narayanan, B. Cohen, A. Safonova, and M. Likhachev, "Motion planning for robotic manipulators with independent wrist joints," in *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, 2014, pp. 461–468.
- [127] H. Ding, M. Zhou, and O. Stursberg, "Optimal motion planning for robotic manipulators with dynamic obstacles using mixed-integer linear programming," in *2009 17th Mediterranean Conference on Control and Automation*, 2009, pp. 934–939.
- [128] T. Lozano-Perez, "Spatial Planning: A Configuration Space Approach," *IEEE Trans. Comput.*, vol. C–32, no. 2, pp. 108–120, Feb. 1983.
- [129] H. Barki, F. Denis, and F. Dupont, "A New Algorithm for the Computation of the Minkowski Difference of Convex Polyhedra," presented at the SMI 2010 - International Conference on Shape Modeling and Applications, Proceedings, 2010, pp. 206–210.
- [130] S. Tomiczková, "Algorithms for the computation of the Minkowski difference," in *In Proceedings of the 26th conference on geometry and computer designers*, České Budějovice: University of South Bohemia, 2006, pp. 37–42.
- [131] C. Fragkopoulos and A. Gräser, "Sampling based path planning for high DoF manipulators without goal configuration," *IFAC Proc. Vol.*, vol. 44, no. 1, pp. 11568–11573, Jan. 2011.
- [132] D. Berenson, S. S. Srinivasa, D. Ferguson, A. Collet, and J. J. Kuffner, "Manipulation planning with Workspace Goal Regions," in *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2009, pp. 618–624.
- [133] F. Farelo, R. Alqasemi, and R. Dubey, "Optimized dual-trajectory tracking control of a 9-DoF WMRA system for ADL tasks," in *2010 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2010, pp. 1786–1791.
- [134] Y. Nakamura, *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*, 1st ed. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1990.
- [135] D. technique T. et ville, "Direction technique Territoires et ville," 11-Jun-2015. [Online]. Available: <http://www.territoires-ville.cerema.fr/>. [Accessed: 12-Jun-2015].
-

