

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITÉ DE BATNA 2  
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE  
Département de Génie Industriel  
*Laboratoire d'Automatique et Productique (LAP)*

# THÈSE

pour obtenir le titre de

DOCTEUR EN SCIENCES

OPTION : GÉNIE INDUSTRIEL

Présentée et soutenue par

SALAH EDDINE BELLAL

Thème

Exploration du potentiel de la vision  
artificielle pour la reconnaissance d'objets  
en vue d'une conception d'un dispositif  
intelligent dans un contexte industriel.

Pr. M. DJAMEL MOUSS	Université de Batna 2	Président
Pr. LEILA HAYET MOUSS	Université de Batna 2	Rapporteur
Pr. M'HAMMED SAHNOUN	LINEACT CESI Rouen	Co-Rapporteur
Pr. NOUREDDINE ZERHOUNI	Université de Bourgogne	Examineur
Pr. SIDI MOHAMMED MELIANI	Université de Tlemcen	Examineur
Dr. MOURAD MESSAADIA	LINEACT CESI Rouen	Invité

2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ملخص :

إن تطور الكراسي المتحركة الذكية يعتبر تحدي أثار اهتمام العديد من مخابر البحث العاملة في الجانب التكنولوجي. يتم إعاقة استخدام هذه الكراسي من خلال تحديد الإحتياجات الحقيقية التي تطرح مشكلة قبول وجدوى الحلول المقترحة. تزداد أهمية المشكلة عندما يتعلق الأمر بالسكان الذين يعيشون في مناطق غير مواتية من العالم مثل البلدان النامية. يواجه الأشخاص ذوي القدرة المحدودة على الحركة في السياق الجزائري العديد من المشاكل المتعلقة بقدرة المقاعد المعروضة في السوق على تلبية إحتياجاتهم الحقيقية. من ناحية أخرى ، سمحت التطورات التكنولوجية بتطوير منتجات ذكية وقابلة للتكيف تلقائيًا بتكلفة أقل. تهدف هذه الأطروحة إلى تطوير كرسي متحرك ذكي يلبي إحتياجات الأشخاص ذوي القدرة المحدودة على الحركة في السياق الجزائري. أتاحت الدراسة الأولى تطوير نموذج لسلوك الأشخاص ذوي القدرة المحدودة على الحركة على أساس جمع وتلبية الإحتياجات. بعد ذلك ، تتناول الأطروحة تصميم الكرسي المتحرك الذكي بناءً على هندسة النظام وتقتراح نهجًا ممزوجًا. يوفر هذا النهج عملية تصميم تستند إلى مزج طريقة APTE وتعليقات SysML التوضيحية التي تسمح بتحليل القيمة الديناميكية. يتضمن تحليل القيمة الديناميكية نمذجة وتحسين تأثير المتطلبات المتغيرة على المنتج والعملية وسلسلة التوريد. لقد مكنتنا النتائج التي تم الحصول عليها من اقتراح منهجية تسمح بتطويره من كرسي متحرك يدوي إلى كرسي متحرك ذكي بتكلفة أقل. تم إجراء هذا التطور بفضل إعادة التصميم التي تسمح بدمج وحدة الرؤية الاصطناعية في كرسي يدوي. أخيرًا ، تم تنفيذ النتائج التي تم الحصول عليها ونمذجتها في CAO. وبالتالي ، تم اقتراح نسخة أولية من التجميع .

الكلمات الرئيسية: كرسي متحرك ذكي ، إعادة تصميم، SysML، التحسين، CAO

---

## **Résumé :**

Le développement des fauteuils roulants intelligents est une problématique qui a intéressée plusieurs laboratoires de recherche travaillant sur l'aspect technologique. L'utilisation de ces fauteuils est freinée par l'identification des besoins réels qui posent un problème d'acceptation et de faisabilité des solutions proposées. Le problème est d'autant plus important quand il s'agit de population vivant dans des régions défavorables du monde tels que les pays en voie de développement. Les personnes à mobilité réduite du contexte Algérien rencontrent plusieurs problèmes liés à l'adaptabilité des fauteuils, proposés dans le marché, à leurs vrais besoins. D'un autre côté l'évolution technologique a permis le développement de produits intelligents et automatiquement adaptables à moindre coût.

Cette thèse vise à développer un fauteuil roulant intelligent répondant aux besoins des personnes à mobilité réduite dans le contexte Algérien. Une première étude a permis de développer un modèle du comportement des personnes à mobilité réduite sur la base d'une collecte et d'une analyse des besoins. Ensuite, la thèse aborde la conception du fauteuil roulant intelligent basée sur l'ingénierie système (IS) et propose une approche hybride de la méthode APTE et l'annotation SysML pour permettre une analyse dynamique de valeur. L'analyse dynamique de la valeur fait appel à la modélisation et l'optimisation de l'impact de changement des exigences sur le produit, le processus et la chaîne d'approvisionnement.

Les résultats obtenus nous ont permis de proposer une approche permettant l'évolution d'un fauteuil roulant manuel vers un fauteuil roulant intelligent à moindre coût. Cette évolution se fait grâce à la re-conception permettant l'intégration d'un module de vision artificielle dans un fauteuil manuel. Les résultats obtenus ont été implémentés grâce au logiciel solidworks CAO. Ainsi, une première version d'assemblage est proposée.

**Mots clés :** Fauteuil roulant intelligent, Re-conception, SysML, Optimisation, Modélisation CAO.

---



---

**Abstract :**

The development of intelligent wheelchairs is a challenge that attracted several research laboratories working on the technological aspect. The use of these wheelchairs is hampered by the identification of real needs which pose a problem of acceptance and feasibility of the proposed solutions. The problem is all the more important when it comes to populations living in unfavorable regions of the world such as developing countries. People with reduced mobility in the Algerian context encounter several problems related to the adaptability of the wheelchairs, proposed in the market, to their real needs. On the other hand, the technological evolution has allowed the development of intelligent and automatically adaptable products at lower cost.

This thesis aims to develop an intelligent wheelchair that meets people with reduced mobility requirements in the Algerian context. A first study allowed to develop a behavior model of people with reduced mobility based on a requirements collection and analysis. Then, the thesis addresses the design of the intelligent wheelchair based on system engineering (SE) and proposes a hybrid approach. This approach offers a design process based on the hybridization of the APTE method and the SysML annotation to allow a dynamic value analysis. Dynamic value analysis involves modeling and optimizing the impact of requirements change on the product, the process and the supply chain.

The obtained results allowed us to propose an approach based on the evolution of a manual wheelchair towards an intelligent wheelchair at lower cost. This evolution is done through the re-design with the integration of a computer vision module in a manual wheelchair. Finally, the obtained results were implemented and modeled in CAD. Thus, a first assembly version is proposed.

**Keywords :** Intelligent Wheelchair, Re-design, SysML, Optimisation, CAD.

---

## *Remerciements*

Je commencerai par remercier ALLAH le tout Puissant de m'avoir fait naître musulman. Je lui demande de guider mes pas dans le chemin qui méritera son approbation.

Je remercie ALLAH de m'avoir comblé de sa générosité. Sans son amour et sa bienveillance, je n'aurais pas pu réaliser toutes mes ambitions.

*Tous mes remerciements vont à Mme Mouss Hayet Professeur à l'université de Batna 2 dont l'auguste autorité scientifique et les précieux conseils ont permis de réaliser ce modeste travail.*

*Je ne la remercierai jamais assez pour la confiance qu'elle m'a témoignée en acceptant la direction scientifique de mes travaux. Je lui suis reconnaissant de m'avoir fait bénéficier tout au long de ce travail de sa grande compétence, de sa rigueur intellectuelle, de son dynamisme, et de son efficacité certaine que je n'oublierai jamais.*

*Qu'elle trouve ici le sincère témoignage de reconnaissance et de gratitude qu'elle mérite et qui n'égale jamais sa patience, ses encouragements et ses conseils pertinents tout au long de cette thèse.*

*Je remercie tout particulièrement Mr M'hammed Sahnoun, Maître de conférences / HDR à CESI Rouen, d'avoir codirigé cette thèse. Tout au long de ce travail, il a su m'apporter un soutien constant inconditionnel, une disponibilité, une écoute, une confiance, des connaissances, des critiques et des conseils constructifs qui m'ont permis de mener à bien ce travail. « Une pensée particulière pour toutes les longues réunions tardives par visioconférences ! »*

Je suis très honoré de remercier la présence dans mon jury de thèse les professeurs :

*Mohammed Djamel Mouss, Professeur à l'Université de Batna 2, de l'honneur qu'il m'a fait pour sa participation en qualité de président de jury.*

*Noureddine Zerhouni, Professeur de l'École Nationale Supérieure de Mécanique et des Microtechniques de Besançon (ENSMM), pour l'intérêt qu'il a porté à ce travail et d'avoir accepté de l'examiner.*

*Sidi Mohammed MELIANI, Professeur de l'université de Tlemcen, d'avoir bien accepté d'examiner le contenu du présent travail.*

*Pour les efforts aimablement consentis à l'élaboration de cette thèse, que Monsieur Mourad Messaadia Enseignant chercheur à CESI Rouen soit amplement remercié pour ses conseils, ses remarques, le temps consacré et je le prie de trouver ici la sincère expression de ma reconnaissance la plus entière.*

*Mes remerciements vont également au Professeur Saidi Said, de l'université de Batna 1 dont les judicieuses suggestions en méthodologie furent très constructives.*

*Je tiens également à remercier le laboratoire de CESI Rouen pour l'accueil et les conditions de travail privilégiées qui m'ont été offertes.*

*Je tiens à remercier tous mes collègues du département de Génie industriel.*

*Enfin, pour tous ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce travail, qu'ils trouvent ici toute ma profonde gratitude.*

*Au terme de ce parcours, je remercie enfin celles et ceux qui me sont chers et que j'ai quelque peu délaissés ces derniers mois pour achever cette thèse. Leurs attentions et encouragements m'ont accompagné tout au long de ces années.*

## *Dédicaces*

Au nom de Dieu le clément et le miséricordieux louange à ALLAH le tout puissant.

*Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de reconnaissance et de remerciements :*

*À la mémoire de mes défunts Père et Mère que Dieu ait leur âme.  
J'espère que, du monde qui est le leur maintenant, ils apprécient cet humble travail  
preuve de reconnaissance de la part d'un fils qui a toujours prié pour le salut de  
leurs âmes.*

*Puisse Dieu, le tout puissant les avoir en sa sainte miséricorde.*

*À ma femme pour son soutien et ses encouragements quotidiens. Qu'elle sache  
qu'elle seule a su m'aider à me dépasser. Mes travaux n'auraient pu aboutir sans  
ton soutien indéfectible. MERCI...*

À mes enfants Nada, Rania et Mohamed Ilyes.

À mes frères et sœurs.

À toute ma famille.

Salah Eddine.

الحمد لله

# Table des matières

Liste des tableaux	xii
Liste des figures	xvi
Liste des abréviations	xvii
Introduction générale	1
<b>1 État de l'art</b>	<b>7</b>
1.1 Introduction	9
1.2 Évolution du concept du "Handicap"	10
1.2.1 Différentes classifications et définitions actuelles du handicap	11
1.2.2 Innovation technologique : Handicap moteur	14
1.3 Description du contexte algérien	16
1.4 Aperçu des différents types de Fauteuils Roulants (FR)	19
1.4.1 Fauteuils Roulants Manuels (FRM)	20
1.4.2 Fauteuils Roulants Électriques (FRE)	22
1.4.3 Exemple de Brevets d'intégration d'un module pour FR	26
1.4.4 Fauteuils Roulants Intelligents (FRI)	30
1.5 Rôle des nouvelles technologies dans le développement des FRI	35
1.5.1 Technologies de perception	35
1.5.2 Technologies d'intelligence embarquée	37
1.5.3 Reconnaissance d'objets pour l'évitement d'obstacles	40
1.6 Synthèse de l'état de l'art et positionnement du problème	42
1.7 Conclusion	44
<b>2 Comportement et enquête par questionnaire</b>	<b>47</b>
2.1 Introduction	49
2.2 Situation des personnes handicapées moteur en Algérie	49
2.2.1 Associations de personnes handicapées	50
2.2.2 Rôle des associations de personnes handicapées en Algérie	51
2.3 Méthodologie, population de l'enquête	52

2.4	Modélisation du comportement . . . . .	52
2.5	Élaboration du questionnaire . . . . .	55
2.6	Déploiement du questionnaire . . . . .	56
2.7	Collecte de données pour le modèle . . . . .	58
2.7.1	Conception du questionnaire . . . . .	58
2.8	Analyse et résultats . . . . .	61
2.8.1	Analyse de corrélation . . . . .	64
2.8.2	Modèle de comportement proposé . . . . .	66
2.9	Conclusion . . . . .	68
<b>3</b>	<b>Modélisation du fauteuil roulant avec SysML</b>	<b>69</b>
3.1	Introduction . . . . .	71
3.2	Conception du produit . . . . .	72
3.2.1	Processus de conception . . . . .	75
3.2.2	Typologie de conceptions . . . . .	82
3.3	Modélisation des systèmes . . . . .	82
3.3.1	Modèle de produit de base (CPM : Core Product Model) . . .	84
3.3.2	Les Classes Core Product Model (CPM) . . . . .	85
3.3.3	Modèle d'assemblage ouvert (OAM : Open Assembly Model)	86
3.4	Approche proposée . . . . .	87
3.5	Modélisation du FR . . . . .	88
3.5.1	Analyse fonctionnelle . . . . .	88
3.5.2	Les outils de l'analyse fonctionnelle . . . . .	89
3.6	Synthèse . . . . .	95
3.7	Analyse Fonctionnelle en langage SysML . . . . .	97
3.7.1	Introduction . . . . .	97
3.7.2	Modélisation du système avec System Modelling Language (SysML) . . . . .	98
3.7.3	Analyse Structurelle (Interne) . . . . .	105
3.8	Conclusion . . . . .	110
<b>4</b>	<b>Impact de changement d'une exigence sur le système</b>	<b>111</b>
4.1	Introduction . . . . .	113
4.2	Re-conception d'un FR dans le contexte algérien . . . . .	114
4.3	Ingénierie des Systèmes . . . . .	115

---

4.3.1	Normes d'ingénierie des systèmes (IS)	116
4.3.2	L'ingénierie des systèmes basée par les modèles	116
4.4	Ingénierie des exigences	117
4.4.1	Différents types d'exigences	119
4.4.2	Liens entre les exigences	119
4.5	Impact des changements d'exigences	120
4.5.1	Impact de la modification des exigences sur les fonctions du produit	121
4.5.2	Modèle d'optimisation des coûts de l'impact des exigences	122
4.6	Implémentation	126
4.6.1	Impact des fonctionnalités sur les exigences	126
4.6.2	Impact des composants techniques sur les fonctionnalités	130
4.7	Conclusion	136
<b>5</b>	<b>Prototype de la solution en vue d'une industrialisation</b>	<b>139</b>
5.1	Introduction	141
5.2	Architecture et composants de la solution proposée	142
5.2.1	Spécifications techniques du Fauteuils Roulants Manuels (FRM)	142
5.2.2	Spécifications techniques du Fauteuils Roulants Intelligents (FRI)	144
5.2.3	Architecture logicielle du module de vision du FRI	146
5.2.4	Modélisation des composants du FRM	149
5.2.5	Conception 3D de l'ensemble du module intelligent	151
5.3	Processus d'assemblage et d'installation	154
5.3.1	Processus d'assemblage du module intelligent	154
5.3.2	Installation et utilisation du module intelligent	155
5.4	Plate-forme et simulation du FRI	157
5.4.1	Système d'exploitation robotique Robot Operating System (ROS)	159
5.4.2	Philosophie et architecture de ROS	160
5.4.3	Simulation Gazebo	162
5.4.4	Rviz (ROS visualization)	167
5.4.5	Communication inter-processus et modélisation	167
5.5	Conclusion	170

Conclusion générale et perspectives	173
<b>Annexes</b>	<b>177</b>
A Liste des principaux projets des FRI	179
B Technologies de perception dans le développement des FRI	187
C Enquête par questionnaire	195
D Identification des caractéristiques des solutions techniques	203
Bibliographie	217



# Liste des tableaux

<b>1</b>	<b>État de l'art</b>	
1.1	Classification Internationale du Handicap (CIH) ou schéma de P. Wood ( OMS-INSERM-CTNERHI,1988) . . . . .	11
1.2	Composantes de la CIH et leurs caractéristiques. . . . .	12
1.3	Évaluation de la taille du marché du besoin de FR [1]. . . . .	16
1.4	Estimation des personnes handicapées en Algérie 2010 Office National des Statistiques (ONS) . . . . .	18
1.5	Répartition des causes principales du handicap en Algérie. . . . .	19
1.6	Répertoire de plusieurs modèles de FR et informations du fabricant associées [2] . . . . .	25
1.7	Nombre de publications classées par année et période (intervalle de dix ans). . . . .	33
<b>2</b>	<b>Comportement et enquête par questionnaire</b>	
2.1	Questions et leur relation avec les classes du modèle de comportement. 59	
2.2	Résultats du questionnaire . . . . .	62
<b>3</b>	<b>Modélisation du fauteuil roulant avec SysML</b>	
3.1	Cahier des charges FR. . . . .	102
<b>4</b>	<b>Impact de changement d'une exigence sur le système</b>	
4.1	Degré de satisfaction des exigences par les fonctionnalités existantes. .	128
4.2	Nouvelles fonctionnalités issues de nouvelles exigences. . . . .	129
4.3	Résultats des nouvelles fonctionnalités. . . . .	129
4.4	Contribution à la solution technique . . . . .	130
4.5	Prix Arduino. . . . .	131
4.6	Prix des Capteurs. . . . .	131
4.7	Prix du joystick. . . . .	131
4.8	Prix Moteurs. . . . .	131
4.9	Prix des batteries. . . . .	132
4.10	Prix des Cameras. . . . .	132
4.11	Prix Raspberry. . . . .	132

---

4.12	Nouvelles solutions techniques Module Intelligent (MI). . . . .	133
4.13	Résultat de la solution technique. . . . .	134
4.14	Résultats de la solution technique en tenant compte de tous les composants. . . . .	135
<b>5</b>	<b>Prototype de la solution en vue d'une industrialisation</b>	
<b>A</b>	<b>Liste des principaux projets des FRI</b>	
A.1	Principales recherches portées sur les FRI décrites dans la littérature.	180
<b>B</b>	<b>Technologies de perception dans le développement des FRI</b>	
B.1	Comparaison des différents capteurs à télémètre. . . . .	191
B.2	Classification des capteurs les plus utiles pour les applications de robots mobiles. . . . .	193
<b>D</b>	<b>Identification des caractéristiques des solutions techniques</b>	
D.1	Tableau comparatif des différents systèmes de motorisation du FRI .	206
D.2	Tableau comparatif des différentes cartes Arduino . . . . .	208
D.3	Tableau comparatif des différentes cartes Raspberry . . . . .	209
D.4	Tableau comparatif des différentes cartes FPGA . . . . .	209
D.5	Tableau des différents types de capteurs pour FRI . . . . .	211
D.6	Tableau des différents modèles de batteries . . . . .	213
D.7	Tableau des différents modèles de joystick . . . . .	214
D.8	Supports de fixation . . . . .	215

# Table des figures

1	Structure de la Thèse. . . . .	6
<b>1</b>	<b>État de l'art</b>	
1.1	Causes du Handicap en Algérie. . . . .	14
1.2	Répartition de l'handicap par sexes, homme/femme . . . . .	18
1.3	Structure d'un FRM à mains courantes. . . . .	21
1.4	Fauteuils à propulsion manuelle et verticalisation manuelle assistée . . . . .	23
1.5	Fauteuils à propulsion manuelle et verticalisation électrique . . . . .	23
1.6	Fauteuils Roulants Electriques (FRE) avec dossier inclinable . . . . .	24
1.7	FRE avec levage mécanique . . . . .	24
1.8	Transformation FRM vers FRE . . . . .	24
1.9	FRM transformé en FRE par module . . . . .	26
1.10	FR autonome convertible en lit . . . . .	27
1.11	FR à commande vocale . . . . .	28
1.12	FR convertible avec un module de levage . . . . .	28
1.13	FR automatisé avec ordinateur de bord . . . . .	29
1.14	FR pour escalier et obstacles . . . . .	29
1.15	FRE combiné intelligent . . . . .	30
1.16	Schéma de classification des FR . . . . .	33
1.17	Représentation graphique du nombre d'articles publiés . . . . .	34
1.18	Capteur de contact, type « Bumper ». . . . .	36
1.19	Capteur d'images "caméras". . . . .	36
1.20	Architecture Modulaire pour les typologies de FR . . . . .	43
<b>2</b>	<b>Comportement et enquête par questionnaire</b>	
2.1	Modèle de comportement générique. . . . .	54
2.2	Analyse de corrélation . . . . .	65
2.3	Modèle de comportement d'une personne handicapée dans le contexte Algérien . . . . .	66
<b>3</b>	<b>Modélisation du fauteuil roulant avec SysML</b>	
3.1	Conception des contraintes . . . . .	75
3.2	Modèle en cascade . . . . .	79

3.3	Modèle de conception en V . . . . .	80
3.4	Modèle de conception en spirale . . . . .	81
3.5	Formes de processus de conception . . . . .	81
3.6	Du système vers le modèle . . . . .	83
3.7	Diagramme de Classe du CPM [3] . . . . .	85
3.8	Diagramme de Classe de l'OAM [3] . . . . .	87
3.9	Décomposition fonctionnelle et allocation aux organes des fonctions [4] . . . . .	90
3.10	Diagramme (Use case) du FR . . . . .	91
3.11	Évitement d'obstacles . . . . .	93
3.12	Adaptation à la morphologie . . . . .	94
3.13	Embarquement du module Intelligent . . . . .	95
3.14	Architecture du fauteuil intelligent . . . . .	96
3.15	Diagramme SysML . . . . .	99
3.16	Définition de la mission du FR . . . . .	101
3.17	Comportement du modèle . . . . .	104
3.18	Diagramme d'exigences. . . . .	106
3.19	Chaînes fonctionnelles (chaînes d'énergie et d'information). . . . .	107
3.20	Solutions techniques d'une chaîne fonctionnelle du FR. . . . .	107
3.21	Diagramme de définition de blocs (bdd). . . . .	108
3.22	Diagramme de blocs internes. . . . .	109
<b>4</b>	<b>Impact de changement d'une exigence sur le système</b>	
4.1	Diagramme des cas d'utilisation du FR . . . . .	115
4.2	Ingénierie système. . . . .	116
4.3	Typologie des modèles en Ingénierie Système [5] . . . . .	117
4.4	Objectif(s) de l'ingénierie des exigences. . . . .	118
4.5	Impact(s) du changement des exigences. . . . .	120
4.6	Exigences et fonctions du produit . . . . .	122
4.7	Impact(s) des nouvelles exigences sur les fonctions et composants. . . . .	127
4.8	Exemple de l'architecture d'un FRI avec les composants qui dépendent aux exigences du contexte Algérien . . . . .	136
<b>5</b>	<b>Prototype de la solution en vue d'une industrialisation</b>	
5.1	FRM existant . . . . .	143
5.2	Évolution du FRM vers FRI . . . . .	145

---

5.3	Architecture du résultat de la solution technique proposée. . . . .	146
5.4	Étapes de l'algorithme d'évitement d'obstacles. . . . .	147
5.5	Détail architecture proposée : dispositifs d'E/S. . . . .	148
5.6	Diagramme de transfert des données entre les dispositifs d'en- trée/sortie et ROS installé sur le Raspberry pi 4 B. . . . .	149
5.7	Principaux composants du modèle FRM . . . . .	150
5.8	Assemblage final du FRM modélisé . . . . .	151
5.9	Partie moteur . . . . .	152
5.10	Partie coffre étanche (Batterie, Arduino, Raspberry) . . . . .	153
5.11	Emplacement caméra et capteur ultrasons . . . . .	154
5.12	Organisation de l'atelier de production du module intelligent. . . . .	155
5.13	Installation finale du module intelligent . . . . .	156
5.14	Position et présentation du MI . . . . .	156
5.15	Ensemble partie motorisation et boîtier de puissance . . . . .	157
5.16	Besoins du FRI pour les déplacements en autonomie. . . . .	159
5.17	Interaction et communication entre différents outils ROS . . . . .	160
5.18	Exportation assemblage Solidworks vers Unified Robot Description Format (URDF) . . . . .	163
5.19	Structure arborescente du FRI . . . . .	163
5.20	Exemple du code du FRI dans Simulateur 3D sous ROS (Gazebo) . . . . .	164
5.21	Position du FRI sur Gazebo . . . . .	165
5.22	Simulation du déplacement du FRI sur Gazebo . . . . .	166
5.23	Vue en plan de la simulation du déplacement du FRI sur Gazebo . . . . .	167
5.24	Visualisation du FRI sur Ros visualization (Rviz) . . . . .	168
5.25	Communication des messages via un système de transport avec la sémantique publisher/subscriber. . . . .	168
5.26	Visualisation des obstacles sur Rviz . . . . .	169
5.27	Visualisation des obstacles en profondeur sur Rviz . . . . .	169
5.28	Visualisation du déplacement du FRI . . . . .	170
 <b>A Liste des principaux projets des FRI</b>		
 <b>B Technologies de perception dans le développement des FRI</b>		
B.1	Différents types de capteurs. . . . .	188
B.2	Un exemple de Télémètre Laser de calcul de distance . . . . .	189

---

B.3	Un exemple de Télémètre Laser à balayage, fournissant 720 mesures réparties sur 360 degrés, à 5Hz (marque Ibeo) . . . . .	189
B.4	Capteurs Ultra-Son (US) . . . . .	190
B.5	Capteur infrarouge (IR) . . . . .	190
<b>D</b>	<b>Identification des caractéristiques des solutions techniques</b>	
D.1	Kit de motorisation pour fauteuil roulant . . . . .	204
D.2	Alber e-motion M25 . . . . .	204
D.3	Kit module de propulsion pour fauteuil roulant . . . . .	205
D.4	Kit MINOTOR pour fauteuil roulant . . . . .	207
D.5	Kit BULLU pour fauteuil roulant . . . . .	207

# Liste des abréviations

- OMS** Organisation Mondiale de la Santé
- CIDIH** Classification Internationale Déficience, Incapacité, Handicap
- CIH** Classification Internationale du Handicap
- CNPH** Conseil National des Personnes Handicapées
- ONS** Office National des Statistiques
- FRI** Fauteuils Roulants Intelligents
- FRAv** Fauteuil Roulant Avancé
- FRAu** Fauteuil Roulant Autonome
- FRR** Fauteuil Roulant Robotique
- FRS** Fauteuil Roulant Smart
- LMIC** Low- and Middle-Income Countries
- PRFI** Pays à Revenu Faible ou Intermédiaire
- PRE** Pays à Revenu Elevé
- HIC** High-Income Countries
- FRM** Fauteuils Roulants Manuels
- FRE** Fauteuils Roulants Electriques
- FR** Fauteuils Roulants
- FREI** Fauteuil Roulant Électrique Intelligent
- SPC** Systèmes de Produits Complexes
- MRC** Méthodologie de Recherche en Conception
- AF** Analyse Fonctionnelle

- CPM** Core Product Model
- CAO** Conception Assistée par Ordinateur
- NIST** National Institute of Standards and Technology
- OAM** Open Assembly Model
- XML** Extensible Markup Language
- APTE** Application aux Techniques d'Entreprise
- CdCF** Cahier des Charges Fonctionnel
- FAST** Functional Analysis System Technics
- SysML** System Modelling Language
- UML** Unified Modeling Language
- BPMn** Business Process Model and Notation
- AF** Analyse Fonctionnelle
- IS** ingénierie des systèmes
- IA** Intelligence Artificielle
- TIC** Technologies de l'Information et de la Communication
- MCU** Microcontrôleur
- MI** Module Intelligent
- ROS** Robot Operating System
- Rviz** Ros visualization
- URDF** Unified Robot Description Format
- Gazebo** Simulateur 3D sous ROS



# Introduction générale

La technologie est le propre de l'homme, actuellement plus que jamais. Elle permet, dans l'une de ses utilisations plausibles, de pallier un certain nombre d'handicaps ou de dysfonctionnements corporels ou biologiques : prothèses, fauteuils roulants, etc. De nos jours, le développement croissant de la technologie et l'augmentation des exigences des utilisateurs poussent les fabricants à améliorer de plus en plus les performances des produits manufacturiers modernes. L'intégration des nouvelles technologies dans les produits devient très complexe en utilisant des composants de technologies différentes et avec plus de fonctionnalités. Les tendances actuelles dans le domaine de la technologie sont orientées vers l'amélioration des conditions de vie des personnes en situation de handicap. En effet, l'amélioration du quotidien des personnes handicapées nécessite la mobilisation de plusieurs disciplines scientifiques telles que les technologies de perception, l'innovation, la conception, la re-conception, l'intelligence artificielle, etc. À ceci s'ajoute la concurrence sur le plan marketing, qui demeure un moteur très puissant de l'innovation et de la performance technologique.

Cependant, travailler dans le domaine de la technologie de la réhabilitation pour les personnes handicapées implique des contraintes de coût, de sécurité et de psychologie cognitive et ergonomique. Pour établir un compromis entre ces contraintes et l'acceptabilité psychologique, il faut mettre en œuvre un modèle global composé par ces entités afin d'optimiser la situation des personnes handicapées, notamment, les personnes handicapées moteur. Il existe des solutions efficaces développées sur plus de 40 ans de recherches et d'industrialisation dans le domaine de la réhabilitation. L'utilisation de ces solutions par des personnes handicapées vivant dans des pays développés ne pose pratiquement aucun problème malgré leur coût élevé. Ces mêmes solutions restent inaccessibles voir inefficaces pour des populations issues des pays en voie de développement.

Aujourd'hui, l'intelligence artificielle et les innovations techniques sont capables de faciliter la vie des personnes en situation de handicap, tant sur le plan personnel que professionnel. En effet, la disponibilité des moyens de calcul à prix bas a permis d'équiper des machines mobiles avec de l'intelligence capable de prendre des

décisions avec différents niveaux de complexité. Le développement des technologies en lien avec les données a permis le développement d'algorithmes d'optimisation capables d'être exécutés sur des moyens de calculs embarqué permettant une qualité de service acceptable. Aussi l'Intelligence Artificielle (IA) peut s'intégrer à d'autres technologies et s'appliquer à presque toutes les activités liées aux Technologies de l'Information et de la Communication (TIC). Elle devrait être la première ligne d'action pour déterminer les exigences d'une fonction d'un processus pour ensuite établir un modèle fiable qui pourrait être opérationnel.

L'importance des technologies de l'information et du processus de conception des produits sont bien connus par les ingénieurs industriels. L'informatique est utilisée en ingénierie industrielle comme un outil de modélisation, d'analyse et de pilotage. Elle a conduit les technologies de l'information sur la scène de la fabrication, et de la réponse adéquate aux exigences urbaines, de transports, aussi bien personnelles que professionnelles.

À ce titre, les outils d'ingénierie ont eu un impact important sur les fauteuils roulants. Les matériaux, les techniques de fabrication, les outils de mesure et les logiciels de conception ont tous été utilisés pour améliorer les performances des FR. Cela est possible à travers l'introduction de plus d'intelligence dans les fauteuils roulants électriques ou manuels pour assurer des fonctions de mobilité autonome, sécurisée et efficace. L'intelligence commence par la perception de l'environnement et l'interprétation des besoins de l'utilisation en termes de destination, vitesse et direction. Le développement des performances des capteurs d'images et la réduction drastique de leurs coûts a ouvert le champ à leur utilisation dans tous les domaines dont les fauteuils roulants.

## Éléments de la problématique

La problématique principale traitée dans cette thèse concerne l'amélioration des possibilités de mobilité de ces personnes handicapées moteur dans des contextes défavorables tels que les pays en voie de développement. Le but est de développer des solutions permettant d'augmenter leur autonomie dans leurs déplacements (au domicile comme à l'extérieur) et d'améliorer leur qualité de vie quotidienne. En effet, le modèle du comportement d'une personne handicapée, incluant ses activités quo-

---

tidiennes, ses habitudes et ses contraintes, est souvent relatif à une infrastructure et culture de pays développés. Ceci se traduit directement sur la forme de FR existants. De plus il est connu que le comportement des utilisateurs de n'importe quel produit évolue vers plus d'exigence et plus de demandes à des produits plus personnalisés et à courte durée de vie. Les personnes handicapées d'une manière générale et les personnes handicapées en Algérie ne sont pas sensées échapper à cette règle. La présente thèse vise à confirmer que le constat qui stipule que les fauteuils existants ne répondent pas aux besoins de ces personnes et sont développés pour des personnes vivants dans des pays développés. À l'issue de cette étude le comportement d'une personne handicapée vivant dans ce contexte sera défini et une solution est proposée pour lui permettre d'accéder à la mobilité tout en répondant à ses besoins. La perception de l'environnement offerte par la vision artificielle et l'intelligence offerte par les ordinateurs embarqués vont être utilisées dans le développement de la solution proposée.

La valeur ajoutée de cette thèse réside dans le croisement du modèle du comportement d'une personne à mobilité réduite avec ses besoins dans le contexte algérien.

Compte tenu de la rareté des données concernant les activités quotidiennes et les besoins des personnes handicapées en Algérie et de l'évolution rapide des besoins des clients, il était nécessaire d'obtenir des données récentes et précises pour remplir tous les champs du modèle proposé.

Afin de mieux cerner les attentes et les besoins des utilisateurs, nous avons mené une enquête par questionnaire pour connaître les vrais besoins des utilisateurs des FR en Algérie. Cette enquête a mis en exergue les vraies exigences des utilisateurs de FR en Algérie.

Un premier modèle fondé sur le comportement quotidien des utilisateurs de FR est proposé dans le but de répondre à leurs besoins et qui présente plusieurs intérêts :

1. La représentation initiale du problème va définir certains éléments de comportements qui permettront de couvrir un ensemble de solutions possibles.
2. Les contraintes sont prises en considération et jouent un rôle prépondérant dans la résolution des problèmes rencontrés.
3. Les exigences fonctionnelles et techniques doivent répondre aux besoins recensés à travers le dépouillement des réponses au questionnaire.

Les résultats de l'enquête ont fait ressortir de nouvelles exigences non identifiées dans le premier modèle de comportement. Ce qui nous a amené à proposer un deuxième modèle de comportement relatif au contexte algérien. Ainsi, le deuxième modèle proposé représente une évolution du premier tenant compte de nouvelles exigences.

Afin de répondre aux exigences observées, nous avons proposé une architecture modulaire du FR en montrant les trois niveaux que donnent la modularité, à savoir, le fauteuil manuel, le fauteuil électrique et le fauteuil intelligent. Cela va permettre une plus grande flexibilité du fauteuil pour répondre à des besoins de plus en plus personnalisés. La contrainte de coût et de maintenance ont été mis en évidence par l'enquête. Nous avons donc proposé une solution basée sur la re-conception permettant de répondre rapidement aux besoins sans faire une nouvelle conception.

La re-conception est le type de conception approprié à notre travail, car il permet d'aller d'un produit existant vers une nouvelle version. Pour cela, nous avons opté pour une approche hybride entre SysML et la méthode APTE. Nous avons utilisé l'analyse fonctionnelle dédiée à améliorer (re-conception) le produit en partant du besoin de l'utilisateur vers des solutions technologiques adaptées. La modélisation SysML est utilisée pour intégrer les exigences dans le modèle du FR.

Le changement d'exigences a un impact sur le modèle existant. Cet impact va avoir des conséquences sur les fonctionnalités existantes, les processus de fabrication et la chaîne d'approvisionnement. Actuellement, les outils de re-conception existants ne permettent pas le lien entre les exigences produit et les systèmes de production.

Pour cela, nous avons proposé un modèle d'optimisation pour minimiser le coût du changement d'exigences quand on introduit des nouvelles exigences sur un produit/processus existant. Ainsi une solution envisageable consiste à utiliser le FR existant en intégrant un dispositif intelligent avec les nouvelles exigences en matière de technologies à travers un modèle 3D. Son rôle est d'aider l'utilisateur à se déplacer en toute sécurité en évitant les obstacles qu'il n'aurait pas vu ou pas pu éviter sans le système. Celui-ci doit être universel, c'est-à-dire adaptable sur la plupart des FR existants sur le marché avec un coût adapté aux utilisateurs.

---

## Contributions de la thèse

Les contributions de la thèse peuvent ainsi être résumées :

- Identification du comportement de la personne handicapée en Algérie à travers une enquête de terrain.
- Proposition d'une architecture modulaire d'un Fauteuil Roulant Électrique Intelligent (**FREI**) basée sur la vision artificielle.
- Proposition d'une conception basée sur le principe de re-conception pour répondre aux différentes exigences détectées dans l'enquête terrain.
- Développement d'un modèle permettant l'optimisation de la conception des **FR** pour répondre aux exigences et respecter les contraintes de coût et d'utilité.
- Proposition d'une solution pour la conception du module intelligent et son implémentation sur les fauteuils existants.

Ce mémoire comporte cinq chapitres comme le montre la figure 1. Le premier chapitre présente les concepts de base et un état de l'art sur les **FR**. Une synthèse de la littérature dans une architecture modulaire de **FRE** et les différents brevets proposant des solutions similaires sont ainsi présentés. Enfin les différents algorithmes sur la vision artificielle dédiés à l'évitement d'obstacles et les fonctions avancées dans les **FRI** sont également présentés. Le deuxième chapitre aborde la collecte et l'analyse des exigences via le déploiement d'un questionnaire. Nous étudions tout d'abord le comportement des personnes à mobilité réduite en Algérie utilisant un **FR** pour se déplacer. Le troisième chapitre décrit, sur la base des exigences collectées, une conception et une modélisation appliquées au **FR**. Le quatrième chapitre propose un modèle d'optimisation du coût de changement d'exigences. Le cinquième chapitre présente le modèle 3D de la solution proposée. Nous terminons, ce travail, par une conclusion et quelques perspectives qui dirigeront nos futurs travaux de recherche.

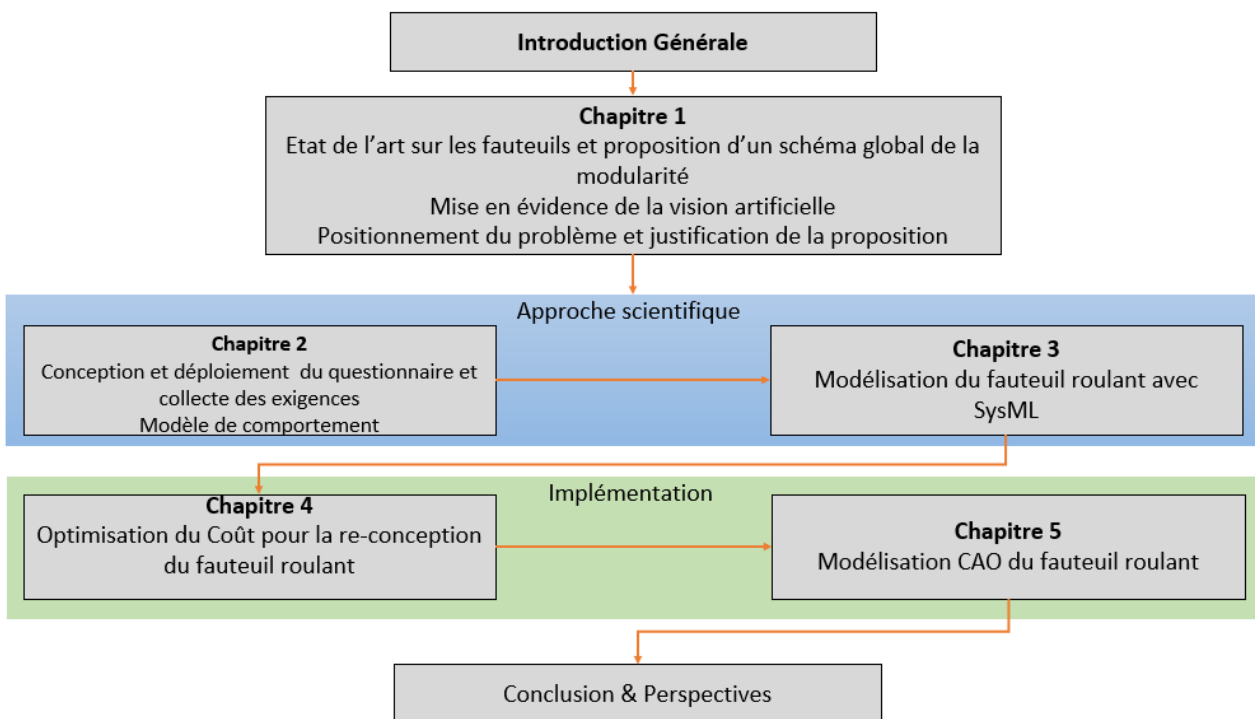


FIGURE 1 – Structure de la Thèse.

# État de l'art

---

## Sommaire

---

<b>1.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>9</b>
<b>1.2</b>	<b>Évolution du concept du "Handicap"</b>	<b>10</b>
1.2.1	Différentes classifications et définitions actuelles du handicap	11
1.2.2	Innovation technologique : Handicap moteur	14
<b>1.3</b>	<b>Description du contexte algérien</b>	<b>16</b>
<b>1.4</b>	<b>Aperçu des différents types de FR</b>	<b>19</b>
1.4.1	Fauteuils Roulants Manuels (FRM)	20
1.4.2	Fauteuils Roulants Électriques (FRE)	22
1.4.3	Exemple de Brevets d'intégration d'un module pour FR	26
1.4.4	Fauteuils Roulants Intelligents (FRI)	30
<b>1.5</b>	<b>Rôle des nouvelles technologies dans le développement des FRI</b>	<b>35</b>
1.5.1	Technologies de perception	35
1.5.2	Technologies d'intelligence embarquée	37
1.5.3	Reconnaissance d'objets pour l'évitement d'obstacles	40
<b>1.6</b>	<b>Synthèse de l'état de l'art et positionnement du problème</b>	<b>42</b>
<b>1.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>44</b>

---

## Résumé



*Le chapitre a pour but de positionner ce travail de thèse dans le vaste domaine de recherches sur les **FR** en général et les **FRI** en particulier. De nombreux prototypes de fauteuils intelligents ont ainsi été développés dans les laboratoires de recherches, exploitant principalement les technologies développées dans le domaine de la robotique mobile pour répondre à divers problématiques. Afin de donner un aperçu sur les différents travaux en lien avec notre travail de recherche, nous débutons par les différentes définitions de l'handicap pour cadrer le sujet étudié. Nous donnons un aperçu sur les travaux concernant les paramètres distinguant les groupes de personnes handicapées à savoir, leur comportement, leur déplacement, les types de **FR** utilisés ainsi que le marché mondial des **FR**. Pour montrer la spécificité de ce travail sur le cas algérien, nous avons présenté une recherche bibliographique et de terrain sur le marché Algérien et la problématique des **FR** dans un contexte Algérien. Une synthèse des travaux a permis de proposer une architecture modulaire qui englobe l'ensemble des développements de types de **FR** existants. Nous présentons un aperçu sur la vision artificielle dédiée à l'évitement d'obstacles et les fonctions avancées. Nous décrivons à la fin de ce chapitre l'intégration de l'intelligence artificielle dans les **FRI** proposés dans la littérature.*



## 1.1. Introduction

---

# 1.1 Introduction

Depuis les années 1980, de nombreuses études intégrant les connaissances des sciences cognitives, de l'informatique ou de l'IA ont été entreprises pour concevoir des dispositifs techniques permettant à des personnes handicapées de mieux s'intégrer et de pouvoir réaliser plus simplement des actions du quotidien et des activités sociales. Il est important que les personnes handicapées aient la possibilité de participer à la société et de mener une vie saine [6, 7, 8] sur le plan humain pour ne pas se sentir exclues et aussi pour pouvoir participer à la vie économique.

Pour les personnes handicapées, la technologie transforme leur vie en leur accordant une plus grande liberté et en améliorant leur qualité de vie grâce à une volonté constante d'innovations nouvelles et passionnantes. Cette technologie est reconnue depuis longtemps comme un moyen potentiel de garantir aux personnes handicapées des chances optimales de mener une vie simple et sociale.

La population des personnes handicapées est en augmentation et les technologies et les approches qu'elle utilise se développent également [9] [10]. La participation à la société nécessite un environnement physique accessible, une technologie adaptée à leurs besoins et la mise en place d'un soutien approprié pour les personnes handicapées [11] [12][13].

Dès que nous essayons de définir le handicap, nous entrons dans « la bataille des mots et des théories »[14]. Car ce mot est entouré de considérations socialement négatives.

Ce chapitre se veut être un état de l'art des différents travaux en relation avec notre problème. Nous présenterons en premier lieu les différents types de FR existants. Ensuite, nous parlerons de la situation des handicapés moteurs en Algérie et les difficultés rencontrées dans leurs déplacements et dans la vie sociale et quotidienne. À cet effet, les besoins de nombreuses personnes peuvent être satisfaits avec les FRM ou motorisés conventionnels, et les personnes atteintes de déficiences motrices sévères, cognitives ou sensorielles, trouvent la conduite des FR difficile ou impossible. Pour assister cette population, de nombreux chercheurs ont utilisé des technologies issues de la robotique mobile afin de créer des « FRI » (en anglais : Smart Wheelchair). Dans ce contexte, nous allons nous intéresser à la classification des FRI qui constituent notre objectif de travail. Nous aborderons ensuite l'intégration des dispositifs intelligents dans le FR classique en détaillant les différents

types de capteurs et les systèmes de perception. Une architecture modulaire de notre système est proposée, que nous détaillons dans les paragraphes qui suivent. À la fin, nous expliquons les différences entre ces fauteuils qui ne sont pas adaptables dans les pays en voie de développement et ceux existants dans la littérature. Ces différences constituent une démarche scientifique pour développer un produit adapté à la population concernée à moindre coût.

## 1.2 Évolution du concept du "Handicap"

Jusqu'à maintenant, les termes "handicap" et "déficience" étaient utilisés de manière interchangeable. Ce manque de différenciation et l'absence d'une base conceptuelle unifiée pour déterminer le handicap ont eu de vastes implications en ce qui concerne la planification des activités, la formulation des politiques et la prestation de services. Les différentes définitions de l'handicap avant 1980 se résument en quelques points basés sur des critères de travail, d'emploi, et/ou d'activités [15, 16, 17, 18, 19, 20]. Nous pouvons citer :

- Incapacité de gérer le personnel et les tâches ménagères [15].
- Incapacité de prendre soin de soi [16].
- Incapacité d'obtenir un emploi et les problèmes liés aux activités sociales et de loisirs [17].
- Avoir des problèmes pratiques dans la vie quotidienne et le temps libre [18].
- Avoir des difficultés à répondre aux exigences des employeurs et avoir besoin d'aide pour les soins personnels et d'autres activités de la vie quotidiennes [19].
- Situation de la personne handicapée touche même le niveau professionnel, le revenu, les conditions de logement et le sentiment subjectif de privation [20].

Le mot « handicap » est apparu pour la première fois en Angleterre au XVIIe siècle [21] et a progressivement remplacé « infirmité », « invalidité », « débilité ». Il trouve son origine dans l'expression « Hand in the cap » (« la main dans le chapeau ») et devient par contraction « han i'cap ». Employé initialement dans le domaine des courses de chevaux, une course à handicap est « une course ouverte à des chevaux

## 1.2. Évolution du concept du "Handicap"

---

dont les chances de vaincre, naturellement inégales, sont, en principe égalisées par l'obligation faite aux meilleurs de porter un poids plus grand » [21].

### 1.2.1 Différentes classifications et définitions actuelles du handicap

Diverses définitions peuvent être mobilisées suivant les acteurs et les contextes [22]. Ces nombreuses définitions de l'invalidité et de la déficience qui se chevauchent parfois sont distinctes. Certains chercheurs prennent soin de distinguer les différences entre déficience et "handicap" [23]

Dans les années 70, l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) souhaitait définir une classification des handicaps en complément de la classification des maladies déjà élaborées par Hamonet en 2007 [24] et confie ce travail à Philip Wood, (médecin épidémiologiste et rhumatologue Anglais), qui proposa un nouveau modèle de définition du handicap, repris en 1980 par l'OMS, sous le nom de Classification Internationale Déficience, Incapacité, Handicap (CIDIH), ou encore de CIH. Ce modèle en tableau 1.1 s'appuie sur la séquence de Wood. Les définitions de ces trois termes sont décrites en détail dans le tableau 1.2 [25] :

Tableau 1.1 – CIH ou schéma de P. Wood ( OMS-INSERM-CTNERHI,1988)

Séquence de WOOD						
Maladie	→	Déficience (niveau des lésions)	→	Incapacité (niveaux fonctionnels)	→	Handicap (retentissement dans le domaine social)

Une personne est considérée comme handicapée si elle présente (ou est perçue par d'autres comme présentant) un état ou un processus physiologique ou comportemental, qui est socialement identifié comme un problème, une maladie, un état, un trouble, un syndrome ou toute autre différence, distinction ou caractéristique négative similaire ayant une catégorie ou un label de diagnostic ethnomédical [26]. Le handicap existe lorsque des personnes sont victimes de discrimination sur la base de limitations fonctionnelles perçues [26].

L'anthropologie a fourni un contexte théorique pour l'étude du Handicap. L'anthropologie sociale, culturelle et médicale ont contribué à l'enrichissement de notre compréhension du Handicap [23]. Tous ces facteurs sont liés à l'aspect culturel

Tableau 1.2 – Composantes de la CIH et leurs caractéristiques.

Variables	Définitions	Caractéristiques
Déficiences	Correspond «à toute perte de substance ou altération d'une structure ou d'une fonction psychologique, physiologique ou anatomique ou mentale».	Peut être provisoire ou définitive, évolutive ou stationnaire. Se situe au niveau intellectuel (intelligence, mémoire, pensée), psychique (conscience, perception, émotion, comportement), langage et parole, auditif, visuel, organes internes (digestif, cardiovasculaire, etc.), squelette et appareil de soutien, esthétique.
Incapacité	Correspond «à toute réduction (résultant d'une déficience), partielle ou totale, de la capacité d'accomplir une activité d'une façon ou dans les limites considérées comme normales pour un être humain».	Peut être totale ou partielle, provisoire ou définitive évolutive ou stationnaire. Elle est classée sous forme de rubriques : comportement, communication, soins corporels, locomotion, tâches domestiques, etc. Elle concerne l'adresse dans les activités de la vie quotidienne, face à certaines situations, l'aptitude à la vie professionnelle et autres occupations.
Inconvénient	«L'inconvénient social (initialement désigné par le mot «handicap») résulte d'une déficience ou d'une incapacité qui limite ou interdit l'accomplissement d'un rôle normal (en rapport avec l'âge, le sexe, les facteurs sociaux et culturels)».	Peut être provisoire ou définitif. Il peut être compensé totalement ou partiellement. Il peut être évolutif en fonction des facteurs personnels et environnementaux de l'individu.

## 1.2. Évolution du concept du "Handicap"

---

des personnes handicapées. Lors de la conception des produits destinés à cette population, il est impératif de tenir compte des statistiques fournies par le rapport de l'OMS. En effet, le tout premier rapport mondial sur le Handicap, réalisé conjointement par l'OMS et la banque mondiale, indique que plus d'un milliard de personnes dans le monde souffrent aujourd'hui d'un handicap [27]. Selon un rapport publié par l'OMS, 15% de la population du monde ont un [27]. Entre 110 millions (2,2%) et 190 millions (3,8%) de personnes âgées de 15 ans et plus rencontrent de grandes difficultés à vivre selon les normes de l'OMS [28]. Entre 2000 et 2050, la proportion de la population mondiale de plus de 60 ans doublera pour passer d'environ 11% à 22%. Le nombre absolu de personnes âgées de 60 ans et plus devrait augmenter pour passer de 605 millions à deux milliards au cours de la même période [29].

En Afrique du Nord, il n'y a pas d'image claire d'handicap, les preuves disponibles suggèrent que les personnes handicapées se portent moins bien que les personnes non handicapées. Cette situation est le résultat de plusieurs facteurs tels que la marginalisation, la stigmatisation, le manque de sensibilisation à la prévalence du Handicap, le manque de services publics et les environnements inaccessibles [30].

En Algérie, la situation des personnes handicapées n'est pas meilleure que celle des autres pays africains. Les pouvoirs publics algériens font un effort sur le plan législatif. L'Algérie vise à adapter sa législation aux textes internationaux (Convention internationale sur les droits des personnes handicapées) à travers le décret présidentiel N°. 09-188. L'Algérie a créé le Conseil National des Personnes Handicapées (CNPH) dans le texte 06-145 du 25 avril 2006. Malgré tous ces efforts, la situation des personnes handicapées en Algérie ne progresse pas. Dans la société algérienne, les personnes ayant des besoins spéciaux constituent une part importante, bien que vulnérable. L'Algérie compte environ 2 millions de personnes handicapées, selon l'ONS [31]. La même source indique que l'handicap moteur est le plus important (44%), suivi par l'handicap lié à la compréhension et à la communication (32%) et la déficience visuelle (24%).

En outre, l'analyse des causes du Handicap en Algérie révèle que 28,5% des cas sont congénitaux ou héréditaires, 16,7% sont les conséquences d'accidents ou de blessures, 14,2% des maladies infectieuses, 12,5% sont dus aux effets de la vieillesse, 7,9% de violences psychologiques ou physiques et 2% des blessures à l'accouchement [32], sans ignorer l'existence d'autres types de handicaps, qui, même s'ils sont pénibles et doivent être regardés avec beaucoup d'humanité et d'attention, ne relèvent

cependant pas de nos préoccupations doctorales ici présentes (Figure 1.1).

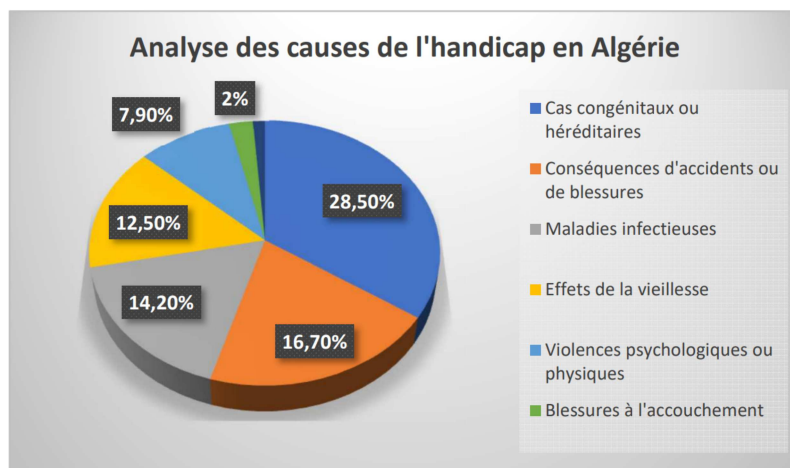


FIGURE 1.1 – Causes du Handicap en Algérie.

### 1.2.2 Innovation technologique : Handicap moteur

L'impact de la technologie sur les personnes handicapées a été massif ces dernières années et comme la marche du progrès se poursuit et a pour principale mission d'aider l'homme. Les FR mobiles ont fait l'objet de nombreuses innovations technologiques améliorant progressivement chacun de leurs composants. La dépendance de l'utilisateur à l'égard du FR et le temps de déploiement constituent des défis importants pour l'ingénieur concepteur du FR.

L'handicap moteur est le plus souvent associé à la mobilité réduite.

Un FR est considéré comme un dispositif médical classé parmi les aides techniques au déplacement pour améliorer l'autonomie des personnes à mobilité réduite qui présentent une déficience motrice sévère (tétraplégie, infirmité motrice cérébrale, myopathie, etc.). Le FR doit tenir compte des spécificités de la personne concernée, de son environnement et de ses besoins (sociaux, professionnels et de loisirs). Il offre aux personnes handicapées la mobilité, qui est une condition préalable et nécessaire pour jouir des droits vitaux, vivre dans la dignité. Pour de nombreuses personnes, un FR approprié, bien conçu et bien adapté peut être le premier pas et sans doute le plus important vers l'intégration et la participation à la vie de la communauté.

Les personnes handicapées moteurs peuvent souvent bénéficier de moyens de mobilité autonome, tels que les FRE ou FRM, comme les scooters ou les déambulateurs

## 1.2. Évolution du concept du "Handicap"

---

[33]. La mobilité indépendante augmente les opportunités professionnelles et éducatives des individus, réduit la dépendance vis-à-vis des soignants et des membres de la famille, et favorise le sentiment d'autonomie.

Ces dernières années, la population âgée des pays occidentaux et d'autres pays développés a augmentée [34] [35]. Ce phénomène commence à attirer l'attention des communautés scientifiques et industrielles et plusieurs solutions ont été proposées pour offrir une vie plus indépendante aux personnes concernées.

En général, un FR se présente sous la forme d'une chaise équipée de quatre roues qui peuvent être propulsées par la force humaine, ou par une source d'énergie électrique (généralement une batterie et un moteur électrique) [36].

Actuellement, il existe une grande variété de modèles de FR disponibles sur le marché. Ils répondent à une variété de besoins des personnes et représentent un progrès significatif. La tendance actuelle chez les fabricants de FRM se concentre sur l'ingénierie de réduction des coûts [37]. Le nombre de modèles disponibles sur le marché en Algérie est très limité (modèles de FRE et FRM pour adultes et enfants), la plupart avec différentes options. De plus, il n'est pas possible de fournir des FR spécifiques, la plupart sont importés des pays développés (Europe et Chine). En général, il existe de nombreuses possibilités d'adaptation d'un fauteuil aux utilisateurs. Cela nécessite une évaluation précise des besoins et des attentes des personnes handicapées en Algérie pour répondre à leurs besoins spécifiques. Ce besoin augmente très rapidement et nécessite une technologie avancée pour simplifier les activités quotidiennes des utilisateurs.

Les FR sont l'une des aides techniques la plus couramment utilisée. Selon les estimations de l'OMS, 1% de la population, soit environ 75 millions de personnes dans le monde, ont besoin d'un FR [38].

Quatre personnes sur cinq ont besoin d'un FR dans les Pays à Revenu Faible ou Intermédiaire (PRFI) appelé également Low- and Middle-Income Countries (LMIC) [39]. Ces pays enregistrent le plus haut pourcentage de besoins non satisfaits. Si on estime à 90% le nombre de personnes nécessitant un FR qui en sont équipées dans les Pays à Revenu Elevé (PRE) ou High-Income Countries (HIC). Ce chiffre serait plus proche des 5% dans les LMIC. On estime à 64 millions le nombre de personnes ayant besoin d'un FR dans les LMIC (Tableau 1.3). Ces chiffres représentent une estimation approximative des besoins en raison du manque de données disponibles.



Tableau 1.3 – Évaluation de la taille du marché du besoin de FR [1].

Région de l’OMS	Besoin de FR (en Millions)	Estimation de la popula- tion disposant d’un FR (en pourcentage)	Besoin non satis- fait (en Millions)
Amérique (hors HIC)	~6	5%	~6
Europe (hors HIC)	~ 4	5%	~4
Afrique	~10	5%	~10
Asie du Sud	~25	5%	~25
Pacifique Occidental	~20	5%	~19
HIC	~9	90%	~1
Monde entier	~75		~65

### 1.3 Description du contexte algérien

Avant de parler du contexte algérien, nous présenterons une brève situation des personnes handicapées dans le monde qui reflète avec quelques différences, la même situation en Algérie. L’analyse de la situation des personnes handicapées doit prendre en compte les différences de niveaux de développement économique, social et la diversité des cultures [40]. Les gouvernements doivent prendre l’initiative et rendre les populations conscientes des avantages que tireraient les individus et la société de l’insertion des handicapés dans tous les domaines de la vie sociale, économique et politique.

Dans une large mesure, les personnes handicapées doivent faire face à des obstacles physiques, culturels et sociaux qui les désavantagent même lorsqu’elles peuvent bénéficier d’une assistance de réadaptation. Plusieurs facteurs expliquent l’augmentation du nombre de personnes handicapées et leur marginalisation croissante, notamment [41] :

- Les guerres, leurs conséquences et les autres formes de violence comme la destruction, la pauvreté, la faim, les épidémies, les mouvements massifs de population.
- Le taux d’analphabétisme élevé et manque d’informations sur les services sociaux, de santé et d’éducation.



### 1.3. Description du contexte algérien

---

- L'ignorance de l'Handicap, de ses causes, de sa prévention et de son traitement.
- Les contraintes, telles que le manque de ressources, les distances géographiques et les barrières sociales, empêchent de nombreuses personnes de bénéficier des services disponibles.
- L'absence ou l'insuffisance d'infrastructures.
- Les accidents survenant dans l'industrie, l'agriculture et surtout dans les transports.
- Les catastrophes naturelles ; telles que les tremblements de terre.
- La pollution de l'environnement.

Il convient de souligner les problèmes des personnes handicapées, en particulier dans les pays en voie de développement, où 80% de ces personnes vivent dans des zones rurales éloignées. Dans certains de ces pays, le pourcentage de personnes handicapées est estimé par les Nations Unies à 20%, et si l'on compte les membres de la famille, on peut dire que 50% de la population souffre des conséquences du handicap (ONU/2012). Le problème est encore accentué par la pauvreté, dans la plupart des cas des personnes handicapées. Dans ces pays, les problèmes sont également aggravés par l'explosion démographique, qui multiplie inexorablement le nombre et la proportion de personnes handicapées.

L'Algérie est l'un des pays qui partage les mêmes caractéristiques de personnes handicapées que les autres pays en voie de développement. En Algérie, on remarque que le degré de l'handicap qui varie selon le sexe. 77,8% des personnes handicapées sont de sexe masculin, alors que la représentation du sexe masculin dans l'ensemble de la population n'est que de 50% comme le montre la figure 1.2. De plus, les statistiques montrent une différence basée sur la localisation géographique des personnes handicapées, où 53,4% vivent dans des agglomérations urbaines [42].

Différents types d'handicaps sont présents dans la population algérienne. Il n'est pas évident d'obtenir des statistiques précises sur la répartition de ces handicaps dans la population. Par exemple, les handicapés moteurs sont les plus représentés (avec 44%) selon l'ONS [31], alors que ce ratio devient 14,7% si l'on se réfère à la documentation relative aux handicaps dans la Région Arabe [42]. La même source donne plus de détails concernant les autres handicaps, comme le montre le tableau

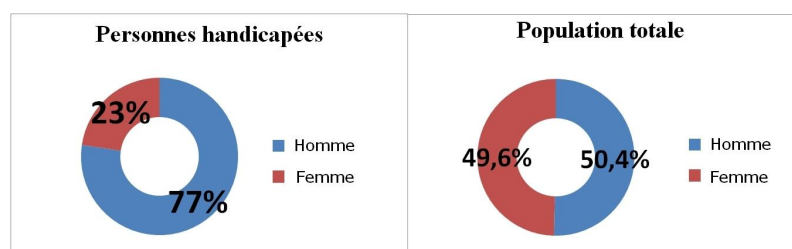


FIGURE 1.2 – Répartition de l'handicap par sexes, homme/femme

1.4. Le nombre total de personnes handicapées est en constante évolution. Il était estimé à 1,9 million de personnes en 2010. Ce nombre représente 5% de la population totale. Parmi les causes de handicaps qui touchent le plus la population algérienne, nous citons les paraplégiques, la myopathie, les amputations, la poliomyélite, les maladies héréditaires et les accidents de la route. En Algérie, chaque jour, les accidents routiers, résultats du non-respect du code de la route, l'excès de vitesse, le dépassement dangereux causent 35% de l'ensemble des handicaps.

Tableau 1.4 – Estimation des personnes handicapées en Algérie 2010 ONS

Types	Nombre	%
Moteur	278 520	14,67
Visuel	169 534	8,93
Mental	163 163	8,59
Handicap multiple	83 545	4,40
Auditif	72 409	3,81
Maladies chroniques	610 842	32,17
Autres	520 821	27,43
<b>TOTAL</b>	<b>1 898 834</b>	<b>100</b>

Afin d'illustrer cette problématique, le tableau 1.5 présente la cause du handicap en Algérie. Il est important de noter que les données concernant la population handicapée ne sont pas mises à jour et que plusieurs informations importantes ne sont pas disponibles par rapport aux autres pays en développement.

## 1.4. Aperçu des différents types de FR

---

Tableau 1.5 – Répartition des causes principales du handicap en Algérie.

Cause du handicap	Total (%)
Congénitale/héréditaire	28,5
Naissance/travail	2,0
Maladie infectieuse/virale	14,2
Violence psychologique/physique	7,9
Vieillessement	12,5
Accident	16,7
Autres	12,7
Non spécifié	5,6

## 1.4 Aperçu des différents types de FR

Les utilisateurs de FR sont des personnes qui en possèdent ou qui peuvent bénéficier de l'aide en raison de leur capacité de marche limitée [39]. Les utilisateurs de FR incluent :

- Les enfants, les adultes et les personnes âgées.
- Les hommes et les femmes, les filles et les garçons.
- Les personnes avec des déficiences motrices d'origine neuromusculaire, cérébrale, ostéo-articulaire et diverses.
- Les personnes avec des modes de vie et rôles différents et divers statuts socio-économiques.
- Les personnes vivant dans des environnements différents, y compris l'environnement rural, semi urbain et urbain.

Les utilisateurs représentent un vaste éventail de besoins en termes de mobilité, mais ils ont en commun le besoin d'un FR qui améliore leur mobilité en relative autonomie et avec dignité.

Aucun modèle ou aucune taille unique de FR ne peut être standardisé et adapté aux besoins de tous les usagers. La diversité des utilisateurs implique le besoin de

différents types de FR [39]. Les modèles de FR diffèrent pour permettre aux usagers d'utiliser leur FR en toute sécurité et de manière efficiente dans leur milieu de vie et leur environnement professionnel.

Le marché mondial des FR, estimé entre 4 et 4,5 milliards de dollars en 2018, est essentiellement centré sur les marchés des pays à revenu élevé et se révèle très fragmenté. Les États-Unis détiennent une part de marché de 40% et l'ensemble de l'Europe de l'Ouest détient une part de 20%. Les cinq fabricants les plus importants contrôlent près de 50% du marché mondial de la mobilité [1].

Les spécialistes des FR doivent comprendre les besoins de l'utilisateur potentiel et savoir comment il utilisera le FR. Ils doivent aussi connaître les raisons pour lesquelles il existe divers modèles de fauteuils.

Actuellement, il existe plusieurs types de FR disponibles sur le marché ou en cours de développement. Il est possible de les classer en trois grandes catégories, (1) FRM, (2) FRE et (3) FRI. Dans ce qui suit, nous expliquons brièvement chaque type de ces fauteuils.

### 1.4.1 Fauteuils Roulants Manuels (FRM)

Les FRM, également appelés FR classiques ou basiques, se caractérisent par l'utilisation de la force manuelle de l'utilisateur pour assurer leur déplacement. Cette force est propulsée par les membres supérieurs qui deviennent les membres moteurs et sont donc acteurs majeurs de la propulsion. Cette utilisation des membres supérieurs est non-naturelle et peut induire des pathologies. En moyenne, un utilisateur de FRM exerce 2500 fois par jour une force de poussée sur les mains [43]. Des études s'intéressent à l'environnement, car il s'agit ici d'identifier les contraintes des utilisateurs du FRM en cas d'obstacles, de pentes et de divers. Ces contraintes s'appliquent à ses efforts de déplacement [44], à sa gestuelle [45], et aussi à son fauteuil [46]. L'utilisateur peut en fonction de son environnement et de ses besoins, adapter son fauteuil pour gagner en confort [47], et en stabilité et ceci quand les infrastructures le lui permettent [48]. En effet, dans les pays en voie de développement, nous pensons rarement aux personnes handicapées moteur, condamnées à se déplacer en FR, lors des réalisations des constructions, des rues, des trottoirs, des accès aux administrations, etc...

De nombreuses solutions à ce mode de propulsion ont été étudiées, notamment pour ajuster les performances, la technique, la mécanique et l'interface utilisateur,

## 1.4. Aperçu des différents types de FR

d'où toutes les améliorations qui ont été ajoutées au FRM, comme l'utilisation du retour de force ou la structure réglable [49]. Cela a conduit à des fauteuils qui ont pour la plupart un châssis léger et une dimension personnalisée adaptée à la physiologie individuelle [50] ainsi que l'optimisation du confort et de la sécurité. Ils sont également considérés comme la technologie de base assurant la mobilité des personnes handicapées. Le FR de style traditionnel, disponible dans les hôpitaux et les aéroports, a été pendant de nombreuses années le FR le plus utilisé. Les FRM sont disponibles sur le marché international et Algérien, à différents prix, y compris les plus économiques. C'est un dispositif relativement peu coûteux, en tout cas par rapport au FRE.

Le FRM est composé d'un système de propulsion (roues motrices), d'un système de direction (roues directrices) et d'un système de soutien du corps (palette repose-pied, assise, dossier) comme illustré sur la figure 1.3.

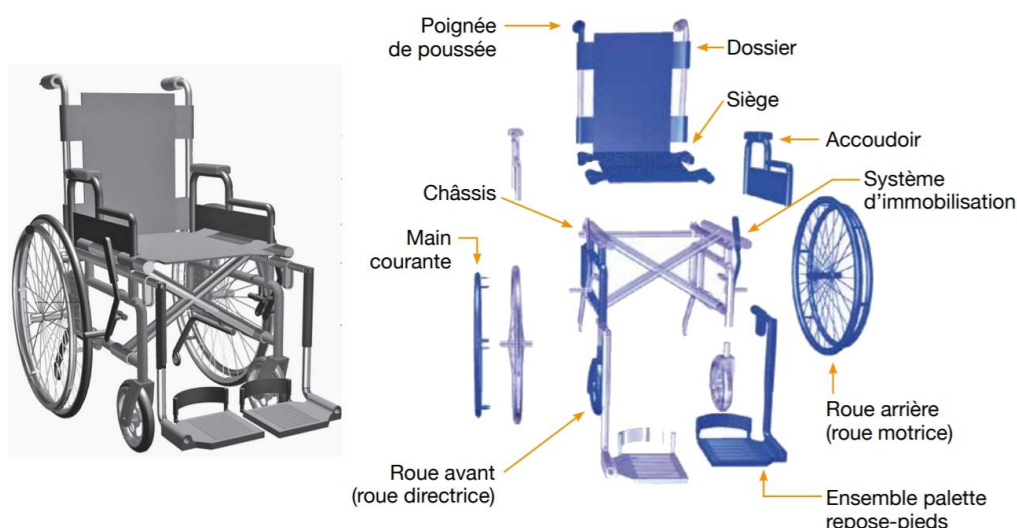


FIGURE 1.3 – Structure d'un FRM à mains courantes.

### 1.4.1.1 Critères de choix d'un FRM selon le modèle

Les critères de choix d'un FRM dépendent du niveau d'autonomie de l'utilisateur et de l'usage prévu. Il existe ainsi plusieurs catégories de FR. Nous pouvons citer quelques-unes avec leurs caractéristiques :

- FRM classique ou standard : pliant.
- FRM de confort : ergonomique et équipée d'une assise inclinable

- **FRM** à pousser : moins encombrant et plus maniable, uniquement propulsable par l'accompagnant.
- **FRM** pour personne forte : moins maniable.
- **FR** pour enfant : facile à plier et très compact, accoudoirs relevables, repose-pieds amovibles.
- **FRM** de confort : ergonomique, dossier réglable, assise inclinable et repose-jambes inclinables.
- **FRM** de sport et multisports : équipé de roues spécifiques adaptées au sport pratiqué par l'utilisateur.

### 1.4.2 Fauteuils Roulants Électriques (FRE)

Le **FRE** a été l'évolution logique du **FR** classique, un produit qui connaît une croissance rapide de vente dans les pays du monde entier. Pour des personnes à mobilité réduite ou présentant une déficience motrice sévère, il s'avère un moyen incontournable pour compenser le Handicap de mobilité.

Selon plusieurs études menées dans des pays développés, comme aux États-Unis, au Japon et en Allemagne [51], le marché de ces produits augmente régulièrement en raison du vieillissement de leurs populations. Par exemple, aux États-Unis, le marché atteindra 4,48 milliards de dollars UE en 2020 [52]. Ces prévisions généreront sans doute un effet d'économie d'échelle ayant un impact sur le coût de ces produits, qui représentent une réelle opportunité pour les personnes handicapées.

De nombreux modèles sont disponibles sur le marché. Ils se caractérisent par leur mécanique (châssis fixe ou rabattable, verticalisation électrique, mécanisme de mobilité) et leurs fonctionnalités électriques (motorisation, contrôle, alimentation), ainsi que par leurs capacités de contrôle (interface homme-machine, annexes de contrôle). En particulier le **FRE**, avec deux moteurs internes et une commande par joystick, décrit dans [53] est devenu le modèle pour la production commerciale. L'avènement des microprocesseurs mono-carte au milieu des années 70 a permis d'améliorer les contrôleurs et ainsi d'améliorer la maniabilité et la sécurité [54]. La difficulté majeure dans la conduite de **FRE** par rapport au **FRM** est la diversité dans les nouvelles capacités fonctionnelles de ces personnes, d'où des tests et des outils

#### 1.4. Aperçu des différents types de FRE

---

à développer pour la conduite du FRE qui permettent d'expérimenter les nouvelles fonctionnalités en toute sécurité [55].

Plusieurs catégories de FRE existant sur le marché, nous pouvons citer quelques-unes avec leurs caractéristiques :

- Fauteuils à propulsion manuelle et verticalisation manuelle assistée. Ce modèle bénéficie généralement d'un dispositif permettant de franchir les obstacles (Figure 1.4).
- Fauteuils à propulsion manuelle et verticalisation électrique (Figure 1.5).
- FRE avec dossier inclinable en arrière et rabattable en avant (Figure 1.6).
- FRE avec levage mécanique du levier (Figure 1.7).
- Fauteuil avec motorisation pour accompagnant : il s'agit d'un système démontable et adaptable sur de nombreux modèles.

Des progrès ont été réalisés dans la conception des FRE au cours des 20 dernières années, mais les algorithmes de contrôle de ces FRE n'ont pas beaucoup été améliorés depuis le début des années 80. L'état actuel de la technologie de contrôle du FRE ne fournit pas une mobilité et un confort adéquats pour de nombreux utilisateurs du FRE dans des environnements extérieurs, en particulier lors de conditions météorologiques défavorables, terrains accidentés ou en pente [56]. Le marché algérien contient plusieurs modèles qui proviennent exclusivement d'Europe et de Chine.



FIGURE 1.4 – Fauteuils à propulsion manuelle et verticalisation manuelle assistée



FIGURE 1.5 – Fauteuils à propulsion manuelle et verticalisation électrique





FIGURE 1.6 – FRE avec dossier inclinable



FIGURE 1.7 – FRE avec levage mécanique

Comme le montre le tableau 1.6, les prototypes de plusieurs modèles de FRE ont été développés et les informations du fabricant associées [2].

Par ailleurs, plusieurs types de transformation du FRM vers un FRE existent sur le marché (Figure 1.8), néanmoins le coût est excessivement élevé. C'est pour cela que nous avons pensé à développer une solution pour les utilisateurs de FR en Algérie qui consiste à intégrer un dispositif à moindre coût.



FIGURE 1.8 – Transformation FRM vers FRE



#### 1.4. Aperçu des différents types de FR

Tableau 1.6 – Répertoire de plusieurs modèles de FR et informations du fabricant associées [2]

Nom du produit	Organisation	Lieu	Caractéristiques de performance	Statut
iBOT 3000	Independence Technology, LLC	New York, États-Unis	Dynamiquement équilibré, multiples fonctions, y compris la montée d'escaliers	disponible dans le commerce
E-motion	Ulrich-Alber GmbH	Albstadt-Tailfingen, Allemagne	Fauteuil roulant assistée par poussée PAPAW (Pushrim Activated Power Assist Wheelchair)	disponible dans le commerce
Extreme 4 × 4	Magic Mobility, Inc	Rowville, Australie	Quatre roues motrices	disponible dans le commerce
ΩmegaTrac	TEFTEC Mobility, Inc	Texas, USA	Fauteuil roulant orientable à suspension réglable	disponible dans le commerce
Series 8	Glide	Balcatta, Australie	Suspension indépendante	disponible dans le commerce
Trax	Permobil	Tennessee, États-Unis	Suspension indépendante aux quatre roues	disponible dans le commerce
Quickie X-tender	Sunrise Medical Inc.	Colorado, États-Unis	Fauteuil roulant assistée par poussée PAPAW (Pushrim Activated Power Assist Wheelchair)	disponible dans le commerce
TDX	Invacare Corp.	Ohio, États-Unis	Step suspension pour l'escalade de trottoir	disponible dans le commerce
iGlide	Independence Technology, LLC	New York, États-Unis	Fauteuil roulant assistée par poussée PAPAW (Pushrim Activated Power Assist Wheelchair)	disponible dans le commerce
NavChair	University of Michigan	Michigan, États-Unis	Trois modes de navigation : évitement d'obstacles, passage de porte et suivi automatique des murs	Recherche
TetraNauta	Universidad de Sevilla	Sevilla, Espagne	Navigaton autonome dans les environnements intérieurs	Recherche
SPAM	AT Sciences, LLC et University of Pittsburgh	Pittsburgh, États-Unis	PAPAW avec des modules d'évitement d'obstacles	Recherche
TopChair	Logosilver	France	Monte-escalier	disponible dans le commerce
VAHM	LCOMS	Metz, France	suivi de mur et passage de porte	Recherche

### 1.4.3 Exemple de Brevets d'intégration d'un module pour FR

Nous présentons quelques Brevets sur l'intégration d'un dispositif et l'évolution technique des FR. Les progrès scientifiques et techniques présentent un intérêt majeur pour les personnes à mobilité réduite pour faciliter leur autonomie, apporter plus de liberté, introduire surtout un meilleur confort dans la vie quotidienne.

Le FR constitue une aide technique à la mobilité complexe, de par la multiplicité de ses composants et accessoires et leurs nombreux réglages. Il existe plusieurs centaines de modèles de FR, ce qui en rend le choix d'autant plus difficile. Chaque utilisateur est unique et a des besoins spécifiques. Certains FR sont conçus pour une utilisation quotidienne générale, d'autres pour des activités uniques ou pour répondre à des besoins d'accès spécifiques.

C'est dans ce contexte que nous avons présenté quelques brevets au sein de l'industrie du FR, mais de nombreuses innovations tombent en fin de compte, soit par la sur-spécialisation, soit par des équipements très cher, soit par le prix très élevé et soit que ces multiples innovations demeurent dans les laboratoires sans être commercialisés. À cet effet, nous avons présenté cette littérature de brevets qui mettra en valeur la proposition d'une nouvelle conception et qui répond aux exigences des utilisateurs Algérien.

**Brevet N°4,3,893,529 July 8, 1975** : Module convertible en mode motorisé qui peut être facilement fixé aux FRM [57] (Figure 1.9).

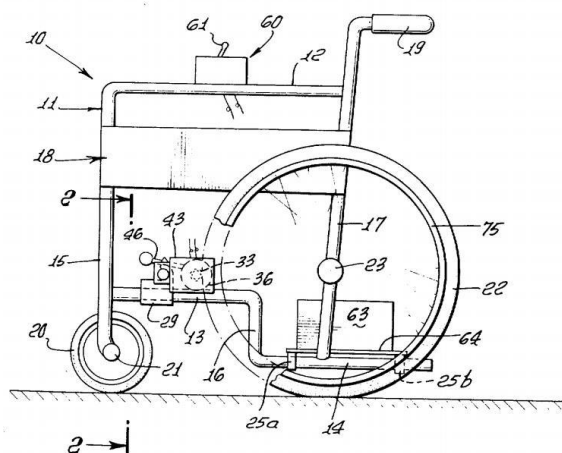


FIGURE 1.9 – FRM transformé en FRE par module

#### 1.4. Aperçu des différents types de **FR**

---

**Brevet N°4,949,408 Aug. 21, 1990** : **FR** qui permet à l'utilisateur d'être autonome et se plie comme une civière pour permettre à l'utilisateur d'être facilement transféré comme un lit [58] (Figure 1.10).

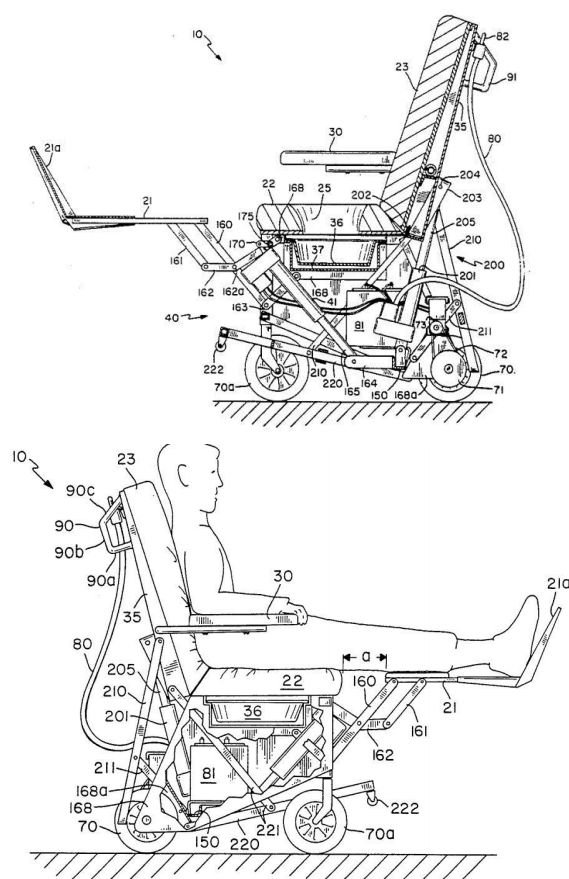


FIGURE 1.10 – **FR** autonome convertible en lit

**Brevet N°4,5,812,978 Sep. 22, 1998** : **FR** à commande vocale possédant un système de commande ayant plusieurs modes de fonctionnement pour le déplacement du fauteuil [59] (Figure 1.11).

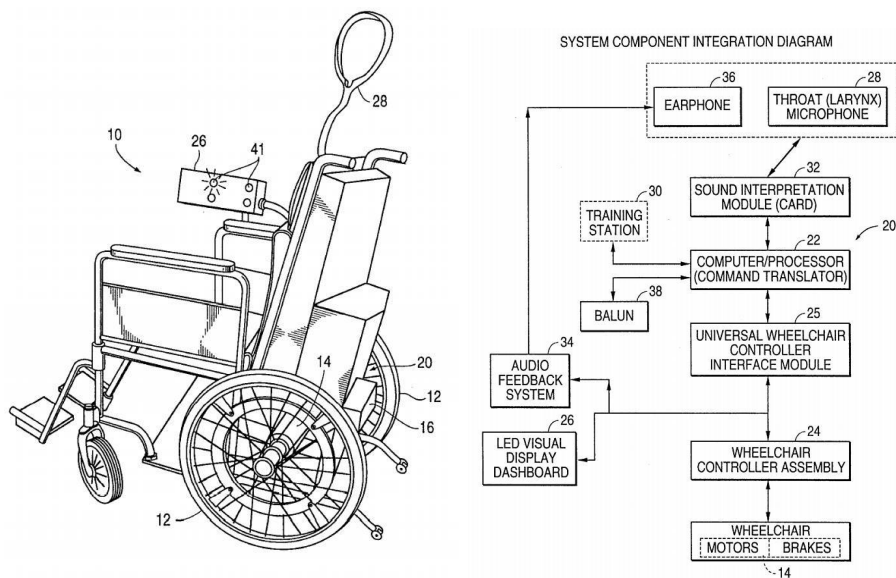


FIGURE 1.11 – FR à commande vocale

**Brevet N°6,866,288 B2 Mars. 15, 2005** : FR convertible avec un module de levage [60] (Figure 1.12).

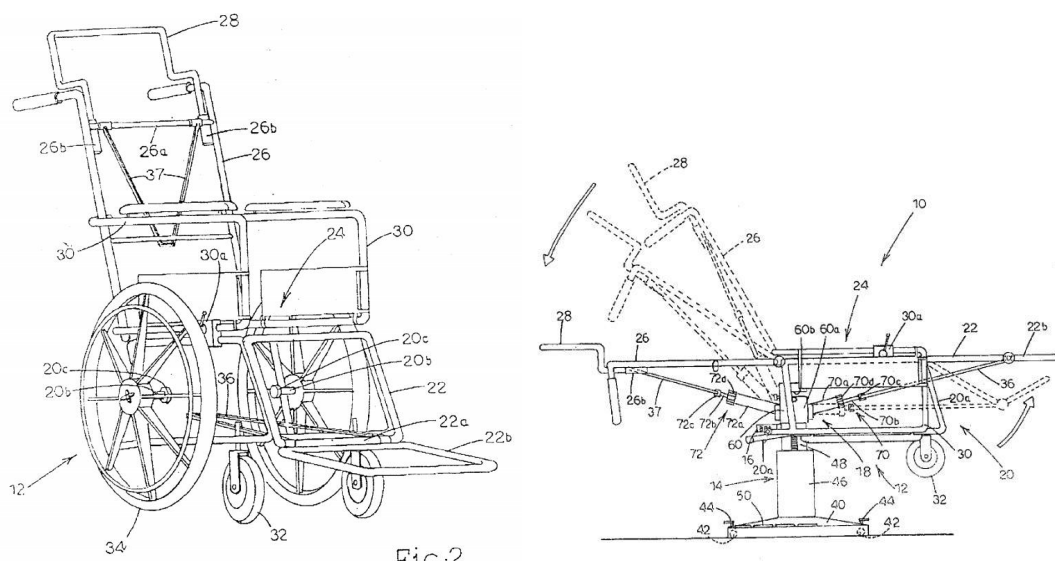


FIGURE 1.12 – FR convertible avec un module de levage

**Brevet N°7,503,567 B2 Mars. 17, 2009** : FR automatisé contient un ordinateur de commande programmé pour recevoir des données transmises par les

#### 1.4. Aperçu des différents types de FR

---

dispositifs de détection de contact [61] (Figure 1.13).

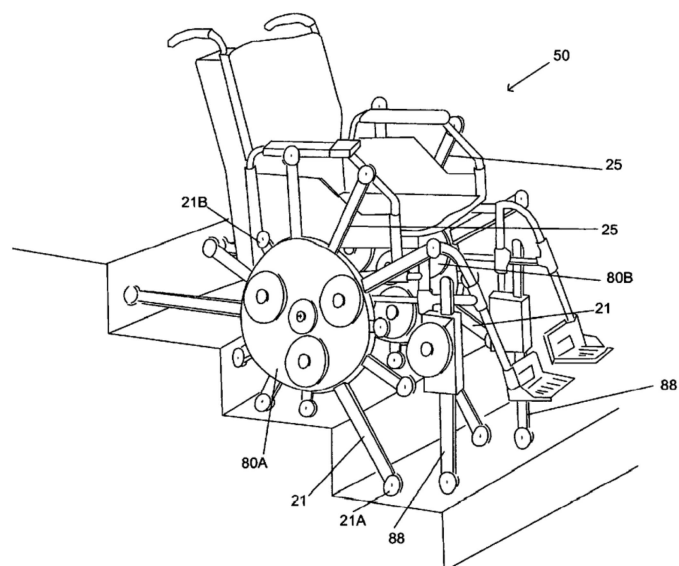


FIGURE 1.13 – FR automatisé avec ordinateur de bord

**Brevet N°12/443,693 Apr. 22, 2010** : FR pour escaliers et obstacles est constitué d'un ensemble d'alimentation, c'est-à-dire d'un moteur à combustion interne servant de chargeur de batterie. [62] (Figure 1.14).

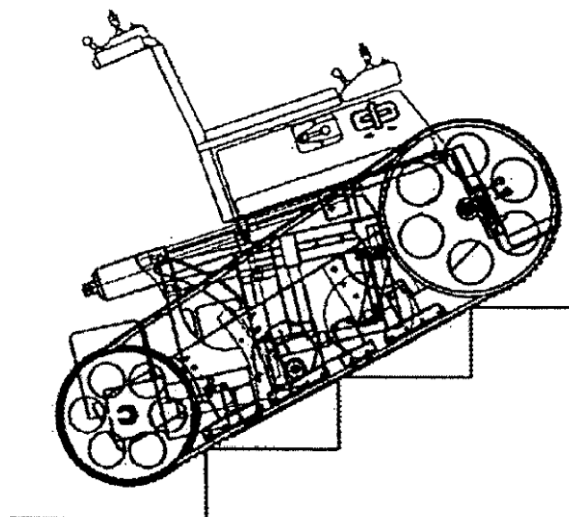


FIGURE 1.14 – FR pour escalier et obstacles



**Brevet N°10-2041882 Mai. 19, 2019** : FREI couplé à un moteur, dans lequel un module de commande électrique actionné par l'énergie est fixé dans le FRM (Inventé par KIM, KYUNG KEUN). (Figure 1.15)

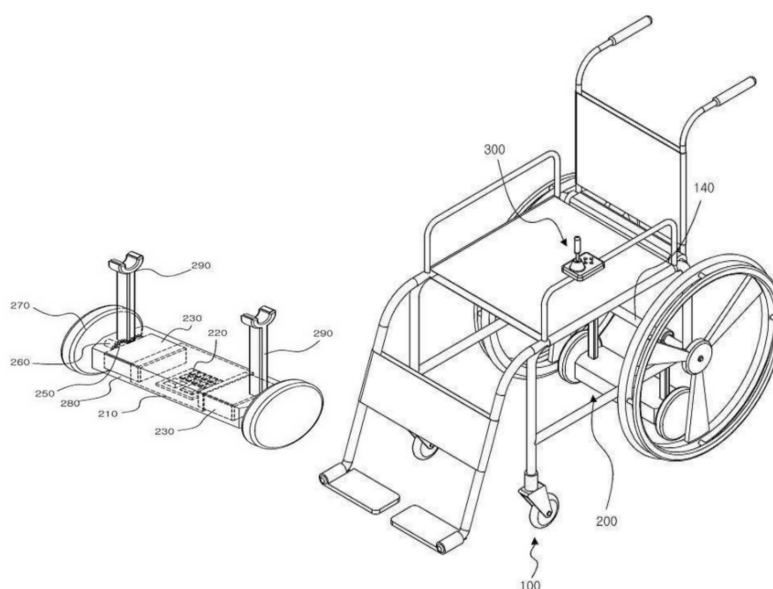


FIGURE 1.15 – FRE combiné intelligent

#### 1.4.4 Fauteuils Roulants Intelligents (FRI)

Les FRM et les FRE permettent aux utilisateurs de retrouver une certaine autonomie dans leurs déplacements au domicile comme à l'extérieur et d'améliorer leur qualité de vie [63]. Tandis que le FRM demande un effort physique plus important pour être manœuvré, le FRE quant à lui requiert des capacités cognitives et motrices qui ne sont pas à la portée d'une bonne partie des personnes handicapées. L'apparition des FRI est le résultat de travaux de recherches depuis le début des années 1980 et ont été développés sur des fauteuils modifiés dans les laboratoires de recherche et continuent aujourd'hui à être l'objet d'attentions des chercheurs [64]. Ces chercheurs ont utilisé des technologies issues de la robotique mobile afin de créer des « FRI » (en anglais : Smart Wheelchair). L'intelligence d'un fauteuil peut être définie comme la capacité de percevoir son environnement extérieur et d'en tirer des informations pertinentes dont l'objectif est de réaliser des mouvements autonomes ou semi-autonomes [65]. Actuellement, ils ne sont commercialisés que de

#### 1.4. Aperçu des différents types de FR

---

façon marginale à cause de la difficulté du transfert technologique vers l'industrie, et certainement du coût de telles réalisations.

Plusieurs chercheurs ont basé leurs travaux sur l'utilisation des technologies de pointe développées dans le domaine de la robotique mobile. Cela permet l'émergence d'une nouvelle génération de FR améliorant les compétences physiques, perceptuelles et cognitives nécessaires aux activités quotidiennes et offrant un nouveau style de vie [66].

Cette nouvelle génération de FR a plusieurs appellations résumées dans le tableau A.1. L'une des définitions courantes d'un FRI est la suivante : *un appareil de locomotion utilisé pour aider un utilisateur handicapé physique, lorsqu'un système de contrôle artificiel augmente ou remplace le contrôle utilisateur* [67] [68]. Son objectif principal est de réduire ou d'éliminer les activités difficiles pour l'utilisateur de conduire un FRE, et de fournir une assistance de navigation de différentes manières, comme l'évitement d'obstacles, passage de porte, accostage, suivi automatique de parcours et le transport de manière autonome entre différents emplacements.

Certains chercheurs ont toutefois proposé des solutions sous la forme d'un module qui peut être ajouté sur le FRE [69],[70], [71],[72], et d'importants autres travaux ont proposé des solutions de fauteuils intelligents élaborés sur une coopération ergonomique et efficace entre l'homme et un ensemble de fonctions embarquées, ainsi que des solutions hybrides, entre le tout manuel et le tout automatique qui peuvent prendre en compte la complexité des environnements naturels de déplacement et sont généralement issues du monde de la robotique mobile autonome. Ces techniques de navigation utilisent dans leur version la plus évoluée un modèle global et dynamique de l'environnement, et la perception de cet environnement est assurée par des capteurs de type sonores, infrarouges, laser ou encore vision camera [73] [74] [75] [76] [77] [78].

Une étude statistique menée dans 200 cliniques a montré l'intérêt des services qu'un FREI pourrait offrir [79] :

- De 9 à 10% de personnes qui reçoivent une formation pour l'utilisation de FRE sont incapables de les utiliser pour des raisons de sécurité.
- 40% des patients interrogés ont rencontré des difficultés plus spécifiquement sur les tâches de manœuvre et de conduite.

C'est la raison pour laquelle plusieurs groupes de recherche ont concentré leur effort

pour le développement de FRI.

#### 1.4.4.1 Présentation des FRI

Comme évoqué plus haut, plusieurs chercheurs ont employé des technologies développées dans un contexte de robotique mobile afin qu'elles soient transposées dans le monde des handicapés [65]. Peu de prototypes de modèles des FRI développés, ont fait la transition vers un produit commercial. La majorité des fauteuils développés ne sont pas destinés à être utilisés en dehors d'un laboratoire de recherche.

Malgré ces multiples recherches effectuées sur les FREI, très peu de prototypes sont commercialisés et donc accessibles à tous, et ce uniquement pour des fonctionnalités simples (détection d'obstacles, suivi de mur etc...). Plusieurs explications peuvent être données, on peut citer le manque de fiabilité des solutions proposées du fait notamment de l'imperfection des capteurs utilisés pour la perception de l'environnement, la difficulté d'appliquer une phase de conception/évaluation dans les prototypes des FRI et la raison majeure à la non-commercialisation des FRI est comment convaincre les industriels et les utilisateurs potentiels d'adopter ces nouvelles technologies.

Dans l'Annexe A, nous recensons les recherches portées sur les FRI selon les évolutions de la technologie décrites dans la littérature.

Notre objectif principal est à la recherche d'une conception qui peut être facilement adaptée à n'importe quel FR commercial, notamment dans la vision et l'intelligence par des composants (solution technique) moins cher et de réduire ou d'éliminer les tâches difficiles de l'utilisateur de conduire un FREI.

#### 1.4.4.2 Système de classification FRI

Différents schémas de classification des FR existe. Par conséquent, les FR robotiques intelligents peuvent être classés en fonction de leur domaine d'application (saisie d'objets, ouverture de portes, planification de chemin, etc.), des modalités et des algorithmes qu'ils peuvent prendre en charge (vision interaction homme-machine, interaction geste homme-machine, joysticks, etc.), les capteurs qu'ils utilisent (laser, sonar, etc.), et d'autres aspects de leur conception et de leur fonctionnement. Notre schéma de classification est présenté dans la figure 1.16

Ces dernières années, plusieurs prototypes de FRI ont été développés et de nombreux travaux scientifiques ont été publiés dans ce domaine [69] (Tableau 1.7).



## 1.4. Aperçu des différents types de FR

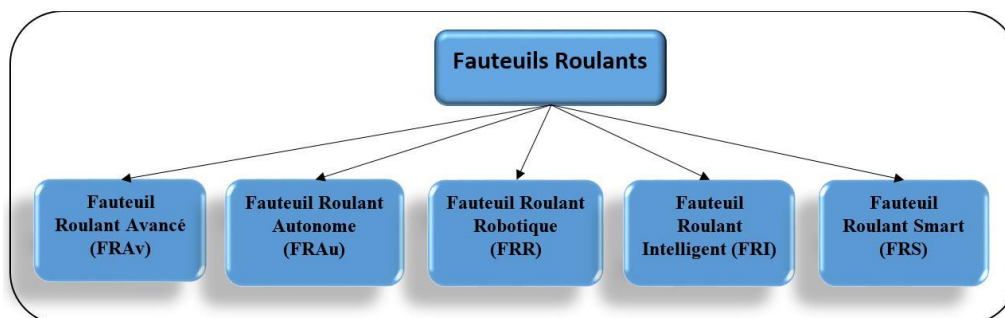


FIGURE 1.16 – Schéma de classification des FR

Tableau 1.7 – Nombre de publications classées par année et période (intervalle de dix ans).

Concept/Période de 10 ans	1980-1989	1990-1999	2000-2009	2010-2020
Fauteuil Roulant Avancé (FRAv)	14	39	107	224
Fauteuil Roulant Autonome (FRAu)	8	125	580	1040
FRI	3	121	1010	2980
Fauteuil Roulant Robotique (FRR)	5	91	1060	2810
Fauteuil Roulant Smart (FRS)	16	104	478	1690
Total	46	480	3235	8744

Nous avons utilisé uniquement le moteur de recherche Google Scholar pour citer l'évolution par intervalle de dix ans. Le nombre de travaux de recherche pour la dernière période (2010-2020) est supérieure à celle des 30 années précédentes, ce qui révèle l'intérêt croissant et exponentiel que suscite ce type de fauteuils (Figure 1.17).

- L'énorme croissance des références au cours de la période [1990-1999] montre l'intérêt croissant des chercheurs pour le domaine des FR Smart. En fait, différents prototypes ont été développés au cours de cette phase [80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96].
- La croissance est de près de 600% sur la période 2000-2009. Cette évolution peut être liée au développement de nouvelles stratégies dans le domaine de la robotique et de l'IA [97, 98, 99, 100, 69, 101, 2, 65, 102, 103, 104, 105].
- En effet, les résultats de la période 2010-2020 montrent le nombre croissant de scientifiques qui s'intéressent à ce domaine. Cela peut s'expliquer par l'intérêt croissant des politiques des pays développés pour l'amélioration de la

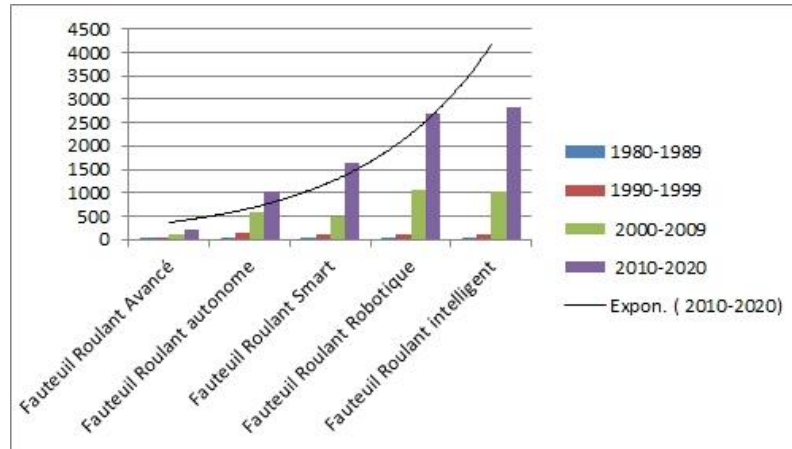


FIGURE 1.17 – Représentation graphique du nombre d'articles publiés

vie quotidienne des personnes handicapées et le développement de plusieurs prototypes de FRI. [106, 107, 108, 109, 110, 111, 112].

Plusieurs acronymes sont utilisés pour désigner cette nouvelle génération de FR. Le terme le plus utilisé sur toutes les périodes est "FRI", le second est "FRR" et le troisième est "FRS". Même si ces termes désignent le même appareil, ils peuvent présenter quelques petites différences. Par exemple, "FRI" ne peut pas être utilisé pour désigner un "FRAu" s'il ne contient que des fonctionnalités d'assistance, même le FRR sur lesquels sont montés des bras robotiques ne peut pas être classé comme un "FRS". De plus, chacune de ces catégories peut être séparée en autonome et non autonome. Il pourrait y avoir d'autres systèmes de classification, en raison de la richesse des publications de projets et de prototypes, et malgré le grand nombre de travaux de recherche visant à ajouter des fonctionnalités avancées aux FR, aucun FRI n'est disponible sur le marché à l'exception de ceux développés pour des besoins très spécifiques. Sur le marché algérien, il n'est pas possible d'obtenir des fonctionnalités avancées ou spécifiques qui peuvent qualifier le FRI. Cela peut s'expliquer par le fait qu'aucun fournisseur de technologie ne travaille en Algérie.

# 1.5 Rôle des nouvelles technologies dans le développement des FRI

Comme nous l'avons mentionné dans la section précédente, le développement des FRI est dû principalement à la disponibilité des technologies de perception, de contrôle ainsi que les progrès sur les technologies des actionneurs. Dans cette section, nous allons donner un aperçu sur les technologies utilisées dans les FRE et FRI en termes de perception, d'IA et de contrôle.

### 1.5.1 Technologies de perception

L'aspect le plus important dans le développement des FRI est la perception de son environnement et des intentions de son utilisateur. Le domaine d'acquisition de données regroupe plusieurs techniques : l'utilisation de capteurs proprioceptifs et extéroceptifs, mais aussi celle de bases de données embarquées et d'appareils de communication avec l'infrastructure et les autres robots à proximité. Un FR, proposant de telles capacités, requiert l'emploi de capteurs tels qu'un odomètre pour évaluer les mouvements du véhicule, des caméras, des capteurs à l'ultrasons ou infrarouges, ou encore les télémètres laser à balayage afin de percevoir l'environnement.

La perception représente l'aptitude du système à extraire, étudier et mettre en œuvre des données acquises par des capteurs pour permettre aux robots de prendre les décisions et agir en fonction de l'environnement qui les entoure.

Les FRI ont été conçus pour fournir une assistance de navigation à l'utilisateur de différentes façons. Par exemple, il peut assurer un déplacement sans collision et transporter de manière autonome l'utilisateur entre différents lieux.

On distingue en la matière, des capteurs proprioceptifs et des capteurs extéroceptifs. Les premiers fournissent des informations internes au fauteuil, comme l'évolution dynamique de ses organes (par exemple la vitesse des roues), qui permettent le lien entre le FR et l'environnement [113]. Les seconds fournissent des informations externes au fauteuil, par exemple la mesure de distance séparant le capteur d'un obstacle de l'environnement [113].

### 1.5.1.1 Les capteurs extéroceptifs

De nombreux types de capteurs extéroceptifs existent, ces capteurs sont principalement utilisés pour la localisation dans l'environnement, la détection des obstacles sur des prototypes de FRI et la lecture de la signalisation. Les capteurs de type contact, par exemple les Bumpers dans la figure 1.18 qui permettent de détecter les obstacles. Il existe deux familles de capteurs extéroceptifs embarqués : les capteurs télémétriques (US, IR, Les capteurs laser/ Lidar), et les systèmes de vision (caméra RGB, caméra de profondeur, caméra multi-spectrale, c.f. figure 1.19). Ils sont généralement le complément indispensable aux capteurs proprioceptifs. Ils servent à la perception de l'environnement, la vérification et l'amélioration de la trajectoire suivie par le FRI.



FIGURE 1.18 – Capteur de contact, type « Bumper ».



FIGURE 1.19 – Capteur d'images "caméras".

### 1.5.1.2 Les capteurs proprioceptifs

Les capteurs proprioceptifs permettent à un système de mesurer des valeurs de ses composants internes : vitesses, accélérations, forces, déformations, contacts, température, etc. Comme exemples de quelques capteurs proprioceptifs, nous pouvons citer :

## 1.5. Rôle des nouvelles technologies dans le développement des FRI

---

- **Capteurs odométriques** : Comme tout système odométrique, il est utilisé pour estimer la trajectoire du fauteuil lors de ses déplacements.
- **Capteur inertiel** : Capteur qui informe le véhicule sur son accélération linéaire (accéléromètre), ses positions, ses orientations et sa vitesse de rotation (gyroscope).
- **Codeurs optiques rotatifs** : Ces capteurs assurent le comptage du nombre de tours de chaque roue à intervalles de temps connus. Ils sont les plus utilisés sur les FRI, ce sont des codeurs optiques qui équipent généralement les arbres moteurs fournissant ainsi des informations sur la position et la vitesse angulaire des roues du fauteuil.

Pour plus de détails au sujet de perception et capteurs voir l'Annexe B.

### 1.5.2 Technologies d'intelligence embarquée

Le développement des moyens de calcul avec l'apparition d'ordinateurs pas chers et de petites tailles tels que les NUC (Next Unit of Computing) et les Raspberry a rendu possible d'installer des ordinateurs sur des appareils mobiles tels que les FR.

Cet organe d'intelligence embarquée représente la partie la plus importante pour le FRI. Il définit le niveau de performance d'un fauteuil et représente sa capacité à répondre aux besoins de la personne handicapée.

Ce module est responsable de la prise de décision de différents niveaux. Il reçoit les informations collectées par les capteurs et l'organe de commande représentant l'organe de perception, fusionne ces informations et les transforme en connaissance de situation. La situation peut se traduire par une reconnaissance du besoin plus la reconnaissance de l'environnement.

Sur cette base, le fauteuil peut prendre diverses décisions allant de l'évitement de l'obstacle à la définition de la destination. L'autre partie importante dans le développement de l'intelligence réside dans les algorithmes d'optimisation et d'intelligence artificielle de plus en plus performant et efficace. Des interlogiciels complets sont à la disposition des chercheurs et industriels pour gérer cette partie tels que *Robotic Operating Systems* (ROS).

Le développement de ce type de Fauteuils représente un vrai challenge pour les chercheurs. Plusieurs domaines de recherches sont développés sur toutes les étapes

de fonctionnements de ce module, notamment, sur le traitement de l'information (reconnaissance d'objet, détection d'obstacles, etc.), la fusion de données, l'optimisation de la décision et l'interaction avec l'opérateur humain. Dans cette section, nous allons présenter quelques aspects de développement de cet organe.

### 1.5.2.1 Vision artificielle dédiée à l'évitement d'obstacles

La vision est l'une des méthodes de détection les plus puissantes et les plus utilisées pour la navigation autonome. Par rapport à d'autres techniques de détection embarquées, les approches de navigation basées sur la vision continuent de demander beaucoup d'attention de la part des chercheurs sur les robots mobiles. Cela est en grande partie dû à sa capacité à fournir des informations détaillées sur l'environnement, qui peuvent ne pas être disponibles en utilisant des combinaisons d'autres types de capteurs.

La détection et l'évitement d'obstacles jouent un rôle important dans tout système, que ce soit en conduite automatique ou en assistance à la conduite. L'une des fonctionnalités essentielles dans une telle navigation est la disposition des moyens pour éviter les objets et les personnes présentes dans l'environnement. À cet effet, on dispose de plusieurs types de capteurs : caméras, capteurs laser, capteurs infrarouge et capteurs à ultrasons, etc.

Au cours de la dernière décennie, un certain nombre d'algorithmes de navigation ont été explorés par les FRI, et la plupart d'entre eux ont utilisé divers capteurs de distance pour la détection et l'évitement d'obstacles [114].

### 1.5.2.2 Algorithmes de l'évitement d'obstacles

L'objectif, de cet algorithme d'évitement d'obstacles, est de déplacer un FRI vers une zone sans collision grâce aux informations gérées par les capteurs lors de l'exécution du mouvement. Lorsqu'un FRI se trouve dans une zone totalement inconnue et ne dispose pas d'informations sur cette zone, les algorithmes échouent et ne produisent aucune solution. Pour ce genre de situation, la planification locale des mouvements est plus adaptée. L'amélioration de l'évitement d'obstacles consiste à trouver une direction pour le FRI en introduisant les informations du capteur, utilisées pour contrôler le mouvement en temps réel. L'évitement d'obstacles peut être effectué en local, en global ou avec les deux combinaisons.

## **1.5. Rôle des nouvelles technologies dans le développement des FRI**

---

Afin de réaliser une recherche approfondie sur les travaux de vision dédiée à l'évitement d'obstacles, cette tâche est ardue, puisqu'il ne s'agit pas d'un domaine de recherche clairement défini. Les environnements changent sans cesse compliquent la reconnaissance ou la mettent en situation d'échec. Les problématiques de la vision en robotique mobile se croisent entre plusieurs et différents domaines tel que, le traitement d'images, la reconnaissance d'objets, la planification de la trajectoire et la localisation.

À la pluralité de ces techniques répond la diversité des algorithmes de l'évitement d'obstacles. Ces algorithmes ont été proposés et appliqués au FRI, nous en détaillons quelques méthodes qui nous paraissent importantes pour caractériser les différents travaux dans ce domaine. Il s'agit d'approches de champs potentiels (PFA (Artificial Potential Field)), histogramme de champ vectoriel (VFH) ou approche de fenêtre dynamique (DWA) :

### **- Les techniques des champs potentiels (PFA)**

Les techniques des champs potentiels (PFA) ont été décrites pour la première fois par Khatib [115] et ont depuis été largement utilisées par plusieurs chercheurs pour diverses applications, telles que les robots mobiles [116],[117], les FRI [118], les véhicules sous-marins [119], les robots humanoïdes [120], les robots marcheurs [121], ... L'algorithme est très simple, mais fournit une planification de chemin en temps réel et efficace pour éviter la collision du robot avec des obstacles. Le principe de cette méthode est de construire un champ de potentiels sur l'environnement de navigation du robot. Un champ exerce une force d'attraction attire le robot vers sa configuration finale et l'autre force de répulsion repousse le robot des obstacles. En utilisant les champs de potentiel, il est possible de créer une carte des distances par rapport aux obstacles.

### **- Histogramme de champ vectoriel (VFH)**

Le deuxième algorithme d'évitement d'obstacle présenté, est l'histogramme de champ vectoriel (VFH), ou Grilles d'histogramme. Cette méthode a été proposée par Borenstein et Korem [122]. Elle représente l'environnement par une grille d'occupation centrée sur le robot où chaque cellule contient une valeur entière correspondant à la probabilité d'y trouver un obstacle. Un compteur est incrémenté pour chaque cellule appartenant au secteur angulaire dans lequel un obstacle a été détecté et les valeurs sont déplacées d'une cellule à l'autre en fonction des déplacements du robot.

### **- Méthode de la fenêtre dynamique**



L'approche de fenêtre dynamique (en anglais Dynamic Window - DW) présentée par Fox, Dieter et al [123] a été récemment utilisée pour le FR seul ou en combinaison avec un autre algorithme. Aussi elle convient parfaitement pour exploiter les robots à grande vitesse. Le concept de cette approche est d'obtenir une commande de vitesse optimale dans l'espace de vitesse en maximisant la fonction objective. Pour atteindre cet objectif, il existe deux étapes dans l'approche de la fenêtre dynamique : La première étape consiste à limiter l'espace de recherche. La commande de vitesse est obtenue à partir de l'espace de vitesse du robot. Il existe trois types d'espace de vitesse définis dans l'DWA et chaque vitesse dans l'espace de vitesse est un couple  $(v, \omega)$  de vitesse de translation et de rotation du robot. Le premier espace de vitesse est constitué de toutes les vitesses possibles que le robot peut atteindre. Chaque vitesse dans le deuxième espace de vitesse permet au robot de s'arrêter avant la collision sur un obstacle si nous choisissons cette vitesse. Le troisième espace de vitesse contient les vitesses qui peuvent être atteintes dans un cycle d'horloge, et on l'appelle aussi la Fenêtre dynamique. La méthode de la fenêtre dynamique permet de sélectionner le couple le plus pertinent.

### 1.5.3 Reconnaissance d'objets pour l'évitement d'obstacles

La détection, la reconnaissance, la localisation et le suivi d'objets sont des tâches très importantes en robotique et en vision par ordinateur. Ces procédés sont réalisés grâce à l'utilisation de différents moyens de mesure (caméra, LIDAR, RADAR, ...) et d'algorithmes (filtres, reconnaissance de formes, extraction de caractéristiques, classification, etc.)

La navigation d'un robot mobile est une tâche qui consiste, généralement, à trouver un mouvement libre dans l'espace de configuration (environnement intérieur ou extérieur) sans collisions avec les obstacles proches du robot, cette navigation est l'élément crucial de tout système robotique autonome ou semi-autonome.

- **Navigation autonome** : Le robot mobile est un agent physique réalisant des tâches dans son environnement (statique ou dynamique), qu'il doit percevoir à l'aide de capteurs et agir à l'aide d'un ensemble d'actionneurs [124]. L'objectif est de permettre, à partir de la perception de l'environnement, de rechercher une trajectoire dans un espace libre entre un point initial et un point final



## 1.5. Rôle des nouvelles technologies dans le développement des FRI

---

(point cible), puis de se déplacer sur cette trajectoire à l'aide d'une carte qui se trouve dans la mémoire du fauteuil afin d'avoir une localisation précise [125]. L'exemple de prototype du VAHM *Véhicule autonome pour Handicapés Moteurs* qui doit intégrer deux modes de localisations :

- Une localisation statique qui utilise uniquement les capteurs à ultrasons et une carte de l'environnement. Elle permet au FR de se localiser lorsqu'il démarre ou bien lorsqu'il a perdu toute information sur sa localisation actuelle.
  - Une localisation dynamique qui maintient une estimation correcte de la position du véhicule lorsqu'il se déplace.
- 
- **Navigation semi-autonome** : L'estimation des intentions de l'utilisateur est un point clé dans de nombreux systèmes de contrôles partagés ou systèmes semi-autonomes. La navigation à l'extérieur nécessite que les manoeuvres soient effectuées prudemment puisque il s'agit d'un environnement impliquant diverses situations inconnues. D'ailleurs cela oblige l'usager à opérer souvent en mode manuel ou semi-autonome du fait de l'impossibilité de prévoir toutes les situations probables, pour cela le robot doit ajuster ses actions à la volonté de l'utilisateur. Cette navigation intègre deux modes :
    - Mode de commande semi-automatique ou manuelle assistée : le fauteuil est piloté de façon classique par un capteur de commande tout ou rien ou proportionnel avec possibilité d'appel à des fonctionnalités de bas niveau telles que, par exemple, le contournement automatique d'obstacles ou le suivi de mur.
    - Mode de commande manuelle : il est similaire à une commande classique de FRE.

Plusieurs chercheurs ont employé des technologies développées à l'origine dans un contexte de robotique mobile afin qu'elles soient transposées dans le monde des handicapés [126]. La navigation autonome est une illustration exemplaire de l'intelligence des machines, elle reste à ce jour l'ambition d'un grand nombre de recherches en robotique mobile.

## 1.6 Synthèse de l'état de l'art et positionnement du problème

Le développement d'un **FREI** représente une technologie potentielle pour améliorer l'autonomie des personnes à mobilité réduite. Différents prototypes de **FRE** puis de **FREI** ont été développés au fil des années. Ils intègrent diverses technologies de la robotique. L'un des principaux objectifs de la conception d'un **FREI** est d'effectuer ou de faciliter des opérations trop complexes à exécuter pour des personnes handicapées. Ils se basent sur les technologies de perception pour collecter les informations suffisantes sur son environnement, l'état de la personne handicapée et son intention afin de prendre des décisions de déplacement ou de posture. Nous avons aussi vu que plusieurs tentatives de développement de module de motorisation de **FRM** ont vu le jour pour donner plus de flexibilité aux utilisateurs et réduire les coûts d'acquisition de fauteuil. À notre connaissance aucun module intelligent n'a été développé pour donner uniquement de l'intelligence à un **FRE** ou donner la motorisation et l'intelligence à un **FRM**. Pour résumer l'existant observé dans l'état de l'art et notre proposition, nous avons proposé un **FREI** modulaire composé de trois niveaux. En fait, un **FREI** modulaire est normalement constitué sur la base d'un **FRM** ou **FRE**, d'un moyen de calcul embarqué "ordinateur" pour la prise de décision et d'un module de perception composé de capteurs. En ce qui concerne les capteurs de navigation embarqués, la plupart des systèmes s'appuient sur des capteurs de distance standard, tels que les télémètres à ultrasons, les télémètres à infrarouges, la télémétrie laser ou la vision binoculaire pour la cartographie, la localisation et l'évitement des obstacles. Le choix de ces équipements est sujet à plusieurs contraintes respectant un compromis entre le besoin et le coût. Par exemple, les télémètres lasers offrent la meilleure précision en termes de mesures de distance et de représentation de l'environnement. Cette technologie a connu un développement important durant ces deux dernières décades à cause de son utilisation dans d'autres applications telles que la robotique mobile et l'automobile autonome, par contre son utilisation est soumise à des contraintes de coût importantes. En plus des capteurs, le traitement de l'information collectée de ce capteur qui est un nuage de points qui demande une puissance de calcul importante afin de les exploiter. Cela augmente le coût total du fauteuil. En se basant sur les modèles déjà présents sur le marché ou développés pour d'autres domaines tels que la robotique industrielle ou de service

## 1.6. Synthèse de l'état de l'art et positionnement du problème

ou l'automobile, nous pouvons proposer une architecture qui englobe l'ensemble des développements déjà existants et donne une classification de types de fauteuils. L'architecture modulaire proposée, est composée de trois niveaux et chaque niveau est composé d'un ou plusieurs modules. Nous avons représenté cette architecture sur la figure 1.20 où nous distinguons au centre les FRM qui sont commandés directement par la force manuelle par l'utilisateur. Ce dernier peut être motorisé en introduisant une motorisation en ajoutant un module de motorisation qui se place dans la couche de FRE.

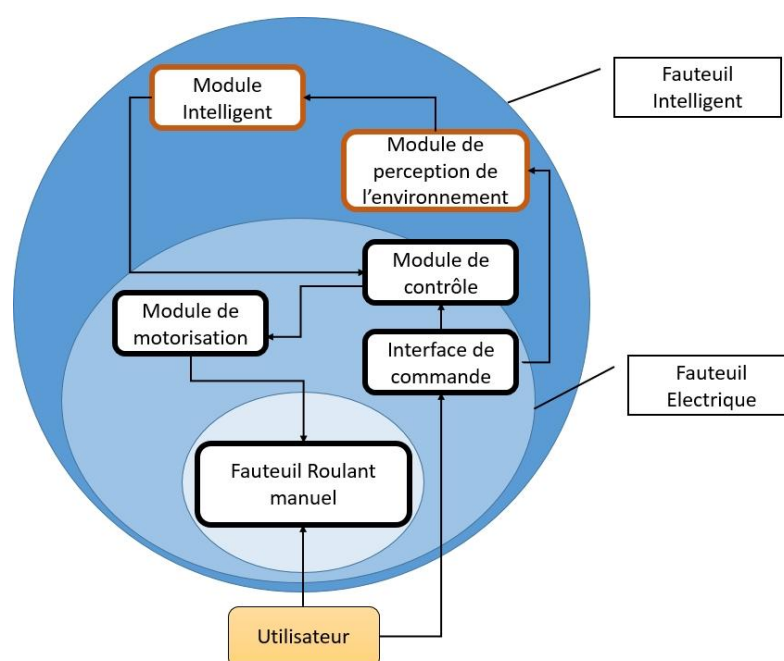


FIGURE 1.20 – Architecture Modulaire pour les typologies de FR

Dans cette couche on trouve aussi l'interface de commande qui peut être concrétisée par une manette ou n'importe quelle interface permettant de transmettre les ordres de l'utilisateur en termes de direction et de vitesse. Le lien entre l'interface de commande et le module de motorisation passe par le module de contrôle qui joue un rôle d'adaptation de la commande afin d'augmenter le confort de la conduite. Ce module joue un rôle plus important lors de l'introduction de l'intelligence. La couche la plus haute dans l'architecture proposée est la couche d'intelligence. Elle contient deux modules importants qui sont le module de perception et le module intelligent. En effet, n'importe quelle fonction intelligente a besoin d'observer l'environnement afin de définir la situation puis elle prend des décisions. Le module de perception

collecte des données à travers différents types de capteurs qui collectent des informations sur les obstacles présents, les intentions et les commandes de l'opérateur. Le module intelligent est composé du moyen de décision permettant de prendre des décisions autonomes ou semi-autonomes pour la conduite du fauteuil. Ces modes sont implémentés grâce au module de contrôle présent entre la couche de **FRE** et le **FRI**. Cette architecture a été conçue de manière à accepter l'intégration de ces différents types d'organes matériel et logiciel. Par ailleurs, les progrès récents en termes de miniaturisation et de coût rendent certains types de capteurs plus adaptés à ce type d'architecture.

La différence entre les développements existants et la proposition de cette thèse est l'introduction de l'intelligence comme un module indépendant qu'on peut rajouter à un **FRE** ou **FRM**. Cela permettra à des populations défavorables de profiter de la technologie et de l'intelligence abondante sur le marché et à prix abordable.

## 1.7 Conclusion

Le progrès des technologies récentes a donné naissance à des solutions intéressantes pour les **FR**. Ce tour d'horizon sur les handicapés d'une manière générale et les handicapés moteurs dans le monde et en Algérie a permis de parcourir ce secteur industriel très important et humainement indispensable et par conséquent de parcourir les différentes évolutions qu'a connu le **FR** en l'espace de quelques décennies. Ce chapitre nous a permis d'avoir une idée sur l'utilisation des **FR** et la grande variété commercialisée et non commercialisée. Nous avons détaillé également quelques caractéristiques techniques de quelques catégories de **FR**. En particulier, nous avons vu les différentes approches d'évitements d'obstacles par les capteurs ou par la vision artificielle et hybride pour les **FRI**. Nous avons aussi répertorié quelques brevets sur l'intégration des dispositifs dans les **FRM**. Les **FR** recensés reposent sur des exigences et des cahiers de charges adaptés au comportement et environnement précis (pays développés). Dans notre cas, et vu la différence de culture, d'environnement et de comportement, nous allons étudier les modèles de comportement et collecter les exigences du contexte Algérien. Le chapitre suivant présente le comportement des utilisateurs de **FR** et propose un modèle générique. Ce modèle est ensuite, adapté au contexte Algérien sur la base d'une analyse des exigences. Ceci va

## 1.7. Conclusion

---

orienter le choix entre garder une solution existante (un des modèles de FRI identifié dans la littérature) et essayer de réduire ses coûts ou bien re-concevoir un fauteuil qui répond au contexte Algérien.



# Comportement et enquête par questionnaire

---

## Sommaire

---

<b>2.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>49</b>
<b>2.2</b>	<b>Situation des personnes handicapées moteur en Algérie</b>	<b>49</b>
2.2.1	Associations de personnes handicapées	50
2.2.2	Rôle des associations de personnes handicapées en Algérie	51
<b>2.3</b>	<b>Méthodologie, population de l'enquête</b>	<b>52</b>
<b>2.4</b>	<b>Modélisation du comportement</b>	<b>52</b>
<b>2.5</b>	<b>Élaboration du questionnaire</b>	<b>55</b>
<b>2.6</b>	<b>Déploiement du questionnaire</b>	<b>56</b>
<b>2.7</b>	<b>Collecte de données pour le modèle</b>	<b>58</b>
2.7.1	Conception du questionnaire	58
<b>2.8</b>	<b>Analyse et résultats</b>	<b>61</b>
2.8.1	Analyse de corrélation	64
2.8.2	Modèle de comportement proposé	66
<b>2.9</b>	<b>Conclusion</b>	<b>68</b>

---

## Résumé



ans le monde d'aujourd'hui, de nombreux types de FR sont disponibles sur le marché. Les différents modèles ont des fonctions et des formes variées. Nous pouvons citer FRM, FRE et FRI. Un FR peut être utilisé pour se déplacer d'un endroit à un autre. Il est conçu pour les personnes handicapées afin de leur permettre de se déplacer facilement et de manière indépendante. Toutefois, le fait d'avoir un FR ne signifie pas automatiquement qu'il répond aux besoins de l'individu. Il existe diverses raisons pour lesquelles il y a un écart entre les besoins satisfaits et non satisfaits. C'est dans cet aspect que nous sommes en motivation d'aborder les besoins à satisfaire les utilisateurs des FR en déployant une enquête par questionnaire. Ce chapitre vise à développer un modèle de comportement des personnes handicapées en Algérie à travers (1) le développement d'un modèle théorique basé sur la revue de la littérature et (2) l'amélioration de ce modèle en utilisant les données locales collectées à partir de notre questionnaire développé. Cette étude induit l'idée de transformer les FRM en FR motorisés ayant la possibilité d'intégrer le module intelligent. Ceci présente le cœur de la problématique de cette étude.



## 2.1. Introduction

---

## 2.1 Introduction

Ces dernières années, la disponibilité des FRM, FRE et les fonctionnalités associées ont considérablement progressé. Le comportement de l'utilisateur, qui peut non seulement améliorer la mobilité de l'utilisateur de FR, mais aussi améliorer l'espace de l'environnement et le rendre plus accessible aux utilisateurs de FR. L'assistance aux personnes dans leur tâche de conduite est essentielle pour le confort et la sécurité des conducteurs.

Comme les FRE et les voitures ont de nombreuses caractéristiques communes, le concept de modèles de conducteur pour les voitures pourrait être adapté au fonctionnement des FRE comme proposé dans [127]. Cependant, un modèle de conducteur pour FRE est différent des modèles de conducteur pour voiture, puisque les FRE et les voitures ont également des caractéristiques différentes. De plus, l'espace de travail pour les deux systèmes est complètement différent. Il en résulte que le modèle de comportement du conducteur pour les deux systèmes doit être différent. La modélisation du comportement du conducteur du véhicule est d'un intérêt majeur pour fournir un contrôle assisté. De nombreuses équipes de recherche se sont penchées sur cette question. Cela est encore plus important dans le cas des personnes handicapées motrices. Cependant, les travaux dans ce domaine sont très rares. La diversité des situations de handicap rend le contrôle assisté du fauteuil essentiel et nécessite une modélisation plus précise. Malgré leurs difficultés, les commandes de FR ne sont pas adaptées aux besoins individuels des personnes handicapées. Ce chapitre présente une étude basée sur le comportement quotidien et les exigences des personnes handicapées motrice en Algérie. Nous identifions les besoins réels de cette population à travers le déploiement d'un questionnaire de collecte de données afin d'obtenir un modèle spécifique pour le développement d'un FR adapté au contexte algérien.

## 2.2 Situation des personnes handicapées moteur en Algérie

L'Algérie compte environ 2 millions de personnes handicapées, selon l'Office National des Statistiques ONS 2013. Ce nombre illustre parfaitement la proportion importante que ce groupe représente dans la société et, en plus de la volonté, l'in-

térêt ainsi que l'importance et la diversité des actions nécessaires à leur gestion efficace, conformément aux normes internationales et aux engagements des autorités. La vie des personnes handicapées en Algérie est le reflet de la société algérienne. Le sort des personnes handicapées dépend largement de celui de la société dans son ensemble. Les villes algériennes, en particulier les grandes villes, restent hostiles aux utilisateurs de FR. De nombreux utilisateurs de FR vivent et travaillent dans des endroits où il est difficile pour eux de se déplacer, par exemple dans des zones où le sol est rugueux, boueux, ou bien où il y a des marches, des trottoirs ou de petits espaces exigus. L'environnement doit être adapté aux besoins spécifiques des personnes handicapées, en leur donnant la possibilité d'accéder à différents services (marchés, transports publics, institutions publiques) et en facilitant leur déplacement d'un espace à l'autre. Dans le cas des bâtiments publics, la majorité absolue de ces bâtiments sont dépourvus d'ascenseurs et sont inaccessibles ou difficiles d'accès, les infrastructures spécialisées sont gravement insuffisantes, transport inapproprié, etc.

En outre, la partie la plus importante de la maison n'est pas adaptée aux personnes handicapées (c'est-à-dire les portes "la chaise ne peut pas franchir les portes", les couloirs, l'emplacement des interrupteurs, etc.). La petite subvention du gouvernement ne permet pas aux personnes handicapées d'obtenir une assistance permanente si la famille n'est pas disponible. Cependant, la population algérienne se caractérise par sa dynamique et sa solidarité, où il est très facile de trouver différents types d'aide. Sur la base de l'observation de la situation des personnes handicapées en Algérie, il est possible de conclure que le comportement des personnes handicapées dépend de plusieurs paramètres qui le rendent complexe et dynamique. L'accessibilité est le problème le plus important des personnes handicapées à l'intérieur ou à l'extérieur de leur maison. En outre, il n'est pas facile de trouver des statistiques ou des études intéressées par la modélisation des personnes handicapées en Algérie.

### 2.2.1 Associations de personnes handicapées

Au cours des dix dernières années, les personnes handicapées se sont regroupées en organisations dans plus de 100 pays pour influencer les décideurs des gouvernements de tous les secteurs et défendre leurs propres droits. Ces organisations sont connues sous le nom d'associations de personnes handicapées.

Les associations de personnes handicapées sont apparues en réponse aux obstacles de la société qui ont empêché la possibilité d'une participation équitable des

## **2.2. Situation des personnes handicapées moteur en Algérie**

---

personnes handicapées, et en réaction au contrôle des personnes handicapées par les autres personnes.

Pendant longtemps, les professionnels de la santé, les familles et d'autres personnes ont été les porte-parole des personnes handicapées. L'apparition de ces associations a beaucoup donné l'espoir aux handicapés dans tous les secteurs. Les associations sont les meilleurs porte-parole et leurs meilleurs représentants, car elles connaissent bien leurs besoins et leurs préoccupations.

En fin de compte, les personnes handicapées ont commencé à former leurs propres associations pour se défendre dans la dignité sous l'impulsion de ces associations qui revendiquent le droit aux handicapés moteurs d'être autonomes et de pouvoir mener pleinement une vie sociale, sans exclusion.

### **2.2.2 Rôle des associations de personnes handicapées en Algérie**

Le rôle des associations est de répondre aux besoins et attentes des personnes handicapées en matière d'information, de communication, d'accessibilité, d'autonomie et d'intégration sociale. Elles ont connu un essor considérable depuis plusieurs années.

En Algérie, tout le monde est conscient de la situation dramatique dans laquelle vivent ces personnes. Pour preuve, des milliers de demandes annuelles de FR ne sont jamais satisfaites. Face à cette situation et en l'absence quasi totale d'un système de protection sociale prenant en compte toutes les situations, plusieurs associations de personnes handicapées ont été créées.

Grâce à leurs connaissances exceptionnelles fondées sur l'expérience, les associations jouent un rôle important dans l'organisation de diverses activités et la fourniture de services nécessaires aux personnes handicapées. De plus, elles doivent bien cerner leur domaine d'intervention. Cette connaissance ne peut se faire qu'à travers des rencontres, des communications, des écoutes continues. Un lien qui ne doit jamais être interrompu, mais renouvelé, consolidé à travers des actions impliquant les handicapés eux-mêmes.

En Algérie, les associations de personnes handicapées ont apporté des contributions importantes à la planification des programmes et services en faveur des personnes handicapées. Les services les plus importants que ces associations peuvent fournir aux personnes handicapées sont : procédures administratives, notamment au-

près des organismes de santé, demandes d'acquisition de matériel, demandes d'emploi, demandes de ressources, demandes de logement, etc, et surtout humanitaire (distribution de dons).

## 2.3 Méthodologie, population de l'enquête

De nombreux problèmes affectent la population algérienne qui a plusieurs caractéristiques spécifiées. Nous identifions les besoins réels de cette population à travers une enquête menée dans plusieurs villes algériennes en mettant en évidence les vrais problèmes que subissent les personnes handicapées moteurs. Des enquêtes par questionnaire auprès des utilisateurs de FR ont permis de recueillir des données sur le besoin des utilisateurs, les fonctions exigées des FR, les environnements dans lesquels ils sont utilisés et certaines caractéristiques des utilisateurs.

Cette enquête a de multiples objectifs. Elle vise essentiellement à évaluer l'état actuel des services de FR dans plusieurs régions d'Algérie en examinant les problèmes réels.

## 2.4 Modélisation du comportement

Plusieurs études s'intéressent à la modélisation du comportement humain dans différents contextes tels que l'analyse du comportement humain (HBA : Human Behavior Analysis) et la compréhension du comportement humain (HBU : Human Behavior Understanding). Ces recherches se concentrent sur certains domaines d'application tels que la vidéosurveillance [128] et l'assistance à l'autonomie à domicile (AAD) basée sur l'exploitation des technologies de l'information et de la communication dans les soins de santé personnels.

La reconnaissance des activités de la vie quotidienne évolue avec de nouveaux systèmes tels que les capteurs des téléphones intelligents [129], ou les capteurs RFID (Radio Frequency Identification) et de la vision [130].

La littérature présente plusieurs tentatives de modélisation du comportement humain en essayant de prendre en compte les aspects psychologiques et cognitifs. Le comportement humain est toujours étudié selon un point de vue donné, par exemple :

- La compétence [131], la performance [132], la capacité cognitive [133], les facteurs psychologiques ou psychosociaux [134].

## 2.4. Modélisation du comportement

---

La modélisation du comportement dépend également du contexte dans lequel l'individu évolue comme l'opérateur dans un système de production [135], le patient dans un système hospitalier [136], le client dans la conception du produit [137], etc. Dans le cas des personnes handicapées, le modèle de comportement doit également prendre en compte des points de vue spécifiques en fonction du contexte. L'approche la plus appropriée pour notre étude de cas est de définir les activités humaines comme la combinaison d'actions et d'objets [130]. Alors que les actions sont reconnues par un ensemble de verbes, des objets ou les lieux sont reconnus par un ensemble de noms qui sont les cibles des actions.

Les auteurs dans [138] se sont intéressés aux activités quotidiennes, où chaque personne aura un comportement spécifique en fonction de ses besoins, mais aussi de ses caractéristiques socio-démographiques (âge, sexe, CSP, etc.). L'approche propose deux types de mouvements :

- Un simple déplacement, où l'individu se déplace pour une seule raison (activité aller-retour au domicile) ;
- Un déplacement (destinations multiples), où l'individu se déplace vers une destination principale (activité où l'individu passe le plus de temps) et visite d'autres points d'intérêt autour de la principale.

Plusieurs autres travaux tels que [139] et [140] s'intéressent à la modélisation du comportement de déplacement des populations.

Sur la base de cette vision générique, nous avons proposé un premier modèle qui prend en compte les contraintes rencontrées par les personnes handicapées. Le modèle donne une vue de la personne qui se déplace pour deux activités, à la maison et à l'extérieur. Le déplacement de la personne handicapée est assuré par un dispositif donné qui définit la méthode de la classe "Déplacement". Étant donné que la majorité des personnes handicapées sont des utilisateurs de FR, nous supposons que la méthode de déplacement est basée sur un dispositif de FR.

Comme le montre la figure 2.1, l'activité principale peut être le travail et l'activité secondaire peut être l'achat, par exemple. Pour les activités, la personne se déplacera selon une certaine trajectoire modélisée par la classe "Way". La classe "contrainte" représente les obstacles auxquels la personne devra faire face. Ces obstacles sont de deux natures, mobiles comme d'autres personnes et immobiles, comme les escaliers, les trottoirs, etc.

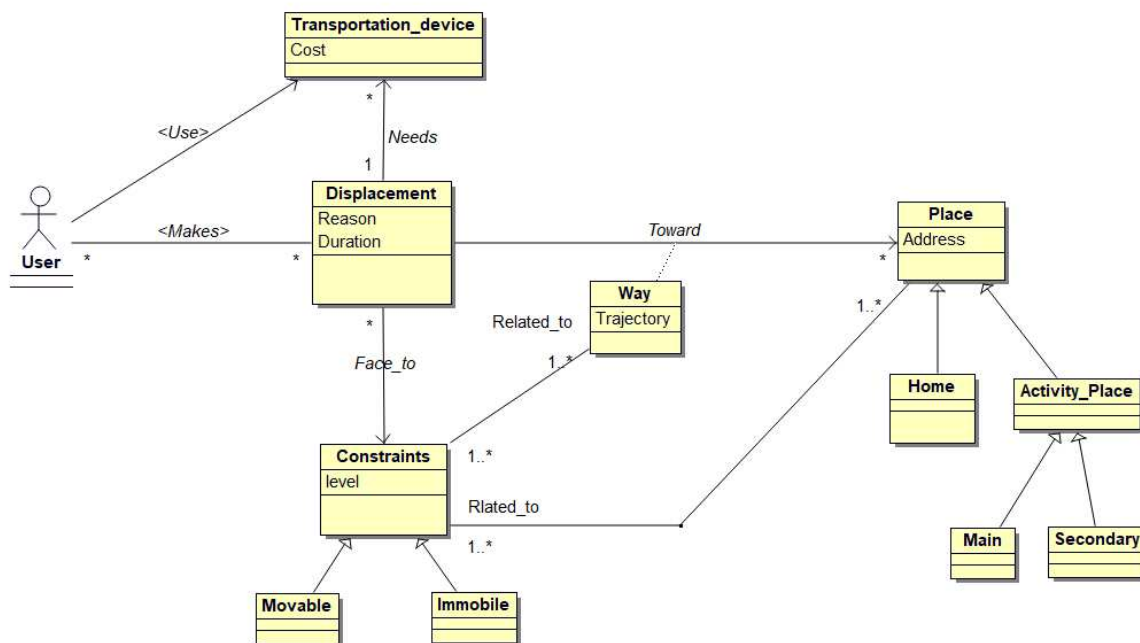


FIGURE 2.1 – Modèle de comportement générique.

Pour compléter le modèle de comportement des personnes handicapées et l'adapter au contexte algérien, il faut comprendre les nouveaux défis de la mobilité quotidienne. Pour cela, nous devons commencer par analyser les trajets quotidiens. Sur la base de l'analyse comparative des modèles de comportement similaires identifiés dans la littérature, nous identifions les facteurs suivants : Personnalité, émotion, capacité cognitive, environnement social et culturel. Il n'est pas évident de compléter tout le champ de ce modèle en raison de l'indisponibilité des données. Afin de surmonter ce problème, nous avons élaboré un questionnaire basé sur les facteurs précédents et le modèle de comportement proposé présenté dans la figure 2.1.

Dans le présent travail, nous avons mené une recherche dans ce domaine très particulier et inexploré et sur la base du questionnaire et des résultats exploités, nous avons obtenu ces faits :

La première étape a consisté en une enquête auprès des utilisateurs de FR. Notre

## 2.5. Élaboration du questionnaire

---

approche prend en compte l'opinion de l'utilisateur et celle de l'assistant, sur le développement d'un module supplémentaire aux **FR** existants, que nous appellerons module intelligent. Il peut améliorer la mobilité des personnes handicapées et leur permettre de se déplacer facilement vers les emplacements souhaités dans des environnements intérieurs ou extérieurs.

En raison du coût d'acquisition élevé des **FRE** commercialisés et des prix des quelques options de renseignement souvent personnalisées, les utilisateurs algériens ne sont toujours pas en mesure de les acquérir, compte tenu du niveau de vie, du besoin du marché et de l'environnement. L'idée de transformer des **FRM** en **FR** motorisés avec la possibilité d'intégrer des fonctionnalités intelligentes grâce au développement et à l'intégration d'un module intelligent à moindre coût devient intéressante, voire même indispensable. Notre ambition est d'offrir un module personnalisable aux besoins locaux.

## 2.5 Élaboration du questionnaire

L'élaboration d'un questionnaire implique de nombreuses décisions concernant la formulation et l'ordre des questions, la sélection et la formulation des catégories de réponses et le mode d'administration du questionnaire, ainsi que l'introduction et l'explication de l'enquête. Bien que la conception d'un questionnaire reste un art, les connaissances disponibles pour éclairer ces décisions sont de plus en plus nombreuses.

Pendant de nombreuses années, les enquêteurs ont abordé la conception d'un questionnaire comme un art, mais des recherches substantielles au cours des trente dernières années ont démontré qu'il y a beaucoup de science impliquée dans l'élaboration d'un bon questionnaire d'enquête. Il constitue l'une des trois grandes méthodes pour étudier des faits psychosociologiques. C'est une méthode de recueil d'informations en vue de comprendre et d'expliquer des faits. Les deux autres méthodes les plus couramment utilisées étant l'entretien et l'observation. Si l'entretien et l'observation sont des méthodes individuelles et collectives, le questionnaire est une méthode uniquement collective. C'est une méthode quantitative qui s'applique à un ensemble (échantillon) qui doit permettre des inférences statistiques [141]. Sur le plan humain, le questionnaire demeure un outil d'investigation, très pratique, car il offre une discrétion totale en raison de l'anonymat.



De ce point de vue, le questionnaire se compose de questions standardisées qui rendent opérationnels les concepts de mesure. L'objectif est de présenter un stimulus uniforme aux répondants afin que leurs réponses soient comparables. Bien que les répondants semblent souvent ne pas prêter beaucoup d'attention aux questions ou les directives de l'enquête, ils sont souvent très sensibles aux changements subtils de mots et de syntaxe. Les questionnaires sont des outils de recueil d'information souvent irremplaçables en recherche. Il s'agit donc d'une démarche méthodique qui doit satisfaire à certaines exigences de rigueur.

Le questionnaire élaboré dans le cadre de ce projet, porte sur plusieurs dimensions telles que : comportement, exigences, contraintes, assistance, coût, nouvelle technologie, maintenabilité, ergonomie, convivialité du **FR**, etc. Il fournit à la fois des informations quantitatives et qualitatives.

## 2.6 Déploiement du questionnaire

L'enquête par questionnaire a pour objectif de collecter des informations claires et précises spécifiques à chaque personne handicapée moteur. Les questions doivent être bien présentées pour rendre le questionnaire attrayant.

- Pour comprendre ce flux d'informations très distinctes, le questionnaire contient différents types de questions. La catégorie relative aux questions fermées consiste à proposer un ensemble de choix de réponses défini précédemment. La deuxième catégorie dédiée aux questions ouvertes vise à permettre à la personne concernée de répondre librement à la question.
- Afin de trouver la bonne approche, nous nous intéressons à la technologie permettant la diffusion de questionnaires sur Internet, car l'accès à tous ces services semble plus facile. Comme la plupart des personnes ont des connexions internet lente, ne connaissent pas bien ou mal l'utilisation d'ordinateurs, nous fournissons une version papier du questionnaire. Cela augmente la possibilité d'avoir un contact direct avec les personnes handicapées, ce qui réduit les réponses ambiguës et clarifie les problèmes qui ne sont pas clairs bien que le déploiement dans ce cadre prend plus de temps.



## 2.6. Déploiement du questionnaire

---

- La première version du questionnaire a été testée sur un petit échantillon de personnes dans le but de l'améliorer.
- Les résultats de cette phase de test ont permis de fournir une deuxième et dernière version améliorée du questionnaire, qui conserve les mêmes objectifs du modèle, tels que : l'expression des questions et les choix pour n'obtenir qu'une seule interprétation de chaque question, l'ordre des questions et la présentation des deux langues sont sur la même page.
- Au cours de cette phase de test, nous remarquons que plusieurs questions peuvent être posées par certaines personnes de l'environnement proche de la personne handicapée, nous décidons de développer une version allégée pour l'assistant ou la famille de la personne handicapée.
- L'évaluation du questionnaire envoyé aux utilisateurs de [FR](#) a été basée sur des questions générales, techniques, personnelles et de motivation visant à faciliter les besoins des utilisateurs et des assistants des utilisateurs du [FR](#).
- L'un des problèmes les plus importants est la compréhension de la question liée à la langue utilisée (français). Afin de surmonter ce problème, nous réalisons le questionnaire dans les deux langues les plus utilisées en Algérie (l'arabe et le français).
- Afin d'augmenter le nombre de réponses au questionnaire, nous avons contacté plusieurs associations pour participer et aider à la diffusion du questionnaire, pour recueillir leur retour d'expérience avec des personnes handicapées.
- Le contact avec les personnes handicapées n'est pas une tâche facile, ce qui étend le déploiement du questionnaire à plusieurs mois. Malgré le nombre important envoyés aux associations dans les différentes régions d'Algérie, la partie la plus importante sur la réponse a été fournie par la région de Batna.
- Une fois les objectifs de l'enquête définis, les besoins d'informations identifiés, le contenu bien défini et le formatage établi, nous en sommes venus à collecter 24 questions de 4 pages pour les utilisateurs et 12 questions de 3 pages pour les assistants (Annexe C).

## 2.7 Collecte de données pour le modèle

Sur la base du modèle développé, nous devons définir les caractéristiques des personnes handicapées en Algérie afin de vérifier si les dispositifs de déplacement nécessaires sont disponibles sur le marché et donner des recommandations pour les concevoir s'ils ne le sont pas déjà. La meilleure façon de répondre à ces questions dans notre domaine d'étude est le développement et l'envoi d'un questionnaire directement à la personne concernée. De cette façon, un questionnaire est construit non seulement pour compléter les besoins du modèle, mais aussi pour obtenir plus de connaissances sur la situation des personnes handicapées en Algérie. Le développement du questionnaire est basé sur une approche de conception centrée sur le client afin de satisfaire ses besoins et ses exigences, et d'assurer sa sécurité, sa santé et son confort [142].

### 2.7.1 Conception du questionnaire

Le questionnaire est divisé en plusieurs sections selon le profil de l'utilisateur, la personne interrogée, sa maladie, ses attentes et son intérêt pour une fonction intelligente du dispositif de déplacement du FR (Tableau 2.1). Une version adaptée du questionnaire est également développée pour obtenir les informations nécessaires de l'environnement. Les questions multiples concernent plusieurs sections ou classes du modèle comme la question (Q4) sur la situation professionnelle, qui définit l'activité et le profil de la classe. Il en va de même pour la question (Q12) sur le lieu d'utilisation du FR, qui concerne l'activité et le déplacement de la classe du modèle proposé. Dans les paragraphes suivants, nous détaillons la répartition des questions par classe :

#### 2.7.1.1 Profil de l'utilisateur

Une classe importante dans notre modèle est celle des caractéristiques de l'utilisateur. Un ensemble de questions sont abordées pour connaître tous les attributs de cette classe tels que le sexe(Q1), l'âge(Q2), la situation professionnelle (Q4), etc. D'autres questions concernant le handicap sont ajoutées telles que l'origine et la durée de la maladie (Q6) et (Q8), sa cause et son type (Q5). Les noms des personnes n'ont pas été collectés pour garder l'anonymat des résultats et pour les encourager à répondre au questionnaire.

## 2.7. Collecte de données pour le modèle

Tableau 2.1 – Questions et leur relation avec les classes du modèle de comportement.

N°	Questions	Profil	Activités	Contraintes	Déplacements	Fonctionnalités
Q1	Genre	✓				
Q2	Âge	✓				
Q3	Type de FR				✓	
Q4	Statut professionnel	✓	✓			
Q5	Type de maladie	✓				
Q6	Origine de la maladie	✓				
Q7	La maladie vous a-t-elle empêché de poursuivre vos études	✓	✓			
Q8	Depuis combien de temps êtes-vous dans cette situation ?	✓		✓		
Q9	Assurance de la sécurité sociale			✓		
Q10	Aide au déplacement			✓	✓	
Q11	Année d'utilisation du FR	✓			✓	
Q12	Environnement du déplacement		✓		✓	
Q13	Accès au domicile		✓		✓	
Q14	Autonomie d'utilisation	✓			✓	
Q15	Sécurité dans le déplacement			✓	✓	
Q16	Assistance pendant la conduite du fauteuil roulant			✓		
Q17	Nouveau dispositif pour se déplacer				✓	✓
Q18	Nouveau dispositif pour l'évitement des obstacles				✓	✓
Q19	Nouveau dispositif pour éviter les obstacles sans les percevoir				✓	✓
Q20	Nouveau dispositif d'évitement des obstacles sans intervention				✓	✓
Q21	Amélioration du FR				✓	✓
Q22	Intéressé(e) par un FR avec conduite intelligente				✓	✓
Q23	Suggestions			✓		✓
Q24	Coût			✓		

### 2.7.1.2 Activités

Cette catégorie de questions vise à connaître la raison du déplacement de la personne handicapée. Certaines questions sont directes, comme "Avez-vous un emploi? (Q4)", ou "La maladie vous empêche-t-elle de poursuivre vos études? (Q7)" et d'autres sont indirectes comme "Avez-vous des difficultés à rentrer chez vous? (Q13)" et "Où utilisez-vous votre FR? (Q12)".

### 2.7.1.3 Contraintes

Cette section du questionnaire vise à définir le problème le plus important auquel les personnes handicapées sont confrontées lors de leur déplacement à l'intérieur ou à l'extérieur. Ces questions concernent l'autonomie (Q14), la sécurité (Q15), le besoin d'assistance (Q16) et le coût (Q24).

### 2.7.1.4 Déplacements

Le déplacement a généralement une raison et est assuré par un dispositif, qui est le plus souvent un FR. Plusieurs questions sont définies pour connaître les caractéristiques de l'appareil utilisé comme le type (Q3 : FRM ou électrique par exemple), son environnement d'utilisation (Q12), sa sécurité (Q15, Q10) et son intelligence (Q17). Nous devons également obtenir des informations sur la nature des déplacements des personnes handicapées (Q12, Q13) et sur l'adaptation et l'expérience des utilisateurs (Q10, Q11 et Q14).

### 2.7.1.5 Fonctionnalités souhaitées

L'objectif de cette catégorie est de définir les limites des dispositifs de déplacement existants et d'identifier les besoins réels des personnes handicapées. Plusieurs questions sont communes aux deux classes. Cet ensemble de questions n'est pas concerné par une classe spécifique dans le modèle de déplacement actuel, mais il vise à définir les caractéristiques de la prochaine génération de modèle de déplacement en identifiant les besoins et les attentes des personnes handicapées. Ces questions concernent l'introduction de l'intelligence dans le dispositif de déplacement et l'utilité de l'intelligence (Q17 à Q23).

## 2.8 Analyse et résultats

L'objectif du déploiement est d'obtenir plus de 260 des réponses pour satisfaire à la formule de taille simple du Cochran [143]. Nous avons envoyé environ 2000 questionnaires, mais nous avons reçu seulement 310 réponses (16%). Ces résultats permettent une analyse statistique des réponses. Tous les résultats sont bien résumés dans le tableau 2.2, à l'exception de la Question 21 (amélioration du FR) et la question 23 (suggestion des utilisateurs de FR), qui sont ouvertes et peuvent avoir des réponses ouvertes.

L'observation des résultats montre que la majorité des participants à l'enquête sont des hommes (87,10%) et ont entre 16 et 35 ans (38,71%) et que la plupart d'entre eux sont au chômage (48,39%) et 90% du panel répondent en arabe. Nous observons également qu'ils ont une forte expérience de l'utilisation du FR. L'utilisateur le moins expérimenté ayant 5 ans et environ 20% utilisent un FR depuis la naissance.

Ces résultats qui concernent les profils des utilisateurs de FR s'expliquent par le contexte social et culturel algérien. Dans les associations, les hommes s'engagent le plus et sont toujours présents, donc c'est facile de les contacter et travailler avec eux. Beaucoup d'utilisateurs sont des jeunes et sans emplois. On peut également noter que la majorité des personnes interrogées souffrent de myopatie (58,06%), qui se manifeste souvent dès l'adolescence. Ceci explique la réponse à la question des tranches d'âge, où le nombre de personnes handicapées âgées de 16 à 35 ans représente 38% de cette catégorie.

L'activité de ces personnes est limitée (sortir prendre de l'air où aller à l'association). En effet, 48,39% sont au chômage et seulement 25,81% ont une activité professionnelle. En outre, 77,42% rencontrent des difficultés pour se rendre à leur domicile en raison d'infrastructures inadéquates et de bâtiments publics inaccessibles ce qui limite leurs activités. Même si elles n'ont pas d'activité régulière ou professionnelle, sur la base de leur réponse 45% utilisent le FR en dehors de la maison et 55% l'utilisent à chaque fois.

Les réponses obtenues concernant la durée du handicap sont très variées, mais tous sont considérés comme des utilisateurs expérimentés de FR ayant au moins 5 ans d'utilisation. 67,74% sont mécontents de l'utilisation de leur FR et ont besoin d'une amélioration de leur sécurité. La plupart d'entre eux justifient leur

Tableau 2.2 – Résultats du questionnaire

N° Questions	Résultats (%)
Q1	Homme : 87.10% ; Femme : 12.9%.
Q2	Âge $\leq$ 15 ans : 6.45% ; 16 ans à 35 ans : 38.71% ; 36 ans à 50 ans : 32.26% ; $>$ 50 ans : 22.58%
Q3	Manuel : 35,48% ; Électrique : 32,26%. Autre : 32,26%
Q4	Étudiant : 25,81% ; Employé : 25,81%. ; Chômeurs : 48,39%
Q5	Accident Vasculaire Cérébral : 9,68% ; Paralytie cérébrale (IMC) : 3,23%. ; Polyhandicap : 6,45% ; Accident de voiture : 6,45 % ; Maladie héréditaire : 3,23% ; Amputation : 6,45% ; Myopathie : 58,06% ; Autre (Depuis la naissance) : 3,23% ; Malformation : 3,23%
Q6	Accident de la route : 16,13% ; Maladie : 48,39% ; Depuis la naissance : 25,81% ; Accident Vasculaire Cérébral : 6,45% ; Maladie héréditaire : 3,23%
Q7	Oui : 29,03% ; No : 70,97%
Q8	Depuis la naissance : 19,35% ; $<$ 5 ans : 0% de 5 à 10 : 3,23%, de 10 à 15 : 16,13% ; de 15 à 20 : 35,48% ; de 10 à 13 ans : 16,13% ; de 20 à 30 ans : 3,23% ; $>$ 30 ans : 3,23% ; Sans réponse : 3,23%
Q9	Oui : 67,74% No : 32,26%
Q10	Oui : 61,29% No : 38,71%
Q11	0-5 ans : 3,23% ; 5-10 ans : 22,58% ; 10-20 ans : 32,26% ; 20 et plus : 38,71% ; Sans réponse : 3,23%
Q12	Principalement à l'intérieur : 0.0 % , Principalement à l'extérieur : 45,16%, à l'intérieur et à l'extérieur : 54,84%
Q13	Oui : 22,58% Non : 77,42%
Q14	Oui : 38,71% Non : 61,29%
Q15	Oui : 32,26% Non : 67,74%
Q16	Oui : 54,85% Non : 45,16%
Q17	Oui : 96,77% Non : 3,23%
Q18	Oui : 96,77% Non : 3,23%
Q19	Oui : 96,77% Non : 3,23%
Q20	Oui : 100,00% Non : 00%
Q21	Réponses ouvertes (voir discussion)
Q22	Oui : 96,77% Non : 3,23%
Q23	Réponses ouvertes (voir discussion)
Q24	100 000 DA (800€) : 77,42% ; 150 000 DA (1200€) : 12,90% ; 400 000 DA (4000€) : 6,45% ; Sans réponse : 3,23%

## 2.8. Analyse et résultats

---

mécontentement par l'inadaptation de leur **FR** à l'environnement (routes, trottoirs, moyens de transport, etc.). La majorité (77,42%) des membres du panel ne sont pas en mesure de mettre plus de 800 euros dans un **FRI**, bien qu'ils soient très intéressés par les fonctionnalités de dispositif smart.

Les deux modèles de **FR** sont utilisés par le panel avec une répartition presque ou quasi uniforme (35,48% de **FRM**, 32,26% de **FRE**, 32,26% des deux modèles) pour assurer le déplacement à l'intérieur et à l'extérieur de leur domicile. Les utilisateurs des deux types de **FR** gardent le **FRM** pour remplacer **FRE** lorsqu'il est en panne. Nous remarquons également que le choix du type de **FR** dépend de la nature du handicap et de sa gravité (80% des personnes handicapées souffrant de myopathie utilisent un **FRE**). Néanmoins, il y a un léger avantage au **FRM** étant donné son coût raisonnable et sa disponibilité sur le marché et par le biais du service de dons. En ce qui concerne les **FRE**, qui sont très chers par rapport aux revenus des personnes concernées, nous avons remarqué que 90% des personnes en **FRE** interrogées l'ont obtenu par le biais de dons. Cela explique l'incapacité des personnes handicapées à se procurer ce type d'appareil par leurs propres moyens. Nous pouvons également constater la solidarité de la population algérienne, en particulier avec les personnes handicapées. 61,29% ne sont pas satisfaits de leurs autonomies, il faut des fonctionnalités intelligentes pour améliorer leur autonomie et réduire le besoin d'assistance. 97% Des personnes handicapées sont intéressées par des fonctionnalités intelligentes dans leur **FR**. Elles recherchent l'avantage d'une telle solution qui améliorera leur qualité de vie en leur offrant une meilleure mobilité, une grande interaction avec la communauté et une plus grande participation aux activités sociales. Selon les questions 21 et 23 concernant les attentes des utilisateurs de **FR**, différentes réponses intéressantes et originales ont été notées, qui peuvent être utilisées pour concevoir la génération future de **FR**. Ces réponses peuvent également être utilisées pour identifier les spécifications du contexte algérien. Certaines de ces réponses sont :

- Facile à transporter, confortable et robuste.
- Évitement d'obstacles, anticipation d'obstacles et optimisation des parcours.
- Visibilité, équipement d'éclairage et rétroviseur.
- Permet une position allongée (convertible en lit).

- Dispositif protégeant du soleil et de la pluie.
- Ceinture de sécurité.
- Autonomie de la batterie, équipée de l'énergie solaire.
- Une petite tablette.
- Amélioration de la vitesse.

### 2.8.1 Analyse de corrélation

Une partie des réponses aux questions sont de nature catégorielle et souvent des "oui" ou "non". De ce fait, nous avons utilisé les outils de la bibliothèque Pandas de python afin d'identifier s'il existe des corrélations. La méthode utilisée est l'analyse de corrélation de Pearson, représentée sous forme heatmap. La corrélation est utilisée pour tester les relations entre les variables quantitatives ou les variables catégorielles. En d'autres termes, il s'agit d'une mesure de la façon dont les choses sont liées.

Chaque carré montre la relation de corrélation entre les variables sur chaque axe. La corrélation est représentée par une valeur comprise entre -1 et +1, où +1 dénote la corrélation positive la plus élevée, -1 dénote la corrélation négative la plus élevée et 0 dénote qu'il n'y a pas de corrélation.

La figure 2.2 montre que chaque cellule de la matrice est représentée par les nuances d'une couleur. Les nuances les plus sombres de la couleur indiquent des valeurs plus petites, tandis que les nuances les plus claires correspondent à des valeurs plus grandes (proches de 1). Dans notre cas, la majorité des données sont catégorielles, cependant, nous nous sommes intéressés à une analyse qui montre les facteurs communs entre les utilisateurs. Nous remarquons que la corrélation entre les questions Q17(Nouveau dispositif), Q18(Éviter les obstacles) et Q19(Éviter les obstacles sans les percevoir) est élevée, tandis qu'entre les questions Q5 (Type de maladie) et Q6(Origine de la maladie) elle demeure moins élevée. Ce résultat nous permet de spécifier le nouveau dispositif attendu par les utilisateurs et qui se traduit par l'évitement d'obstacles.

Aussi, l'analyse des réponses qualitatives nous permet de conclure que les personnes handicapées en Algérie restent exclues de la vie professionnelle. De plus, elles n'ont pas les capacités financières pour satisfaire leurs besoins en matière de



## 2.8. Analyse et résultats

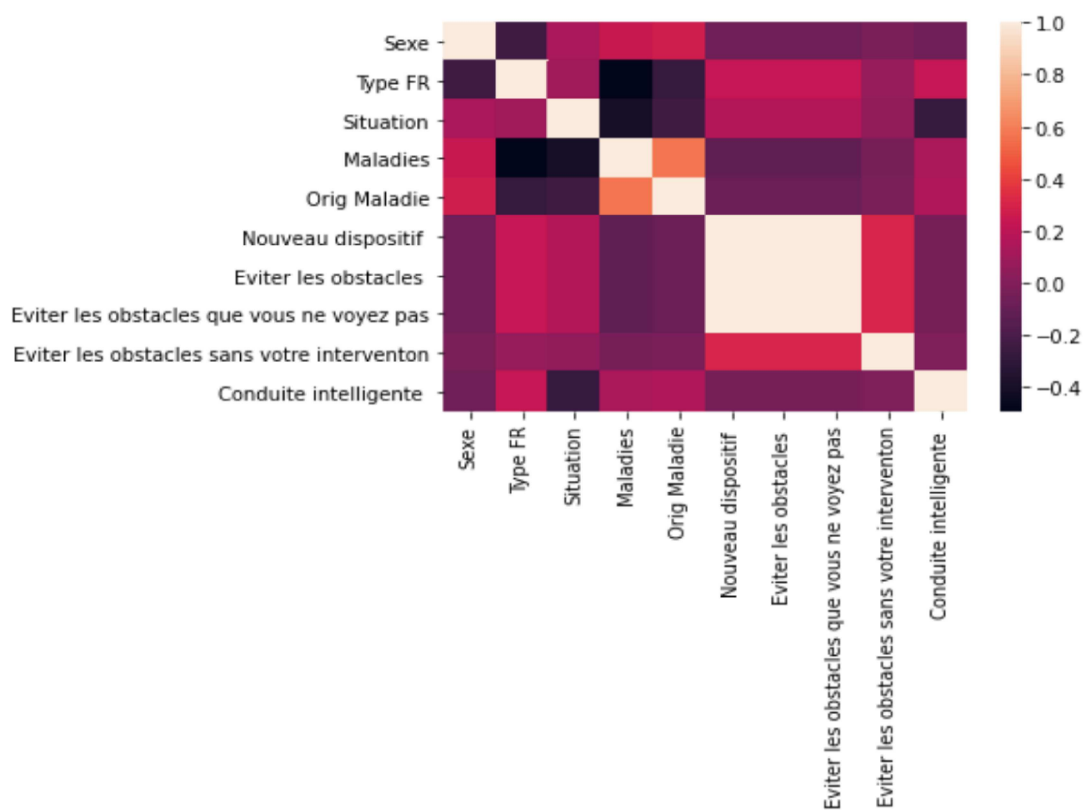


FIGURE 2.2 – Analyse de corrélation

FR et autres équipements médicaux. Le questionnaire a fait ressortir les difficultés rencontrées par les personnes handicapées en matière de déplacement. En effet, elles remontent les contraintes de déplacement dues aux infrastructures partiellement adaptées, voire pas du tout. Ceci influence la nature de leurs déplacements et de leurs activités, où elles effectuent de courts trajets et très peu d'activités (association, café). Aussi, elles se trouvent dépendantes de l'assistance humaines (souvent familiales) pour assurer leurs déplacements et activités quotidiennes. Ce qui converge vers leur besoin d'un nouveau dispositif permettant l'évitement d'obstacles et une conduite intelligente et ainsi leur procurer plus d'autonomie. Les FR utilisés sont en provenance de pays développés et la plupart d'entre eux sont fournis par donation. Le besoin de FR est en constante évolution, mais les services de maintenance ou de personnalisation ne sont pas assurés en Algérie. Ce qui ouvre la porte vers le développement de FR adapté au contexte Algérien.

## 2.8.2 Modèle de comportement proposé

Sur la base de l'observation et de l'enquête, il est possible de compléter le premier modèle décrit dans la figure 2.1. Ainsi, l'analyse du questionnaire a permis de mieux comprendre le contexte algérien qui diffère de celui de l'Europe et de compléter le modèle précédent par le modèle présenté dans la figure 2.3. Les classes ajoutées sont présentées en couleur bleue.

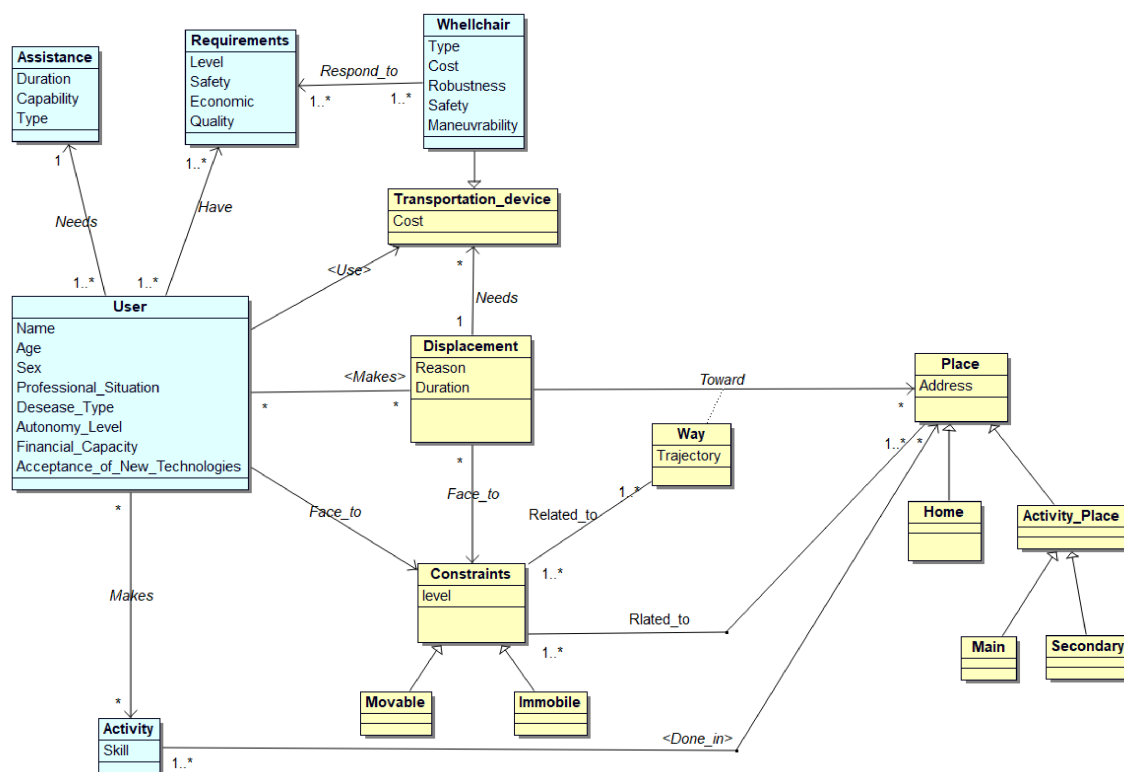


FIGURE 2.3 – Modèle de comportement d'une personne handicapée dans le contexte Algérien

Compte tenu du contexte, nous avons intégré la classe "utilisateur", qui permet la description de la personne à travers son profil axé sur la situation professionnelle, le type de maladie, la capacité financière et son acceptation de nouvelles technologies (Figure 2.3).

Dans ce contexte l'utilisateur semble très important pour la conception des FR. De même dans le contexte algérien, la plupart des personnes handicapées dépendent de l'assistance de leur entourage, notamment de leur famille. Ce point donne plus de

## 2.8. Analyse et résultats

---

détails sur la perception des autres au sujet de leurs besoins. La classe "Exigence" décrit les besoins des utilisateurs en termes de sécurité d'utilisation du FR, avoir un FR économique (coût et utilisation) de bonne qualité avec différents niveaux de besoins (plus ou moins importants).

Concernant leur déplacement, les personnes handicapées utilisent ou veulent utiliser des FR qui présentent certaines particularités telles que le coût, la robustesse, la sécurité et la maniabilité (la classe "FR"). Les personnes interrogées ont des difficultés à effectuer leurs activités quotidiennes. La classe "Activité" se concentre sur le type de compétence nécessaires à l'activité. L'attribut de compétence associé à la classe "contrainte" et l'attribut "type de maladie" permettent d'orienter les caractéristiques du FR pour améliorer la performance des activités quotidiennes. En ce qui concerne le coût d'acquisition élevé des FRE et le prix onéreux des quelques fonctionnalités intelligentes, les utilisateurs algériens ne peuvent toujours pas acquérir un FR avec des fonctionnalités avancées. Cette situation est le résultat de plusieurs paramètres définis par le contexte algérien et la rareté des fonctionnalités intelligentes sur le marché. D'où l'idée de transformer les FRM en FR motorisés ayant la possibilité d'adapter des fonctions intelligentes grâce au développement et à l'intégration d'un module intelligent à moindre coût semblent être une bonne option. Cela peut expliquer l'acceptation de cette solution par la population interrogée. Notre ambition est de proposer un module personnalisable aux besoins locaux.

## 2.9 Conclusion

Ce chapitre se concentre sur la modélisation du comportement des personnes à mobilité réduite en Algérie utilisant un **FR** pour se déplacer. Un modèle prenant en compte les contraintes auxquelles sont confrontées les personnes handicapées est proposé. Nous partons du principe que les appareils de mobilité disponibles sur le marché algérien ne sont pas adaptés aux besoins des utilisateurs. Nous avons déployé un questionnaire pour obtenir plus d'informations sur la situation des personnes handicapées en Algérie. Les résultats obtenus sont suffisants pour identifier la plupart des problèmes et des attentes des utilisateurs. L'un des problèmes identifiés est celui du coût. En effet, les utilisateurs algériens ne sont pas en mesure d'acheter un **FR**, étant donné son prix élevé et leur niveau de vie. L'idée de transformer les **FRM** en **FRI** par l'intégration d'un module intelligent à moindre coût est un besoin des personnes à mobilité réduite en Algérie selon l'échantillon de la population interviewée. Le chapitre suivant aborde la conception du **FRI** sur la base des exigences collectées. Pour cela, nous allons détailler la conception des produits ainsi que leurs modélisations. Le langage SysML sera utilisé pour la prise en compte de la classe exigences dans la modélisation du **FRI**.

# Modélisation du fauteuil roulant avec SysML

---

## Sommaire

---

<b>3.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>71</b>
<b>3.2</b>	<b>Conception du produit</b>	<b>72</b>
3.2.1	Processus de conception	75
3.2.2	Typologie de conceptions	82
<b>3.3</b>	<b>Modélisation des systèmes</b>	<b>82</b>
3.3.1	Modèle de produit de base (CPM : Core Product Model)	84
3.3.2	Les Classes CPM	85
3.3.3	Modèle d'assemblage ouvert (OAM : Open Assembly Model)	86
<b>3.4</b>	<b>Approche proposée</b>	<b>87</b>
<b>3.5</b>	<b>Modélisation du FR</b>	<b>88</b>
3.5.1	Analyse fonctionnelle	88
3.5.2	Les outils de l'analyse fonctionnelle	89
<b>3.6</b>	<b>Synthèse</b>	<b>95</b>
<b>3.7</b>	<b>Analyse Fonctionnelle en langage SysML</b>	<b>97</b>
3.7.1	Introduction	97
3.7.2	Modélisation du système avec SysML	98
3.7.3	Analyse Structurelle (Interne)	105
<b>3.8</b>	<b>Conclusion</b>	<b>110</b>

---

## Résumé



Le chapitre a pour but de développer une approche de modélisation du FRI modulaire basé sur les résultats de l'enquête. Pour cela, nous avons exploré les approches de conception pour identifier celle qui correspond le mieux aux attentes des handicapés. Dans un premier temps, nous avons exploré et comparé les différents modèles de conception existants selon le domaine d'utilisation. Ces modèles peuvent être exploités pour différents types de conception que nous avons expliqué tels que : la conception initiale, la re-conception, la conception routinière, etc. Ainsi, sur la base d'une analyse comparative, nous avons identifié le modèle et le type de conception le plus approprié à notre étude (re-conception).

## 3.1 Introduction

L'implémentation de la conception se fait via l'analyse fonctionnelle qui respecte les étapes identifiées (capture du besoin, définition des fonctionnalités du produit, hiérarchisation, etc.). Plusieurs approches basées sur des annotations sont utilisées pour la modélisation : Business Process Model and Notation (BPMn) pour les processus. Unified Modeling Language (UML) pour le développement logiciel, etc. Cependant, l'annotation SysML reste la plus adaptée à la modélisation des produits. Ce chapitre propose une approche hybride entre l'Analyse Fonctionnelle (AF), qui est une démarche de conception et le langage de modélisation SysML. L'originalité de notre approche réside dans la prise en compte durant la conception, du changement et/ou l'évolution des exigences des clients.

Afin de comprendre la modélisation, il est important de la définir. Souvent, le modèle est vu comme une simplification de la réalité [144]. Vu la complexité des systèmes et leur environnement, il devient important de simplifier la réalité afin de comprendre le système ou le représenter. En effet, en tant qu'êtres humains, nous ne pouvons pas appréhender la complexité [145]. Si un modèle devient une simplification de la réalité, alors, beaucoup de choses peuvent être considérées comme un modèle. Nous distinguons différents types de modèles :

- Les modèles mathématiques, qui peuvent aller des équations représentant différents aspects d'un système à des spécifications formelles, faisant appel des méthodes formelles spécialisées, pouvant être utilisées dans le cadre d'une analyse ou d'une preuve formelle.
- Les modèles physiques, tels que les maquettes, qui peuvent être utilisés pour donner une image de ce à quoi ressemblerait le système final ou peuvent être utilisés dans le cadre d'une simulation ou d'une analyse physique.
- Modèles visuels, tels que des dessins et des plans, qui peuvent être utilisés comme modèle pour la création ou comme base d'analyse.
- Les modèles textuels, tels que les cahiers des charges écrits, qui peuvent-être les plus utilisées à notre disposition.
- ...

Cette liste n'est pas exhaustive, mais elle transmet le message général. Il est important de modéliser pour pouvoir identifier la complexité, améliorer notre compréhension et communiquer de manière non ambiguë.

Afin de modéliser de manière efficace, il est essentiel de disposer d'un langage commun pouvant être utilisé pour réaliser la modélisation. Il existe un certain nombre d'exigences pour tout langage de modélisation comme le choix du modèle, le niveau d'abstraction, la connexion à la réalité et les vues indépendantes du même système.

## 3.2 Conception du produit

Tous les objets qui nous entourent et que nous utilisons quotidiennement sont pour la plupart issus de l'activité créative de l'être humain d'où leurs appellations "Produits". Tout produit connaît plusieurs états à partir du moment où il est souhaité, imaginé, jusqu'au moment où il est détruit, voire recyclé [146]. Pour arriver à ce produit et l'intégrer dans la chaîne, certains processus sont mis en œuvre dont le processus de conception, de fabrication, de cycle de vie, etc. La conception de produits est devenue au fil des années une source majeure d'avantages compétitifs pour les sociétés industrielles devant la pression, toujours plus forte, exercée par le marché (réduction des cycles de développement, apparition de nouvelles technologies, etc.) [147].

Elle repose sur un échange permanent d'informations entre les différents processus pour définir les meilleures solutions qui répondent au cahier des charges ou pour réaliser le besoin exprimé par une entreprise ou un client.

La conception de produits décrit le processus d'imagination, de création et d'itération. Elle permet de résoudre les problèmes des utilisateurs ou répond à des besoins spécifiques pour un marché donné. Plusieurs équipes multidisciplinaires tentent de transformer des besoins clients en une solution optimisée [148].

La conception des produits est généralement liée à la fabrication de produits qui répondent aux besoins des clients. L'activité commerciale est basée sur l'échange des produits. Les exigences de fabrication permettent de définir le processus de conception en séparant les solutions qui sont possibles et celles qui ne le sont pas, et en classant les solutions possibles comme étant économiquement viables ou non rentables. La production détermine le niveau de précision et la portée des spécifications



### 3.2. Conception du produit

---

attendues du processus de conception.

Les concepteurs de produits tentent de résoudre des problèmes réels en faisant appel à la fois à l'ergonomie et à la connaissance des habitudes, des comportements, des besoins et des désirs de leurs clients potentiels.

Les projets de conception actuels sont souvent remis en question par leur nature interdisciplinaire ainsi que par la complexité croissante des produits et la contrainte de temps [149].

La complexité de la conception des produits ne cesse de croître et représente un défi majeur pour toute la réussite durable des entreprises sur le marché. De ce fait, la complexité provient de différents domaines, par exemple les marchés, les produits, les processus ou les organisations. Alors que la multitude d'éléments et les liens entre les systèmes représentent déjà une grande complexité. Il est particulièrement difficile de gérer les changements de systèmes. Tous ces domaines mentionnés sont fortement interconnectés, par exemple, la demande du marché pour la personnalisation des produits ou un nombre important de variantes de produits peut entraîner la nécessité de modifier en profondeur le programme de produits ou le processus de création de produits.

Il en résulte que ces dernières années plusieurs travaux de recherche ont fait l'objet d'étude de théories et méthodologies de conception de produits complexes [150] [151].

Les Systèmes de Produits Complexes (SPC) sont des produits intégrés de haute technologie, ils comportent des systèmes, des produits, ou des installations comprenant des machines, des ordinateurs, de l'électronique et des réseaux de communications.

Avec le développement de plus en plus dynamique, diversifié et personnalisé du marché mondial, le schéma traditionnel de développement basé sur les commandes de SPC est incapable de répondre rapidement aux demandes complexes du marché.

Les concepteurs sont confrontés à un double défi :

- La demande des clients et les exigences de l'environnement sont non seulement entrelacées, mais également complexes et variées sous l'influence de l'environnement et des délais, ce qui rend difficile, pour les entreprises manufacturières de mettre à jour rapidement et efficacement leurs produits en fonction des tendances dynamiques de la demande.
- La collecte et la réutilisation des connaissances en matière de recherche et de développement (R & D) sont insuffisantes. En conséquence, il y a une grande

quantité de travail répétitif dans le processus d'itération et de modification de la conception, de sorte que l'efficacité du développement est faible et que le processus de développement n'est pas contrôlé de manière efficace [152]. Ainsi, la manière de concevoir un produit pour répondre aux exigences complexes du marché et sur la base des connaissances collectées est un véritable enjeu dans le domaine de la conception technique [153].

De nombreux produits modernes ont des modes multiples (multi-technologiques, multi-composants). Les modes peuvent signifier différentes utilisations pour l'utilisateur, à savoir la performance, la robustesse tout en réduisant les coûts et les délais. Pour offrir cette commodité, le concepteur doit prendre en compte les exigences et les contraintes tout au long du processus de conception. Les exigences clairement définies sont des éléments essentiels qui conduisent à la bonne réussite d'un projet. Elles établissent un accord formel entre le client et le fournisseur qui s'engagent tous deux à atteindre le même objectif. Des exigences détaillées de hautes qualités contribuent également à atténuer les risques financiers et à respecter le calendrier du projet. Selon la définition du corpus de connaissances de l'analyse d'affaires appelé BABOK (Business Analysis Body Of Knowledge) [154], les exigences sont une représentation utile d'un besoin. Les contraintes relatives aux solutions possibles à un éventuel problème de conception se présentent sous de nombreuses formes. Certaines contraintes seront fixes et invariables, comme celles qui découlent des lois physiques, des réglementations gouvernementales, des normes et des contraintes qui sont en dehors de l'influence du concepteur, et peuvent être appelées les contraintes externes. Celles-ci fixent la limite extérieure des modèles possibles, comme le montre la figure 3.1.

## 3.2. Conception du produit

---

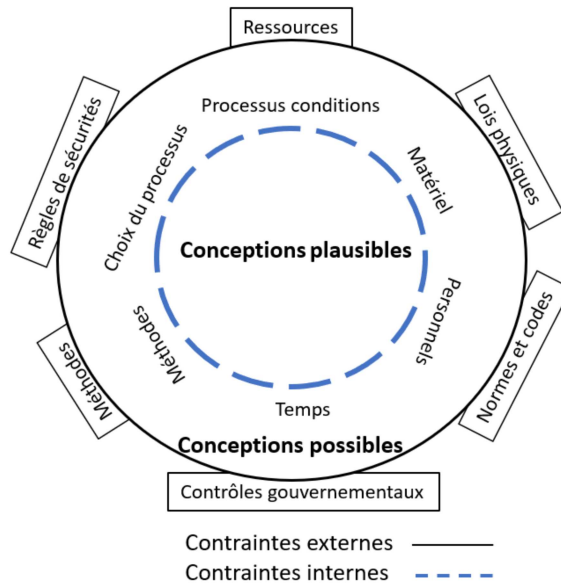


FIGURE 3.1 – Conception des contraintes

À l'intérieur de cette limite, il y aura un certain type de modèles plausibles délimités par les autres contraintes, les contraintes internes, sur lesquelles le concepteur a un certain contrôle, notamment le choix du processus, les conditions du processus, les matériaux et l'équipement. Les considérations économiques sont évidemment une contrainte majeure pour toute conception technique. Le coût des procédés et les aspects économiques doivent aussi être respectés. Le temps sera également une contrainte, car le temps disponible pour la réalisation d'une conception limitera généralement le nombre d'alternatives de conceptions envisagées.

Il existe plusieurs types de conceptions qui peuvent se faire suivant des processus différents. Nous aborderons dans la section suivante, les processus de conception.

### 3.2.1 Processus de conception

Le principe de la conception est créé pour codifier et formaliser les connaissances en matière de conception afin que l'innovation, les pratiques d'archivage puissent être communiquées et utilisées pour faire évoluer la science de la conception et résoudre les futurs problèmes de conception, en particulier les problèmes les plus complexes et les plus difficiles auxquels sont confrontés industrie et les marchés mondiaux.

La formalisation de la Méthodologie de Recherche en Conception (MRC) est la voie incontestable vers la maturation du domaine. Pahl et Beitz [155] ont été parmi

les premiers à proposer des processus de conception et de recherche formalisés, qui se résument en quatre étapes [156] :

- Élaboration du cahier des charges.
- Formalisation et spécification des principes.
- Conception d'ensemble.
- Conception détaillée.

Blessing et Chakrabarti dans [157] ont formulé un processus MRC composé de quatre étapes principales :

1. Clarification de la recherche, analyse documentaire pour formuler un objectif de recherche valable,
2. Étude descriptive I, analyse des données empiriques dans une étude exploratoire
3. Étude prescriptive, synthèse de l'expérience en une vision de la manière d'améliorer la situation existante,
4. Étude descriptive II, analyse des données empiriques de l'effet du support d'amélioration développé [158].

Finger et Dixon dans [159] ont examiné en détail les méthodes de recherche en matière de conception, y compris les modèles descriptifs des processus de conception, les modèles prescriptifs de conception, les modèles informatisés des processus de conception, les langages, les représentations et la conception de l'environnement, l'analyse pour faciliter les choix de conception, la conception pour la fabrication et d'autres questions liées au cycle de vie comme la fiabilité, la facilité d'entretien, etc. [160].

### 3.2.1.1 Intégration des besoins dans les processus de conception

Les entreprises sont aujourd'hui confrontées à un problème de compétitivité qui les oblige à concevoir des produits de qualité qui répondent aux besoins du client, au coût le plus bas possible et dans les délais les plus courts. Pour s'adapter à ce

### 3.2. Conception du produit

---

nouveau contexte économique, elles doivent modifier leur approche de conception et adapter leur approche organisationnelle.

L'identification des besoins des clients peut se faire de plusieurs manières. Soit le concepteur est approché directement par un client avec un problème spécifique, soit le concepteur trouve une opportunité sur le marché en identifiant un besoin pour un produit nouveau ou amélioré. Dans le processus de conception, il est important de déterminer si une telle opportunité commerciale existe pour un produit avant d'investir du temps et de l'argent pour faire évoluer le produit. L'analyse nécessite une étude approfondie du marché. Elle doit être menée au début du processus de conception. Elle sert de mécanisme pour définir en amont l'énoncé du besoin et offre aux concepteurs l'occasion de passer en revue d'autres tentatives de résolution du problème en question, si elles existent.

La recherche en conception vise à aider les utilisateurs en leur proposant des méthodologies, des méthodes, des outils et des recommandations, mais une grande partie des outils développés sont plutôt mono-disciplinaire.

Birkhofer dans [161] a étudié les contributions de plusieurs experts dans le domaine de la méthodologie de conception, et l'une de ses conclusions est : *«Dans l'ensemble, les propositions indiquent que la méthodologie de conception présente des lacunes en matière de support des travaux de développement actuels ou même futurs qui nécessitent une réforme substantielle»* [161]. Certains auteurs ont effectué des comparaisons de méthodologies de conception et de modèles de processus de conception, contribuant ainsi à une certaine harmonisation. Howard et al dans [162] ont analysé plusieurs modèles de processus principalement issus de l'ingénierie mécanique. Ils ont identifié les étapes typiques de la conception : établissement d'un besoin, analyse de la tâche, conception d'un produit, conception physique, conception détaillée et mise en œuvre.

Sur cette base d'analyse des comparaisons existantes, il a été conclu que les processus de conception présentent des similitudes entre les disciplines. Ils comportent un noyau commun entre différentes étapes de conception et proposent un processus itératif par étapes. Ces étapes ont pour résultat :

- L'identification des besoins
- La formalisation et spécification du problème par rapport aux besoins (analyse fonctionnelle)

- La réalisation des choix de principes technologiques envisageables et étude de leur faisabilité
- L'étude fonctionnelle pour répondre aux besoins (choix des composants et dimensionnement fonctionnel) et choix d'un principe technologique
- La conception détaillée (choix des solutions techniques - composants - et dimensionnement géométrique)
- La vérification des résultats et validation des résultats (fabrication d'un prototype, test grandeur nature pour vérifier les performances requises)

Ces étapes se retrouvent dans les cycles de développement issus de l'ingénierie système, objet de la section suivante.

### 3.2.1.2 Formes de processus de conception

La littérature présente différents travaux sur les modèles de conception et les formes de processus de conception. Cependant, ces deux appellations font référence à la même chose, que nous appellerons modèles de conception tout au long de notre recherche. Nous présenterons ici, les principaux modèles de conception à savoir le modèle en cascade, le modèle en V et enfin le modèle en Spirale.

#### • Modèle en cascade

Le modèle en cascade est un modèle de processus séquentiel qui ne se superpose pas. Cela signifie que lorsqu'une phase est achevée, son résultat sert de point d'entrée à la phase suivante. La modification d'une phase du projet a un impact important sur les phases suivantes. Ce modèle est simple et facile à comprendre, il a été développé dans les années 1970, et il a longtemps servi de référence en conception de produits [163], [164]. La figure 3.2 montre la représentation graphique du modèle en cascade.

Le processus commence par la phase d'analyse des besoins qui conduit à la rédaction du cahier des charges. Dans la phase de conception, la structure globale du produit est conçue sur la base de la phase d'analyse des besoins.

### 3.2. Conception du produit

---

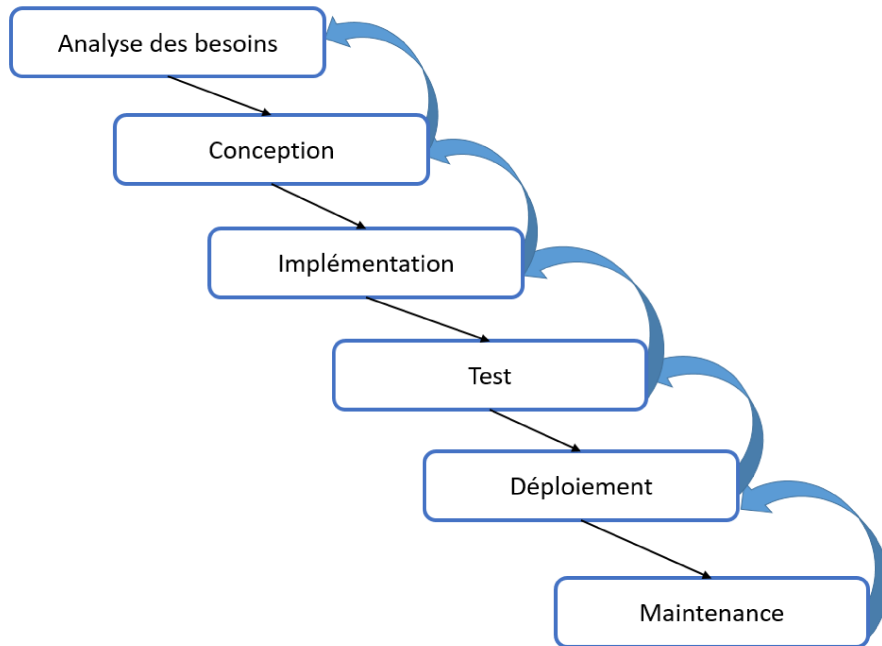


FIGURE 3.2 – Modèle en cascade

#### ● Modèle en V

Le modèle en V confronte les différents niveaux de test avec les phases de projet de même niveau. Ceci permet à chaque étape de définir non seulement les fonctions, mais également les critères de validation. La cohérence entre les deux éléments permet de vérifier en continu que le projet progresse vers un produit répondant aux besoins initiaux. Ce modèle est une amélioration du modèle en cascade. Il permet d'identifier et d'anticiper les éventuelles évolutions des besoins.

Nous retrouvons dans la figure 3.3, le modèle en V qui est une amélioration du modèle en cascade qui permet en cas d'anomalie, de limiter un retour aux étapes précédentes.

Cependant, la spécification et la conception se déroulent dans une phase dite descendante, tandis que les tests et validations seront situés dans une phase dite ascendante d'après Calvez et Brenier dans [165][166]. Les phases descendantes doivent être spécifiées les méthodes (SysML par exemple), modalités et outils (Astah<sup>1</sup> par exemple) qui permettront d'évaluer l'étape en cours. Ce point constitue l'apport principal de ce modèle par rapport à son prédécesseur.

---

1. <https://astah.net>

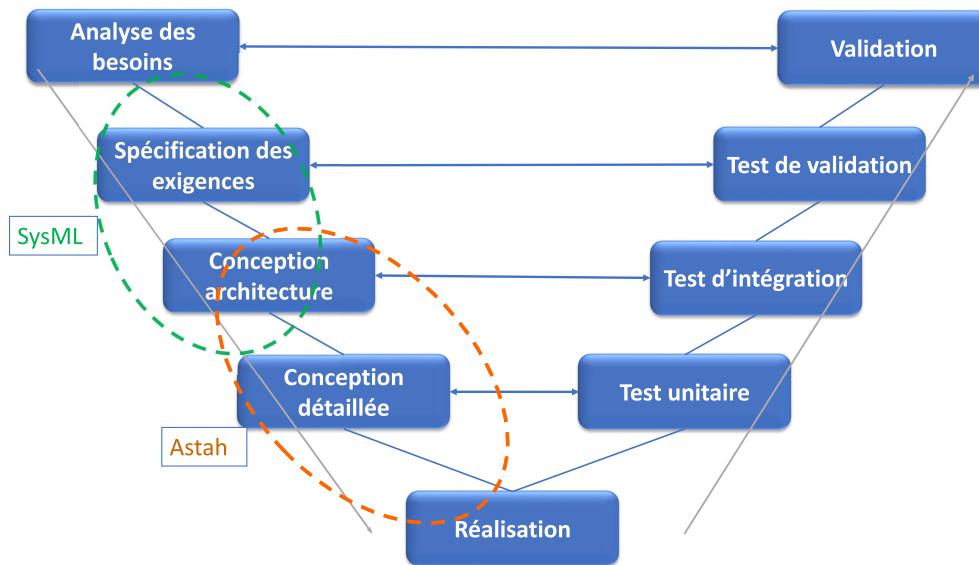


FIGURE 3.3 – Modèle de conception en V

### • Modèle en Spirale

Le cycle de vie en spirale est un modèle générique de cycle de vie évolutif qui a été proposé par Barry W. Boehm dans [167] (Figure 3.4). Ce modèle, axé sur la maîtrise et la réduction des risques, est un cadre de travail guidant la construction d'une démarche de conception et de gestion de projet. Chaque boucle de la spirale permet d'identifier :

- Les objectifs propres de la boucle,
- Les moyens alternatifs pour atteindre les objectifs,
- Les contraintes de chaque alternative.

La figure 3.5 montre la majorité des modèles représentant la séquence des étapes qui forment le processus de conception d'une manière plutôt simple, souvent appelée modèles séquentiels, linéaires ou en cascade. Seuls quelques modèles présentent une forme spirale ou en V. Ces processus sont organisés en différentes phases suivant un modèle de conception.



### 3.2. Conception du produit

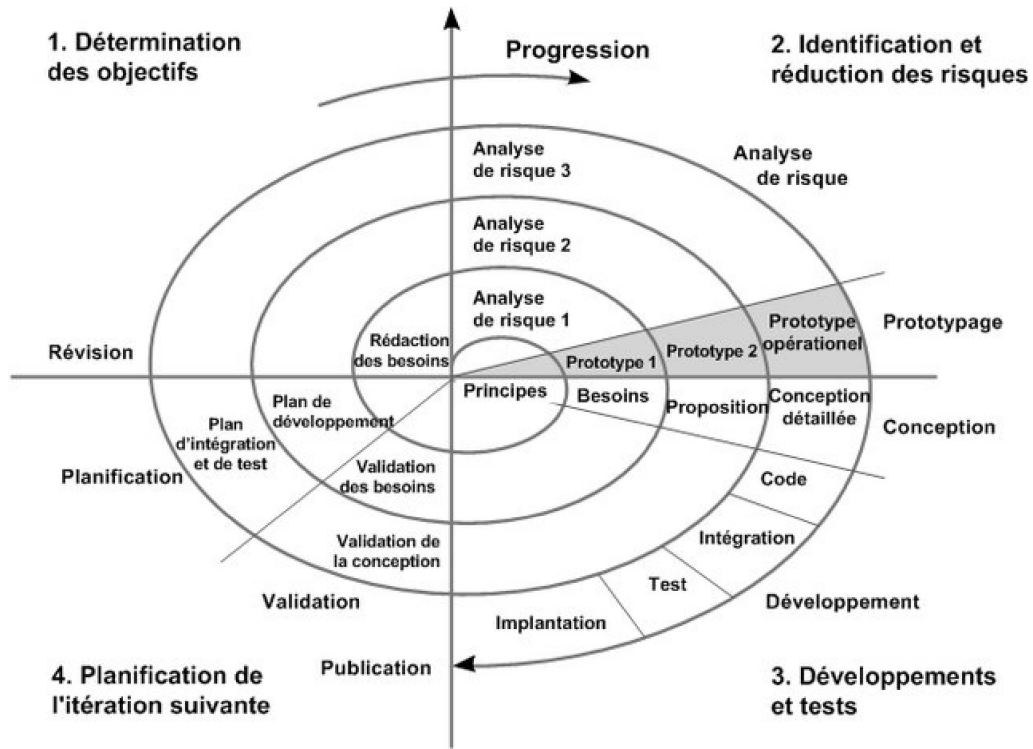


FIGURE 3.4 – Modèle de conception en spirale

	Forme			
	Séquentiel/cascade	Spiral	V	Autres
ingénierie mécanique				
conception industrielle				
ingénierie des systèmes				
conception de bâtiments (architecture/génie civil)				
conception de logiciels				
ingénierie des services				
mécatronique				
systèmes de services de produits				
approches transdisciplinaires				

FIGURE 3.5 – Formes de processus de conception

### 3.2.2 Typologie de conceptions

En raison de la multitude d'activités de conceptions, Chandrasekaran dans [168] a tourné autour de quatre activités principales. Ces activités sont la conception créative, la conception innovatrice, la re-conception et la conception routinière.

La conception créative et la conception innovante peuvent être considérées comme une conception initiale.

- **La conception initiale** : Il s'agit de concevoir et d'inventer un produit ou un processus pour la première fois, sans aucun cas de référence existant ni aucune expérience passée réussie permettant de s'inspirer pour copier, re-concevoir ou améliorer des solutions existantes. [169].

- **La re-conception** : Elle utilise les idées des concepts déjà établis, mais en modifiant leur structure et géométrie (soit le modèle produit) pour satisfaire un nouveau cahier des charges ou de nouvelles contraintes [170]. Il s'agit, alors, de modifier un produit ou un process existant en choisissant de nouvelles alternatives de conception. Il existe de nombreuses raisons de revoir la conception des produits. Tout d'abord, des défauts de conception peuvent être constatés ou les clients (les utilisateurs du FR) peuvent modifier leurs exigences pour améliorer la qualité, réduire les coûts, prolonger la durée de vie du produit ou réduire les impacts environnementaux. En conséquence, la re-conception est une partie importante du processus de développement du produit qui consiste à modifier des conceptions antérieures pour les rendre adaptées à de nouvelles applications. La re-conception englobe la conception routinière et la conception paramétrique.

## 3.3 Modélisation des systèmes

La modélisation est une technique puissante pour développer un système de manière efficace et efficiente. Elle permet d'approcher et de comprendre un système complexe en créant un modèle qui représente la réalité (en intégrant des contraintes) compréhensible par tous [171]. Elle offre aussi de nombreux avantages à tous les participants au développement du système, tels que les parties prenantes, les développeurs du système et les utilisateurs.

La modélisation des systèmes est une méthode utilisée pour conceptualiser un

### 3.3. Modélisation des systèmes

---

système, chaque fois que cela est nécessaire au cours de son cycle de vie.

Elle est le processus de développement des modèles abstraits et simplifiés d'un système. Chaque modèle présentant une vue ou une perspective différente de ce système (Figure 3.6). Une perspective d'interaction, qui modélise les interactions entre un système et son environnement, ou entre les composants d'un système. Le modèle de système fournit des expériences, des règles et des informations utiles pour concevoir, développer et mettre en œuvre le système. En appliquant le modèle, le coût, le temps et les risques sont considérablement réduits.

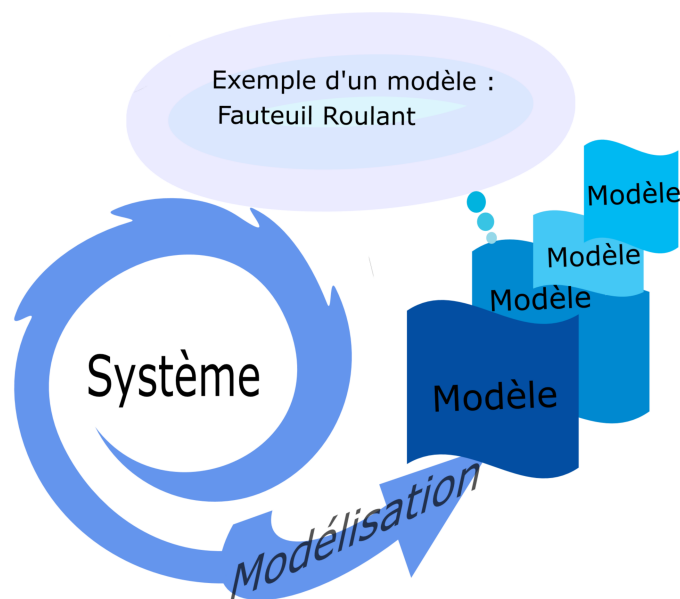


FIGURE 3.6 – Du système vers le modèle

À présent, la modélisation des systèmes signifie la représentation d'un système à l'aide d'une forme de notation graphique, presque, toujours basée sur des langages de modélisations comme UML ou SysML. Réaliser un modèle, c'est avant tout représenter ce que l'on a compris d'un problème dans une syntaxe précise. Face à la complexité des problèmes, il est conceptuellement impossible de l'appréhender d'un seul bloc. Avec la nécessité d'établir plusieurs niveaux d'abstraction, nous avons besoin de « découper, simplifier » et donc d'analyser le problème et le raffiner en sous-problèmes de tailles plus petites afin de pouvoir le comprendre. L'analyse de chacun de ces sous-problèmes nécessite de comprendre tous les détails.

Le modèle d'analyse n'est donc qu'une vision du monde réel à un niveau de détail « analyse ». Il sert de lien entre la description du système et le modèle

de conception. Dans la littérature, nous pouvons trouver différents modèles de produits, plus ou moins spécifiques. Parmi ces modèles, nous trouvons le modèle basé sur le Holon exposé dans les travaux [172], conçu pour assurer la traçabilité des produits et qui a été implémenté en Extensible Markup Language (XML). D'autre part nous avons un modèle générique, dit CPM<sup>2</sup> [173], qui contient les éléments fondamentaux pour représenter tout produit. Le CPM a été conçu comme une représentation des informations relatives au développement de produits et peut être vu comme une base pour le développement de la nouvelle génération d'outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Nous trouvons aussi son extension, l'Open Assembly Model (OAM)<sup>3</sup>. Cependant, il existe des normes permettant la standardisation des produits développés par NIST.

### 3.3.1 Modèle de produit de base (CPM : Core Product Model)

Initialement le CPM a été prévu pour fournir un modèle de produit de bas-niveau qui n'est pas attaché à une application ou un logiciel spécifique. Il est ouvert, simple, générique, extensible, indépendant de tout procédé de développement de produit et capable de saisir toutes les informations du produit à maintenir tout au long de son cycle de vie [173]. Le CPM a été conçu comme une représentation des informations relatives au développement de produits et peut être vu comme une base pour le développement de la nouvelle génération d'outils de CAO. Ce modèle fournit une représentation de produits manufacturiers (artéfacts) contenant une large variété de concepts d'ingénierie de produits, outre les concepts géométriques. Cette représentation inclut les notions de forme, de fonction, de comportement, de matériaux, de décompositions physique et fonctionnelle, de mise en correspondance entre la fonction et la forme ainsi que plusieurs relations entre ces différents concepts [3][173]. À noter que ce modèle a été représenté avec l'annotation UML.

---

2. CPM : est le modèle de produit développé par le bureau US de normalisation National Institute of Standards and Technology (NIST)

3. OAM : est le modèle d'assemblage, en tant qu'extension du CPM

### 3.3. Modélisation des systèmes

#### 3.3.2 Les Classes CPM

Les classes du CPM sont regroupées en quatre sous classes comme illustré dans la figure 3.7 : abstraite, objet, relation, utile. Afin de rendre la représentation aussi robuste que possible sans devoir prédéfinir les attributs qui pourraient être appropriés dans un domaine donné, le CPM est limité aux attributs exigés pour saisir l'information générique de produit et pour créer les liens entre classes. Cette représentation exclut les attributs des domaines-spécifiques (par exemple, des attributs de dispositifs mécaniques ou électroniques) ou des objets spécifiques (par exemple, des attributs spécifiques à la fonction, à la forme ou au comportement).

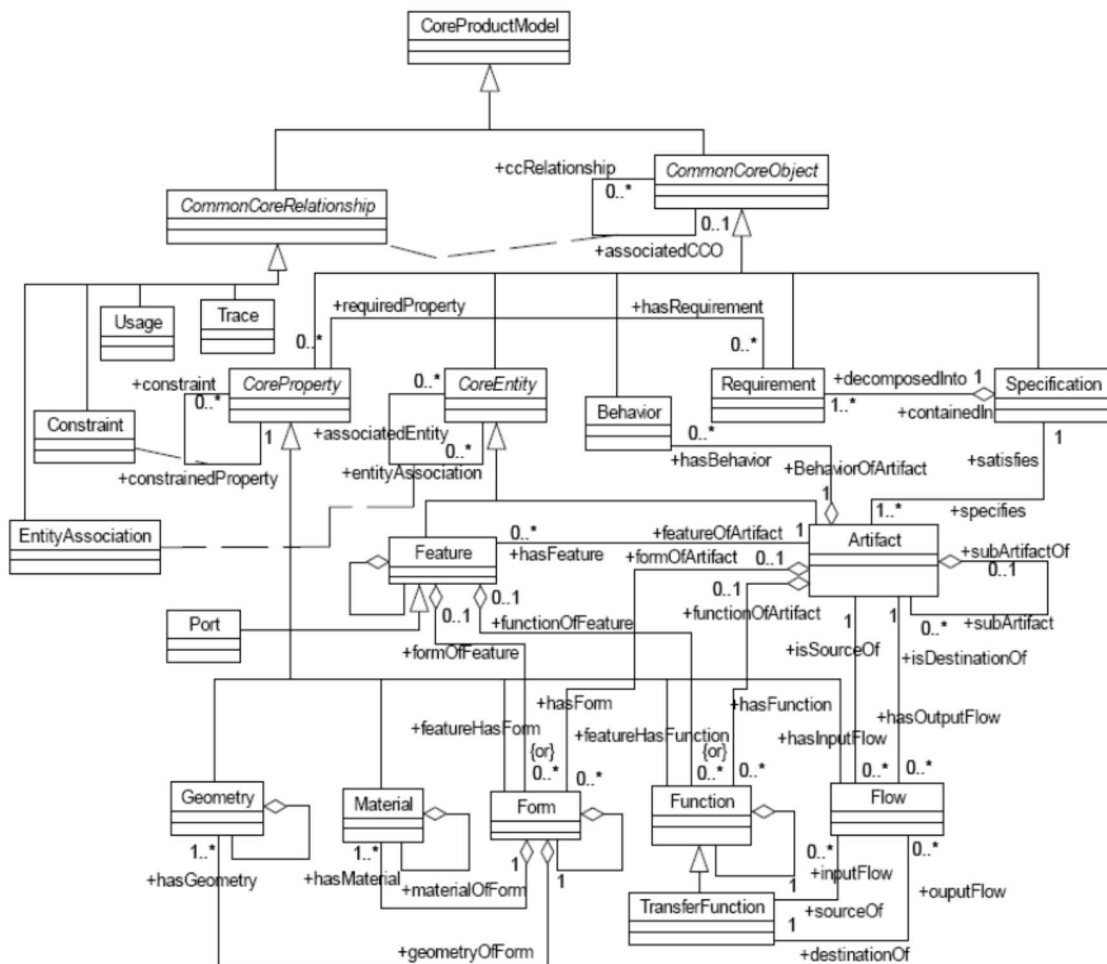


FIGURE 3.7 – Diagramme de Classe du CPM [3]

Le CPM offre trois aspects d'un produit ou d'un objet (artéfact), sa fonction, sa forme, son comportement. Ainsi, le CPM peut supporter le raisonnement purement fonctionnel au sujet d'un produit aux étapes conceptuelles du développement comme enregistrer et modéliser son comportement dans l'étape post-design.

Artéfact est la classe principale du CPM. Elle représente une entité distincte dans un produit, que ce soit un composant, une partie, un sous-assemblage ou un assemblage. Toutes ces entités peuvent être représentées et interconnectées à travers les liens sous-artéfact et sous-artéfact-de modélisés par une relation réflexive sur la classe Artéfact (relation ayant les rôles subArtifacts/subArtifactOf).

Une forme caractéristique (la classe Feature) est une partie de la forme physique d'un artéfact, destinée à assurer une fonction particulière. Selon sa fonction une forme caractéristique est dite de conception, d'analyse, de fabrication, etc. Une spécification (la classe Spécification) est une description dérivée des besoins clients et/ou des besoins d'ingénierie, elle représente l'ensemble des données pertinentes pour la conception d'un artéfact et incorpore les besoins spécifiques que la fonction, la forme, la géométrie et les matériaux d'un artéfact doivent satisfaire. Un besoin (la classe Requirement) est un élément particulier de la spécification d'un artéfact qui détermine un des aspects de sa fonction, de sa forme, de sa géométrie ou de ses matériaux [3]. Aussi, le CPM est représenté avec l'annotation UML.

### 3.3.3 Modèle d'assemblage ouvert (OAM : Open Assembly Model)

Étant donné que la plupart des produits manufacturiers sont des assemblages de plusieurs composants, la capture, la représentation des données d'assemblage et la gestion des assemblages font donc partie des éléments de base de la modélisation produit. C'est dans ce sens qu'est proposée l'extension du CPM, dite OAM. L'OAM décrit les composants et leurs relations dans un assemblage. Il s'appuie sur la norme d'échange de données STEP pour l'extraction des informations géométriques. Les autres informations relatives aux fonctions, formes, comportement, ajustement, etc. sont créées directement dans le modèle. L'utilisation combinée du CPM et de l'OAM permet de modéliser et d'échanger le flux d'informations générées pendant toutes les phases de la conception d'un objet manufacturé [3]. La raison de créer un modèle d'assemblage ouvert OAM était de fournir un standard de représentation pour le système d'assemblage avec l'information au niveau de tolérance des systèmes. L'OAM

### 3.4. Approche proposée

a été créé pour être extensible (modélisation en UML) (Figure 3.8). L'information sur les relations de l'assemblage et de la composition de produits est incorporée dans le schéma.

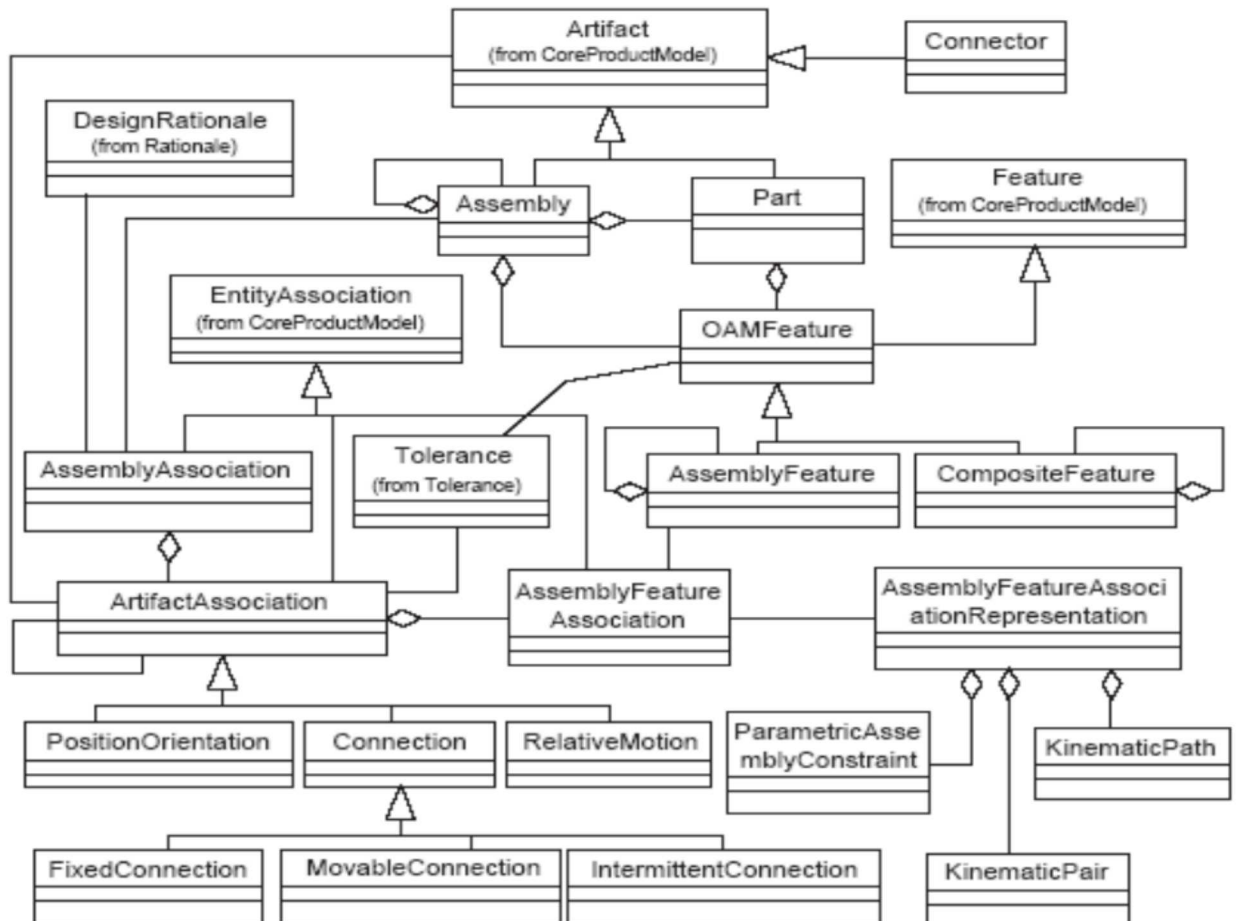


FIGURE 3.8 – Diagramme de Classe de l'OAM [3]

### 3.4 Approche proposée

Sur la base des travaux existants sur les types de modèles et processus de conception, nous avons pu identifier l'approche qui correspond au mieux à notre problématique. En effet, la re-conception est le type de conception approprié à notre travail, car elle permet d'aller d'un produit existant vers une nouvelle version. Le modèle en V est le modèle approprié, car il reste facile à utiliser avec des phases claires et per-



mettant des vérifications spécifiques, plus adaptées aux petits projets. Cependant, les modèles identifiés montrent une limite par rapport à leur déploiement, car la majorité semble orientée vers le logiciel. Aussi, les modèles proposés par la littérature ne traitent pas l'évolution et impact de changement des exigences. De ce fait nous avons choisi l'annotation **SysML** qui propose une représentation des exigences que nous n'avons pas trouvées même dans les modèles proposés par le **NIST** (**CPM** et **OAM**).

Notons que nous avons opté pour une approche hybride entre **SysML** et la méthode Application aux Techniques d'Entreprise (**APTE**). L'analyse fonctionnelle **APTE** est dédiée à améliorer (re-conception) le produit et permet de partir du besoin de l'utilisateur jusqu'aux solutions technologiques adaptées. **SysML** est utilisé pour intégrer la modélisation des exigences dans le modèle du **FR**. Notons qu'utiliser **SysML** pour concevoir ou re-concevoir un produit reste une approche difficile et complexe, car elle ne propose pas un processus à suivre (ordonné). Ainsi, d'un concepteur à un autre nous aurons différents processus ou organisation des diagrammes. Toutefois, la méthode **APTE** offre un processus structuré où les étapes à suivre sont organisées (Cahier des Charges Fonctionnel (**CdCF**) -> Fonctions -> Functional Analysis System Technics (**FAST**) -> Solutions technologiques.

## 3.5 Modélisation du FR

### 3.5.1 Analyse fonctionnelle

Les origines de la technologie se situent à la fin du XIXe siècle. Comparées à d'autres disciplines telles que les mathématiques ou la physique, on voit nettement, pour ce domaine, une certaine proximité temporelle avec notre époque. La technologie est jeune, mais cela n'occulte pas la complexité qui apparaît lorsque son étude est nécessaire. Sur l'origine de la technologie et sa complexité, nous pouvons nous référer à Grison en 1996 [174]. Cette vision donne bien une place complète à la technologie en tant que science et annonce que la technologie ne peut pas être considérée comme une simple adaptation de ce qui est « praxis », au sens d'activité pratique et « techné », au sens de savoir-faire [175]. Pour mettre en place cette technologie à quelque niveau que ce soit, industriel, éducatif, social, il faut s'appuyer sur des outils. L'analyse fonctionnelle traite de l'approche technique des systèmes. Elle repose sur plusieurs méthodes, et principalement utilisée lors de la conception ou l'amélioration



### 3.5. Modélisation du FR

---

d'objets techniques. L'objet technique peut toujours être perçu comme complexe, on ne peut s'arrêter à une analyse qui se baserait sur une perception subjective simple ou non de l'objet. Pour prolonger cette réflexion sur la complexité, on rencontre rapidement les problèmes posés par la description d'un système qui intègre différents composants.

L'analyse fonctionnelle vient du monde de la production industrielle, et plus précisément de ce que la technologie industrielle classe sous le terme « d'Analyse Systémique et Fonctionnelle [176].

Dans le monde industriel de la production, différentes méthodes issues de l'analyse fonctionnelle permettent de comprendre la dimension systémique d'un système technique [177]. L'analyse fonctionnelle s'applique à la conception ou la re-conception de « système » [178]. Le terme « système » est utilisé au sens large pour désigner un produit, un projet, un procédé ou une organisation. Dans le cadre de notre étude, le « système » est le FR.

L'analyse fonctionnelle est un ensemble de techniques utilisées en phase de création ou d'amélioration d'un produit pour identifier les vrais besoins, les quantifier, définir les vraies problématiques et saisir ce qui est important à obtenir. Comme le montre la figure 3.9, le produit peut être caractérisé par des besoins, des exigences techniques, des fonctions et des constituants. Dans la phase de conception d'un produit, les fonctions de service du produit sont identifiées à partir des exigences techniques découlant des besoins clients. Les fonctions de service peuvent ensuite se décomposer en différentes sous-fonctions de service qui elles même se décomposent en fonctions techniques et sous fonctions techniques. Les fonctions techniques sont réalisées par des solutions techniques.

#### 3.5.2 Les outils de l'analyse fonctionnelle

Avant d'imposer un "comment" ou une solution, il faut se tourner vers l'utilisateur et/ou le demandeur, pour aboutir de manière structurée à la solution, car un projet n'a de sens que s'il satisfait le besoin. Il convient donc d'exprimer le besoin et rien que le besoin dès le lancement du projet. Il s'agit d'explicitier l'exigence fondamentale qui justifie la conception ou la re-conception d'un produit. Dans le domaine de l'ingénierie, certaines méthodes sont souvent utilisées comme la méthode APTE, SADT [179] et FAST. D'autres méthodologies de conception avec une approche systémique ont commencé à émerger [180]. Par exemple, en informatique, UML semble

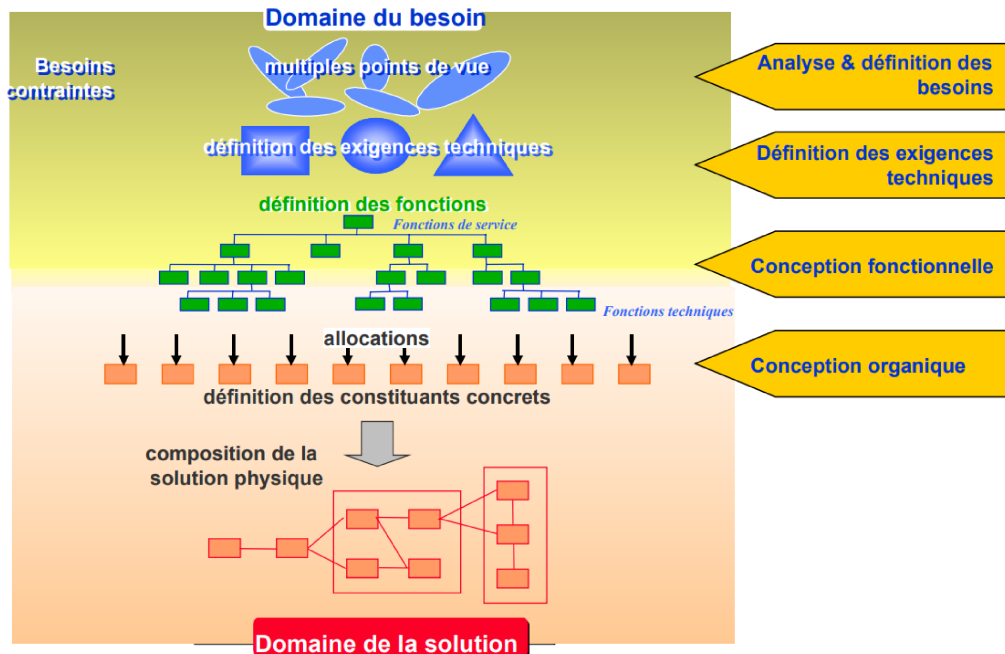


FIGURE 3.9 – Décomposition fonctionnelle et allocation aux organes des fonctions [4]

être un bon outil qui est maintenant spécialisé dans SysML [181] pour une approche système.

Nous allons maintenant expliciter quelques-uns des différents outils inhérents à l'analyse fonctionnelle. Ils peuvent se compléter et aller de descriptions et conventions élémentaires à des structures beaucoup plus complexes et élaborées.

### 3.5.2.1 La méthode APTE

Dans le cadre de notre travail, nous avons utilisé les outils de l'AF et plus particulièrement la méthode APTE qui est basée sur les étapes suivantes :

#### - Identifier le besoin

Le travail réalisé (questionnaire) nous a permis de recenser les expressions de besoins émises par les utilisateurs de FR.

Sur la base des exigences utilisateurs, nous allons réaliser une AF du système. La première étape consiste à définir les cas d'utilisation du FR (use cases). Sachant que la méthode APTE n'offre pas ce type de diagramme, nous avons fait appel au SysML. Le diagramme «use case» nous permet d'identifier les fonctionnalités du

### 3.5. Modélisation du FR

système et les personnes qui interagissent avec lui sur la base des exigences. Le diagramme de la figure 3.10 décrit le contexte du fauteuil.

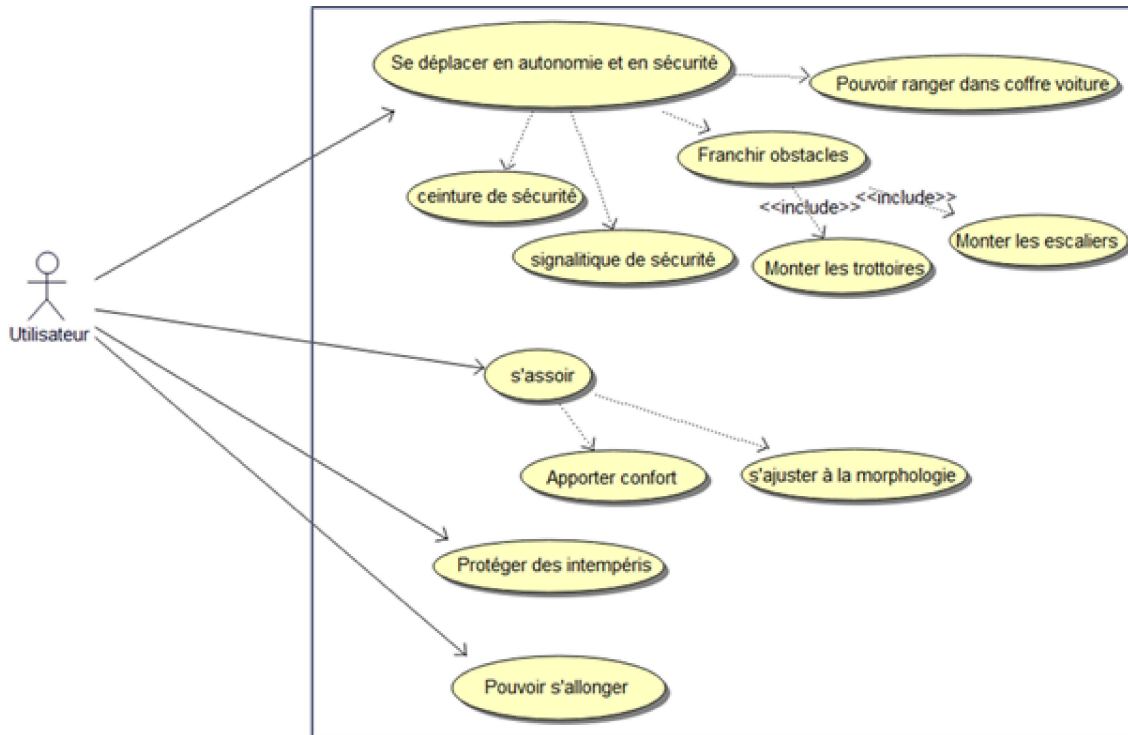


FIGURE 3.10 – Diagramme (Use case) du FR

#### - La construction d'un cahier des charges fonctionnel

Le CdCF constitue l'expression du problème auquel le produit conçu devra répondre, l'expression fonctionnelle du besoin. Ce cahier des charges est composé d'un ensemble hiérarchisé de fonctions externes, ou de service. IL permet au demandeur d'exprimer des besoins en termes de fonctions, sans faire référence à une solution technique.

#### - Positionnement du CdCF dans la conception d'un produit

Au début de la démarche de conception, le client doit passer par différentes étapes. La première action consiste à définir précisément ce qu'il attend du produit afin que la solution technique conçue, produite et mise en vente corresponde au maximum à ses attentes. La définition de l'attente du client est formalisée dans un document

normalisé appelé CdCF, qui « modélise » les attentes du client. La conception du produit, objet réalisé et vendu au client, consiste ensuite à trouver une solution technique répondant scrupuleusement ou en très grande partie à toutes les requêtes du client, donc à tous les critères du cahier des charges. Cette partie, nous allons la détailler dans la section modélisation SysML.

**- Diagramme FAST : Recherche des solutions (Avant-projet)**

Il permet de structurer les fonctions techniques envisagées pour remplir chaque fonction de service identifiée. Cette structuration se fait en décomposant la fonction de service en fonctions techniques de plus en plus élémentaires. La démarche de mise en œuvre du FAST est double. En effet, cet outil structure et formalise les réponses en se déplaçant vers la droite dans le FAST, et en synthétisant une combinaison de fonctions techniques. En se déplaçant vers la gauche dans le FAST, suite à l'analyse d'une solution (proposée ou existante, dans un cadre de re-conception). C'est-à-dire, la phase de conception initiale permet de chercher des solutions en partant de la fonction à réaliser. La phase de re-conception (analyse de la valeur), permet de savoir à quelles fonctions participent les différents éléments existants. Nous présentons trois exemples pour le FAST : **Éviter les obstacles**, **Adapter à la morphologie** et **Embarquer le module Intelligent** comme le montre les figures 3.11, 3.12 et 3.13.

### 3.5. Modélisation du FR

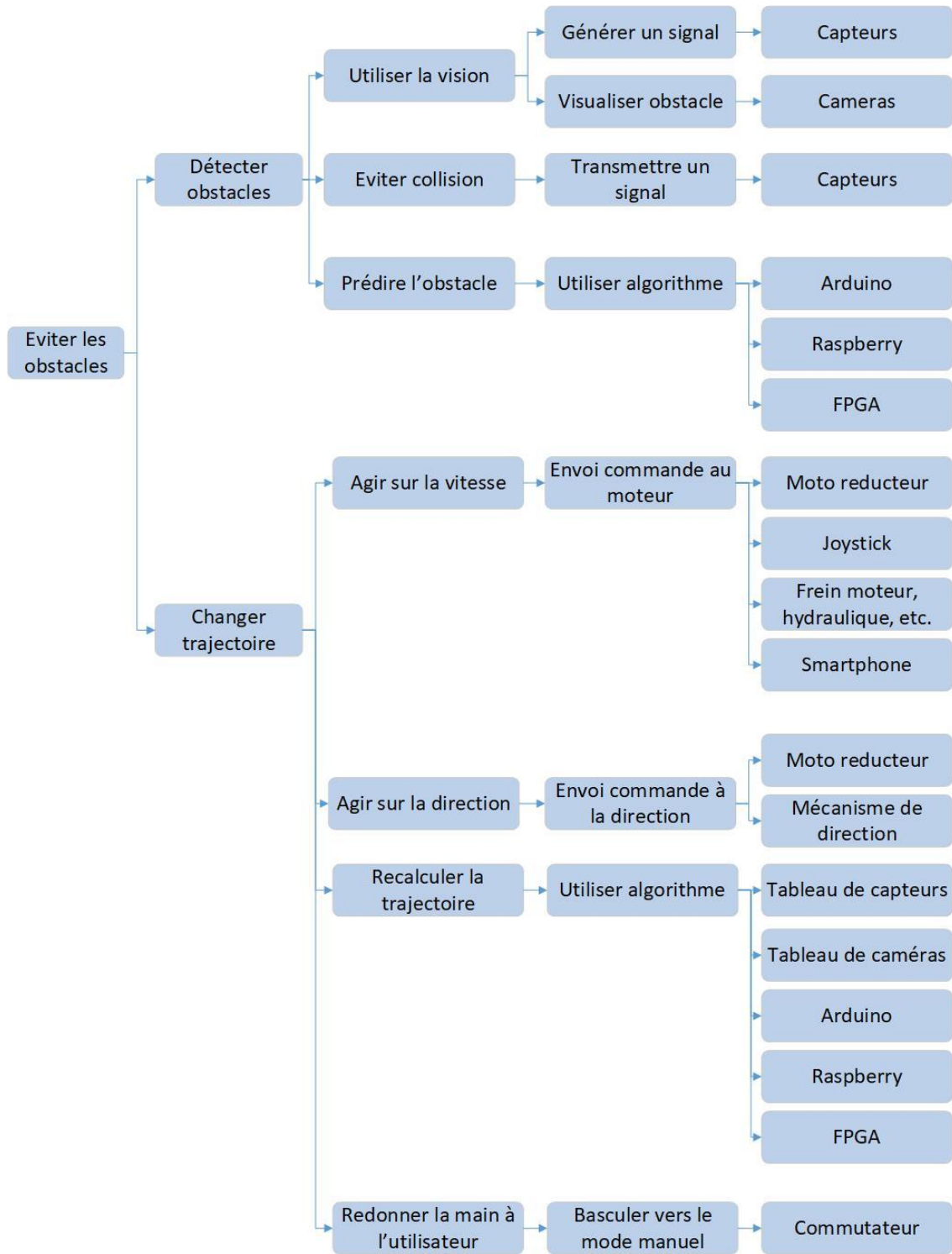


FIGURE 3.11 – Évitement d'obstacles

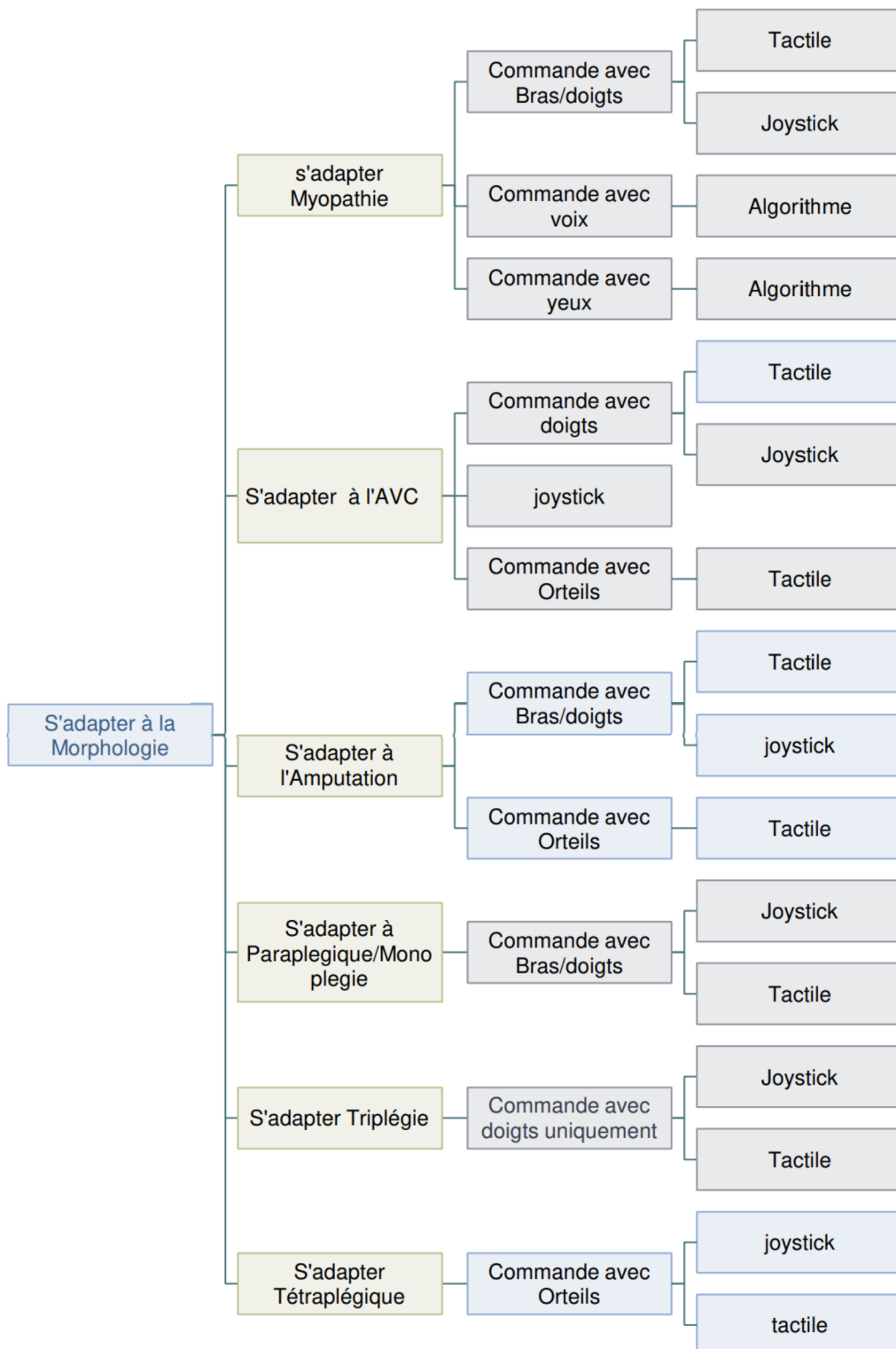


FIGURE 3.12 – Adaptation à la morphologie

### 3.6. Synthèse

---

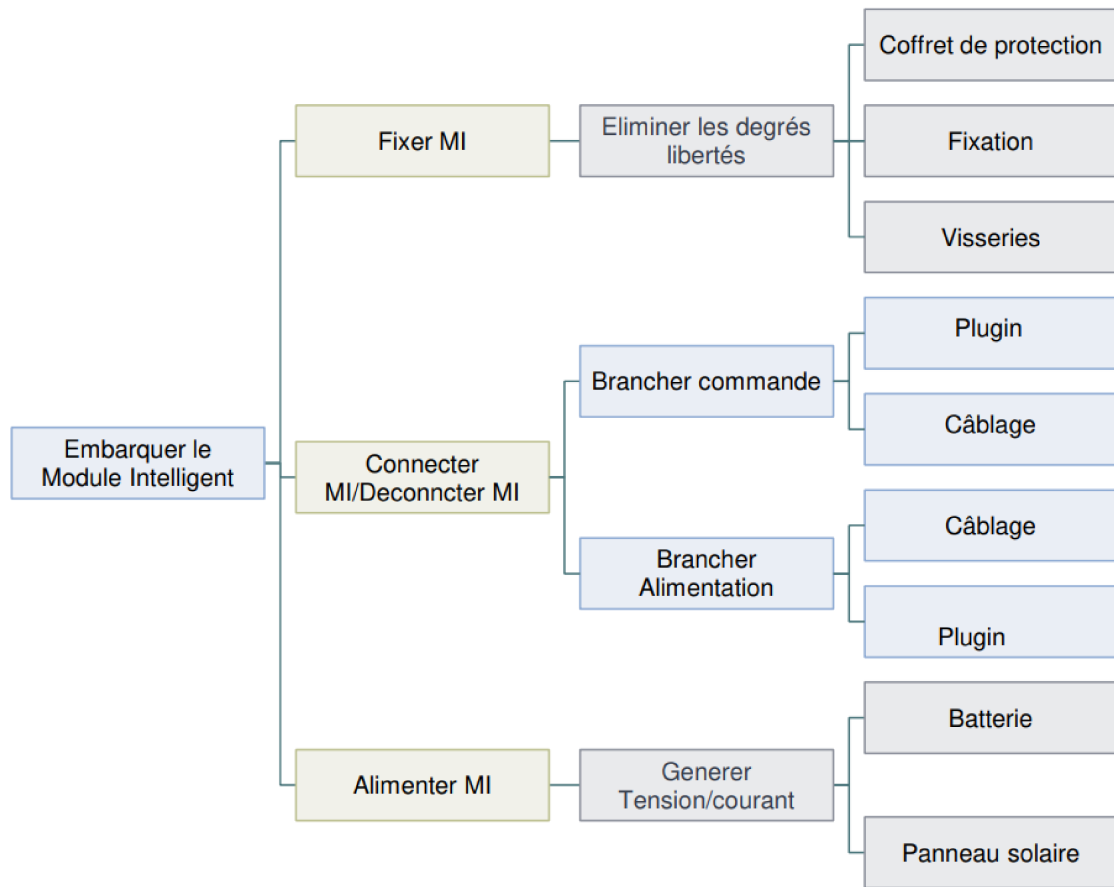


FIGURE 3.13 – Embarquement du module Intelligent

Les trois figures présentent la modélisation par FAST de l'analyse fonctionnelle et montrent bien le lien entre "Fonction" et "Solution technique".

## 3.6 Synthèse

L'analyse des exigences dans le contexte Algérien a permis de définir les fonctions ainsi que les solutions techniques pour le FRI.

Le FRI proposé dans la figure 3.14, est basé sur l'intégration d'un module intelligent à un FRM. Il s'agit d'une re-conception d'un FR pour permettre la détection des obstacles et un déplacement automatique grâce à des capteurs.

Ce système se compose de trois sous-systèmes : détection de l'environnement, module intelligent et partie puissance.

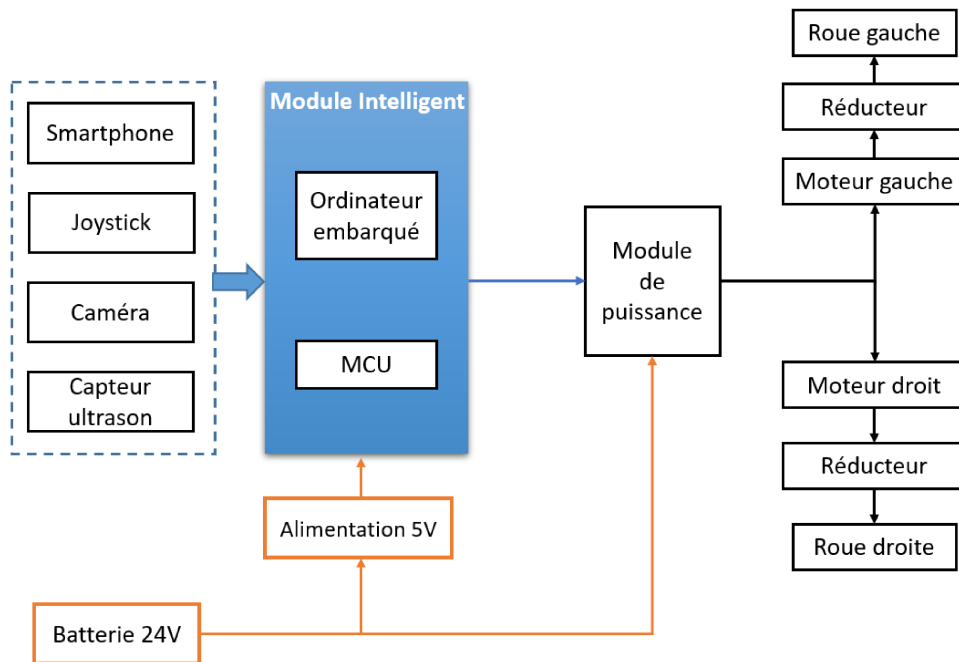


FIGURE 3.14 – Architecture du fauteuil intelligent

Le sous-système détection de l’environnement utilise des capteurs ultrasons et des caméras. Les capteurs ultrasons permettent de détecter les obstacles, mais présentent néanmoins un inconvénient à s’avoir un angle de rayonnement important. Les caméras vont venir améliorer la détection d’obstacles en ajoutant la vision et la reconnaissance des objets. Un joystick est utilisé en mode navigation manuelle. Il permet de commander la direction et la vitesse du fauteuil. Un smartphone sert à sélectionner les modes de navigation manuel ou automatique.

Le sous-système module intelligent, permet le traitement des données collectées grâce à l’ordinateur embarqué et la commande des moteurs grâce à l’unité Microcontrôleur (MCU).

Le sous-système puissance est composé du module de puissance et des deux moto-réducteurs. Ces derniers contrôlent les mouvements (la vitesse et la direction du FR) et sont actionnés par le module de puissance qui est contrôlé par le MCU. Aussi cette partie comporte la batterie (24 V) et l’alimentation du module intelligent (5V).

Le FRI sera composé d’une structure modifiée de FRM. Cette modification va permettre l’intégration du module intelligent ainsi que les accessoires nécessaires tels



### 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

---

que les capteurs, la caméra, les fixations, la batterie, etc. En données d'entrées, nous avons deux caméras et deux capteurs ultrasons.

Les capteurs ultrasons renseignent sur la distance entre le FR et les obstacles. Les caméras permettent la perception de l'environnement. Le fauteuil peut fonctionner soit en mode intelligent autonome, soit en mode manuel. Quand on bascule vers le mode manuel l'utilisateur du FR va avoir la possibilité de commander le fauteuil et d'agir via un joystick ou un smartphone.

## 3.7 Analyse Fonctionnelle en langage SysML

### 3.7.1 Introduction

Le déploiement progressif de la technologie et l'accroissement des exigences des utilisateurs poussent les fabricants à améliorer de plus en plus les performances des produits manufacturiers modernes. Ces produits deviennent chaque jour plus complexes, car intégrant des composants de technologies différentes et avec plus de fonctionnalités. La phase de collecte des exigences est une étape clé pour le succès de tout projet [182]. Il vise à traduire/représenter les besoins du client dans un formalisme plus précis qu'un cahier des charges par exemple.

L'analyse des performances d'un produit en conception permet de prédire son comportement, d'anticiper sur ses défaillances, de faciliter sa maintenance, d'améliorer sa productivité, de réduire son coût, de respecter les délais de fabrication, etc. Pour cela il est nécessaire de pouvoir concevoir la représentation la plus fidèle possible du produit à fabriquer. Cette représentation peut se faire avec un langage de modélisation, un logiciel de modélisation géométrique 3D, un outil de création de prototypes physiques [183], etc.

Les approches telles que l'ingénierie des systèmes offrent un ensemble de démarches méthodiques associées à des outils qui permettent de concevoir, de développer et d'exploiter des systèmes techniques complexes [184]. Ces outils permettent de donner une représentation de la réalité sous des formes simplifiées en fonction des besoins : C'est l'objectif de SysML. SysML est présenté comme un langage de modélisation dédié à l'ingénierie système. Il permet de spécifier les systèmes, de concevoir, définir et analyser leur structure et leur fonctionnement dynamique, de simuler leur comportement afin de valider leur faisabilité avant leur réalisation.

Il permet également un modèle à vues multiples et la création de liens de traçabilité. Ce langage relativement récent est déjà largement utilisé dans les mondes industriel et académique.

Nous avons donc décidé d'utiliser le langage SysML pour différentes raisons. Tout d'abord, bien que récent, il est en pleine expansion et de plus en plus utilisé, dans un certain nombre d'entreprises (Motorola, IBM, Thales, EADS, etc.) pour modéliser les produits complexes [185] [186].

Cette tendance devrait continuer dans ce sens, au vu des systèmes de plus en plus complexes qui sont conçus dans les industries. Le langage s'avère en effet être d'une aide précieuse.

### 3.7.2 Modélisation du système avec SysML

La complémentarité tient dans le fait que l'Analyse fonctionnelle est une méthodologie d'expression du besoin des utilisateurs en termes de finalité, alors que SysML est un langage de modélisation qui s'appuie en entrée sur cette expression de besoin pour formaliser la solution sous forme de différents diagrammes dépendant de la solution retenue. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés au langage SysML pour concevoir le modèle des composants, des liaisons et des exigences fonctionnelles des classes de produits complexes.

SysML est basé sur UML et remplace la modélisation de classes et d'objets par la modélisation de blocs pour un vocabulaire plus adapté à l'IS. Un bloc englobe tout concept logiciel, matériel, données, processus, et même la gestion des personnes. On peut classer le diagramme selon les trois piliers de modélisation (3.15), : les diagrammes structurels, comportementaux et le diagramme lié aux exigences.

#### Diagrammes comportementaux

En SysML, le comportement d'un système peut être modélisé à l'aide de quatre diagrammes :

- Le diagramme de cas d'utilisation représente les fonctionnalités du système à travers les différents acteurs et les cas d'utilisation du système.
- Le diagramme d'activité permet de modéliser un comportement sous la forme

### 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

---

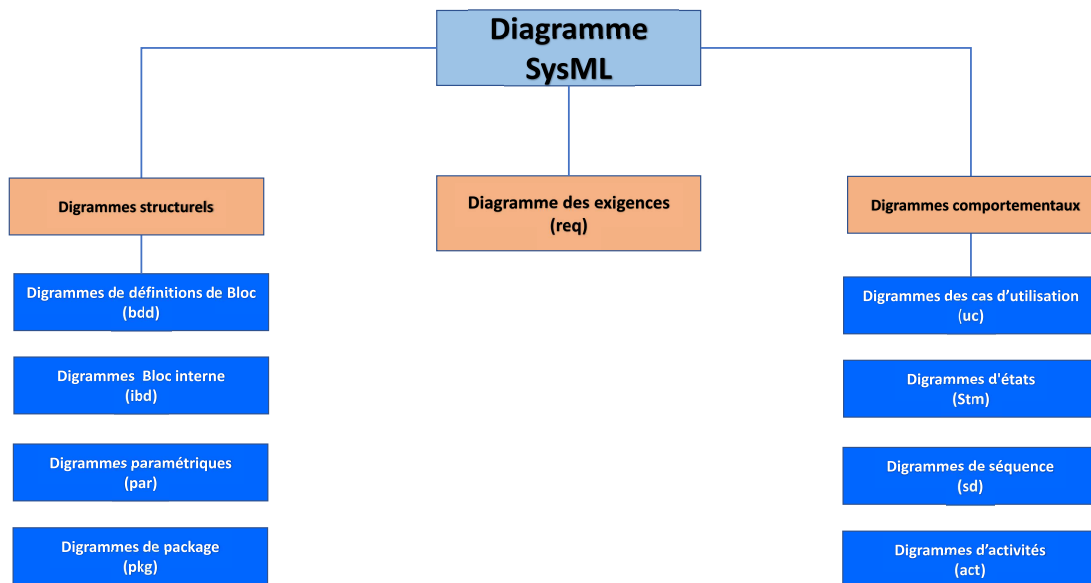


FIGURE 3.15 – Diagramme SysML

d'une suite d'actions transformant des flux de matière, d'énergie ou d'information.

- Le diagramme d'états décrit les transitions entre états et les actions qu'un système réalise en réponse à des événements.
- Le diagramme de séquence permet de représenter les échanges entre différentes parties d'un système, et avec des systèmes ou acteurs externes au système. Il décrit, en particulier, les cas d'utilisation

#### Diagrammes structurels

- Le diagramme de définition de blocs décrit la composition hiérarchique d'un système (arborescence), ainsi que les associations entre les différents constituants d'un système. Ce diagramme peut également être utilisé pour représenter une décomposition fonctionnelle des activités.
- Le diagramme de package montre l'organisation générale du modèle avec les différentes vues du système.

- Le diagramme de bloc interne décrit la structure interne d'un système en termes de parties (parts), ports, interfaces et connecteurs.
- Le diagramme paramétrique permet de modéliser les contraintes subies par les variables du système sous forme d'équations physiques ou d'algorithmes plus complexes.

### Diagramme des exigences

- Le diagramme modélise les exigences devant être vérifiées par le système en liant les solutions mises en œuvre sur le système avec les besoins définis dans le cahier des charges.

Les diagrammes peuvent être reliés les uns aux autres par des allocations entre les blocs, les exigences, les activités, etc. Ces allocations sont répertoriées dans une table d'allocations synthétisant l'ensemble des allocations dans le modèle.

Nous ne nous intéresserons pas à l'ensemble de ces neuf diagrammes, certains nous paraissent moins utiles quant à l'exploitation des informations pour notre modélisation. Ainsi, nous ne nous attardons pas sur les diagrammes de package et de cas d'utilisation. Le diagramme des exigences sera présenté lors de la modélisation.

Pour la représentation des blocs, nous avons utilisé Astah SysML<sup>4</sup> un langage de modélisation graphique à usage général qui prend en charge la conception, la spécification, l'analyse et la vérification de systèmes complexes à l'aide de modèles et de pratiques proposés par l'OMG (Object Management Group)<sup>5</sup>. Toutes les spécialités d'ingénierie, de la mécanique à l'électronique en passant par le génie logiciel, disposent d'un langage commun pour concevoir des architectures de systèmes complexes. Astah SysML est un outil de modélisation qui nous a permis de dessiner rapidement des diagrammes SysML avec une interface fine et un design intuitif.

#### 3.7.2.1 Définition de la mission du FR

La définition du problème est une première étape en langage SysML pour modéliser une telle analyse. Le système répond à une finalité qui est une mission du FR en langage SysML, comme représentée dans la figure 3.16.

---

4. <https://astah.net>

5. OMG Systems Modeling Language<sup>TM</sup> – <https://www.omg.org>

### 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

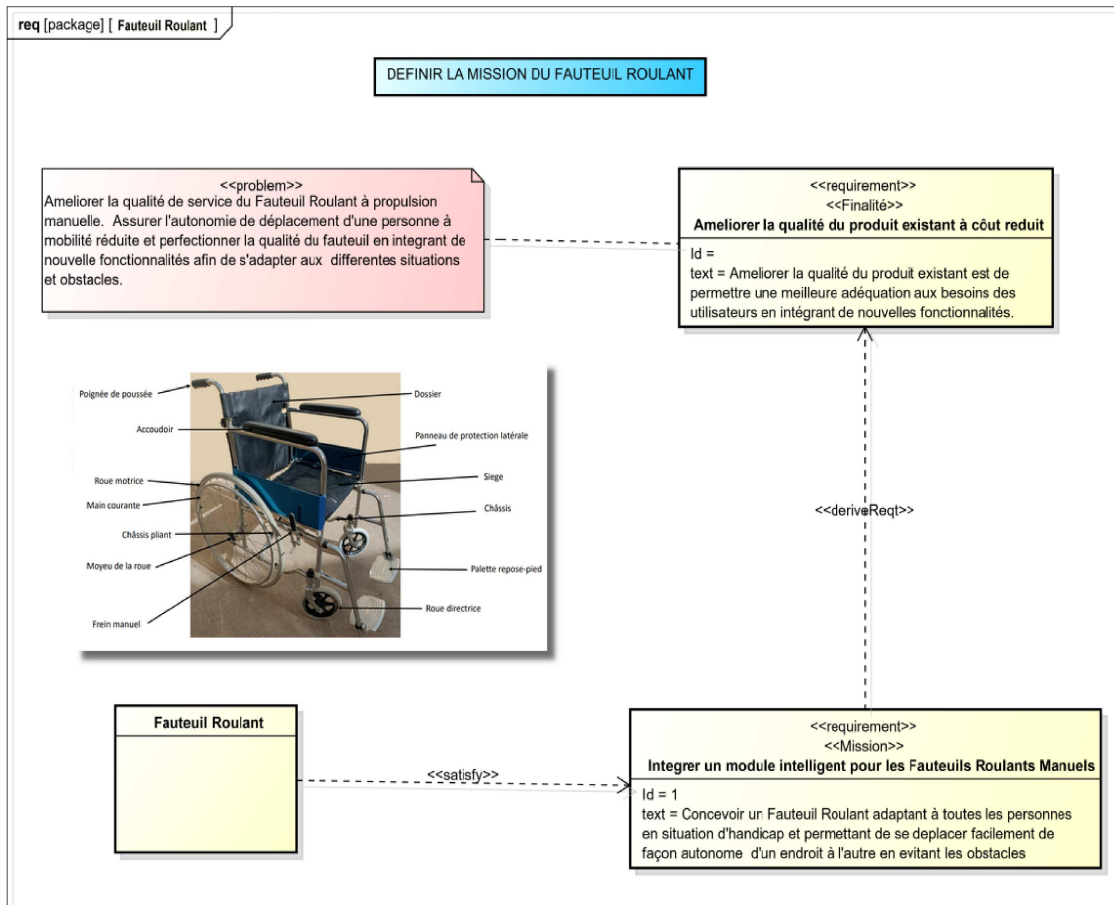


FIGURE 3.16 – Définition de la mission du FR

#### 3.7.2.2 L'analyse du Besoin

L'analyse du besoin a pour objectif de savoir « dans quel but » le produit est construit. Elle constitue une étape fondamentale permettant de poser un problème en termes de finalités et sert de base pour élaborer le cahier de charges du produit. Il faut donc en premier lieu analyser l'impact sur la conception du système de chaque revendication de l'utilisateur du FR.

Après la collecte des données à partir du questionnaire, nous avons recueilli toutes les informations que nous avons mis sous formes d'un cahier des charges. Pour expliciter la caractérisation des fonctions, on réalise un tableau d'appréciation ou de caractérisation des fonctions qui permet d'associer à chaque fonction identifiée les critères d'appréciation, niveaux et flexibilité qui quantifient la performance attendue pour chacune de ces fonctions, comme le montre le tableau 3.1.

Tableau 3.1 – Cahier des charges FR.

Expression	Critère	Niveau d'appréciation	Flexibilité
Déplacer l'utilisateur sur le sol	Vitesse Distance Accélération	0 à 6km/h 10km/jour 3,14 m/s <sup>2</sup>	±2km/h D >10 Mini
Protéger l'utilisateur des intempéries	Résistant à la température Matériau Léger et solide	20° Inoxydable	±5°
Manipuler facilement	Dimensions Poids Hauteur sol/assise Gabarit	Lxlxh=1,25 x 0,75x1,10 P=19 Kg 42 cm (1,25 x 0,75) m	±0,2x0,2x0,5m P<= 22Kg ±3cm ±0,2x0,2
Résister aux intempéries	Étanchéité : 1.Eau 2.Poussière 3.objets Température	IP 55* Norme Étanchéité IP 55* Norme Étanchéité  19°	Aucune   +3° et - 2°
Éviter et contourner les obstacles	Capteur : 1-Position Sécurité Distance Trajectoire	Nombre de capteurs Frontaux et profonds  Champ de 0 à 2 m	1≤Cp≤15 Fr ±2 Pr ±2  ±1m
Franchir les trottoirs	Dimensions Inclinaison de la Pente	1mx0,30 ≤6%	±2cm ±1%
S'adapter aux escaliers	Marche et contre marche Pente Chenille	20 cm 0,65	±2cm ±2%
S'adapter à l'handicap, morphologie, l'âge, etc.	Utilisation Confortable  Préhension Ajuster	Simple Simplicité d'accès (Confort orthopédique) Facile	
Rentrer dans un coffre de voiture.	Taille Poids de charge max Volume Structure	59 X 62 X 36 cm 90 Kg  Acier et double croisillon Aluminium	±5 Kg
Respecter les normes de sécurité	Norme Internationale	FRM : NF EN 12183 FRE: NF EN 12184	Aucune Aucune
Pouvoir contenir un sac, cartable, affaires scolaires, etc.	Bac rigide Support	15cmx15cm	±2cm
Se connecter à une source d'énergie électrique	Batterie : taille Type d'alimentation Durée d'autonomie Temps de charge Energie de charge	181 x 76 x 167mm Autonome 12V 20 Ah 6 Km 4 h 220 v/50Hz	±2x3x2mm ±4 Ah ±3Km Plus 3 h Aucune
Permettre d'embarquer les nouvelles technologies (smart) et les alimenter	Réactivité : le temps Autonomie Robustesse : pas d'erreur Pas de défaillance Coût/efficacité Energie de charge		

### 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

---

Expression	Critère	Niveau d'appréciation	Flexibilité
Être accessible par les salaires minimaux	Prix raisonnable	18000 - 22000 DA	±1000 DA
Être maniable par une personne	Petit Leger Maniable Poids max supporté Matériaux solides	125 kg	± 5 Kg
S'adapter à l'ascenseur et aux élévateurs	Poids du fauteuil Dimensions	P=23 Kg Lxlxh=1,25 x 0,75x1,10	P<= 28Kg

#### 3.7.2.3 Modélisation fonctionnelle avec le diagramme des cas d'utilisation

Comme représenté sur le diagramme SysML, nous commençons par l'intégration du modèle déjà développé (chapitre 2 figure 2.1). Le diagramme de cas d'utilisation permet, comme son nom l'indique, d'expliquer comment un système ou un objet technique est utilisé. Aussi, il explique les lots d'actions que réalisent les acteurs avec le système. Un diagramme des cas d'utilisation répertorie les fonctions d'usage que le système offre à chacun de ses acteurs-utilisateurs afin de satisfaire leurs besoins [187]. Les cas d'utilisation déterminent ce que le système est censé faire, et non comment il le fait (Figure 3.17).

L'analyse du modèle en diagramme cas d'utilisation permet de mieux comprendre le contexte Algérien, différent, du contexte européen. Sur cet axe, nous constatons que la classe utilisateur décrit le profil de la personne mettant l'accent sur la situation professionnelle, le type de maladie, la capacité financière, son impact, et aussi l'acceptation des nouvelles technologies. La classe utilisateur paraît très importante pour la conception des FR. Dans le contexte algérien, la plupart des personnes handicapées dépendent de l'assistance de leur entourage, en particulier de leurs familles (voir chapitre 2 section 2.2).

#### 3.7.2.4 Modélisation fonctionnelle avec le diagramme des exigences

SysML définit une exigence comme une aptitude ou une condition qui doit être satisfaite. Le diagramme des exigences est une représentation graphique des exigences. Son but est de spécifier les exigences fonctionnelles et non fonctionnelles à l'intérieur du modèle, ces diagrammes rendent toutes les relations entre les différents aspects du système transparentes et accessibles dans un seul diagramme. Les différents éléments du modèle d'un diagramme d'exigences permettent d'accéder fa-

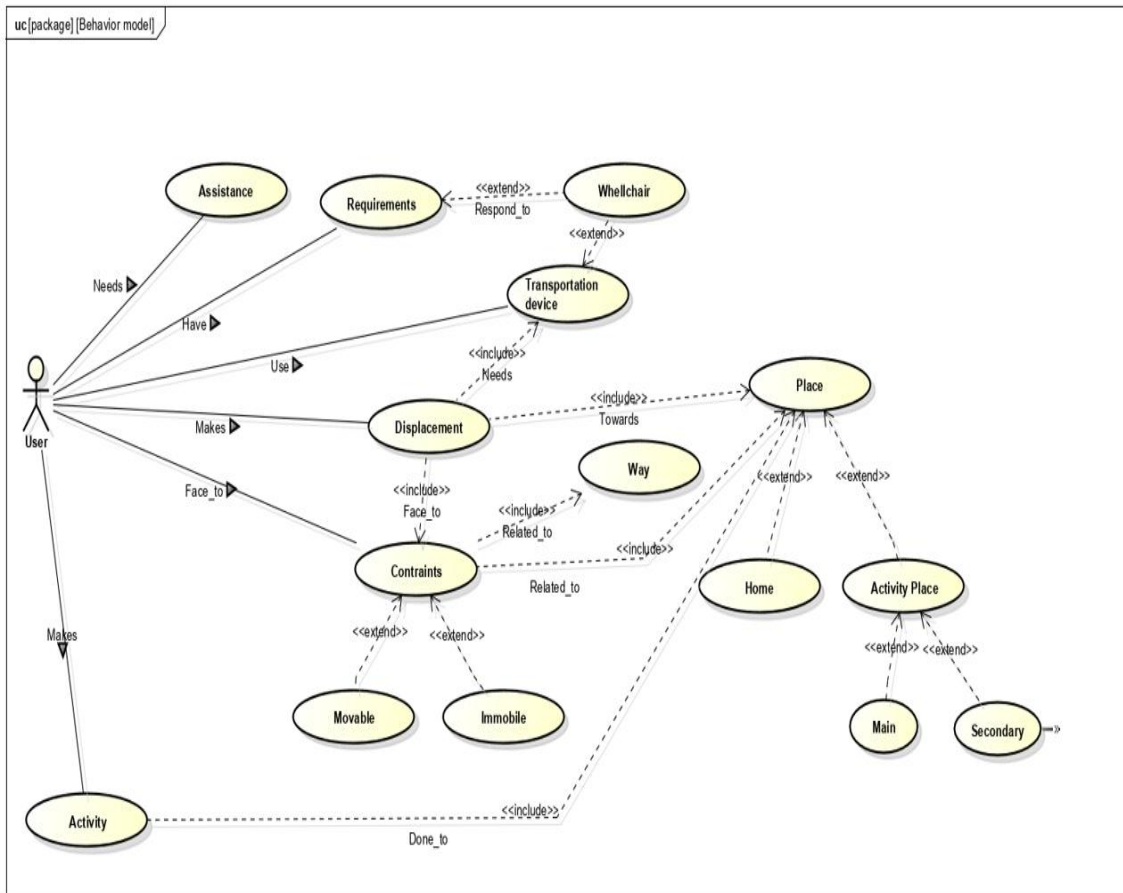


FIGURE 3.17 – Comportement du modèle

cilement aux éléments essentiels du processus de conception. En outre, ils assurent la traçabilité entre ces éléments. Les exigences sont le moyen idéal de transformer les objectifs des parties prenantes en modèles réalisables. Chaque exigence est définie par son nom, sa description et son propre identifiant unique. Les exigences peuvent être organisées et liées entre elles de différentes manières. Tout d'abord, il est possible de décomposer une exigence en sous-exigences. On utilise pour cela la relation de contenance («containment»). Cela permet de décomposer une exigence complexe en une hiérarchie de sous-exigences. Pour que l'exigence complexe soit vérifiée, il faudra que l'ensemble des sous-exigences le soit. Le raffinement (« refine ») consiste en l'ajout de précisions, par exemple de données quantitatives, ainsi la dérivation (« deriveReq ») consiste à relier des exigences de niveaux différents par exemple des exigences système à des exigences de niveau sous-système. La Figure 3.18 représente



## 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

---

la modélisation des exigences en partant des besoins des utilisateurs qui est définie par un identifiant (champ Requirement ID) qui représente le numéro d'exigence, hiérarchisé en fonction du degré de raffinement de l'exigence (par exemple l'exigence 3 est d'un niveau plus abstrait que l'exigence 2.2 qui est raffinée à partir de l'exigence 3.1 elle-même découlant de l'exigence 3).

### 3.7.3 Analyse Structurale (Interne)

Dans cette partie nous allons décrire l'architecture et l'organisation interne des blocs du système traité.

#### -Chaînes fonctionnelles

Quel que soit un système automatisé peut être modélisé avec une chaîne fonctionnelle composée de la chaîne d'information et de la chaîne d'énergie. La chaîne fonctionnelle est utilisée dans la conception et surtout dans l'amélioration d'un système. Elle permet d'avoir une vue d'ensemble sur les fonctions d'un système et sur les flux d'énergie, d'information ou de matière d'œuvre comme l'illustre la figure 3.19.

#### -Chaîne fonctionnelle du FR

La structure du FR définit ses différents constituants (matériels ou immatériels), donc les solutions techniques (Figure 3.20).

#### -Diagramme de définition de blocs

En SysML, un diagramme de définition de bloc (bdd) définit les caractéristiques des blocs et les relations entre les blocs telles que les associations et les dépendances, c'est-à-dire chaque composant ou sous-système est représenté par un bloc. Le bdd représente la liste des blocs réalisant le système, classés hiérarchiquement (Figure 3.21).

Il peut s'agir évidemment d'éléments physiques, tels que les moteurs, les capteurs, les caméras et la batterie, mais aussi d'éléments immatériels. Cette étape est cruciale, puisque si un élément n'est pas présent dans cette partie du modèle, il ne pourra pas être considéré comme un composant à utiliser pour la modélisation. L'idée est de descendre petit à petit d'un niveau de détail global avec le système entier, à un niveau

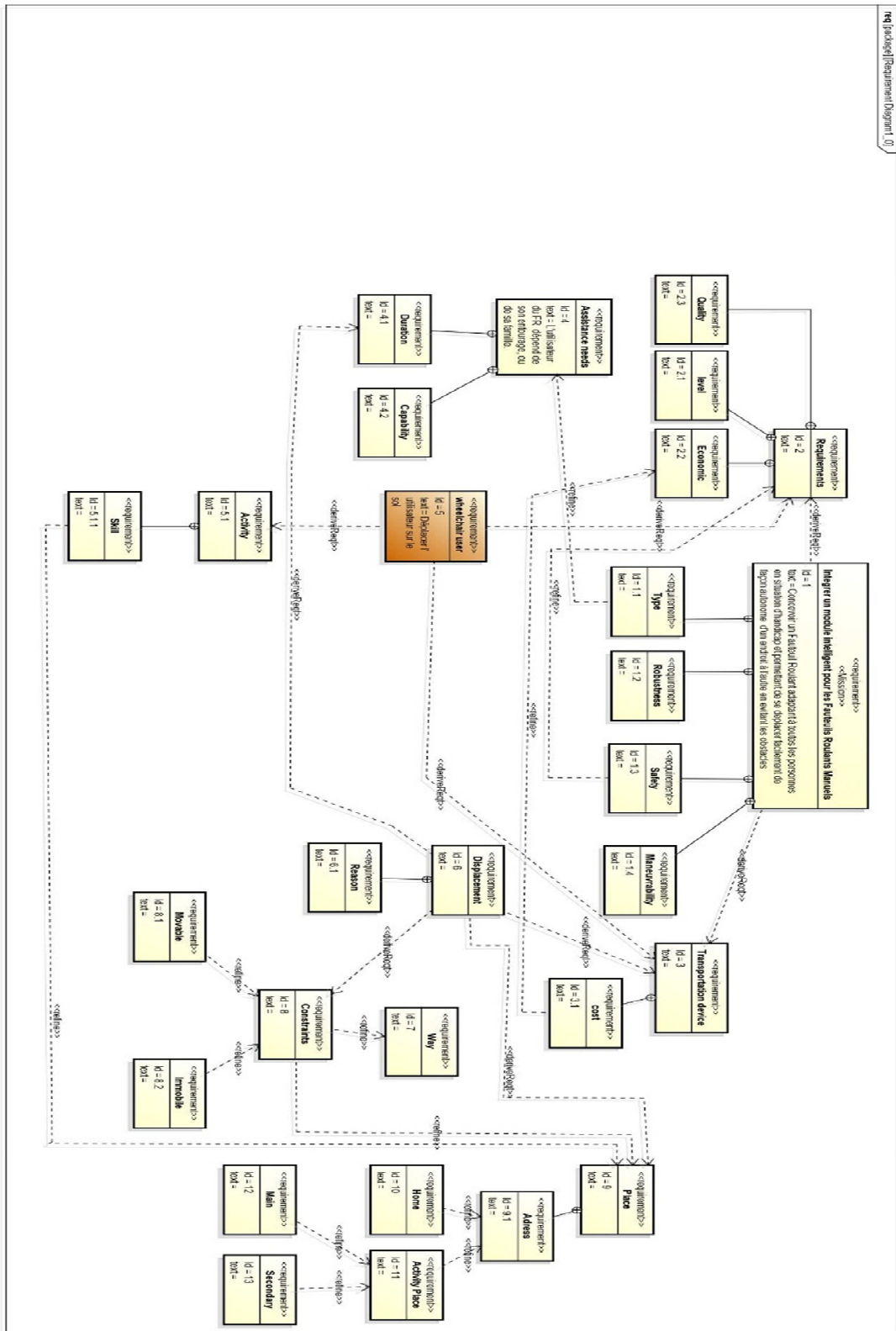


FIGURE 3.18 – Diagramme d'exigences.

### 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

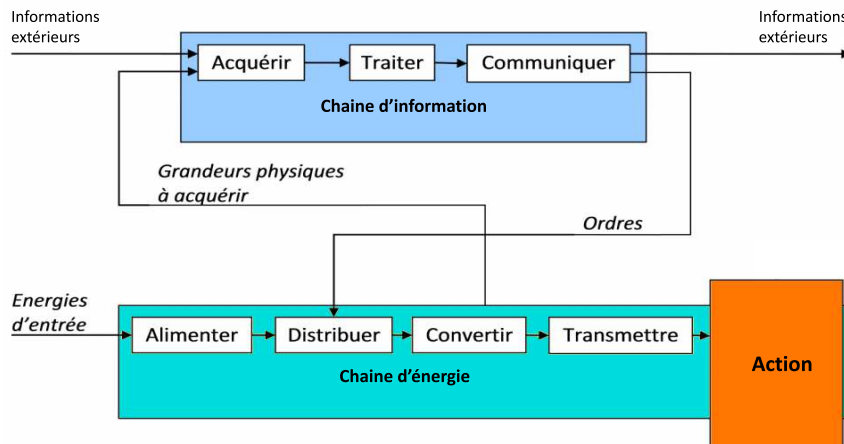


FIGURE 3.19 – Chaînes fonctionnelles (chaînes d'énergie et d'information).

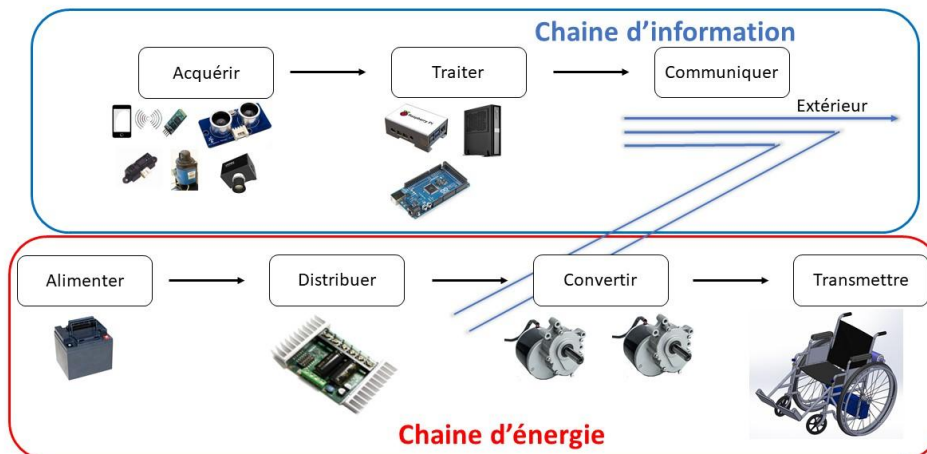


FIGURE 3.20 – Solutions techniques d'une chaîne fonctionnelle du FR.

intermédiaire avec les sous-systèmes, jusqu'au niveau le plus bas où l'on retrouve les composants. Dans notre cas, deux sous-systèmes sont créés : le système mécanique et le système électrique comme le montre la figure 3.21. Ensuite, on crée un bloc pour chaque type de composant présent dans le système. Pour la présentation, nous avons utilisé l'outil Astah SysML.

Cette première étape met en évidence une règle à respecter lors de la modélisation est que chaque composant du système doit correspondre à une instance de bloc (aussi

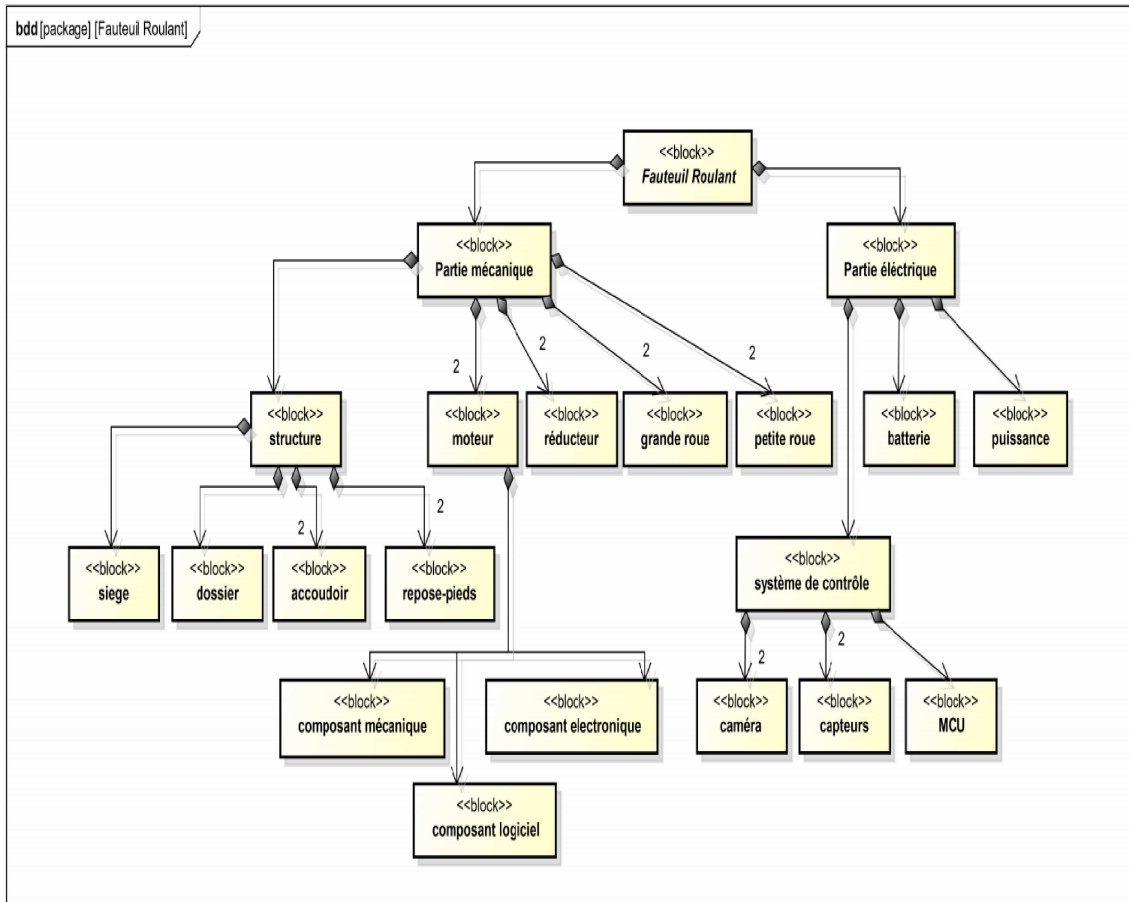


FIGURE 3.21 – Diagramme de définition de blocs (bdd).

appelé parts) dans le modèle.

### Diagramme de blocs internes

Le diagramme de bloc interne modélise la structure interne d'un bloc. Il représente les blocs qui le composent et leurs échanges (flux) à travers des ports (représentés sur la frontière de chaque bloc). La figure 3.22 présente la partie du diagramme de bloc interne du FR par l'outil Astah SysML. Les éléments du système peuvent être reliés physiquement (contact entre deux éléments) ou par un échange de matière, d'énergie ou d'information. Dans le cas de cet échange, il faut créer des ports d'entrées/sorties pour représenter ces échanges. Cela définit une autre règle à respecter lors de la modélisation est que chaque liaison physique et échange entre composants doit être modélisé sur un diagramme de bloc interne.

### 3.7. Analyse Fonctionnelle en langage SysML

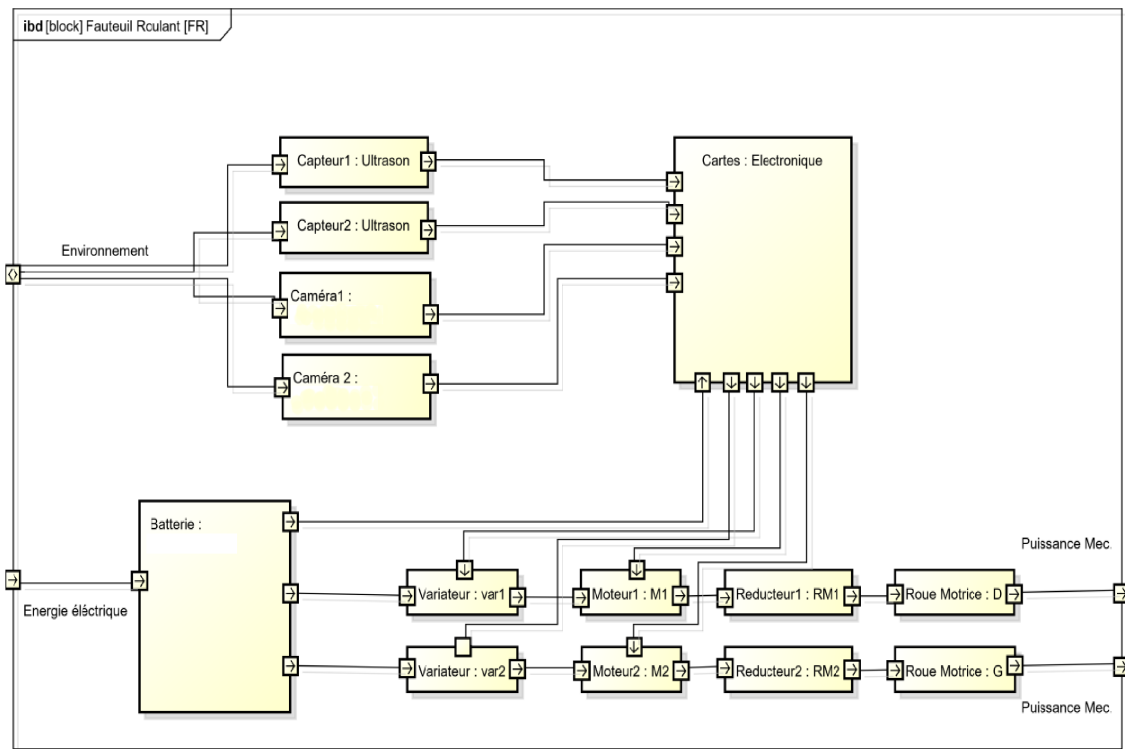


FIGURE 3.22 – Diagramme de blocs internes.

## 3.8 Conclusion

La modélisation est une représentation théorique ou physique, abstraite qui se veut la plus fidèle possible d'un objet du monde réel. Elle est faite avec un outil de modélisation dans le but de représenter le point de vue fonctionnel et/ou structurel et/ou comportemental pour résoudre un problème posé, avec l'objectif principal de fournir des produits innovants, performants, répondant aux exigences des utilisateurs du **FR** et à moindre coût.

L'analyse de la littérature nous a permis d'identifier la méthode de conception et les outils pouvant être utilisés. Notre analyse comparative nous a orienté vers la re-conception et une hybridation entre la méthode APTE et l'outil de modélisation **SysML** afin de structurer notre modélisation et la lier aux exigences.

Nous avons identifié des modèles de produits tels que le CPM et l'OAM. La limite de ce type de modèle réside dans l'utilisation du langage de modélisation inadapté. En effet, le **SysML** est plus adapté que l'**UML** dans la modélisation des systèmes. Ainsi nous avons pu combler le manque de diagramme des exigences que nous ne trouvons pas dans **UML** et qui est présent dans **SysML**.

La modélisation suit un processus bien défini et qui commence par l'analyse des exigences jusqu'au modèle final. L'**AF** permet d'optimiser la conception ou la re-conception de produits en s'appuyant sur les fonctions que doit réaliser le produit. La méthode APTE permet le déploiement de l'analyse fonctionnelle afin de modéliser et réaliser une analyse de la valeur (coût) du produit. Elle permet aussi de structurer notre modélisation à travers des étapes successives. Cependant, elle ne permet pas le lien entre les exigences et le modèle de produit qu'offre **SysML** à travers le diagramme exigences. Ce travail nous a permis d'identifier le manque de liens entre les exigences et les solutions technologiques, processus de fabrication, chaîne d'approvisionnement, etc. En effet, **SysML** offre un diagramme d'exigences lié aux autres diagrammes, qui reste statique. Ainsi, l'impact de changement d'exigence ne peut pas être évalué dans l'analyse de la valeur. Dans le chapitre suivant nous allons aborder le concept de traçabilité des exigences à travers l'analyse de l'impact de changement d'exigences sur le coût de système de production, le **FR** dans notre cas.

# Impact de changement d'une exigence sur le système

---

## Sommaire

---

<b>4.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>113</b>
<b>4.2</b>	<b>Re-conception d'un FR dans le contexte algérien</b>	<b>114</b>
<b>4.3</b>	<b>Ingénierie des Systèmes</b>	<b>115</b>
4.3.1	Normes d'IS	116
4.3.2	L'ingénierie des systèmes basée par les modèles	116
<b>4.4</b>	<b>Ingénierie des exigences</b>	<b>117</b>
4.4.1	Différents types d'exigences	119
4.4.2	Liens entre les exigences	119
<b>4.5</b>	<b>Impact des changements d'exigences</b>	<b>120</b>
4.5.1	Impact de la modification des exigences sur les fonctions du produit	121
4.5.2	Modèle d'optimisation des coûts de l'impact des exigences	122
<b>4.6</b>	<b>Implémentation</b>	<b>126</b>
4.6.1	Impact des fonctionnalités sur les exigences	126
4.6.2	Impact des composants techniques sur les fonctionnalités	130
<b>4.7</b>	<b>Conclusion</b>	<b>136</b>

---

## Résumé



*es exigences des utilisateurs des pays en voie de développement diffèrent de celles des pays développés. Cette différence se manifeste par le déplacement des **FR** dans des infrastructures qui ne répondent pas aux normes internationales. Cependant, les pays en voie de développement sont souvent amenés à importer des produits et qui ne répondent pas nécessairement à toutes les exigences des utilisateurs. Ainsi, leur adaptation va impliquer la modification des exigences. Ceci va se répercuter sur l'ensemble de la chaîne d'approvisionnement. Ce chapitre propose un modèle pour optimiser le coût de la modification des exigences sur la chaîne d'approvisionnement et cherche à introduire une nouvelle exigence sur un produit/process existant. Ce modèle est adapté à la re-conception et au développement de produits, tels que des **FR**, répondant aux exigences des personnes handicapées en Algérie.*



# 4.1 Introduction

L'industrie européenne se repositionne sur la production de forte valeur ajoutée, à savoir la production de systèmes de plus en plus complexes et souvent reliés entre eux [188].

Elle se dote de moyens de plus en plus performants pour maîtriser (coût, délai, qualité, impact environnemental, etc.) les différentes phases de conception, d'intégration et de validation des systèmes apportant une solution économique et efficace aux besoins d'un client.

Cette augmentation de la complexité des systèmes va de pair avec celle des organismes qui les conçoivent, les exploitent et les contrôlent.

Pour maîtriser cette complexité, les différentes disciplines de l'ingénierie ont largement virtualisé leur contenu. Tout produit ou système est désormais accompagné de dizaines, voire de centaines de modèles, chacun offrant un point de vue disciplinaire sur le matériel, le logiciel ou le système humain considéré.

La méthode de modélisation fonctionnelle est basée sur le fait que tout lien fonctionnel entre deux sous-systèmes/composants peut être décrit en termes d'échange d'énergie, de matière ou d'information.

L'objectif de la modélisation fonctionnelle est de :

- Permettre la liaison de différents éléments de l'architecture.
- Permettre la présentation du système dans sa globalité avec un haut niveau d'abstraction.
- Simplifier la paramétrisation.
- Assurer le lien avec les vues multi-physiques.

Cependant, les méthodes de modélisation existantes donnant des vues graphiques où le lien exigences-fonctions-composants, reste statistique.

Les auteurs dans [189] ont proposé des modèles de conception réutilisables par le lien entre les diagrammes, tels que les diagrammes de classe et de séquence. Les auteurs dans [190] ont proposé un modèle pour la traçabilité des parties prenantes à travers le raffinement des objectifs.

Nous notons les initiatives existantes pour les liens, comme dans [191] où les auteurs ont proposé un modèle bayésien pour la traçabilité des informations pendant la conception.

Ce chapitre propose une analyse de traçabilité à travers une évaluation de changement de coût lorsque la modification des exigences se produit. Nous allons présenter le besoin de re-conception du **FR** dans le contexte algérien. Ensuite nous proposons un modèle de traçabilité basé sur l'optimisation du coût de changement d'exigence. Le modèle est testé et validé sur le cas d'étude qui porte sur l'intégration du module intelligent dans le **FR**.

## 4.2 Re-conception d'un FR dans le contexte algérien

La re-conception consiste à ajouter/supprimer des exigences à la conception existante. Pour la conception initiale, il s'agit de concevoir et d'inventer un produit ou un procédé pour la première fois, sans aucun cas de référence existant ni aucune expérience passée réussie permettant de s'inspirer pour copier, re-concevoir ou améliorer les solutions existantes [169]. La re-conception du produit est basée sur certains produits existants / similaires où le défi est de re-concevoir un produit existant en tenant compte de la satisfaction de nouvelles exigences [192].

L'enquête réalisée a identifié les besoins exprimés par les utilisateurs de **FR** dans le contexte algérien. Le résultat de l'enquête montre la différence entre l'Europe et l'Algérie dans certains besoins comme le montre la figure 4.1. Cette différence nous pousse à envisager la re-conception du **FRM** vers un **FRI** adapté au contexte algérien (coût, maintenance, environnement, etc.). Sur cette base, nous réalisons une analyse fonctionnelle du **FR**. Le diagramme des cas d'utilisations, basé sur les exigences, nous permet d'identifier les fonctionnalités du système et les acteurs.

### 4.3. Ingénierie des Systèmes

---

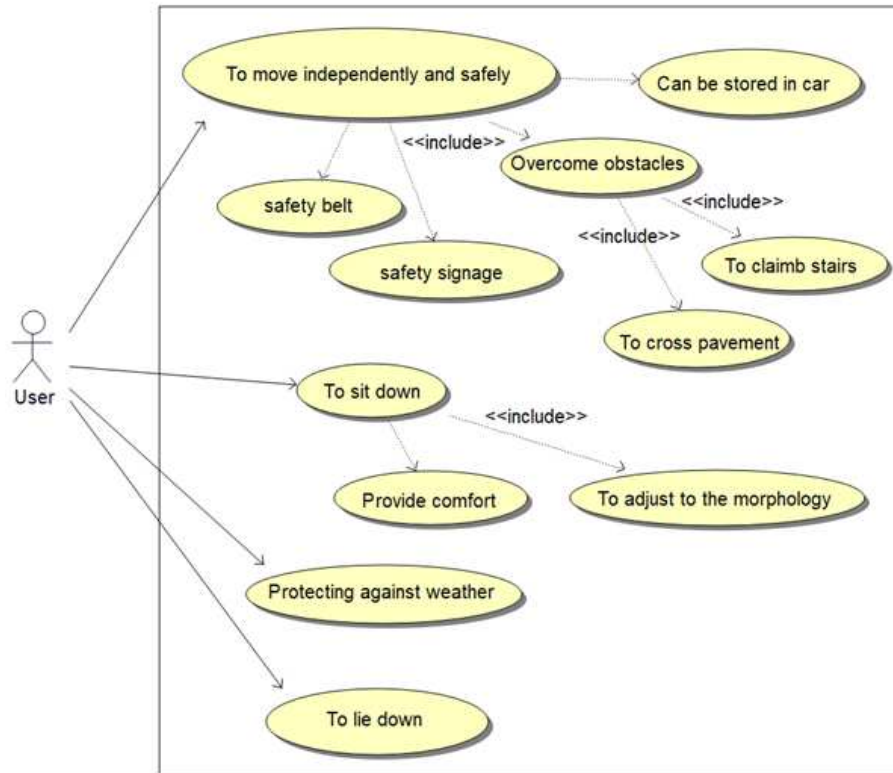


FIGURE 4.1 – Diagramme des cas d'utilisation du FR .

### 4.3 Ingénierie des Systèmes

L'IS est une démarche méthodologique permettant de maîtriser la conception des systèmes et produits complexes. Il s'agit d'une approche coopérative et interdisciplinaire qui décompose un système, le développe et vérifie que la solution décrite sur tout le cycle de vie satisfait aux attentes de l'ensemble des parties prenantes.

Elle s'appuie sur des connaissances des méthodes et des techniques issues de la science et de l'expérience. Nous pourrions citer différents objectifs de l'IS :

1. Satisfaction des parties prenantes (en répondant à leurs demandes)
2. Recherche de qualité technique
3. Tenue des délais
4. Maitrise des coûts en respectant le budget alloué

Les concepts d'IS pour les problèmes complexes passent par leur décomposition en problèmes plus limités auxquels on peut apporter une solution [193][194].

Les pratiques de cette démarche sont répertoriées dans des normes, réalisées à l'aide de méthodes et supportées par des outils (Figure 4.2).

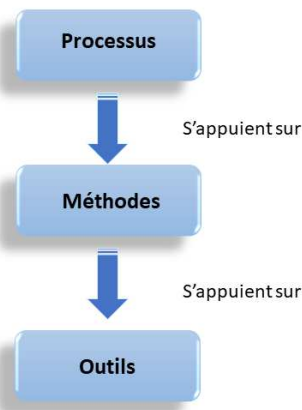


FIGURE 4.2 – Ingénierie système.

Le développement d'une nouvelle technologie souffre des processus et de méthodes non fiables utilisés durant le développement du système. Pour cela, les développeurs des systèmes complexes où émergent les nouvelles technologies utilisent des normes l'aidant à accomplir leurs missions [195].

### 4.3.1 Normes d'IS

L'IS repose sur plusieurs normes. Nous ne mentionnerons que quelques-unes d'entre elles. Trois sont très utilisées. l'IEEE 1220-1998 [STA-IEEE], l'EIA-632-1998 [STA-EIA] confirmé en 2003 et l'ISO 15288-2002 [STA.ISOa]. Suivant les domaines, plusieurs démarches ont été développées à partir de ces trois normes de référence et dans chaque domaine, tel que le spatial. Les démarches sont guidées par les modèles de maturité représentés notamment par le CMMI [CMMI 02].

### 4.3.2 L'ingénierie des systèmes basée par les modèles

L'ingénierie des systèmes basée par les modèles (Model-Based Systems Engineering : MBSE) est une méthodologie formalisée utilisée pour supporter les exigences, la conception, l'analyse, la vérification et la validation associée au développement de systèmes complexes.

#### 4.4. Ingénierie des exigences

La transformation d'un besoin émergent en la définition d'un système offrant une solution fait appel à de multiples activités intellectuelles qui évoluent de façon progressive depuis les concepts abstraits jusqu'à la définition rigoureuse des produits [196].

Il est indispensable de se baser sur des représentations tant du problème que de ses solutions possibles à différents niveaux d'abstraction pour appréhender, conceptualiser, concevoir, estimer, simuler, prouver formellement, valider, justifier les choix et communiquer. C'est le rôle de la modélisation avec ces différents types de modèle (Figure 4.3).

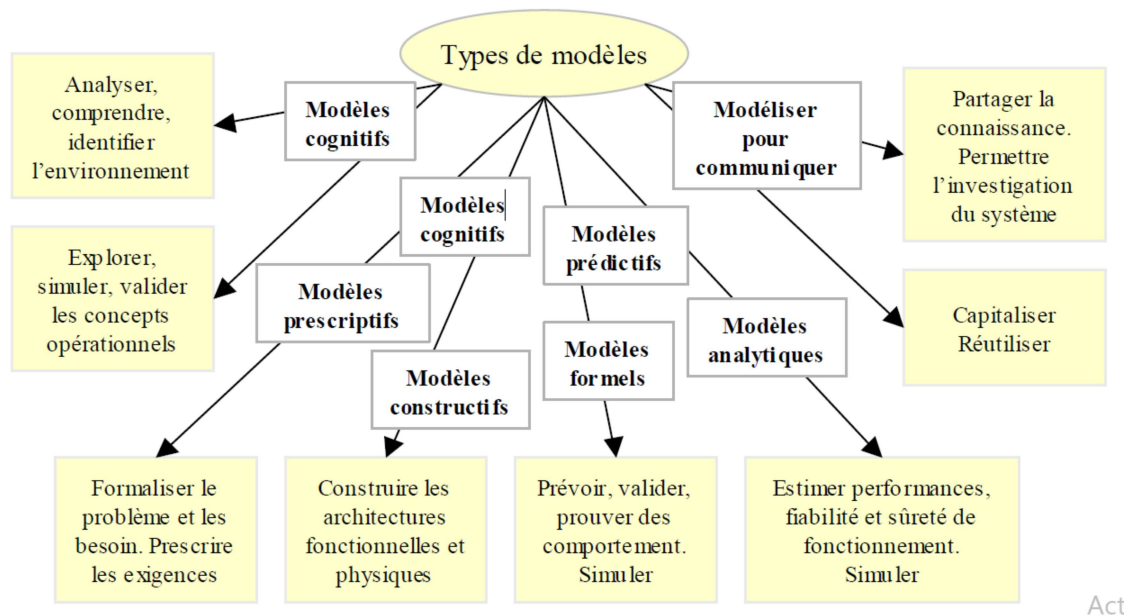


FIGURE 4.3 – Typologie des modèles en Ingénierie Système [5]

#### 4.4 Ingénierie des exigences

L'ingénierie des exigences est un terme qui a été inventé pour couvrir toutes les activités impliquées dans la découverte, la documentation et la maintenance d'un ensemble d'exigences pour un système informatique.

L'utilisation du terme "ingénierie" implique que des techniques systématiques et reproductibles doivent être utilisées pour garantir que les exigences du système sont complètes, cohérentes, pertinentes, etc.

D'après les différents problèmes rencontrés (volatilité, modification, expression des exigences, etc.) durant le développement, les industriels ont trouvé la nécessité d'élaborer une étude comme l'ingénierie des exigences [197], pour couvrir la gestion d'exigences durant tout le cycle de vie du développement de systèmes (de l'élicitation jusqu'à la validation).

Le but du processus d'ingénierie des exigences (Figure 4.4) est de gérer les demandes de changements, en recherchant les exigences impactées par la demande. De ce fait plusieurs questions se posent :

- Quelle partie de la conception (implémentation) sera impactée ?
- Comment établir une étude d'impact de la demande ?
- Et comment l'intégrer dans le cycle de développement ?

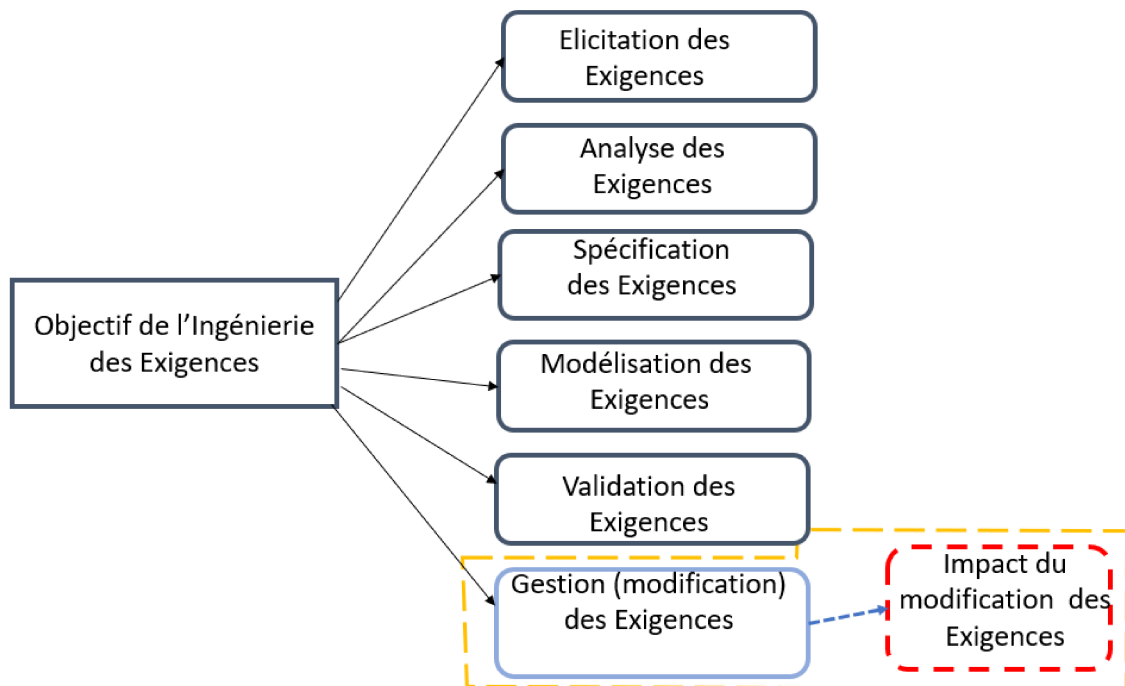


FIGURE 4.4 – Objectif(s) de l'ingénierie des exigences.

L'élicitation des exigences est la première phase du processus d'ingénierie des exigences. On peut donc affirmer que l'élicitation des besoins est en fait la première phase du cycle de développement du système d'information, et donc un préalable à

## 4.4. Ingénierie des exigences

---

toutes les autres activités de développement. Actuellement, il y a très peu de cohérence dans la recherche et la pratique de l'ingénierie des exigences concernant une définition standard de l'élicitation des exigences. Dans [198] les auteurs définissent l'élicitation des exigences comme "l'apprentissage, la découverte, l'extraction, la mise en évidence et/ou la découverte des besoins des clients, des utilisateurs et d'autres parties prenantes potentielles". Ces dernières années, la recherche sur l'élicitation des exigences n'a cessé de devenir plus multidisciplinaire [199]. Cette évolution résulte de la nécessité d'aborder non seulement les aspects techniques et fonctionnels du système, mais aussi les facteurs humains et sociaux. Le processus d'élicitation des besoins peut avoir plusieurs points de départ. Il peut s'agir d'un besoin, d'une opportunité ou d'une idée [200]. Cependant, il s'agit généralement d'un problème à résoudre. Il peut être dû à une insatisfaction de la situation actuelle, au désir de développer une nouvelle situation, ou à une opportunité d'améliorer la situation actuelle en termes de temps et de coût.

### 4.4.1 Différents types d'exigences

Les exigences sont un moyen de communication entre les différentes parties prenantes. Le terme d'exigence désigne la connaissance des fonctionnalités et des qualités que doit posséder le produit en cours de développement. Les exigences fonctionnelles expriment les fonctions attendues par le système. En revanche, les exigences non fonctionnelles sont la traduction des contraintes globales de qualité de service ou de capacité du système (fiabilité, opérabilité, convivialité), ou des contraintes opérationnelles (respect des normes d'utilisation). des contraintes opérationnelles (respect des normes d'utilisation), ou des contraintes de conception (réutilisation de l'existant).

### 4.4.2 Liens entre les exigences

Dans cette partie, nous présentons les différents types de liens qui existent entre deux exigences différentes.

#### - Dépendance et déclinaison

Deux types de liens existent entre deux exigences différentes : le lien de dépendance et le lien de déclinaison. Le premier ne consiste pas à relier des exigences de

niveaux de décomposition différents, mais des exigences de même niveau qui sont soit complémentaires, soit analogues, ou similaires. Ce type de lien facilite l'analyse de l'impact (également pour le lien de décomposition). Par exemple, si nous avons une relation (R) de dépendance entre R1 et R2, nous pouvons présenter cette relation avec : (R1) R (R2). Dans le cas où nous avons une évolution sur R1, par l'existence de ce lien nous pouvons savoir qu'il y aura un impact sur R2, et inversement.

### - Lien évolutif

Avoir les différentes versions d'un besoin, c'est connaître son origine. Les faits manquants sont à l'origine, et permettent de mieux comprendre le besoin et parfois sa formulation.

Dans la figure 4.5, nous montrons les liens entre les exigences et les fonctions. Ces fonctions sont collectées par l'étude fonctionnelle. Les composants sont définis à travers les fonctionnalités. Comme dans le FAST, on part des exigences. Celles-ci ont été transformées en fonctionnalités puis deviennent des composants. Le lien entre les nouvelles exigences aura automatiquement un impact sur la fonctionnalité ou sur d'autres fonctions ou nous pouvons constater les deux.

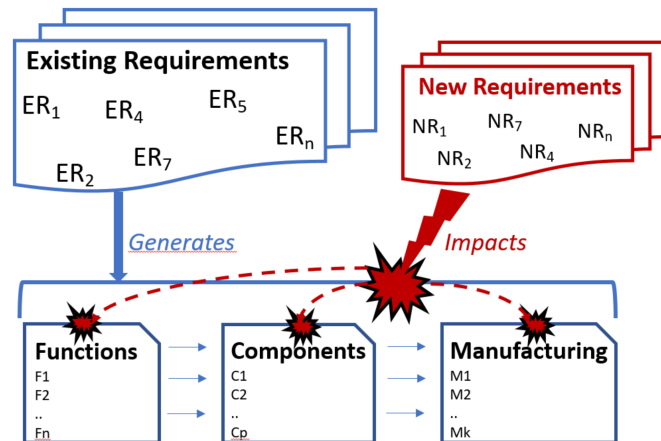


FIGURE 4.5 – Impact(s) du changement des exigences.

## 4.5 Impact des changements d'exigences

Le changement ou l'évolution des exigences a un impact sur l'ensemble du cycle de vie du produit. Les sources fréquentes de changement des exigences d'un produit



## 4.5. Impact des changements d'exigences

---

sont l'ajout et/ou la suppression de fonctions ou de composants et les changements radicaux. Modifier un produit ou un système existant implique de prendre une décision basée sur la gestion du changement des exigences. Pour optimiser la décision, il faut analyser les conséquences du changement, ce qui constitue l'étape principale. Dans le domaine de l'IS, l'approche utilisée pour la gestion des changements d'exigences est la traçabilité des exigences [201]. Cette méthode est basée sur l'établissement d'un lien entre les demandes des clients et les spécifications, la conception finale, les composants du système, le déploiement et l'utilisation du système. Cette approche est d'autant plus complexe que le système l'est. Un autre aspect important, est la consommation de temps et l'augmentation des coûts [202].

### 4.5.1 Impact de la modification des exigences sur les fonctions du produit

Le développement d'un produit est une succession d'activités créatives qui part des besoins et exigences exprimés pour aboutir à la définition et à la faisabilité du produit. Pendant la phase de conception, les exigences sont spécifiées, puis transformées en fonctions. Lorsque nous passons d'un produit conçu à une version nouvelle ou améliorée de ce produit, les exigences évoluent par le maintien, l'ajout et la suppression. Ainsi, le nouvel ensemble d'exigences du nouveau produit peut contenir des exigences existantes de la version précédente du produit et de nouvelles exigences. Les nouvelles fonctions du produit suivront cette évolution et peuvent contenir des fonctions existantes et de nouvelles fonctions.

Le nouvel ensemble d'exigences impliquera à la fois des fonctions existantes ( $f_{e_e}$ ) et de nouvelles fonctions ( $f_{n_n}$ ) avec des liens mixtes comme illustré dans la figure 4.6. Dans le nouvel ensemble d'exigences, chaque exigence ( $R_k$ ) peut être une source de fonction existante, de nouvelle fonction ou des deux. Ce qui implique que la :

- fonction existante résulte d'un ensemble d'exigences existantes
- fonction adaptée résulte d'un ensemble d'exigences existantes et nouvelles
- nouvelle fonction résulte d'un ensemble de nouvelles exigences

Nous notons que cet impact affecte également la chaîne d'approvisionnement, la fabrication et tout le cycle de vie du produit. Dans ce document, nous nous concentrerons uniquement sur les fonctions, les composants et la transformation des

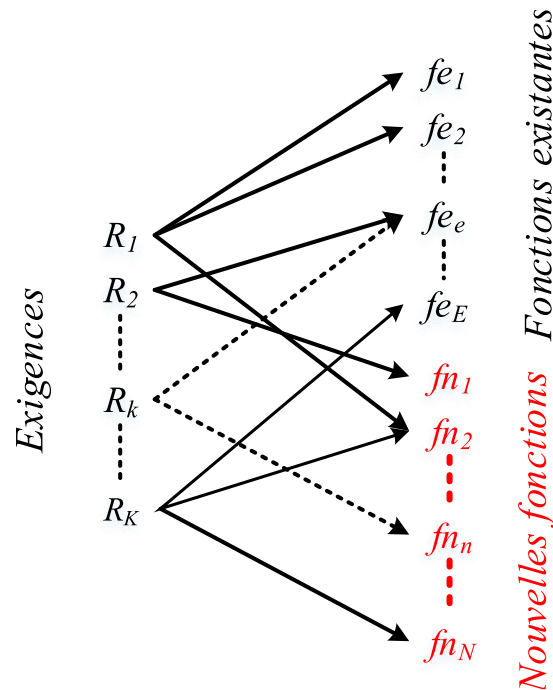


FIGURE 4.6 – Exigences et fonctions du produit

produits sachant que nous incluons le coût d'approvisionnement dans les coûts des composants.

#### 4.5.2 Modèle d'optimisation des coûts de l'impact des exigences

Comme nous l'avons expliqué, la satisfaction de nouvelles exigences ne peut être assurée que par l'adaptation des fonctions existantes ou l'ajout de nouvelles fonctions dans tout produit. Il est important d'optimiser la conception des produits pour garantir la satisfaction de ces nouvelles exigences avec un minimum de coûts et de modifications du processus. Nous pouvons classer les fonctions de tout nouveau produit en fonctions existantes et nouvelles

$fe_e, e \in \mathcal{E} = \{1, \dots, E\}$  et  $fn_n, n \in \mathcal{N} = \{1, \dots, N\}$  respectivement (Figure 4.6). Parmi l'ensemble des exigences possibles, le concepteur décide des exigences que nous pouvons satisfaire et des fonctionnalités que nous pouvons conserver. Les variables de décision utilisées dans ce modèle sont donc données par les deux équations (4.1) (4.2) :

#### 4.5. Impact des changements d'exigences

---

$$f_{e_e} = \begin{cases} 1 & \text{Si la fonctionnalité existante} \\ & \text{est sélectionnée} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall e \in \mathcal{E} \quad (4.1)$$

$$f_{n_n} = \begin{cases} 1 & \text{Si la nouvelle fonctionnalité} \\ & \text{est sélectionnée} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall e \in \mathcal{E} \quad (4.2)$$

Il existe une autre classe de fonctions, qui ne sont qu'une adaptation de fonctions existantes, elles peuvent donc être considérées comme un sous-ensemble de l'ensemble des fonctions  $f_{e_e}$ . L'utilisation de toute fonction a un coût lié aux différents aspects et transformations nécessaires pour assurer cette fonction. Ces aspects sont le traitement des composants (Bill Of Material), la conception et les fournisseurs. Le coût total de l'introduction d'une fonction est composé du coût de chaque aspect mentionné. Le coût basique d'une fonction existante  $Cb_{f_{e_e}}^k$  pour satisfaire l'exigence  $R_k$  est ainsi résumé par l'équation (4.3) :

$$Cb_{f_{e_e}} = Cp_{f_{e_e}} + Cbom_{f_{e_e}}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (4.3)$$

où

$Cp_{f_{e_e}}$  représente tous les coûts liés au traitement de la fonction tels que la transformation, l'assemblage et le conditionnement pour satisfaire la production du composant capable d'assurer la fonctionnalité  $f_{e_e}$ .  $Cbom_{f_{e_e}}$  rassemble tous les coûts liés à chaque composant utilisé dans cette fonction tels que le coût des matières premières et le coût lié à la chaîne d'approvisionnement.

Certaines fonctions existantes doivent être adaptées pour répondre aux exigences requises avec un coût d'adaptation supplémentaire. Le coût  $C_{f_{e_e}}^k$  de l'utilisation d'une fonction  $f_{e_e}$  pour satisfaire l'exigence  $R_k$  peut être ainsi exprimé en équation (4.4) :

$$C_{f_{e_e}}^k = \begin{cases} Cb_{f_{e_e}} + CA_{f_{e_e}}^k & \text{si l'adaptation} \\ Cb_{f_{e_e}} & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall e \in \mathcal{E}, k \in \mathcal{K} \quad (4.4)$$

où

$CA_{f_{e_e}}^k$  est le coût d'une adaptation de la fonction existante  $f_{e_e}$  pour l'exigence

$R_k$ . Le concepteur doit décider si une fonction donnée doit être adaptée. Nous proposons la variable de décision  $A_{ek}$  pour décider si une fonction  $f_{e_e}$  doit être adaptée ou non pour contribuer à la satisfaction de l'exigence  $R_k$  comme le montre l'équation (4.5) :

$$A_{ek} = \begin{cases} 1 & \text{si } f_{e_e} \text{ est adaptée pour } R_k \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall e \in \mathcal{E}, k \in \mathcal{K} \quad (4.5)$$

Si la fonctionnalité est utilisée dans sa situation actuelle sans aucune adaptation, la variable  $E_{ek}$  permet de sélectionner la fonctionnalité et elle est représentée comme dans l'équation (4.6) :

$$E_{ek} = \begin{cases} 1 & \text{si } f_{e_e} \text{ est sélectionnée} \\ & \text{sans adaptation} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall e \in \mathcal{E}, k \in \mathcal{K} \quad (4.6)$$

Dans ce cas, le coût d'une fonction adaptée est défini comme indique dans l'équation (4.7) :

$$C_{f_{e_e}}^k = C_{f_{e_e}} + A_{ek} \times CA_{f_{e_e}}^k, \forall e \in \mathcal{E}, k \in \mathcal{K} \quad (4.7)$$

Le coût d'une nouvelle fonction est lié principalement au coût d'installation, au nouveau processus de production, au coût du matériel d'approvisionnement et de rang et au coût lié à l'innovation (équation (4.8)).

$$C_{fn_n} = I_n \times (Cp_{fn_n} + Cbom_{fn_n} + Cs_{fn_n}), \forall n \in \mathcal{N} \quad (4.8)$$

où

$$I_{nk} = \begin{cases} 1 & \text{si } fn_n \text{ est développé pour} \\ & \text{assurer une ou plusieurs exigences} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad \forall n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K} \quad (4.9)$$

$Cp_{fn_n}$ ,  $Cbom_{fn_n}$ , et  $Cs_{fn_n}$  sont les coûts de production, les coûts des matières premières et leurs approvisionnements et les coûts d'installation et d'étude liés à la fonctionnalité  $fn_n$ .

#### 4.5. Impact des changements d'exigences

---

Les hypothèses suivantes sont fournies pour représenter les contraintes de notre modèle :

- Chaque exigence  $R_k$  peut être satisfaite complètement par un ensemble de nouvelles fonctionnalités  $fn_n$ .
- Chaque fonctionnalité  $fn_n$  ou  $fe_e$  contribue à la satisfaction  $S_k$  de l'exigence  $R_k$  avec un pourcentage  $Sf_{nk}$  ou  $Sf_{ek}$  ( $k$  est l'indice de l'exigence  $R_k$  et  $n$  ou  $e$  est l'indice de la fonctionnalité) variant entre 0 et 100%.
- Chaque exigence  $R_k$  doit atteindre le niveau de satisfaction  $S_k$ .

La fonction objectif est la minimisation du coût total. Elle est représentée par l'équation (4.10).

$$Min \sum_k \sum_e (E_{ek} + A_{ek}) \times C_{fe_e}^k + \sum_n I_n \times C_{fn_n} \quad (4.10)$$

Sujette aux contraintes suivantes : Chaque niveau de satisfaction des exigences doit être atteint.

$$\sum_e A_{ek} \times Sf_{ek} + \sum_n I_{nk} \times Sf_{nk} + \sum_e E_{ek} \times Sf_{ek} \geq S_k \forall k \in \mathcal{K} \quad (4.11)$$

Les contraintes concernant les liens entre les fonctionnalités choisies et leurs contributions aux exigences sont :

$$fe_e \leq \sum_k E_{ek}, \forall e \in \mathcal{E} \quad (4.12)$$

$$fe_e \leq \sum_k A_{ek}, \forall n \in \mathcal{E} \quad (4.13)$$

$$fn_n \leq \sum_k I_{nk}, \forall n \in \mathcal{N} \quad (4.14)$$

Une fonctionnalité existante ne peut être adaptée et utilisée telle quelle en même temps :

$$A_{ek} + E_{ek} \leq 1 \forall e \in \mathcal{K}, k \in \mathcal{K}$$

Une fonctionnalité est forcément sélectionnée si l'une des exigences est satisfaite totalement ou partiellement par cette fonctionnalité.

$$A_{ek} + E_{ek} \geq f_{e_e}, \forall e \in E, k \in \mathcal{K} \quad (4.15)$$

## 4.6 Implémentation

Dans ce paragraphe, nous allons implémenter le modèle d'optimisation proposé sur le **FRI**. Pour ce faire, nous allons, dans un premier temps, détailler les solutions techniques obtenues dans (Chapitre 3). En effet, chaque solution technique possède plusieurs alternatives selon différents critères tels que le coût, la compatibilité, la qualité, la disponibilité, etc. Dans un second temps, nous allons implémenter notre modèle d'optimisation de coût sur ces solutions techniques. Ainsi, nous allons obtenir les composants nécessaires à la re-conception du **FRI** tout en tenant compte des exigences (coût, process, compatibilité, etc).

Comme présenté dans la figure 4.7, le fait de rajouter ou changer une exigence va avoir un impact sur les fonctions et les composants du système. Si nous considérons ( $R_k$ ) comme une nouvelle exigence relative au contexte Algérien, nous pouvons constater qu'elle affecte les fonctions existantes ( $f_{e_E}$ ) ainsi que la génération de nouvelles fonctions ( $f_{n_1}$ ). L'évaluation de cet impact se traduit par le degré de satisfaction. Ainsi, une fonction va satisfaire une ou plusieurs exigences avec des degrés différents, allant de 0 (non satisfait) à 1 (complètement satisfait). En effet, les nouvelles fonctions vont avoir un degré de satisfaction de l'exigence. Par analogie, une nouvelle fonction va avoir un impact sur les composants existants ( $C_{m_e}$ ) et les nouveaux composants ( $C_{m_n}$ ).

### 4.6.1 Impact des fonctionnalités sur les exigences

Toute conception de produits démarre par les besoins exprimés par l'utilisateur final qui seront traduits en exigences. Aussi, les exigences sont, à leur tour, traduites en fonctionnalités pour ensuite définir les solutions technologiques. Afin d'évaluer l'impact du changement d'exigence, il devient impératif de gérer les dépendances entre le cahier des charges (exigences) et les autres documents (Fonctionnalités et solutions techniques) produits durant l'avancement du processus de développement des produits.

## 4.6. Implémentation

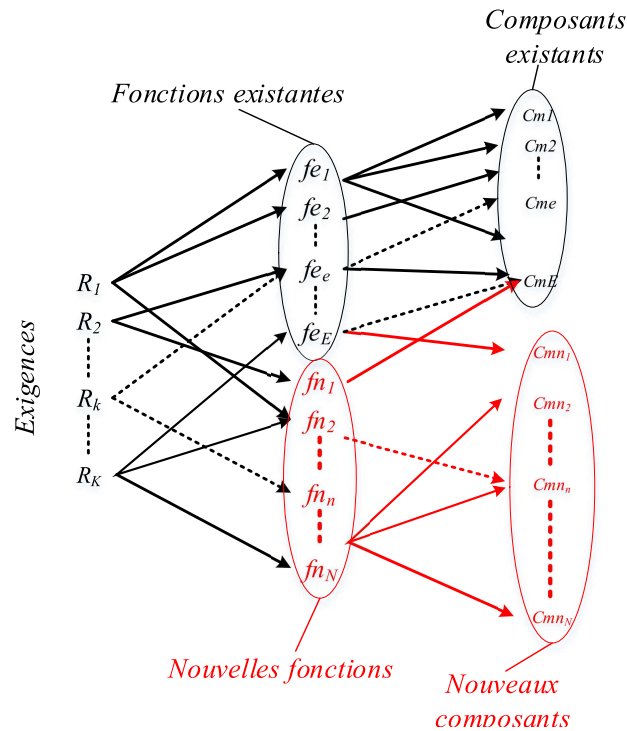


FIGURE 4.7 – Impact(s) des nouvelles exigences sur les fonctions et composants.

Toute nouvelle exigence va impliquer une ou plusieurs fonctionnalités, qui peuvent être nouvelles, existantes ou bien adaptées. Ainsi, l'évaluation de l'impact de changement d'exigence se traduit par l'évaluation du degré de la satisfaction des exigences ainsi que le coût engendré ( $(C_{bom})$ , processus, etc.). L'approche d'optimisation proposée, va permettre de sélectionner la solution qui va maximiser la satisfaction tout en minimisant les coûts. Dans ce contexte, nous cherchons les fonctionnalités qui répondent au mieux à la satisfaction des exigences et en même temps la minimisation des coûts.

Le tableau 4.1 est un exemple des données collectées pour l'implémentation de notre approche. Les colonnes présentent les fonctions existantes remplies par le FRI, telles que détecter les obstacles, changer de trajectoire, déplacement motorisé et s'adapter à la morphologie. Les lignes, du tableau 4.1, présentent les exigences collectées via le questionnaire auprès des personnes à mobilité réduite. Le remplissage des degrés de satisfaction a été réalisé à travers des séances de brainstorming in-

cluant concepteurs<sup>1</sup> et experts<sup>2</sup>. Les degrés de satisfaction sont des variables dans l'intervalle  $[0, 1]$ . La valeur 0 désigne une exigence non satisfaite par la fonction, et 1 désigne une exigence entièrement satisfaite. Aussi, les deux premières lignes présentent les évaluations du coût de conception et des matières premières. Pour chaque fonction existante, nous avons évalué les deux coûts (coûts de process et coût des composants ( $C_{bom}$ )) à travers des brainstormings.

Tableau 4.1 – Degré de satisfaction des exigences par les fonctionnalités existantes.

		Détecter obstacles	Changer trajectoire	Déplacement motorisé	S'adapter à la morphologie
Contribution à l'exigence		Fonctionnalités existantes			
CP (DA)		17500	32500	34000	4000
Cbom (DA)		4375	8125	8500	1000
Satisfaction Exigences	Confortable	0,1	0,1	0,1	0,7
	Eviter Obstacle	0,5	0,3	0,1	0
	Anticiper obstacle	0,6	0,2	0,1	0
	Optimiser parcours	0,4	0,5	0,09	0
	Visibilité	0,2	0,2	0,05	0
	Protection du soleil	0	0,2	0,1	0
	Equipé d'énergie	0	0	0,05	0
	Embarquer tablette	0	0	0	0,05
	Améliorer vitesse	0,1	0,3	0,8	0,05
	Manipuler facilement	0,2	0,25	0	0,2

Lors des entretiens réalisés (cf. questionnaire dans l'Annexe C) les utilisateurs ont exprimé plusieurs besoins qui ont donné lieu à des nouvelles fonctions (cf. analyse fonctionnelle du chapitre 3). Le tableau suivant 4.2 présente les nouvelles fonctionnalités issues de nouvelles exigences et leurs degrés de satisfaction ainsi que les coûts process et ( $C_{bom}$ ). Parmi les nouvelles fonctions (fonctionnalités)<sup>3</sup> identifiées nous trouvons l'intégration du MI, commande du FR via smartphone et intégrer un support pour parapluie, etc. Aussi, pour chaque nouvelle fonctionnalité, nous avons évalué le coût du process et le coût des composants relatifs. Une séance de brainstorming nous a permis d'évaluer les degrés de satisfaction pour chaque couple (exigence, fonctionnalité). Une fois les deux tableaux (4.1, 4.2) construits nous avons implémenté notre modèle d'optimisation. Pour cela nous avons construit notre fonction objectif qui vise à minimiser les coûts avec la contrainte que chaque

- 
1. Concepteurs : Chercheurs dans le domaine et fabricants
  2. Experts : Chercheurs dans le domaine et personnel de santé
  3. Fonction : Nous utilisons les deux termes fonctions et fonctionnalités pour désigner les fonctions du système issues de l'analyse fonctionnelle



## 4.6. Implémentation

niveau de satisfaction des exigences doit être atteint.

Tableau 4.2 – Nouvelles fonctionnalités issues de nouvelles exigences.

	Intégrer MI	Commander via smartphone	Intégrer un support parapluie	Intégrer système anti-renversement	Intégrer système d'éclairage
Nouvelles fonctionnalités	I1	I2	I3	I4	I5
CP (DA)	5700	20000	1800	2100	1500
Cbom (DA)	1425	5000	450	525	375
Confortable	0,2	0,5	0,3	0,62	0,42
Eviter Obstacle	0,9	0,23	0	0,1	0,32
Anticiper obstacle	0,8	0,45	0	0	0,15
Optimiser parcours	0,8	0,17	0	0	0,05
Visibilité	0,86	0,1	0	0	0,55
Protection du soleil	0,1	0,1	0,7	0	0
Equipé d'énergie	0	0,1	0	0	0,2
Embarquer tablette	0,5	0,4	0	0	0,05
Améliorer vitesse	0,5	0,4	0	0,3	0,15
Manipuler facilement	0,6	0,31	0	0,35	0,15

Tableau 4.3 – Résultats des nouvelles fonctionnalités.

Niveau de satisfaction		Confortable	Éviter Obstacles	Anticiper obstacles	Optimiser parcours
<i>Intégrer MI</i>		0,2	0,9	0,8	0,8
<i>Commande via smartphone</i>		0,5	0,2	0,4	0,1
<i>Intégrer un support parapluie</i>		0,3	0	0	0
<i>Intégrer système anti – renversement</i>		0,6	0,1	0	0
<i>Intégrer système d'éclairage</i>		0,4	0,3	0,1	0

Variables de décision		$E_{ek}$			
$f_1$	0	0	0	0	0
$f_2$	0	0	0	0	0
$f_3$	0	0	0	0	0
$f_4$	1	1	0	0	0

Nouvelles fonctionnalités	
$I_1$	1
$I_2$	0
$I_3$	0
$I_4$	0
$I_5$	1

<b>Fonction Objectif</b>	<b>17010 DA</b>
--------------------------	-----------------

L'implémentation du modèle est réalisée avec l'algorithme simplexe sur solveur.

Les résultats de l'implémentation de notre modèle d'optimisation sont présentés dans le tableau 4.3. Nous pouvons constater que les nouvelles fonctionnalités (I1 : intégrer un MI et I5 : intégrer un système d'éclairage) couvrent la satisfaction des exigences tout en minimisant les coûts.

#### 4.6.2 Impact des composants techniques sur les fonctionnalités

La deuxième étape de notre approche consiste à choisir les solutions techniques les plus appropriées aux fonctionnalités identifiées. Pour ce faire, nous avons construit dans un premier temps le tableau 4.4 qui permet de lier les solutions techniques aux nouvelles fonctionnalités à travers les degrés de satisfaction. Chaque solution technique va répondre à une ou plusieurs fonctionnalités selon des degrés de satisfaction. Aussi, les coûts de processus et de composants ( $C_{bom}$ ) peuvent être estimés par les fournisseurs ou les acheteurs de l'entreprise. Dans un second temps, nous

Tableau 4.4 – Contribution à la solution technique

Contribution à la solution technique		Structure	Roues	Siège	Repose pieds
		Solutions techniques existantes			
CP (DA)		100	500	50	100
Cbom (DA)		25	125	12,5	25
Satisfaction Fonctionnalités	Confortable	0,3	0,5	0,1	0,1
	Eviter Obstacle	0,05	0,05	0,04	0,05
	Anticiper obstacle	0,1	0,5	0,05	0
	Optimiser parcours	0,01	0,4	0	0
	Visibilité	0,2	0,1	0	0
	Protéger du soleil	0,1	0,2	0,15	0,1
	Equipé d'énergie	0,1	0,1	0,1	0,1
	Embarquer tablette	0,1	0,1	0,1	0,1
	Améliorer vitesse	0,1	0,05	0	0
	Manipuler facilement	0,1	0,01	0	0

avons choisi la solution technologique la plus adaptée. Pour cela nous nous sommes intéressés à l'intégration du MI. La revue de la littérature montre que la majorité des FRI suivent une architecture générique du module intelligent. Cette architecture se compose de capteurs, de caméras, de MCU, de commande, d'alimentation et de moteur(s) (cf. chapitre 3 3.14). En effet, la littérature sur les FRI montre une architecture générique où la différence entre auteurs réside souvent dans le choix des

## 4.6. Implémentation

---

composants, technologies et algorithmes utilisés. Les tableaux [4.5, 4.6, 4.7, 4.9, 4.10, 4.11, 4.8] présentent les différentes solutions techniques (composants constituant le MI), ainsi que les différents supports, câblages et fixations.

Tableau 4.5 – Prix Arduino.

Arduino	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
Micro	3800	800	500	200	200	5500
Leonardo	3800	700	300	150	300	5250
Uno	4000	700	300	150	250	5400
Nano	4000	750	300	250	280	5580
MKR Zero	4200	750	250	100	300	5600
101 <sup>(2)</sup>	5800	700	500	200	150	7350
Due	6200	700	300	150	200	7550
Mega	6300	700	300	150	250	7700
M0 PRO	6500	800	300	250	250	8100
Yun	11000	750	250	100	400	12500

Tableau 4.6 – Prix des Capteurs.

Capteurs	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
Capteur infrarouge	1700	800	200	100	150	2950
Capteur ultrasonique	1850	700	200	150	200	3100
Capteur ultrasonique PWM	3500	700	300	150	250	4900
Mini capteur ultrasonique	4000	750	300	180	280	5510
Capteur Infrarouge Photoélectrique	1700	750	250	100	300	3100

Tableau 4.7 – Prix du joystick.

Joysticks	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
Manette de commande PortUSB	25000	800	700	100	150	26750
Contrôleur de Joystick à 200 degrés	6000	700	200	150	200	7250
contrôleur Joystick	27000	700	300	150	250	28400
Contrôleur Joystick OM800-H51	19000	650	300	180	280	20410
Interface tactile	20000	2500	250	100	300	23150

Tableau 4.8 – Prix Moteurs.

Motorisation	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
Moteur d'engrenage	3900	900	500	200	150	5650
Motoréducteur brushless	22000	800	300	150	200	23450
Moteur réducteur	14000	750	300	150	250	15450

Tableau 4.9 – Prix des batteries.

Batteries	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
AERDU – batterie 24v 6S6P 18650 li-ion	16000	800	700	100	150	17750
Batterie Lithium-ion 7S4P 24V plus chargeur	14500	700	200	150	200	15750
Batterie Lithium 24V lifepo4	20000	700	300	150	250	21400
Batterie (Mighty Max) ML35-12 SLA rechargeable	13500	650	300	180	280	14910
Batterie Lithium de longue durée,	17000	2500	250	100	300	20150

Tableau 4.10 – Prix des Cameras.

Cameras	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
Camera Lidar 3D à 90 degré	9500	1000	200	100	150	10950
Lidar omnidirectionnel à 360 degré	23000	1200	150	150	200	24700
RPLIDAR A1 2D, 360 degrés, 12 mètres	14000	900	200	150	250	15500
Caméra PC usb, microphone	15000	1500	300	250	280	17330
Webcam HD, haute résolution	17000	1300	250	100	300	18950
Module de caméra usb 960	14500	1400	150	150	250	16450

Tableau 4.11 – Prix Raspberry.

Raspberry	Prix (DA)	Fixation	Câblage	Visserie	Attache	Prix total
Raspberry Pi Pico	1100	800	500	200	150	2750
Raspberry Pi 400	12000	700	300	150	200	13350
Raspberry Pi 4 B 8GB	14000	700	300	150	250	15400
Raspberry Pi 4 B	7200	750	350	250	280	8830
Raspberry Pi 3 Model A+	5000	750	250	100	300	6400
Raspberry Pi 3 B+	7500	800	500	200	150	9150
Raspberry Pi Zero WH	2500	700	300	150	200	3850
Raspberry Pi Zero W	2000	780	300	150	250	3480
Raspberry Pi 3	6000	750	300	250	280	7580
Raspberry Pi Zero	1600	850	270	100	300	3120
Raspberry Pi 2	6000	750	250	100	300	7400
Raspberry Pi B	6000	800	300	100	300	7500

Pour un processus établi, le coût des composants pour chaque fonction est prédéfini ( $C_{bom}$ ). En réalité lors de la re-conception d'un produit, de nouveaux composants peuvent accomplir une ou plusieurs fonctionnalités et donc peuvent changer le  $C_{bom}$  de chaque fonction. De plus, chaque fonctionnalité peut avoir plusieurs solutions technologiques traduites par plusieurs choix de composants. Pour notre cas d'étude, nous allons supposer que les nouveaux composants influencent uniquement le  $C_{bom}$  de la nouvelle fonctionnalité les concernant et n'auront aucun effet sur les  $C_{bom}$

## 4.6. Implémentation

des autres fonctions. Ce choix nous permet de réduire la complexité du problème d'optimisation.

La ligne ( $C_{bom}$ ) du tableau 4.12 présente les coûts des différentes combinaisons de composants constituant le module intelligent. Ainsi, pour chaque combinaison, nous avons un module intelligent. Pour la validation de notre modèle, nous nous sommes limités à cinq combinaisons (Module Intelligent 1, ..., Module Intelligent 5) présentées dans le tableau 4.12. Pareil que la section précédente, les degrés de satisfaction ont été définis via brainstorming.

Tableau 4.12 – Nouvelles solutions techniques MI.

	Module Intelligent 1	Module Intelligent 2	Module Intelligent 3	Module Intelligent 4	Module Intelligent 5
Nouvelles solutions	I1	I2	I3	I4	I5
CP (DA)	3600	2900	4100	4000	3600
<b>C<sub>bom</sub> (DA)</b>	<b>56880</b>	<b>45000</b>	<b>38000</b>	<b>85000</b>	<b>46000</b>
Confortable	0,2	0,5	0,3	0,62	0,42
Eviter Obstacle	0,9	0,8	0,6	0,85	0,9
Anticiper obstacle	0,8	0,7	0,5	0,9	0,85
Optimiser parcours	0,8	0,77	0,7	0,8	0,7
Visibilité	0,86	0,9	0,9	0,95	0,82
Protéger du soleil	0,1	0,1	0,2	0	0
Equipé d'énergie	0	0,1	0	0	0,2
Embarquer tablette	0,5	0,4	0,3	0,5	0,44
Améliorer vitesse	0,5	0,4	0,36	0,3	0,51
Manipuler facilement	0,6	0,31	0,5	0,6	0,55

Une fois les données définies, le modèle peut être implémenté. Dans cette phase, nous nous intéressons à l'optimisation des coûts des composants. La fonction objectif est la minimisation du coût total. Elle est représentée par l'équation (4.16).

$$Min \sum_k \sum_e (ET_{ek} + AT_{ek}) \times C_{te_e}^k + \sum_n It_n \times C_{tn_n} \quad (4.16)$$

La variable  $ET_{ek}$  permet de sélectionner la solution technique (composant). Le concepteur doit décider si une solution technique donnée doit être adaptée. Nous proposons la variable de décision  $AT_{ek}$  pour décider si une solution technique  $te_e$  doit être adaptée ou non pour contribuer à la satisfaction de la fonction  $fn_n$  où :

$$It_{nk} = \begin{cases} 1 & \text{si } tn_n \text{ est développée pour} \\ & \text{assurer une ou plusieurs fonctions } \forall n \in \mathcal{N}, k \in \mathcal{K} \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (4.17)$$

La résolution de notre problème d'optimisation est réalisée avec le Solveur et présentée dans le tableau 4.13.

Tableau 4.13 – Résultat de la solution technique.

		Confortable	Éviter Obstacles	Anticiper obstacles	Optimiser parcours
Niveau de satisfaction	$MI_1$	0,2	0,9	0,8	0,8
	$MI_2$	0,5	0,8	0,7	0,7
	$MI_3$	0,3	0,6	0,5	0,5
	$MI_4$	0,6	0,8	0,9	0,9
	$MI_5$	0,4	0,9	0,8	0,8
Variables de décision					
$f_1$	1	$Et_{ek}$			
$f_2$	1	1	0	0	0
$f_3$	0	0	0	0	1
$f_4$	1	0	0	0	0
		$At_{ek}$			
		0	0	1	0
		1	0	0	0
		0	0	0	1
		0	0	0	0
		0	0	1	0
		Solutions techniques (MI)			
		$It_1$	0		
		$It_2$	0		
		$It_3$	1		
		$It_4$	0		
		$It_5$	0		
		Fonction Objectif <b>43491 DA</b>			

Notre modèle a convergé vers le module intelligent 3 qui est la solution optimale avec une satisfaction des fonctionnalités et un coût optimal de 43491 DA. Cependant, dans cet exemple, la sélection de cinq solutions possibles et suite aux limites du Solveur qui ne prend en compte que 200 variables. Le tableau 4.13 présente les parties essentielles de la résolution du problème. Le tableau des niveaux de satisfaction est le résultat des évaluations faites via brainstorming et sont entre 0.2 et 0.9. Les niveaux de satisfaction répondent aux fonctions respectives : Confortable, Éviter Obstacles, Anticiper obstacles et Optimiser parcours. Le tableau des variables de décision permet de voir les fonctions auxquelles la solution retenue répond. Dans notre exemple, la solution retenue répond à quatre fonctions (Confortable, Éviter

## 4.6. Implémentation

Obstacles et Optimiser parcours). Le tableau Solutions techniques (MI) présente la solution technique retenue, qui est dans notre cas le troisième module intelligent (MI3) avec un coût de 43491 DA.

Le tableau 4.14 présente le résultat final et tient compte du nombre de composants nécessaires pour le FRI. En effet, dans l'exemple, nous n'avons pas dupliqué les composants, car ça n'avait aucun impact sur l'optimisation. Cependant, et afin d'avoir le coût total, nous avons pris en compte le fait que nous avons besoin de deux moteurs, deux caméras et deux capteurs. Le coût final de l'intégration du MI devient 83150 DA.

Tableau 4.14 – Résultats de la solution technique en tenant compte de tous les composants.

MODULE INTELLIGENT 3	Prix (DA)	Fixation(DA)	Câblage(DA)	Visserie(DA)	Attache(DA)	Prix Unitaire	Unité	Prix Total
Caméra PC usb, microphone	15000	1500	300	250	280	17330	2	34660
Capteur ultrasonique	1850	700	200	150	200	3100	2	6200
Raspberry Pi 4 B	7200	750	350	250	280	8830	1	8830
Moteur d'engrenage	3900	900	500	200	150	5650	2	11300
Contrôleur de Joystick à 200 degrés	6000	700	200	150	200	7250	1	7250
Batterie (Mighty Max) ML35-12 SLA rechargeable	13500	650	300	180	280	14910	1	14910
<b>CP (DA)</b>	<b>Cbom (DA)</b>							<b>83150</b>
4100	38000							

L'implémentation d'une telle approche va nécessiter la mise en place d'une base de données comprenant les différents composants et leurs coûts. Aussi, cette base de données devra être actualisée afin de permettre aux concepteurs de pouvoir choisir la bonne référence avec le prix actualisé. Une telle approche peut être adoptée en conception collaborative qui repose sur des solutions telles que le PLM (Product Lifecycle Management). La figure 4.8 présente l'architecture du FRI avec les composants obtenus via notre algorithme d'optimisation. Ainsi, notre approche permet de trouver les solutions techniques qui satisfassent les exigences.



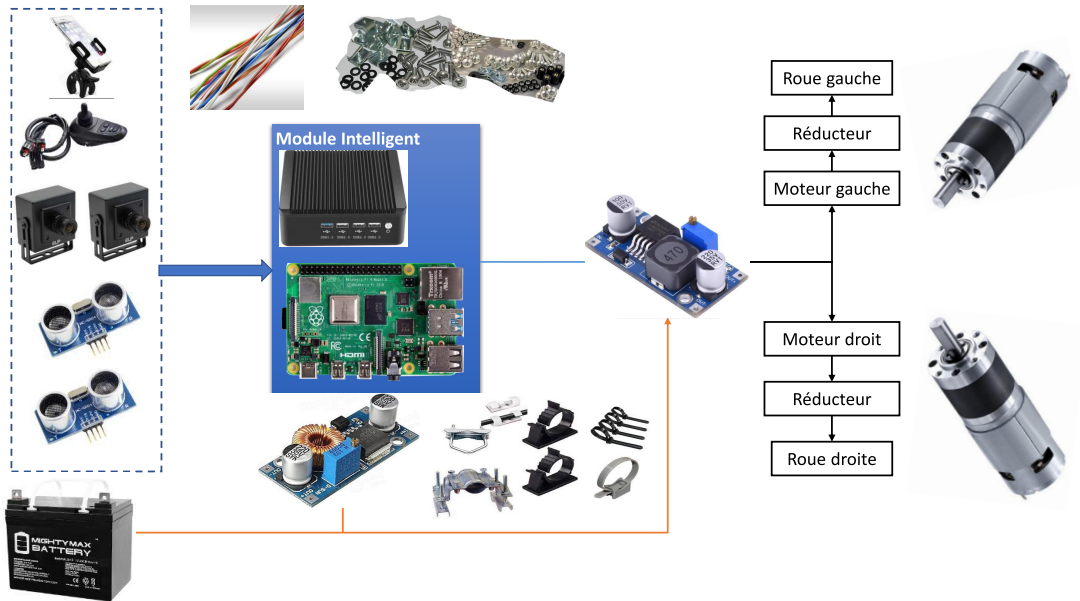


FIGURE 4.8 – Exemple de l’architecture d’un FRI avec les composants qui répondent aux exigences du contexte Algérien

Le support du smartphone a été sélectionné avec les différents supports des autres composants. Notons que dans notre exemple, nous n’avons pris en compte que le support du smartphone et n’avons ni intégré le smartphone en soi ni l’application.

## 4.7 Conclusion

Ce chapitre présente un modèle d’optimisation des coûts de re-conception de produits. Ce type de modèle traite le cas où on passe d’un produit existant à une nouvelle version. Dans ce cas, une nouvelle exigence impliquera une ou plusieurs nouvelles fonctions ou adaptation d’une fonction(s) existante(s). Dans les deux cas, l’impact touchera la chaîne d’approvisionnement, le processus de production et les composants.

Suite à notre analyse de l’état de l’art, nous avons constaté que l’architecture du FRI est générique (vision, traitement des données, moto-réducteur, etc.). Sur la base de



## 4.7. Conclusion

---

notre analyse, nous avons proposé une synthèse de l'architecture des **FR** (cf. chapitre 1 figure 1.20) qui montre bien les modules nécessaires pour un **FRI**. Cependant, d'un modèle de **FRI** à un autre, nous trouvons différents types de modules et composants. Ainsi, pour un concepteur, il devient primordial d'avoir des règles lui permettant de choisir les bons modules et composants.

Ce chapitre propose un modèle basé sur l'optimisation des coûts. L'optimisation de l'impact de changement d'exigence a été réalisée en deux étapes. La première a permis d'évaluer l'impact entre exigences et fonctionnalités. La deuxième étape a permis de lier les fonctionnalités et les solutions technologiques. En effet, une fonctionnalité peut induire une explosion de combinaisons des solutions technologiques incluant qualité, prix, satisfaction, etc. Dans notre approche nous nous sommes basés sur l'optimisation de coûts tout en tenant compte du degré de satisfaction des composants de la fonction qu'ils assurent. La validation de notre modèle est réalisée sur l'intégration de la nouvelle exigence "éviter les obstacles" qui a engendré l'intégration d'un module intelligent "**MI**". la section 4.6 présente l'implémentation et la validation de notre modèle. Nous sommes partis d'un **FRM** existant auquel nous avons ajouté des exigences et avons obtenu la solution technologique optimale répondant à ces exigences. Ce qui nous permet d'évaluer l'impact de changement d'exigences en termes de coût.

Aussi, le modèle que nous proposons, va permettre aux concepteurs de réutiliser les exigences existantes pour la re-conception de produits et réduire le temps de conception en ne se focalisant que sur les nouvelles exigences. Le modèle va leur permettre d'optimiser le coût de l'impact des nouvelles exigences sur les fonctions et solutions techniques existantes et converger vers les nouveaux composants de manière optimale. Dans le chapitre suivant nous allons réaliser la conception d'un modèle 3D tenant compte des nouvelles exigences ainsi que le **MI** pour lequel le modèle a convergé.



# Prototype de la solution en vue d'une industrialisation

---

## Sommaire

---

<b>5.1</b>	<b>Introduction</b>	<b>141</b>
<b>5.2</b>	<b>Architecture et composants de la solution proposée</b>	<b>142</b>
5.2.1	Spécifications techniques du FRM	142
5.2.2	Spécifications techniques du FRI	144
5.2.3	Architecture logicielle du module de vision du FRI	146
5.2.4	Modélisation des composants du FRM	149
5.2.5	Conception 3D de l'ensemble du module intelligent	151
<b>5.3</b>	<b>Processus d'assemblage et d'installation</b>	<b>154</b>
5.3.1	Processus d'assemblage du module intelligent	154
5.3.2	Installation et utilisation du module intelligent	155
<b>5.4</b>	<b>Plate-forme et simulation du FRI</b>	<b>157</b>
5.4.1	Système d'exploitation robotique ROS	159
5.4.2	Philosophie et architecture de ROS	160
5.4.3	Simulation Gazebo	162
5.4.4	Rviz (ROS visualization)	167
5.4.5	Communication inter-processus et modélisation	167
<b>5.5</b>	<b>Conclusion</b>	<b>170</b>

---

## Résumé



Le *FRM* standard est couramment utilisé par les personnes âgées et les personnes souffrant d'handicaps moteurs. D'après les résultats de l'enquête et de l'analyse fonctionnelle, l'utilisation d'un module intelligent est la solution qui permet de répondre à toutes les exigences en respectant les contraintes identifiées. Ce chapitre a pour objectif de définir le processus d'intégration d'un module intelligent dans un *FRM* standard et disponible sur le marché Algérien. La solution proposée minimise au maximum les modifications de la structure du *FRM*. Un modèle du *FR* standard est conçu à l'aide du logiciel de conception 3D *SolidWorks* pour tester l'intégration du module intelligent. Une simulation 3D de la navigation et de son environnement par l'outil *Gazebo* basée sur le framework *ROS* pour tester l'intelligence embarquée et l'utilisation de la vision artificielle pour l'évitement d'obstacles est réalisée. Les différentes parties du module intelligent sont positionnées de manière empirique pour assurer un fonctionnement optimal de l'ensemble. L'optimisation de la conception permet de faire apparaître des améliorations significatives qui peuvent être facilement introduites sur le *FRM* afin de le transformer en *FRI* adapté aux nouvelles exigences à coût réduit.

# 5.1 Introduction

N'importe quelle conception de produit passe par plusieurs étapes avant d'être mise sur le marché. L'étape de la production est une étape cruciale qui a connu plusieurs révolutions depuis plus de deux siècles. Les conceptions pour des FRE sont apparues au début du 20<sup>ème</sup> siècle. Elles permettent à l'utilisateur de contrôler le mouvement du FR motorisé à l'aide d'un joystick. Les FRE et les FRM sont les types de FR les plus populaires aujourd'hui [203]. Ce genre de fauteuils est souvent fabriqué dans des ateliers organisés en cellules et ordonnancés en flowshop ou jobshop. Les ateliers de production pour les modules intelligents ou les FRI respectent la même organisation. Récemment, l'industrie 4.0 a introduit de nouveaux concepts permettant de réduire les coûts de fabrication et d'accélérer le temps entre la conception et la mise sur le marché. De plus l'ensemble de la chaîne logistique a été prise en compte afin de réduire les coûts d'approvisionnement en matière première, augmenter la qualité et faciliter la maintenance. La numérisation du processus de conception et de fabrication est devenue une pratique incontournable pour atteindre les objectifs de coûts et de qualité évoqués et faire face à la complexité des systèmes de production modernes. Ce chapitre propose une solution d'industrialisation d'un FR répondant aux exigences du marché Algérien. Les étapes de définition des exigences et choix des fonctionnalités des produits permettent de concevoir une solution finale du fauteuil modulaire dans un cadre bien défini en termes de fonctions que le fauteuil doit accomplir et des contraintes qu'il doit dépasser et résoudre. Des outils de CAO permettant de concevoir et de tester virtuellement l'ensemble des composants du fauteuil. De plus, les différents composants respectant les contraintes ergonomiques et environnementales ont été pris en considération. Un ensemble d'étapes de production sont proposées pour assurer l'ensemble des opérations d'assemblage et de transformation que le produit doit subir.

Une simulation de la conception mécanique et de navigation a été développée afin de pouvoir tester la conception et les différents algorithmes de commande et d'évitements d'obstacles avant l'expérimentation dans la réalité. Cette partie vise à créer un environnement virtuel dans lequel le FRI est capable d'éviter les obstacles. En effet, un simulateur Gazebo 3D réalisé avec ROS où ROS fournit un cadre robotique à la fois pour l'application réelle et la simulation.

Ce chapitre vise à concrétiser les étapes accomplies dans les chapitres précédents en proposant une solution technique de l'intégration du module intelligent. Ainsi, il

met la lumière sur la problématique de fabrication des modules intelligents en présentant une méthodologie de conception novatrice et peu coûteuse par laquelle un **FRM** standard et disponible sur le marché pourrait être transformé en un **FRI**. Le chapitre présente la partie **FR**, la partie module intelligent et le processus d'assemblage en détail.

## 5.2 Architecture et composants de la solution proposée

Le **FR** retenu pour répondre aux exigences de l'utilisateur Algérien met en exergue le premier objectif, à savoir le prix bas du fauteuil avec l'introduction de l'intelligence basée sur l'utilisation d'algorithmes de vision et planification de trajectoires déjà développés et testés par une large communauté de l'inter-logiciel **ROS**. Ces algorithmes peuvent être exécutés sur un ordinateur avec une faible capacité tel que Raspberry Pi 4. Le système de perception est basé sur des caméras pouvant fournir une stéréo vision capable de détecter les obstacles statiques et dynamiques. Les exigences des utilisateurs retenues sont l'adaptabilité de la solution, le coût bas et la navigation facile, sécurisée et intelligente. Sur la base des exigences des utilisateurs (résultats du questionnaire), la solution retenue est le développement d'un module intelligent pouvant être installé sur des **FRM** avec l'observation des contraintes de coût. Nous allons nous baser sur l'utilisation de **FRM** disponibles sur le marché Algérien. Le choix de ce fauteuil doit permettre l'installation facile de la batterie et le module de calcul. Il doit aussi permettre l'installation des capteurs de perception notamment les caméras avec un minimum de modifications sur le fauteuil. Le résultat final est composé de deux parties principales : le **FRM** et le module intelligent. Nous allons détailler les spécifications du **FRM** sélectionné et le processus d'assemblage du module intelligent.

### 5.2.1 Spécifications techniques du **FRM**

La structure du **FRM** est le plus souvent fabriquée en tubes d'acier ou en aluminium, avec des articulations lui offrant plus de maniabilité et de stabilité. Les **FR** légers sont souvent des modèles pliables, qui sont donc adaptés à un usage à domicile ou à l'extérieur, et qui permettent d'être facilement rangés lorsqu'ils ne sont pas

## 5.2. Architecture et composants de la solution proposée

---

utilisés. Le FRM que nous avons sélectionné est représenté sur la figure 5.1. Il est équipé de 4 roues, 2 grandes roues arrière avec pneumatiques également, utilisées pour la traction arrière et sont facilement démontables. Elles sont disponibles en différentes tailles suivant le besoin de l'utilisateur et 2 petites roues avant. Les grandes roues ont une facilité de rotation, de déplacement à l'intérieur ou à l'extérieur et elles ont une durée de vie plus longue. Les caractéristiques d'un FRM standard sont illustrées dans la figure 5.1.

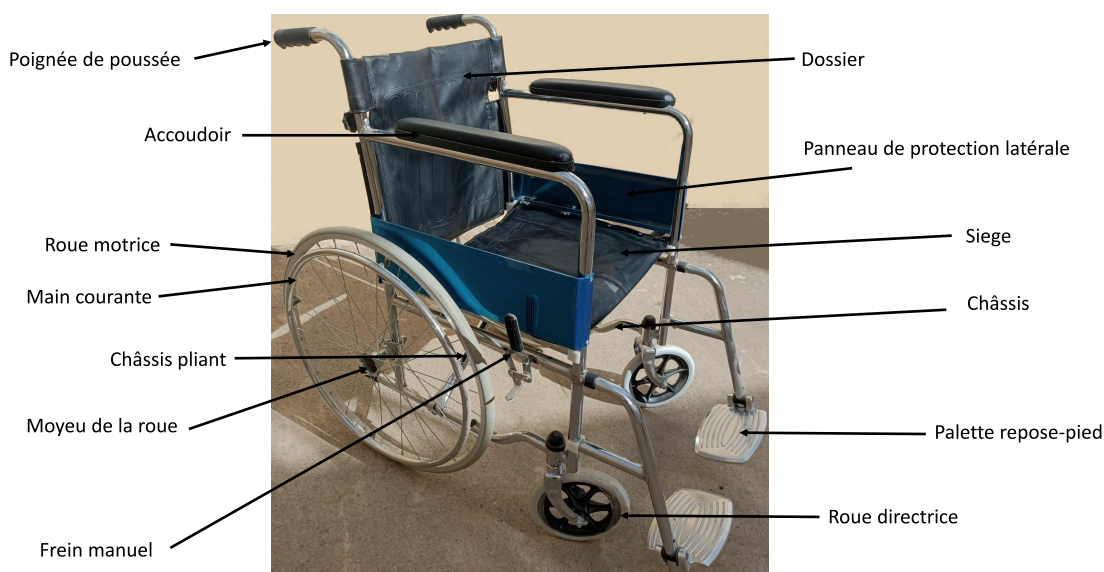


FIGURE 5.1 – FRM existant

Les principales dimensions du FRM standard sont :

- Largeur totale : 64 cm
- Largeur FR plié : 24 cm
- Largeur d'assise : 50 cm
- Diamètre de la roue arrière : 60 cm
- Diamètre de la roue avant : 20 cm
- Hauteur d'assise : 49 cm

- Hauteur totale du FR : 87 cm
- Longueur totale : 106 cm
- Profondeur d'assise : 40 cm
- Hauteur d'assise : 45 cm

Notre choix s'est porté naturellement sur le fauteuil le moins cher et le plus répandu sur le marché Algérien.

Aussi, les nouvelles contraintes pour le concepteur sont la disposition des composants selon les dimensions, la proximité du composant auquel il sera connecté, la contrainte sécuritaire en termes d'aération des composants électroniques de mouvement de frottement d'humidité, etc. Ceci va nécessiter donc l'utilisation d'un outil de conception 3D afin de simuler la structure finale.

### 5.2.2 Spécifications techniques du FRI

L'architecture fonctionnelle des FRI est constituée d'un FRM auquel ont été ajoutées des couches de commande électrique, batterie et motorisation (composant pour FRE) et aussi, ont été ajoutés du matériel et des logiciels pour la vision, la navigation autonome et l'interface utilisateur (FRI) (Figure 5.2).

La partie droite de la figure 5.2 montre les couches de modules rajoutés pour le passage du FRM au FRI en passant par le FRE. Les modifications mécaniques apportées au FRM peuvent comprendre des perçages dans la structure, la fixation des supports pour smartphone, le support pour capteurs et caméras et celui pour fixation de la batterie, le support pour les deux moteurs et ressort pour fixation du coffret et support moteurs. Chaque moteur sera couplé à un réducteur de vitesse.

Des encodeurs optiques rotatifs sont couplés à la chaîne cinématique pour la détection de la position et ainsi la navigation autonome. Dans notre étude, nous avons considéré l'encodeur couplé au moto-réducteur, ce qui nous permettra de les considérer comme un seul module. Une carte de puissance connectée aux encodeurs pour le retour d'information sur le contrôle du mouvement, à l'organe de contrôle qui peut être un joystick ou une interface graphique sur smartphone pour les consignes de contrôle et à l'ordinateur embarqué pour le contrôle en temps réel. Le système d'alimentation comprend une batterie lithium-ion (SLA rechargeable) et un panneau de distribution d'énergie (Alimentation 5 V) avec protection des circuits au



## 5.2. Architecture et composants de la solution proposée

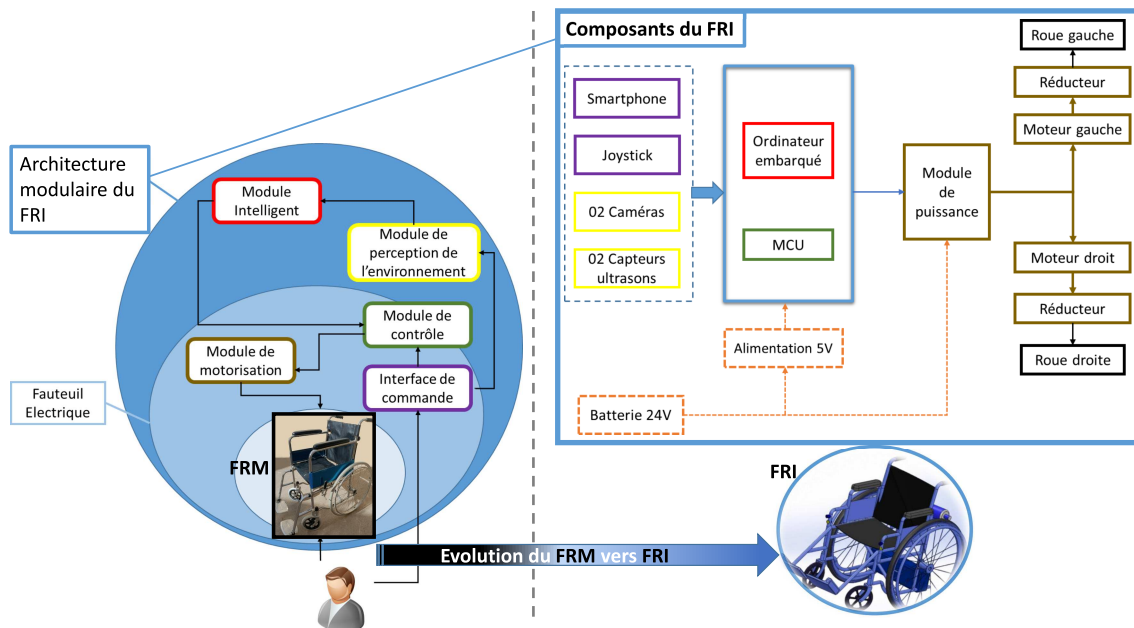


FIGURE 5.2 – Évolution du FRM vers FRI

niveau des composants. Les fonctionnalités de planification de la trajectoire et de contrôle du mouvement avec évitement d'obstacles sont basées sur les bibliothèques déjà développées pour la robotique mobile. Nos choix vont dépendre de la possibilité d'intégration sur les supports de calcul peu coûteux tels que la carte Raspberry (Ordinateur embarqué), Odroid XU4, Beagleboard, UDOO BOLT V8, ASUS Tinker Board S. Notre choix s'est porté sur la carte Raspberry parce qu'elle est disponible sur le marché avec un prix abordable. La carte est connectée aux deux caméras pour l'acquisition et les odomètres des moteurs pour alimenter le module intelligent avec les données nécessaires pour la localisation et la planification de la trajectoire. L'interface utilisateur à écran tactile est assurée par le smartphone de l'utilisateur placé sur le support adapté et alimenté via un câble. Le smartphone est connecté à la carte Arduino (Mega). L'utilisateur aura à télécharger l'application permettant l'utilisation du smartphone en tant que commande pouvant remplacer le joystick qui est placé par défaut sur le fauteuil. La figure 5.3 présente en détail l'architecture et les composants du FRI proposé.

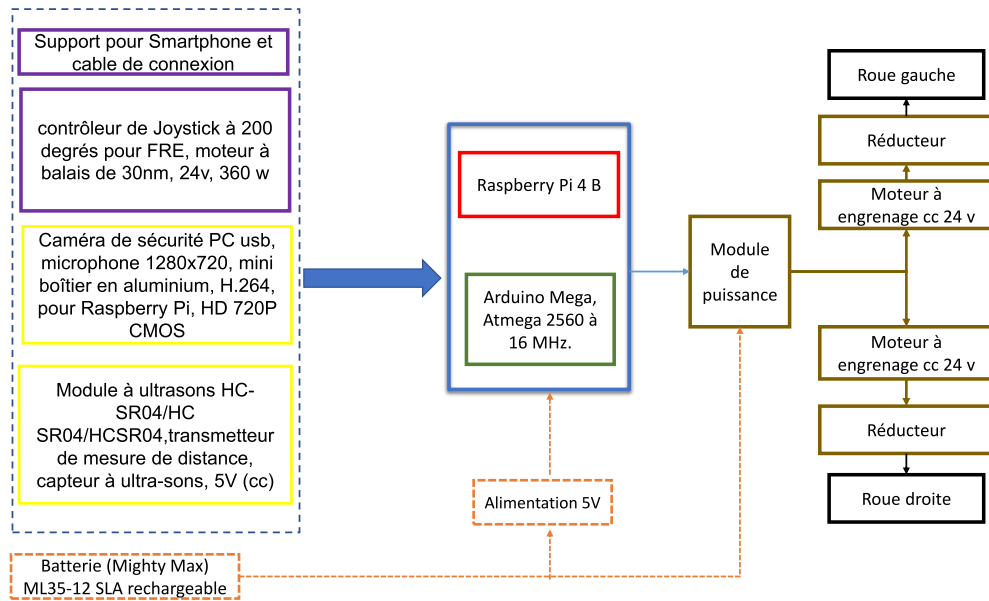


FIGURE 5.3 – Architecture du résultat de la solution technique proposée.

### 5.2.3 Architecture logicielle du module de vision du FRI

Le FRI standard est généralement commandé par un joystick. Il a pour but de fournir une meilleure assistance à l'utilisateur. La plupart des recherches ont intégré des capacités au FRI pour faciliter la navigation [204], la détection des obstacles [205][206], l'estimation de la distance [207] et le suivi des personnes [208] ainsi que le contrôle gestuel sur l'écran tactile via un smartphone [209]. Ainsi, ces FRI sont équipés de capteurs et de système informatique afin d'être en mesure d'exécuter un algorithme spécifique pour assurer ces capacités intelligentes.

Dans notre travail, nous nous basons sur la détection et l'évitement d'obstacles en utilisant une approche de vision par ordinateur. La détection d'obstacles est une technologie qui permet de détecter et de décider de l'action à entreprendre pour éviter une collision avec un obstacle. Aussi, nous combinons les capteurs ultrasons et la technique d'imagerie par caméra tout en acquérant l'information de l'obstacle. Les étapes de l'algorithme d'évitement d'obstacles sont présentées dans la figure 5.4.

L'unité de traitement principale utilisée par ce système est le Raspberry Pi 4 B avec un processeur Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit, de fréquence 1.5 MHz, 1 Go de RAM qui représente un PC embarqué et de basse consommation. Le système d'exploitation utilisé avec ce genre de carte est une variante de système d'exploitation

## 5.2. Architecture et composants de la solution proposée

---

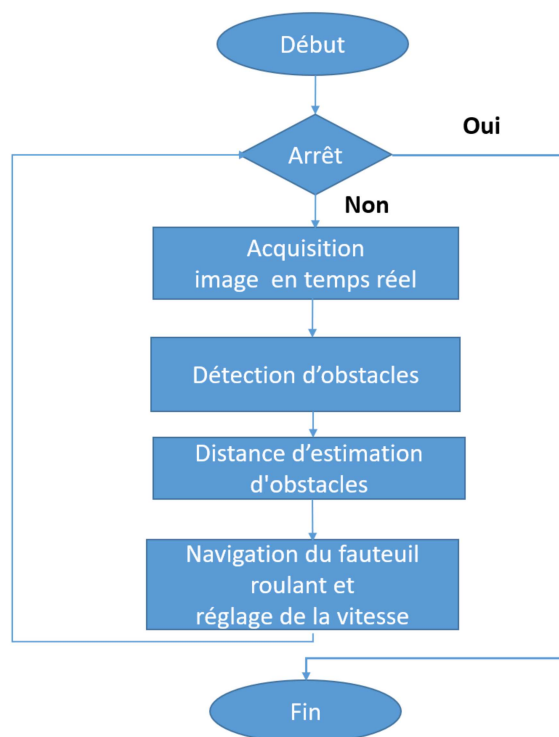


FIGURE 5.4 – Étapes de l’algorithme d’évitement d’obstacles.

appelé Raspberry Pi, il permet l’installation des bibliothèques de traitement d’image et de l’interlogiciel ROS qui permet d’intégrer une large gamme de capteurs et d’actionneurs et contient la plupart des techniques de contrôle de robots.

La caméra utilisée est un module de caméra Raspberry, choisie en raison de sa vitesse de traitement et de sa facilité d’intégration avec ROS. Pour piloter ce FRI, deux moteurs à courant continu (moteur gauche et moteur droit) transmettent les mouvements à chaque roue. La bibliothèque Move\_base de ROS permet de mettre en œuvre la navigation locale et globale dans une carte connue ou en évitant les obstacles de manière dynamique. La bibliothèque Move\_base permet de mettre en œuvre la navigation locale et globale dans une carte connue ou en évitant les obstacles de manière dynamique.

Le sous-système d’évitement des obstacles comprend deux modules : la détection des obstacles et l’estimation de la distance des obstacles. Le module de détection des obstacles utilise deux caméras de type PC USB, miniboîtier, H.264, pour Raspberry Pi, HD 720P CMOS, 6 mm à une portée de 5 m à 10 m. Ces deux caméras peuvent remplacer une caméra de profondeur en utilisant des fonctionnalités déjà développées

dans la littérature.

Pour l'amélioration de l'estimation de la distance avec les obstacles, deux capteurs ultrasons étanches de type HC-SR04/HC SR04/HCSR04, avec une tension de fonctionnement de 5V (cc), distance de détection entre 2cm à 450cm, angle du capteur est de 15 degrés.

Une carte Arduino Méga est utilisée pour connecter les capteurs ultrasons, les encodeurs et le module de puissance. Afin de faciliter l'intégration des différents éléments et d'utiliser les meilleures méthodes de planification de trajectoire et de contrôle du fauteuil, on propose d'utiliser ROS. Il s'agit d'un système open source permettant de contrôler des composants robotiques à partir d'un ordinateur. Le ROS est un ensemble de bibliothèques qui vise à simplifier la tâche de création d'un comportement complexe et robuste de robots sur une grande variété de plateformes robotiques.

ROS est installé sur le Raspberry pi 4 B qui représente l'organe de calcul principal dans notre système, des parties de calcul sont léguées à la carte Arduino qui prend en charge quelques fonctionnalités telles que le filtrage ou la collecte des données sur la position et les obstacles. Comme le montre la figure 5.5, les dispositifs d'entrée, le joystick et les deux caméras, seront connectés à la Raspberry Pi 4 B à l'aide de câbles USB.

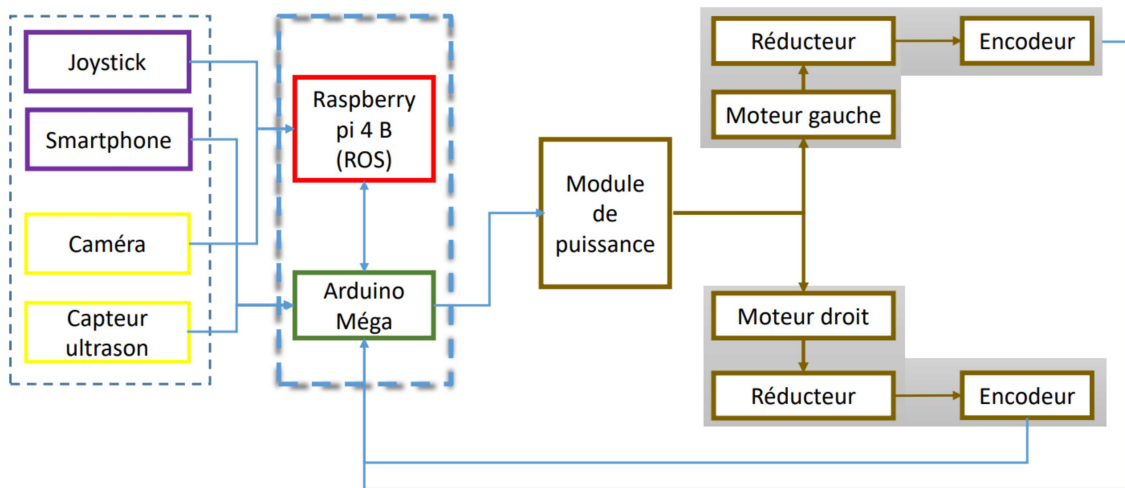


FIGURE 5.5 – Détail architecture proposée : dispositifs d'E/S.

Les principaux nœuds (dispositifs d'E/S) sont les caméras, les capteurs à ultrasons, le smartphone, le joystick et les moteurs qui sont les composants matériels

## 5.2. Architecture et composants de la solution proposée

---

du **FR**. Les nœuds qui envoient des données (éditeurs) directement au ROS sont les caméras, le joystick et les tachymètres, tandis que les capteurs à ultrasons envoient leurs données au **ROS** via la connexion série Arduino Méga. Les moteurs, en tant qu'actionneurs, reçoivent des commandes de vitesse du logiciel **ROS** via la connexion série Arduino/Module de puissance. La figure 5.6 illustre le transfert de données entre les composants matériels et le **ROS**.

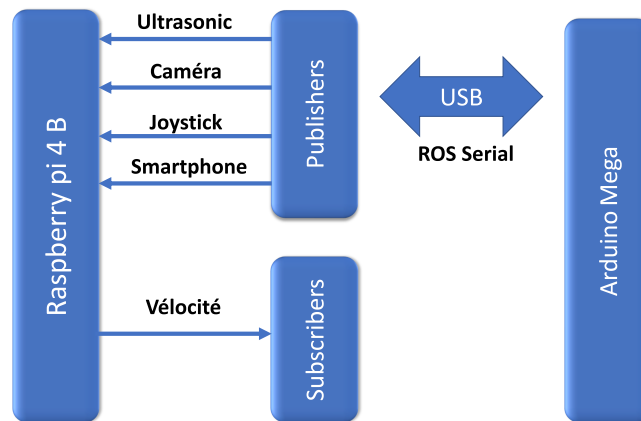


FIGURE 5.6 – Diagramme de transfert des données entre les dispositifs d'entrée/sortie et **ROS** installé sur le Raspberry pi 4 B.

Le **FR** nécessite une batterie de 24V pour une durée de fonctionnement de quatre à cinq heures. Un circuit (Alimentation 5V) est utilisé pour baisser la tension de 24V à 5V / 2,5 A pour les contrôleurs.

### 5.2.4 Modélisation des composants du **FRM**

Une étape principale dans la conception des produits est la conception 3D de tous les éléments et le test de faisabilité de l'assemblage des différents composants. Cela accélère la période d'étude des produits et réduit le nombre d'erreurs rencontrées lors de la réalisation. Dans notre projet, le **FRM** comporte plusieurs parties, la partie principale composée par le cadre de la carrosserie, et les autres parties se composent par le siège, les roues, le repose-pieds, le dossier et autres. Les dessins des pièces montrent les détails de la conception en termes de dimensions et de matériaux. Tous les dessins ont été réalisés à l'aide de l'outil de modélisation SolidWorks où la conception complète proposée est illustrée dans la figure 5.7.

Le logiciel de CAO 3D SolidWorks® a été choisi comme logiciel de conception de notre projet. Il est l'un des meilleurs logiciels de conception utilisé pour créer et modéliser des croquis 2D et 3D, de pièces et d'assemblages.

Les directives de conception du FR présentées se concentrent sur le fait d'être une structure légère, facile à entretenir, à un prix abordable et surtout pouvant intégrer un module intelligent. D'autres indicateurs ont été considérés dans le choix du fauteuil tels que la capacité d'accueillir des utilisateurs pesant jusqu'à 120 kg. L'utilisation de tubes creux en acier s'avère donc être un choix approprié en termes de poids et de rigidité mécanique.

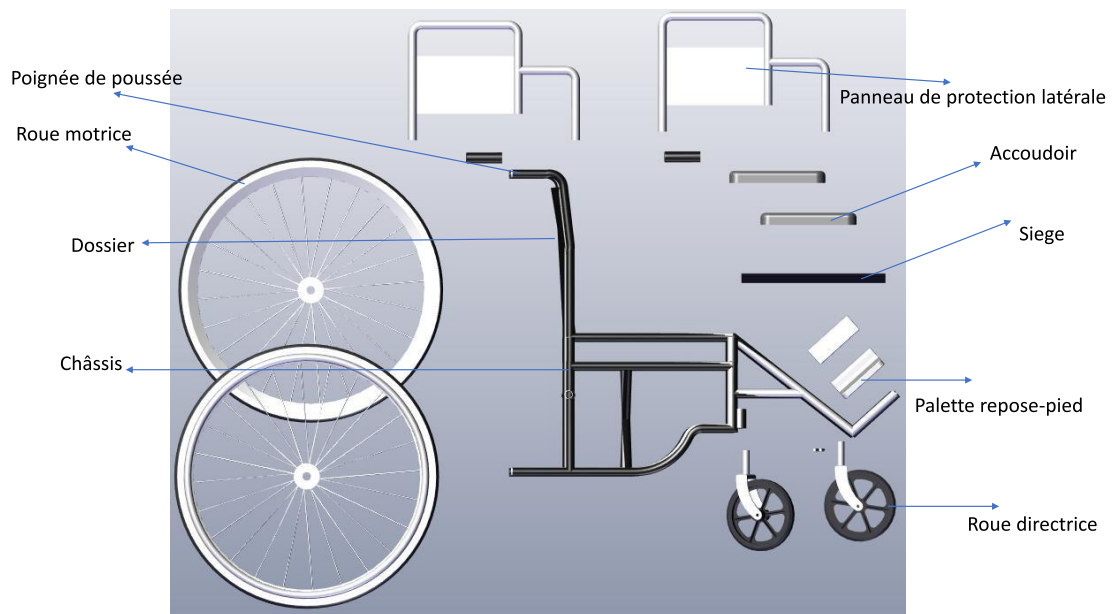


FIGURE 5.7 – Principaux composants du modèle FRM

La figure 5.8 montre les étapes d'assemblage final du FRM avec toutes ces contraintes qui créent des relations géométriques entre des composants d'assemblage. En ajoutant des contraintes, nous définissons les directions autorisées de mouvement linéaire ou en rotation des composants. Nous pouvons déplacer un composant dans les limites de ses degrés de liberté pour visualiser le comportement de l'assemblage.

## 5.2. Architecture et composants de la solution proposée

---



FIGURE 5.8 – Assemblage final du FRM modélisé

### 5.2.5 Conception 3D de l'ensemble du module intelligent

#### 5.2.5.1 Introduction

Il y a de nombreux compromis à prendre en compte lors de la conception ou de la sélection pour différentes utilisations, mais dans l'ensemble, le FRM doit être configuré pour optimiser la stabilité et la maniabilité lors de l'exécution des tâches quotidiennes. La stabilité est nécessaire pour assurer la sécurité et la sûreté de l'utilisation du fauteuil. La maniabilité affecte l'accès aux espaces restreints et la facilité de propulsion. Comme il existe un équilibre délicat entre la stabilité et la maniabilité, la configuration du FR doit être évaluée pour les activités intérieures et extérieures dans divers environnements.

L'assemblage du module intelligent peut se faire de plusieurs manières où chaque composant peut être placé à un endroit spécifique. Au départ, la question principale était : " Comment cet assemblage sera-t-il monté sur le FR ? " La fixation et le montage doivent s'adapter à l'intérieur des supports, qui se trouvent sur le FR existant. La position du montage doit être facile et stable. Le FR doit être analysé sous l'angle de l'ingénierie de matériaux, mais aussi sur celle du design industriel et tenir compte de l'impact sur le FRM existant afin de réduire le risque de poids ou le basculement de la structure lorsque le fauteuil est en déplacement. Alors nous nous



sommes concentrés uniquement sur le cadre de la carrosserie sur lequel le module intelligent est fixé.

### 5.2.5.2 Le Module Intelligent

Le module intelligent est composé de l'organe de collecte d'information et de perception, dans notre cas la caméra, le joystick/smartphone et le télémètre ultrasons. Il contient une capacité de traitement permettant d'exécuter des algorithmes de navigation apportant l'intelligence au système, et aux moteurs de changer leur vitesse qui se traduit par un ralentissement ou changement de direction du fauteuil. Ces algorithmes peuvent aussi prendre la décision de ralentir ou stopper si la personne n'est pas en mesure de le faire elle-même. Ces informations sont traitées par un mini PC (Raspberry) embarqué dans le FR (dans un coffre). La motricité offerte par le module intelligent est assurée par deux moteurs à courant continu contrôlant séparément une des deux roues arrière pour permettre de diriger le fauteuil, les moteurs sont fixés dans un cylindre, celui-ci est fixé à l'arrière de la structure, l'axe horizontal du mécanisme doit être réglé et placé correctement sur les grandes roues pour pouvoir piloter le fauteuil, comme le montre la figure 5.9. L'asservissement de la vitesse et la commande de puissance des moto-réducteurs sont effectués par une carte électronique appelée variateur. Les moto-réducteurs sont équipés de freins électromécaniques à manque de courant, commandés en tout ou rien. En fonctionnement normal, un moto-réducteur transmet une puissance à chacune des roues. Ainsi, lorsque les moteurs ne sont pas alimentés, le fauteuil est par sécurité automatiquement freiné par le frein à manque de courant.



FIGURE 5.9 – Partie moteur

Le système intelligent est situé en bas du FR entre les roues est monté dans un coffre aéré, étanche et perforé en haut pour faire passer les câbles de connexion,



## 5.2. Architecture et composants de la solution proposée

---

celui-ci supporte trois éléments nécessaires à la conduite du FR avec une batterie de 60 Ah / 24V, une carte Raspberry et un Arduino comme le montre la figure 5.10.

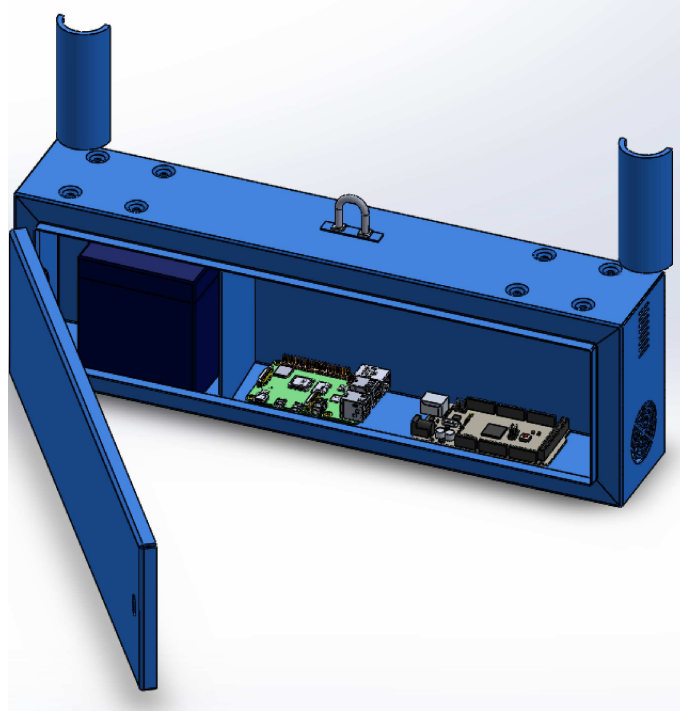


FIGURE 5.10 – Partie coffre étanche (Batterie, Arduino, Raspberry)

Pour l'acquisition d'images, les deux caméras(stéréoscopiques) et les deux capteurs ultrasons ont été montés en avant pour percevoir les obstacles sur le FR comme indiqué sur la figure 5.11.

Le contrôleur de moteur sélectionné pour le FR reçoit des données via USB de la carte Raspberry. Le contrôleur offre la possibilité de piloter les deux moteurs simultanément et le pilotage des freins.

Notre préoccupation a été d'utiliser des équipements existants et de concevoir un système pouvant être adapté sur les FR disponibles sur le marché en Algérie avec un coût minimum.

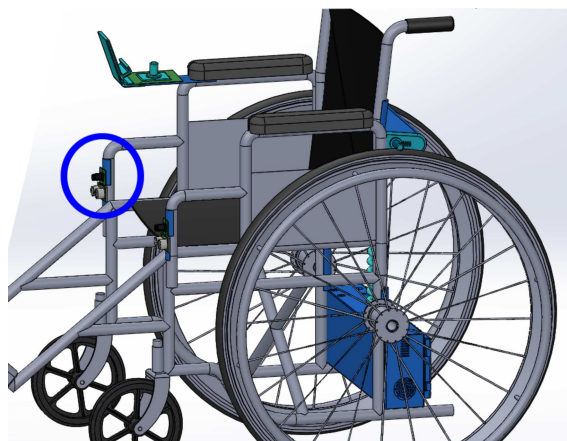


FIGURE 5.11 – Emplacement caméra et capteur ultrasons

## 5.3 Processus d'assemblage et d'installation

### 5.3.1 Processus d'assemblage du module intelligent

Comme on peut le voir sur la figure 5.12, le module intelligent est composé de trois parties, chacune regroupant plusieurs composants et assurant une ou plusieurs fonctions du module intelligent. Ces parties sont : le système de motorisation, le boîtier de puissance et d'alimentation et enfin, l'ensemble des systèmes de perception. Le processus de fabrication du module est peut-être organisé de plusieurs manières. Nous avons choisi une organisation en cellules pour assurer plus de flexibilité et d'extensibilité du système de production. Cette structure est adaptée aux produits non matures qui peuvent subir beaucoup de modifications après les retours clients. Pour faciliter l'implémentations de notre processus d'assemblage, nous proposons de regrouper les opérations concernant la même partie dans une seule cellule de fabrication. Cela nous a conduits à proposer un atelier de production composé de quatre cellules : Cellule pour l'assemblage des moteurs, cellule d'assemblage de boîtier de contrôle et d'alimentation, cellule d'assemblage et d'adaptation des organes de commande et enfin la cellule d'assemblage final et d'emballage. Les trois cellules responsables de l'assemblage de chaque partie sont indépendantes et peuvent exécuter leurs tâches en parallèle. Les sorties de ces cellules, sont les entrées de la 4<sup>ème</sup> cellule servant à contrôler la compatibilité des parties, effectuer le test de fonctionnement et l'emballage.

### 5.3. Processus d'assemblage et d'installation

---

Le module intelligent est considéré comme un module indépendant qui peut être installé sur un grand nombre FRM indépendant et qui ressemble au modèle de FRM déjà présenté dans la section précédente, figure 5.12.

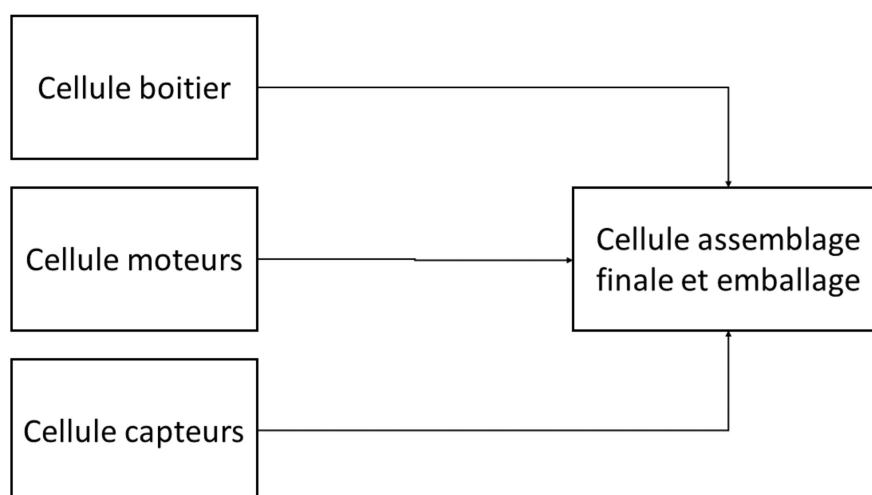


FIGURE 5.12 – Organisation de l'atelier de production du module intelligent.

L'architecture de connexion des différents éléments dans le module intelligent est présentée au chapitre 3. En effet, le système de contrôle est branché au boîtier de puissance et de commande. Ce dernier est connecté aux moteurs.

#### 5.3.2 Installation et utilisation du module intelligent

L'architecture du nouveau système installé sur le FR est illustrée dans la figure 5.13.

Le positionnement des différents éléments est représenté plus clairement sur la figure 5.14. Dans une première étape l'utilisateur installe le boîtier de puissance, les caméras, les capteurs ultrasons. Il rajoute ensuite le support du moyen de contrôle (Joystick ou Smartphone). Il termine par l'installation des moteurs. Le module est rechargeable sur prise électrique.

La figure 5.15 montre la position du ressort de fixation en horizontal, accroché à ses extrémités, le cylindre de motorisation et le boîtier de puissance. Le cylindre de motorisation est fixé à l'arrière des deux roues motrices. L'axe de transmission, reçoit l'impulsion de rotation générée par le moteur. La roue motrice est donc entraînée



FIGURE 5.13 – Installation finale du module intelligent



FIGURE 5.14 – Position et présentation du MI

#### 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

---

par l'axe du cylindre et génère une impulsion de rotation sur la roue permettant au fauteuil d'avancer. L'allongement du ressort exerce une force pour produire le mouvement de la roue motrice. Les dimensions du boîtier de puissance ainsi que le cylindre de motorisation est important à définir pour généraliser la solution.

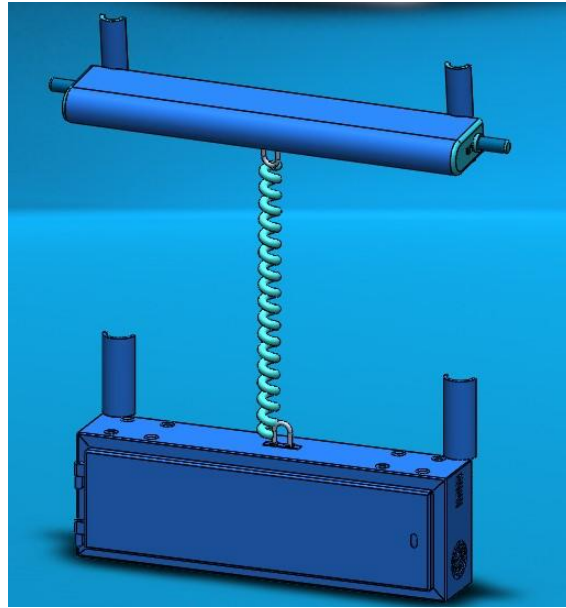


FIGURE 5.15 – Ensemble partie motorisation et boîtier de puissance

#### 5.4 Plate-forme et simulation du FRI

Les logiciels de simulation deviennent un outil de plus en plus important pour les systèmes d'automatisation, tant dans l'industrie que dans la recherche. Dans le domaine de la robotique mobile, il est utilisé pour évaluer les performances des robots en matière de localisation, de planification de mouvement et de contrôle.

La recherche en navigation de FR robotisés réalise un certain type de perception, de planification, de réflexion et de contrôle. Elle propose d'assister l'utilisateur pour des tâches ponctuelles telles que l'évitement d'obstacles, le suivi de couloir ou le passage de portes [113] [210]. La conduite peut également être autonome si l'utilisateur a au préalable bien défini sa destination via une interface qui reste à préciser. Cependant, pour qu'un système robotique soit opérationnel dans le monde réel, il faut un ensemble de logiciels plus performants. La simulation du FR dans un environnement virtuel nécessite une conception graphique et une simulation du

comportement du FR. À titre d'exemple, la rotation des roues du FR réel entraîne une rotation similaire des roues du FR virtuel. Si le FR virtuel rencontre un obstacle, les roues du FR réel sont arrêtées. De même, lorsque le FR virtuel monte ou descend une pente, les roues du FR réel sont accélérées ou ralenties. Selon le type d'application du simulateur de FR, l'environnement virtuel peut également contenir d'autres éléments au comportement complexe. Par exemple, Marchuk et al. [211] ont simulé un FR circulant sur un trottoir avec des piétons virtuels. Le comportement des piétons virtuels a été contrôlé par un algorithme d'intelligence artificielle pour réagir en fonction de la position du FR.

Jusqu'à présent, il existe peu de FRI commercialisés sur le marché. Les FRI actuels sont très coûteux pour une utilisation à grande échelle. Il existe un écart énorme entre la recherche et utilisation dans la réalité. Afin de réduire le coût des FRI, nous avons développé un système avec du matériel qui peut être exploité par les utilisateurs concernés. Dans le cas des FRI, ces études sont essentielles pour obtenir un système final et le rendre adapté à son utilisateur.

L'implémentation des architectures sur des systèmes de production flexibles et robotisées, demande l'utilisation de plate-formes logiciels spécifiques appelées middleware. L'idée principale d'un middleware robotique est d'éviter de refaire ce qui a déjà été fait sous une forme similaire à chaque fois et de proposer des fonctionnalités standardisées faisant abstraction du matériel. Il existe plusieurs exemples de ce type de logiciel dans la littérature, parmi les plus connus, nous pouvons citer : PyRo, Player, Micro, Urbi, Mira MOOS, LCM, Yarp, ROS...

Dans nos recherches sur la navigation et l'évitement d'obstacles, ROS est apparu à plusieurs reprises. Aussi, nous avons opté pour le middleware ROS et ce pour plusieurs raisons :

- Open source, et beaucoup de développeurs l'utilisent.
- Général et peut être appliqué pour différents robots : bras robotisés, drones, bases mobiles, FRI, ...
- Des packages ROS déjà créés.
- Ne possède pas un seul langage de programmation.
- De puissants outils de simulation (on peut notamment utiliser Rviz et Gazebo).
- De plus en plus de produits sont compatibles avec ROS.

## 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

---

Pour ce faire, nous avons construit un schéma de bloc qui définit les besoins du FRI pour les déplacements en autonomie, comme le montre la figure 5.16.

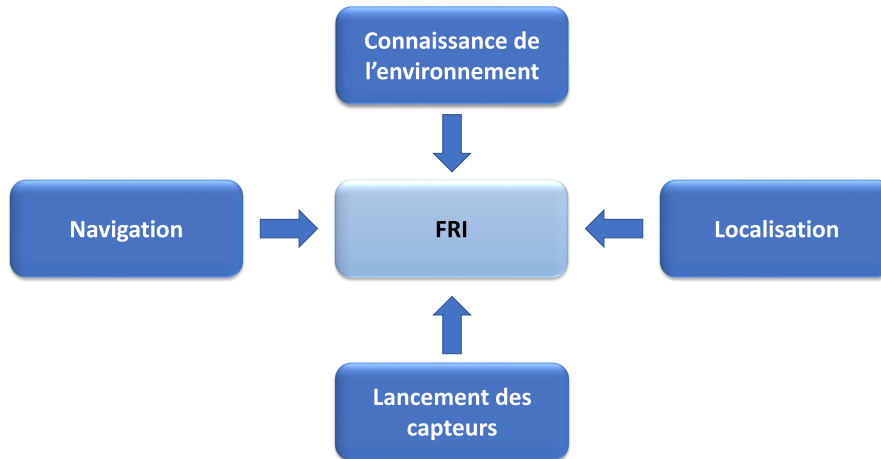


FIGURE 5.16 – Besoins du FRI pour les déplacements en autonomie.

### 5.4.1 Système d'exploitation robotique ROS

De nos jours, ROS est un framework très répandu et utilisé dans la communauté robotique. C'est un méta-système d'exploitation conçu pour les applications robotiques complexes. Nous constatons qu'en 2017, ROS [212] s'est imposé comme la référence dans le monde robotique aussi bien au niveau académique qu'industriel. Son objectif principal est de faciliter le développement et le partage des multiples composants d'un système robotique. Son architecture modulaire permet de choisir et d'exécuter seulement les modules requis pour la réalisation d'une tâche permettant ainsi un usage optimal des ressources. En neuf ans d'existence, ROS s'est imposé comme la référence des middlewares pour la robotique.

Plusieurs grands industriels comme Boeing, Siemens, PSA Peugeot Citroën utilisent déjà ROS [213].

Une architecture ROS est composée d'un certain nombre de nœuds indépendants, qui peuvent correspondre à un capteur, un moteur, un algorithme de traitement, de surveillance... , dont chacun a la capacité de communiquer avec d'autres nœuds. Chaque nœud est un processus système. La figure 5.17 montre les composants es-



sentiers de ROS et leur interconnexion.

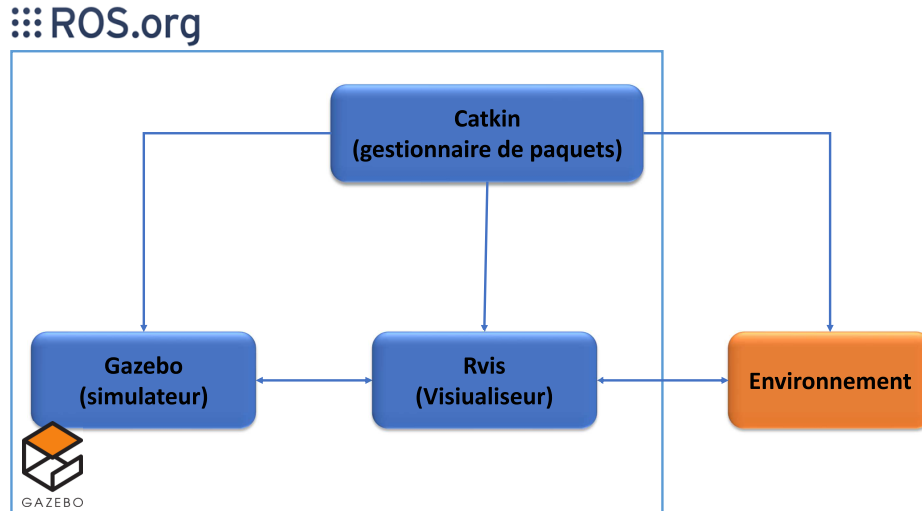


FIGURE 5.17 – Interaction et communication entre différents outils ROS

Les modules de ROS, appelés packages, sont les outils qui nous aident à réaliser les tâches requises par notre FRI. Ces packages peuvent exécuter des tâches de bas niveau comme communiquer avec les périphériques, combiner des sources de données et peuvent aussi réaliser des tâches plus complexes comme éviter les obstacles, planifier des trajectoires, etc. Ces modules ROS sont développés par toute la communauté d'utilisateurs, ce qui explique la compatibilité de ROS avec un très grand nombre de matériels et périphériques. Il existe une dizaine de versions de ROS (Hydro, Groovy, Fuerte, Indigo, Kenetic, Melodic...) qui ont été développées au fil des années. Pour notre travail, nous avons choisi la distribution la plus récente de ROS : ROS Melodic sous Ubuntu LTS 18.04.

### 5.4.2 Philosophie et architecture de ROS

La philosophie de ROS est de réaliser une partie du logiciel qui pourrait fonctionner dans d'autres robots en apportant peu de changements au code.<sup>1</sup>

D'une manière générale, ROS suit la philosophie d'Unix au développement logiciel dans nombreux aspects. Plusieurs aspects philosophiques de ROS sont présents dans [212]. Nous pouvons citer :

1. <http://wiki.ros.org/>



#### 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

---

- **Peer to Peer** : Les systèmes ROS sont constitués de nombreux petits programmes informatiques qui se connectent les uns aux autres et échangent continuellement des messages. Par exemple une carte embarquée sur le système et un ordinateur externe pour un calcul intensif. Avec son architecture basée sur la couche TCP/IP et une sérialisation de données efficace, il permet de réaliser des communications synchrones et asynchrones entre application et différentes entités du robot.
- **Basé sur les outils** : Dans le but de rendre ROS moins compliqué au niveau de sa structure et plus flexible, les tâches sont toutes exécutées par des programmes distincts, comme la navigation dans l'arborescence du code source, la visualisation des informations de débogage, la visualisation graphique, l'enregistrement des données, etc. L'avantage de cette solution est qu'un problème sur un exécutable n'affecte pas les autres, rendant le système plus robuste et évolutif.
- **Multi langage** : ROS a choisi une approche Multi langage. Les modules logiciels ROS supportent différents langages de programmation. Les développeurs peuvent coder sous ROS en C++, Python, LISP, Java, JavaScript, MATLAB, Ruby, Haskell, R, Julia, etc. Les connexions Peer to Peer sont négociées en XML-RPC qui existe dans un grand nombre de langages, tous compatibles les uns avec les autres (exemple : un module écrit en Python peut communiquer avec un module écrit en Java, tous deux enregistrés auprès d'un "ROSMaster" écrit en C++). ROS est donc complètement neutre du point de vue du langage, les langages peuvent être mixés dans un seul et même projet.
- **Léger** : Les conventions ROS encouragent les contributeurs à créer des bibliothèques autonomes, puis à les intégrer afin qu'elles puissent envoyer et recevoir des messages vers et depuis d'autres modules ROS. Cette couche supplémentaire est destinée à permettre la réutilisation de logiciels en dehors de ROS pour d'autres applications, et elle simplifie considérablement la création de tests automatisés à l'aide d'outils d'intégration standard.
- **Gratuit et open source** : Le noyau de ROS est publié sous la licence BSD (Berkley Source Distribution), qui permet une utilisation commerciale et non commerciale. ROS a été créé pour éviter de recommencer le développement

d'un projet à zéro. Il paraît alors logique de laisser un plus grand nombre utiliser cette plateforme et ainsi permettre de multiplier les bibliothèques disponibles.

### 5.4.3 Simulation Gazebo

Comme nous l'avons mentionné précédemment, [Gazebo](#)<sup>2</sup> est compatible avec ROS. C'est un outil permettant la simulation 3D de robots et de leurs environnements. Il a été choisi pour développer une simulation proche de la réalité, car il fournit des moteurs physiques très complexes, comme la gestion de la gravité ou de l'inertie. L'ajout d'obstacles en temps réel permet de faire des tests complets du fonctionnement du FRI.

[Gazebo](#) est extrêmement flexible. En changeant quelques paramètres d'exécution, il est possible de passer de la simulation de plusieurs robots à un petit nombre de robots complexes. Les plugins dotés d'une interface légère, permettent aux utilisateurs de personnaliser [Gazebo](#) et les capteurs disponibles couvrent la plupart des plates-formes de robots.

Cependant, [Gazebo](#) a besoin d'importer des modèles du FRI au format URDF (Unified Robot Description Format). URDF est un fichier de type XML (Extensible Markup Language) qui permet la représentation et la description cinématique d'une large variété de robots sur ROS. L'exportation de SolidWorks vers URDF permet d'exporter tous les composants et les assemblages dans un fichier URDF. Le module d'exportation crée un paquet de type ROS qui contient un répertoire pour les maillages, les textures et les fichiers URDF du FRI. Il peut déterminer automatiquement le type de joint, les transformations de joint et les axes appropriés, comme le montre la figure 5.18.

La première étape de la création d'un URDF consiste à la construction d'une structure arborescente (Figure 5.19). Le FRI doit être construit en suivant une structure sous forme d'arbre :

- On définit la structure par des « joint » et des « link ».
- Un « link » parent est un « link » qui peut regrouper plusieurs « joint ».
- Un « link » parent précède « joint », puis s'ensuit le « link » enfant.

---

2. <http://gazebosim.org/>

## 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

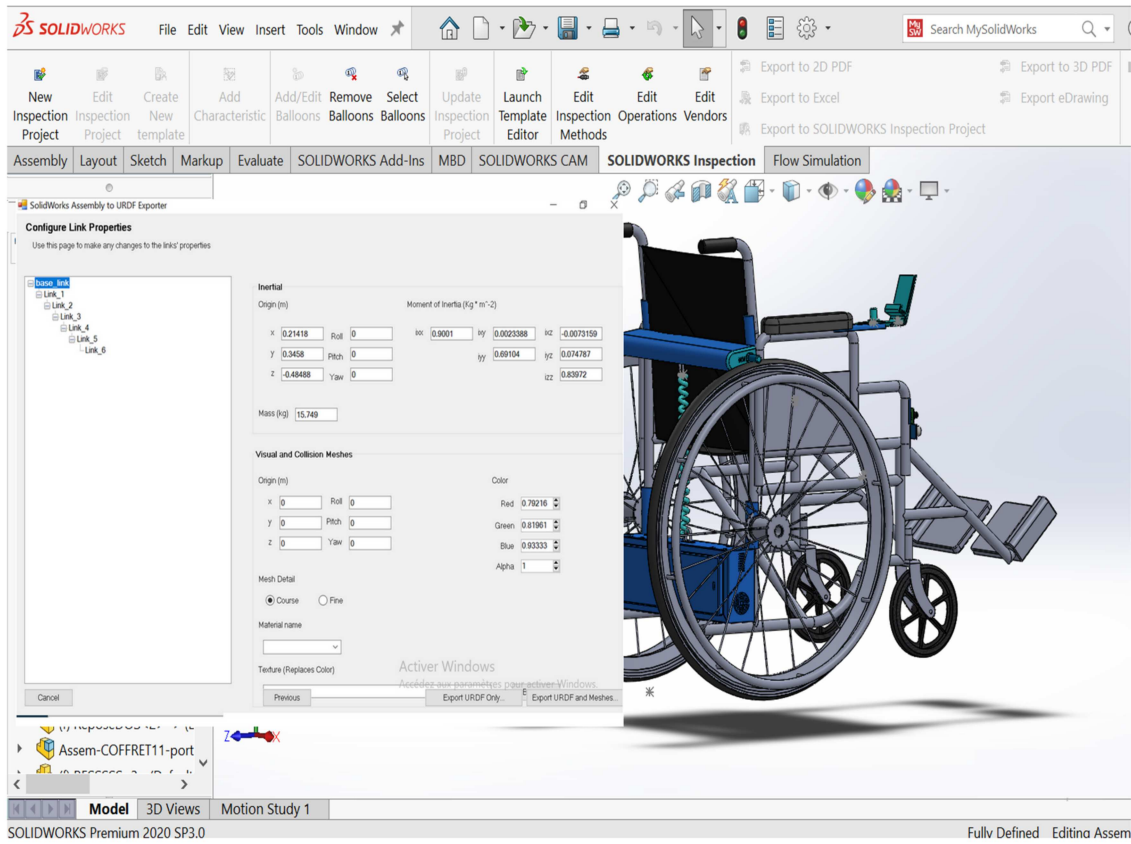


FIGURE 5.18 – Exportation assemblage Solidworks vers URDF

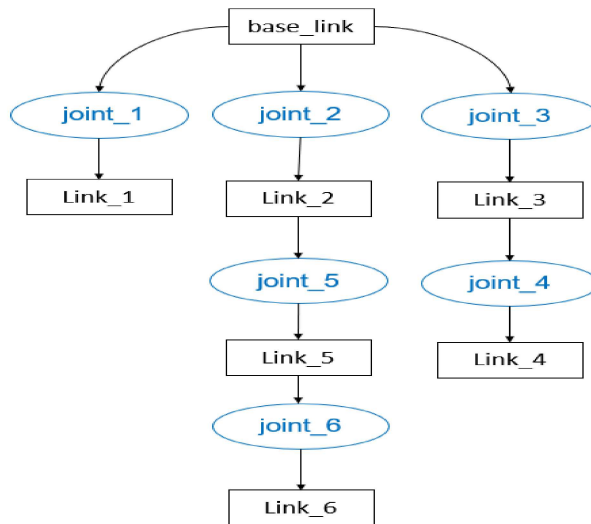


FIGURE 5.19 – Structure arborescente du FRI

```

    <?xml version="1.0" encoding="utf-8"?>
    <robot
    name="Fauteuil Roulant">
    <link
    name="base_link">
    <inertial>
    <origin
    xyz="0.21418 -0.48488 -0.3458"
    rpy="0 0 0" />
    <mass
    value="15.749" />
    <inertia
    ixx="0.9001"
    ixy="-0.0073159"
    ixz="-0.0023388"
    iyy="0.83972"
    iyz="-0.074787"
    izz="0.69104" />
    </inertial>
    <visual>
    <origin
    xyz="0 0 0"
    rpy="0 0 0" />
    <geometry>
    <mesh
    filename="package://Fauteuil
    Roulant/meshes/base_link.STL" />
    </geometry>
    <material
    name="">
    <color
    rgba="0.79216 0.81961 0.93333 1" />
    </material>
    </visual>
    <collision>
    <origin
    xyz="0 0 0"
    rpy="0 0 0" />
    <geometry>
    <mesh
    filename="package://Fauteuil
    Roulant/meshes/base_link.STL" />
    </geometry>
    </collision>
    </link>
    <link
    name="Link_1">
    <inertial>
    <origin
    xyz="8.8052E-08 -2.5799E-08 0.165"
    rpy="0 0 0" />
    <mass
    value="0.070869" />
    <inertia
    ixx="0.00067903"
    ixy="2.6541E-11"
    ixz="9.7553E-11"
    iyy="0.00067903"
    iyz="-1.8488E-06"
    izz="5.8174E-06" />
    </inertial>
    <visual>
    <origin
    xyz="0 0 0"
    rpy="0 0 0" />
    <geometry>
    <mesh
    filename="package://Fauteuil
    Roulant/meshes/Link_1.STL" />
    </geometry>
    <material
    name="">
    <color
    rgba="0.32549 0.98824 1 1"
    />
    </material>
    </visual>
    <collision>
    <origin
    xyz="0 0 0"
    rpy="0 0 0" />
    <geometry>
    <mesh
    filename="package://Fauteuil
    Roulant/meshes/Link_1.STL" />
    </geometry>
    </collision>
    </link>
    <joint
    name="joint_1"
    type="fixed">
    <origin
    xyz="0.21702 0.097612 -
    0.28267"
    rpy="-3.1333 0.033457 -
    0.71822" />
    <parent
    link="base_link" />
    <child
    link="Link_1" />
    <axis
    xyz="0 0 0" />
    </joint>
    <link
    name="Link_2">
    <inertial>
    <origin
    xyz="-0.0032449 -1.1824E-05 -
    0.0028411"
    rpy="0 0 0" />
    <mass
    value="0.0058504" />
    <inertia
    ixx="6.5846E-07"
    ixy="-2.2413E-09"
    ixz="1.586E-07"
    iyy="1.0837E-06"
    iyz="1.0679E-09"
    izz="9.2972E-07" />
    </inertial>
    <visual>
    <origin
    xyz="0 0 0"
    rpy="0 0 0" />
    <geometry>
    <mesh
    filename="package://Fauteuil
    Roulant/meshes/Link_2.STL" />
    </geometry>
    <material
    name="">
    <color
    rgba="0.79216 0.81961 0.93333
    1" />
    </material>
    </visual>
    <collision>
    <origin
    xyz="0 0 0"
    rpy="0 0 0" />
    <geometry>
    <mesh
    filename="package://Fauteuil
    Roulant/meshes/Link_2.STL" />
    </geometry>
    </collision>
    </link>
    <joint
    name="joint_2"
    type="continuous">
    <origin
    xyz="-0.50568 -0.2176 0.11068"
    rpy="-2.5511 -1.5363 0.24222" />
    <parent
    link="Link_1" />
    <child
    link="Link_2" />
    <axis
    xyz="0 0 0" />
    </joint>
    <link
    name="Link_3">
    <inertial>
    <origin
    xyz="0.020263 0.23817
    0.0011058"

```

FIGURE 5.20 – Exemple du code du FRI dans Gazebo

## 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

La figure 5.20 présente l'exemple du code nécessaire pour mettre en œuvre le FRI dans Gazebo (Nous allons montrer une partie du code, puisqu'il comprend plusieurs pages). Dans celui-ci nous pouvons voir le type de paramètres nécessaires afin de mettre en œuvre le FRI. La complexité de ce type de paramétrage freine l'usage de Gazebo, car il est complexe à comprendre et sans un bon paramétrage, la simulation ne fonctionnera pas. En effet, les simulateurs comme Gazebo ont un temps d'apprentissage long et nécessitent d'importantes puissances de calculs. C'est pourquoi l'utilisation d'une simulation plus simple à prendre est généralement mise en œuvre aux dépens du réalisme.

Nous avons modélisé un environnement dans lequel se déplace notre FRI, tout en essayant de détecter et éviter les obstacles autour de lui. Nous avons introduit 6 obstacles à l'aide de l'éditeur de modèles de Gazebo en formes de boîtes, cylindres et murs, placés régulièrement dans notre environnement.

Le modèle que nous avons créé est présenté dans la figure 5.21 qui montre la position du FRI sur Gazebo.

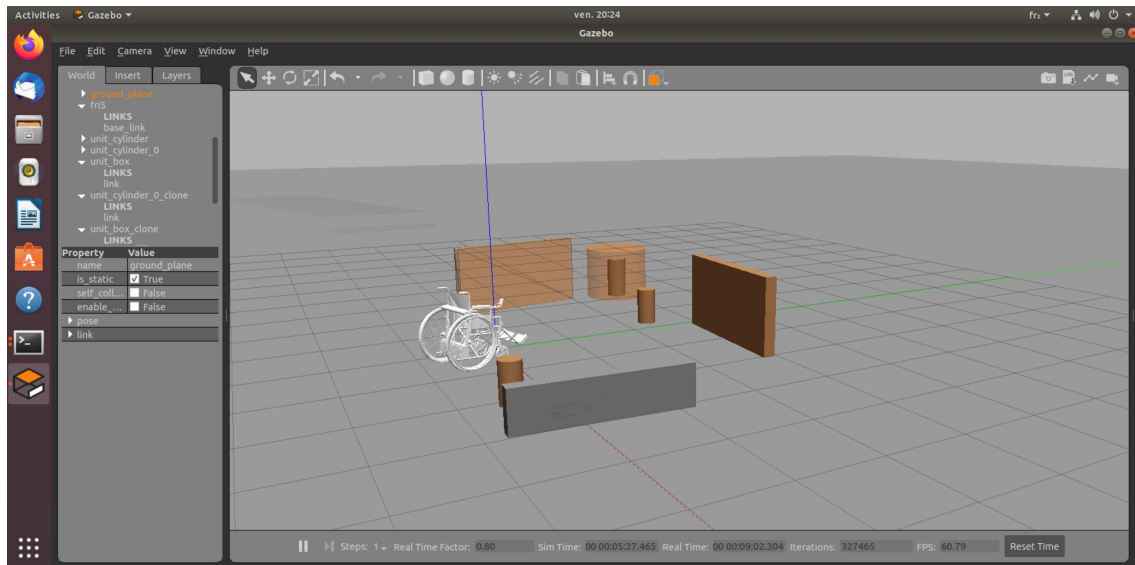


FIGURE 5.21 – Position du FRI sur Gazebo

Le FRI qui démarre son mouvement au milieu des obstacles, est censé arriver à la destination en évitant les obstacles. Les différentes vues de la simulation du FRI sur Gazebo sont présentées dans les figures 5.22 et 5.23.

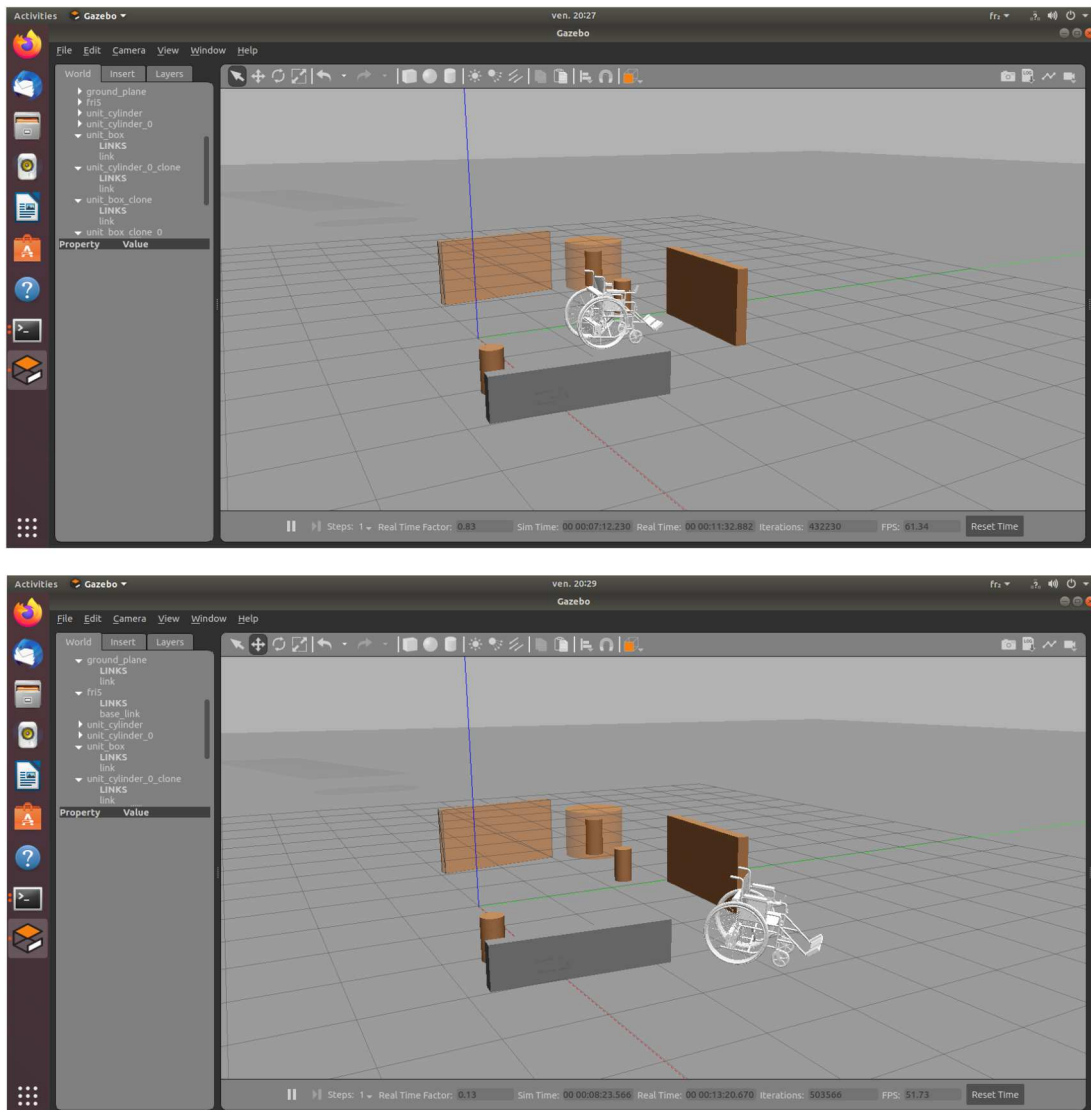


FIGURE 5.22 – Simulation du déplacement du FRI sur Gazebo

## 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

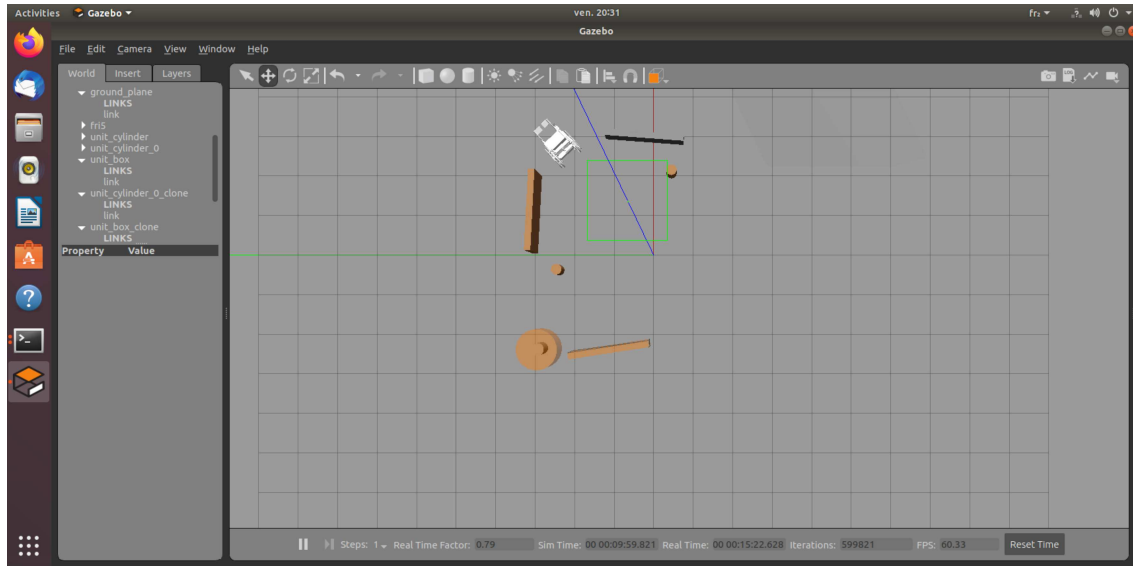


FIGURE 5.23 – Vue en plan de la simulation du déplacement du FRI sur Gazebo

### 5.4.4 Rviz (ROS visualization)

Rviz est un puissant outil de visualisation 3D pour ROS. Il permet de collecter les différentes informations des nœuds afin de présenter un aspect visuel des valeurs, par exemple : la trajectoire du FRI, les repères utilisés, la carte de l'environnement, les données des capteurs (la caméra, les capteurs infrarouges, le Lidar, etc.), le modèle du FRI, etc. Avec Rviz, on peut aussi donner des commandes au FRI ou à l'algorithme de contrôle, par exemple : la destination souhaitée, l'estimation de la position actuelle du FRI, etc. La figure 5.24, présente le modèle du FRI.

### 5.4.5 Communication inter-processus et modélisation

Pour communiquer entre les nœuds, ROS utilise un modèle publisher/subscriber. Les données sont donc directement transmises de façon sérialisée entre les publishers et les subscribers comme résumé sur la figure 5.25.<sup>3</sup> Il y a une différence importante entre la visualisation Rviz et la simulation Gazebo. Gazebo est utilisé pour afficher la position relative des liens, alors que Rviz est considéré comme une copie expérimentale du FRI réel dans le monde virtuel.

Pour activer les fonctionnalités de ROS, une bibliothèque d'environnement Arduino est installée afin de gérer les moteurs via les commandes reçues depuis ROS.

3. <http://wiki.ros.org/ROS/Concepts>



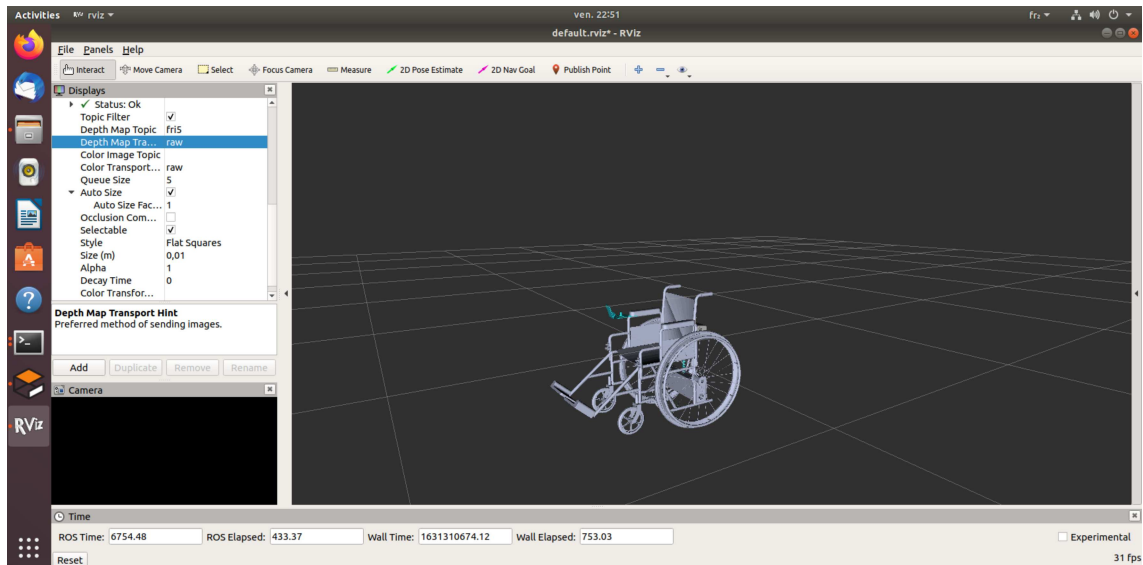


FIGURE 5.24 – Visualisation du FRI sur Rviz

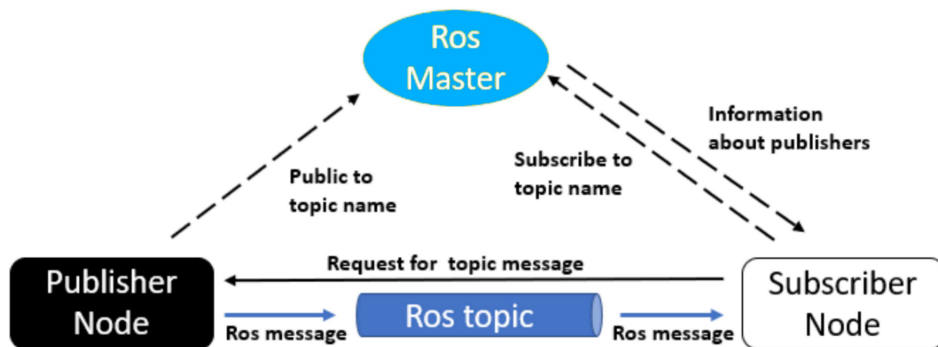


FIGURE 5.25 – Communication des messages via un système de transport avec la sémantique publisher/subscriber.

Elle utilise le protocole Rosserial pour s'interfacer avec le Raspberry Pi 4 B, pour la navigation et la localisation des objets. La caméra est ensuite utilisée afin d'effectuer la reconnaissance. Le logiciel va également publier, sur le Topic pose, la position calculée du FRI selon la rotation des moteurs.

En outre, Rviz nous permet de visualiser en temps réel les résultats des capteurs transmis par ROS y compris les données des images de la caméra. La figure 5.26 montre les points rouges que signifient les données générées par les capteurs et la figure 5.27 montre les points de profondeur tels que détectés par les caméras et valider que les actions du FRI respectent le comportement désiré.



## 5.4. Plate-forme et simulation du FRI

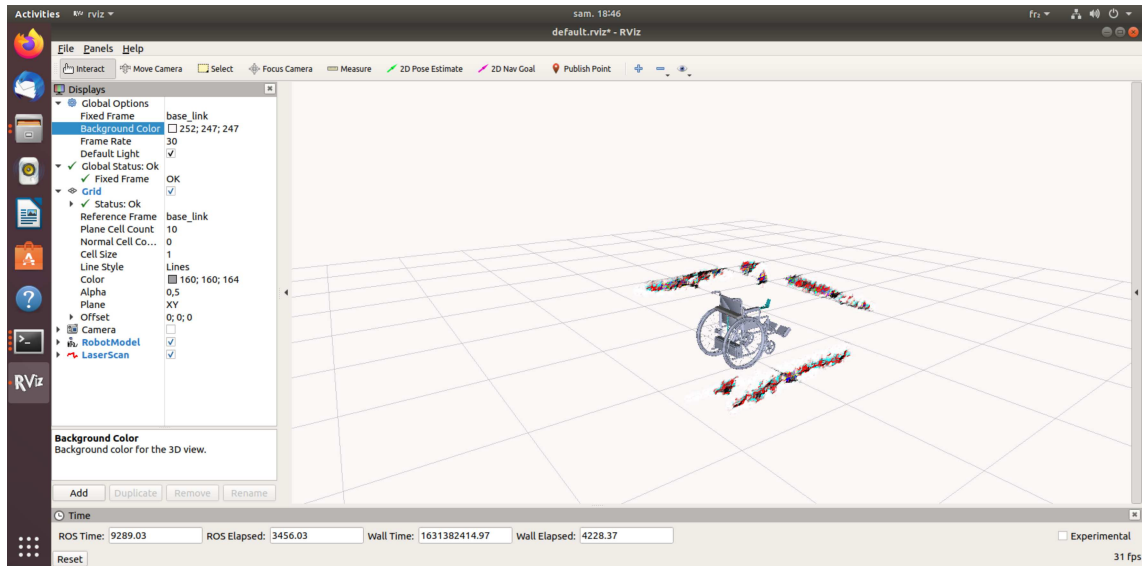


FIGURE 5.26 – Visualisation des obstacles sur Rviz

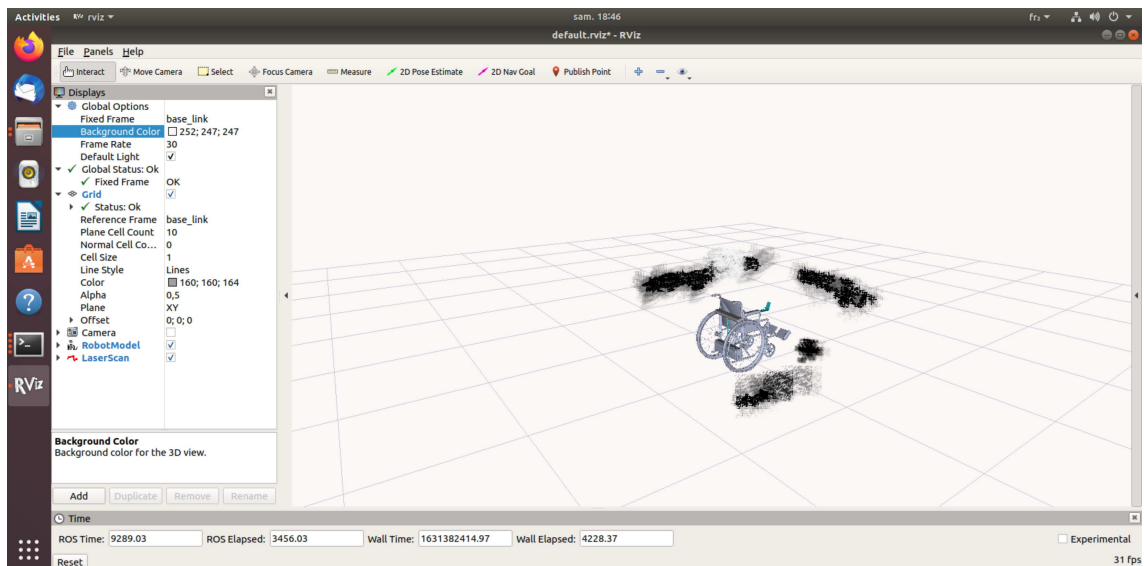


FIGURE 5.27 – Visualisation des obstacles en profondeur sur Rviz

La figure 5.28 montre le déplacement du FRI en évitant les obstacles.

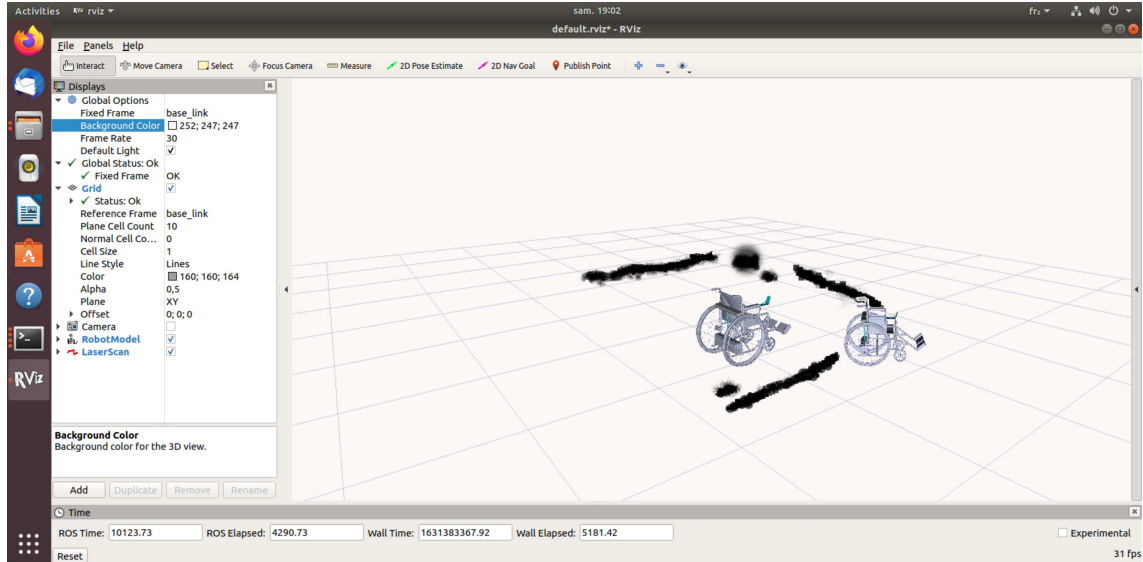


FIGURE 5.28 – Visualisation du déplacement du FRI

## 5.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le prototype développé du module intelligent en détaillant l'architecture matérielle retenue de l'optimisation de la conception. Nous avons présenté, par la suite, la couche logicielle nécessaire au fonctionnement de base du fauteuil. Aussi, nous avons utilisé la représentation 3D pour tester l'assemblage du module sur le fauteuil, en modélisant en détail la composition des différentes parties du module intelligent. Une première version du processus d'assemblage basée sur une organisation en trois cellules d'assemblage parallèle et une cellule finale de test et emballage a été présentée. Une dernière section a été consacrée à la présentation de la simulation mécanique et de la navigation. Cela a permis de valider le prototype proposé et le fonctionnement du dispositif intelligent. Cependant, la simulation 3D par l'outil *Gazebo* basée sur le framework *ROS*, nous a permis de créer notre modèle de *FRI*, et d'ajouter des contraintes physiques à l'environnement (murs, boîtes, cylindres, etc.), aussi de simuler tous types de capteurs et ses algorithmes avant de les déployer sur le *FRI*. La deuxième simulation est basée sur l'outil *Rviz* qui nous a permis de visualiser les données provenant de capteurs, qu'ils soient réels ou simulés, ainsi que le modèle du *FRI* lui-même. Ceci est très utile pour

## 5.5. Conclusion

---

comprendre le comportement du FRI selon ce qu'il voit à travers ses capteurs. Cela a permis de valider le prototype proposé et le fonctionnement du dispositif intelligent. Cette étude doit être validée par un prototype avec introduction de nouvelles technologies de prototypage rapide tels que l'impression 3D.



# Conclusion générale et perspectives

Le but principal de notre travail est l'exploration de la vision artificielle en vue d'une conception d'un dispositif intelligent dans un contexte industriel en appliquant des modèles décrits dans la littérature et appliqués dans d'autres domaines comme la robotique, la conception, la re-conception, la modélisation et les techniques de l'intelligence dans les **FR**. Le problème principal auquel s'attaque cette thèse est le développement d'un produit intelligent exploitant de nouvelles technologies devenues abordables telle que la vision artificielle. Le produit en question est le **FR** pour les personnes handicapées. Lors du développement de ce produit, nous avons découvert que les personnes handicapées en Algérie ont des besoins que personne n'a pris en compte lors du développement de leurs fauteuils. Nous avons donc mené une enquête pour vérifier nos hypothèses et détecter leurs besoins. L'issue de cette enquête a permis de valider nos hypothèses, à savoir, les besoins différents du contexte Algérien, la demande et l'acceptation de produits intelligents et la contrainte limitée du coût.

La solution technique optimale proposée a été générée par une démarche d'ingénierie système en utilisant **SysML** qui permet de lier les exigences à des fonctionnalités. Un modèle mathématique permettant de définir les fonctionnalités optimales à mettre dans le fauteuil afin de répondre à toutes les exigences qui ont été définies a été développé. Nous avons finalement penché pour une solution utilisant la re-conception de produits existants. Plusieurs alternatives pouvaient être choisies, mais nous avons opté pour l'alternative permettant l'utilisation de produits faciles à trouver et à maintenir. L'idée principale est d'équiper des **FRM** avec des modules intelligents. L'intelligence du module réside dans sa capacité à percevoir son environnement, sa capacité de prendre des décisions d'évitement d'obstacles ou d'alertes. La vision artificielle à base de caméras et de capteurs ultrasons est une solution intéressante qui permet d'utiliser des caméras de profondeurs à moindre coût. L'utilisation de la carte Raspberry PI4 B et la carte Arduino Méga sont largement suffisantes pour exécuter les bibliothèques de **ROS** dans notre fauteuil.

Plusieurs contributions ont été proposées dans ce travail de recherche, à savoir, l'identification des exigences des personnes handicapées dans le contexte Algérien à travers une enquête de terrain. Cela a permis le développement d'un modèle de comportement, des personnes handicapées, applicable au contexte Algérien. Nous

avons aussi proposé une solution technique basée sur la re-conception et pouvant répondre à un grand nombre d'exigences des personnes handicapées. Le formalisme SysML a été utilisé pour la modélisation de la solution afin de lier le modèle aux exigences. Une autre contribution majeure de cette thèse est le développement d'un modèle d'évaluation de l'impact de changement d'exigence produit sur le système de production. Ce modèle est basé sur l'optimisation des coûts de re-conception de produit. Une solution technologique (module intelligent pour le FR) avec son processus d'industrialisation ont été proposés à l'issue de cette étude.

Le manuscrit décrit tout d'abord un état de l'art de tous les renseignements collectés dans la littérature en rapport avec les différents FR ainsi que la situation des marchés dans les pays développés et ceux en voie de développement tel que l'Algérie. Il existe en effet un grand nombre de fauteuils et de technologies différentes, pour que les utilisateurs puissent se déplacer facilement et de manière indépendante, dans leur vie quotidienne. Par ailleurs, les utilisateurs des FR ont exprimé des besoins très diverses, ce qui doit être satisfait avec des systèmes personnalisables. Une architecture modulaire de développement de FRI a été proposée sur la base d'étude de l'état de l'art. Le deuxième chapitre a été consacré à la définition du comportement des personnes handicapées en Algérie. Nous avons décrit dans ce chapitre le développement du questionnaire et son déploiement ainsi que l'analyse des résultats. Cette étude représente une contribution majeure de la thèse parce qu'elle a permis de développer un modèle en utilisant les données locales collectées à partir d'une enquête terrain. Le troisième chapitre a exploité les outils d'analyse fonctionnelle et du SysML pour concevoir le produit pouvant répondre aux exigences identifiées. Comme le nombre de solutions possibles est grand et qu'il n'y a pas de méthode structurée et claire pour définir le meilleur choix, nous avons proposé un modèle mathématique permettant de définir la solution optimale en termes de fonctionnalité pouvant répondre à des exigences. Le dernier chapitre est une tentative de concrétiser la solution en proposant un modèle 3D de la solution pour tester l'intelligence embarquée et l'utilisation de la vision artificielle pour l'évitement d'obstacles par des outils de simulation avancés et en proposant une méthode pour arriver à une conception réelle.

Cette thèse a ouvert le champ sur plusieurs problématiques scientifiques que nous comptons résoudre par la suite. Une perspective à court terme est la réalisation d'un

## Conclusion générale et perspectives

---

prototype en exploitant les moyens de prototypage rapide (impression 3D). La perspective à moyen terme est d'effectuer un transfert technologique en partenariat avec un industriel. L'objectif est de commercialiser un FR électrique intelligent disposant de notre assistance à la conduite. Il nous semble important que les utilisateurs aient un accès large à ce type d'assistance pour qu'elles puissent évoluer et répondre au mieux à leurs besoins.

Sur le plan du développement des méthodes d'ingénierie système, il est possible d'utiliser des moyens de modélisation et de simulation récentes tels que les systèmes multi-agents pour établir dynamiquement le lien entre le changement d'exigence et la composition du produit. En ce qui concerne le modèle d'optimisation utilisé, nous avons proposé un modèle basé uniquement sur le coût, il serait intéressant de développer un modèle d'optimisation multi-objectifs pour introduire des objectifs de confort, de maintenabilité et d'empreinte carbone.

Enfin, la thèse a soulevé un problème crucial relatif aux FR dans le marché Algérien. Nous avons détecté que les besoins des utilisateurs en Algérie ne sont pas satisfaits par les FR importés. Une perspective intéressante est de généraliser cette démarche sur d'autres domaines tels que le prêt à porter, l'alimentaire et d'autres équipements tels que l'électroménager, le transport, etc.

Ainsi être à jour et actualiser la présente recherche doctorale et les solutions proposées pour les rendre dignes d'intérêt et susceptibles d'attirer l'attention des opérateurs économiques et de drainer des investissements.





# Annexes

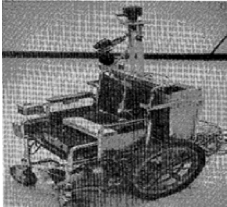










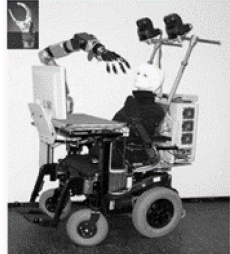
# Liste des principaux projets des FRI



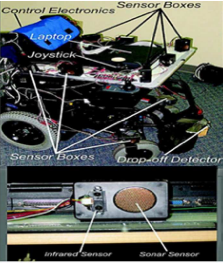

---

ci-dessous, nous présentons les principales recherches des FRI décrites dans la littérature comme présenté dans le tableau A.1.

Tableau A.1 – Principales recherches portées sur les FRI décrites dans la littérature.

FRI	Description
 Madarasz en 1986	Le premier projet du FRI intégrait un micro-ordinateur, un appareil photo numérique, et un scanner Ultra-Son, doté d'un système de détection d'obstacles par vision, et de capteurs ultrasons qui lui permettent de naviguer dans des environnements encombrés [73].
 VAHM 1 1990	Le projet VAHM (Véhicule Autonome pour Handicapé Moteur) est conçu à partir d'une base mobile ROBU-TER équipée d'un micro-ordinateur portable et d'un siège pour personne handicapée. Cette base mobile a des dimensions identiques à celles d'un FRE standard [214].
 Hoyer et Holper en 1993	FR omnidirectionnel qui présente une architecture de contrôle modulaire [82]. L'objectif était de créer un modèle capable de naviguer dans les milieux très complexes, en prenant en compte d'une part les besoins de l'utilisateur qui demande plusieurs fonctionnalités comme le déplacement d'une manière transversale et la manœuvre dans les endroits étroits [31]. Certains utilisateurs ont besoin de réaliser des tâches spécifiques et donc des bras manipulateurs sont ajoutés au FR [32].
 Wellman 1993	Fauteuil hybride équipé de deux pieds et quatre roues ordinaires. Les pieds permettent au fauteuil de monter les escaliers et de se déplacer sur des terrains difficiles [215].
 Tin Man I- Miller et Slak en 1995	Les auteurs ont développé le système avec trois modes d'opérations telles que l'évitement des obstacles, déplacement sur une piste et déplacement vers un point (x, y) [87].

FRI	Description
 <p data-bbox="240 598 659 629">Le NavChair présenté en 1996</p>	<p data-bbox="687 353 1453 577">Equipé de 12 capteurs ultrasons et d'un ordinateur [216]. Ce projet a permis de développer des composantes fonctionnelles telles que les algorithmes d'évitement d'obstacles, passage de portes et le suivi de mur. - L'utilisation d'un joystick comme méthode d'entrée qui remplace la consigne de l'utilisateur quant, c'est nécessaire.</p>
 <p data-bbox="309 954 592 1023">Robotic Wheelchair FORTH, Grèce 1997</p>	<p data-bbox="687 636 1453 860">Un système informatique composé d'un ordinateur portable et d'un ensemble de 5 microcontrôleurs PIC interconnectés par un réseau CAN. Il utilise une caméra panoramique pour la détection de son environnement. Parmi ses capacités de navigation, l'évitement d'obstacles et intégration au suivi de personne [217].</p>
 <p data-bbox="316 1274 587 1305">Tin Man II en 1998</p>	<p data-bbox="687 1025 1453 1182">L'auteur dans [93] a présenté des caractéristiques plus avancées : stocker des informations de voyage ; retour au point de départ, suivi de mur à travers les portes et la recharge de la batterie.</p>
 <p data-bbox="347 1585 557 1617">OMNI en 1999</p>	<p data-bbox="687 1317 1453 1585">Fauteuil équipé d'une direction omnidirectionnelle, de nouveaux capteurs pour la sécurité de l'utilisateur et de modules de navigation sophistiqués. Une large gamme de dispositifs de contrôle peut être utilisée pour le FR ainsi que pour le contrôle de l'environnement. Les modes de conduite semi-autonomes facilitent les tâches de conduite difficiles [218].</p>
 <p data-bbox="284 1908 616 1939">FRIEND's Project 1999</p>	<p data-bbox="687 1626 1453 1850">FRE équipé d'un bras manipulateur (MANUS) à six degrés de liberté commandé par un ordinateur placé à bord. Le bras manipulateur peut être commandé vocalement, ou en désignant un objet capté par la caméra. La détection des obstacles se fait à l'aide d'un système de stéréo vision [219].</p>

FRI	Description
 <p data-bbox="357 696 555 725">VAHM 2 2001</p>	<p data-bbox="699 353 1353 501">Deuxième prototype VAHM 2 développé à partir d'un FR Power Push™ équipé d'un PC, deux codeurs incrémentaux, 16 capteurs à ultrasons Polaroid™ , et une caméra [214].</p>
 <p data-bbox="316 1160 596 1227">En 2000 et 2002, Horn et al. (VAHM)</p>	<p data-bbox="699 741 1353 1151">Dans le cadre du projet Véhicule Autonome pour Handicapés Moteur (VAHM) les auteurs ont présenté un FRI adapté aux personnes présentant un handicap sévère. L'autonomie du fauteuil requiert la mise en œuvre d'une procédure de localisation qui utilise les capteurs ultrasons et qui est séparée en deux fonctions selon l'état du fauteuil : à l'arrêt ou en mouvement. En cours de mouvement, les mesures ultrasonores sont utilisées pour un ajustement de la position odométrique [214].</p>
 <p data-bbox="242 1525 673 1592">SWCS(Smart Wheelchair Component System) 2003-2004</p>	<p data-bbox="699 1240 1353 1420">Le "Smart Wheelchair Component System" SWCS est un module qui peut être installé sur plusieurs types de FRE standards. Il peut supporter des capteurs ultrasons, infrarouges ou des bumpers [67, 220].</p>
 <p data-bbox="338 1989 577 2018">SPAM 2003-2005</p>	<p data-bbox="699 1606 1353 1980">SPAM (Smart Power Assistance Module) est un module qui peut être intégré à un FRM pour les personnes aveugles. Plusieurs types de capteurs peuvent être utilisés comme les ultrasons et les infrarouges. Il a aussi un capteur de couple pour mesurer la force manuelle appliquée sur la roue. Le système permet de rajouter un couple pour assister la conduite du fauteuil et donc éviter le risque de collisions et de fatigue de la personne [67, 221].</p>





FRI	Description
 <p data-bbox="331 734 584 763">Rolland 2002-2006</p>	<p data-bbox="667 353 1318 730">Il a été utilisé par plusieurs équipes de recherche pour étudier différentes méthodes et applications de <b>FRI</b>. Il est équipé de 27 capteurs à ultrasons et d'un capteur laser à balayage, des capteurs infrarouges, des bumpers, codeurs odométries et une caméra. Plusieurs méthodes de navigation ont été testées sur ce fauteuil comme la navigation automatique en utilisant des balises (reconnaissance de trajectoire) ou les réseaux de neurones (apprentissage en ligne).</p>
 <p data-bbox="309 1122 603 1189">En 2000 et 2002, Satoh et Sakaue 2007</p>	<p data-bbox="667 779 1318 1115">Les auteurs ont développé un <b>FRE</b> qui réalise les fonctions de détection à la fois des dangers potentiels dans un environnement en mouvement et des postures et gestes d'un utilisateur en équipant un <b>FRE</b> du système stéréo omnidirectionnel (SOS), capable d'acquérir des séquences d'images couleur omnidirectionnelles et des données de plage simultanément en temps réel.</p>
 <p data-bbox="293 1507 619 1536">Projet LURCH en 2007</p>	<p data-bbox="667 1205 1318 1496">Projet LURCH (Let Unleashed Robots Crawl the House) [222] vise à développer un <b>FR</b> autonome capable d'éviter les obstacles, d'auto-localiser et d'explorer les environnements intérieurs de manière sécuritaire. Il est équipé d'un système qui permet à l'utilisateur de transmettre des intentions en analysant des signaux cérébraux.</p>
 <p data-bbox="277 1895 635 1962">Le prototype IntellWheels Chair1 en 2009</p>	<p data-bbox="667 1547 1318 1883">Un nouveau prototype développé a été intégré au projet IntellWheels avec une plateforme y compris le matériel et les logiciels, l'interface d'entrée multimodale, une ergonomie et des capacités d'adaptations automatiques des utilisateurs . Il dispose de six différentes méthodes de mappage de contrôle du joystick. Le prototype IntellWheels montre les capacités de mouvement autonome du prototype [68].</p>



FRI	Description
 <p data-bbox="323 660 587 689">RoboChair en 2009</p>	<p data-bbox="678 353 1324 616">RoboChair est une plate-forme robotique ouverte destinée à aider les utilisateurs exigeants dans leurs tâches de conduite quotidiennes. Il vise à être un cadre ouvert pour les futures applications d'assistance. Il a été conçu de manière modulaire et basé sur des normes ouvertes pour une extension facile et à faible coût [223].</p>
 <p data-bbox="359 1025 555 1055">VAHM 3 2010</p>	<p data-bbox="678 701 1324 996">Le VAHM 3 est réalisé à partir d'un FRE StormTM connecté à un PC, équipé d'odomètres, de capteurs US, d'un capteur laser et d'une caméra. Sur ce prototype, le travail est concentré sur l'apprentissage et la reconnaissance des trajectoires [224]. Les ont mené une réflexion sur une nouvelle approche du dispositif d'aide à la mobilité [225].</p>
 <p data-bbox="268 1373 646 1402">Projet RADHAR FP7 2012</p>	<p data-bbox="678 1070 1324 1366">Projet RADHAR propose un cadre pour fusionner les informations intrinsèquement incertaines de la perception de l'environnement et des signaux de direction d'un utilisateur de FR en estimant la trajectoire que le FR devrait exécuter et pour adopter ces informations fusionnées pour fournir une assistance à la navigation en toute sécurité [226].</p>
 <p data-bbox="308 1758 606 1787">Projet ARTY en 2012</p>	<p data-bbox="678 1417 1324 1758">L'université de Saragosse a présenté le projet ARTY (Assistive Robot Transport for Youngsters) d'un FR pédiatrique intelligent. Il est axé sur la navigation par robot mobile et les interfaces cerveau-ordinateur. L'objectif fondamental de cette recherche est de fournir une technologie clé permettant aux jeunes enfants qui seraient incapables de naviguer indépendamment dans leur environnement [227].</p>
 <p data-bbox="323 2022 587 2092">Jiaolong wheelchair prototype 2014</p>	<p data-bbox="678 1798 1324 1982">Le système proposé est peu coûteux et peut être facilement implémenté dans des applications réelles avec des capteurs à ultrasons. Il peut gérer efficacement le problème d'occlusion de la cible lorsqu'il doit éviter un obstacle [208].</p>



FRI	Description
 <p data-bbox="363 658 646 734">FRI (MARCUS) en 2014</p>	<p data-bbox="794 392 1455 658">FRI «MARCUS» équipé d'un télémètre laser 3D (3D-LRF) pour la création de cartes, de deux encodeurs de roues pour mesurer l'auto-vitesse et d'un télémètre laser 2D (2D-LRF) pour éviter les collisions, le système de FR utilise une planification à court et à long terme [228].</p>
 <p data-bbox="422 1350 587 1384">iChair 2016</p>	<p data-bbox="794 739 1455 1350">L'iChair est composé d'un FRE, un ordinateur portable, un support pour ordinateur portable, une plate-forme d'entrée multimodale et un boîtier en plastique personnalisé pour les capteurs environnementaux, fabriqué avec une imprimante 3D. Il peut être monté et démonté facilement pour l'entretien ou les déplacements. L'iChair sert une grande variété de types de handicap en intégrant plusieurs méthodes de saisie, voix, toucher, proximité commutateur et caméra de suivi de la tête. La caméra HD et la 3D scanner ont été montées de manière à fournir des données fiables avec la précision nécessaire pour détecter les obstacles, créer des cartes 3D, suivre les guides, anticiper les événements et fournir une aide à la navigation [229].</p>
 <p data-bbox="242 1765 762 1874">FREI testé dans un environnement 3D (Simulation Réalité Virtuelle) en 2017</p>	<p data-bbox="794 1388 1455 1503">Un simulateur de conduite en FRE permettant à l'utilisateur de naviguer avec un FR standard dans un environnement virtuel 3D [230]</p>

FRI	Description
 <p data-bbox="256 775 592 891">FR autonome développé à l'Université de La Laguna en 2018</p>	<p data-bbox="627 360 1407 775">Le prototype développé est équipé d'une caméra vidéo conventionnelle pour la détection d'obstacles et d'un capteur laser semi-conducteur à 16 faisceaux à faible coût (LEDDAR M16). Le système est destiné à former une barrière virtuelle non intrusive des deux côtés d'un FRI, afin de protéger l'utilisateur dans les environnements extérieurs et intérieurs dans la vie quotidienne. Dans ce système proposé, lorsqu'un obstacle coupe un faisceau, le point d'intersection est projeté dans l'image associée et le flux optique est calculé de part et d'autre de ce point [231].</p>
 <p data-bbox="256 1160 592 1272">FRI développé par Matthew Aquilina et al en 2019</p>	<p data-bbox="627 902 1407 1160">Les auteurs ont développé un FRI avec un système modulaire implémenté qui offre un contrôle matériel, une architecture ROS (Robot Operating System) spécialisée et des algorithmes de navigation entièrement autonome [232]. La mise en œuvre de cette conception est l'implémentation d'un nouveau logiciel permet la mise à niveau d'un moteur disponible dans le marché.</p>
 <p data-bbox="256 1547 592 1619">Un FRI développé par Isabella Gomez et al, 2019</p>	<p data-bbox="627 1283 1407 1541">Le FRI implémente une autonomie totale sous forme de navigation intérieure et le passage d'une chambre à une autre à un emplacement prédéterminé grâce à la commande vocale. Il dispose également de fonctions semi-autonomes sous forme de commande manuelle par joystick pour l'évitement des collisions en temps réel et de la détection des escaliers [233] .</p>
 <p data-bbox="256 2029 592 2094">FRI développé par Devigne et al, 2021</p>	<p data-bbox="627 1630 1407 1854">Les auteurs ont proposé le premier système d'assistance à la navigation en FRE utilisant une solution tactile portable. Cette solution a été conçue principalement pour améliorer la navigation des personnes souffrant de déficiences visuelles et/ou cognitives. Il peut se déplacer ou dévier de la trajectoire indiquée [234].</p>

# Technologies de perception dans le développement des FRI

---

Généralement, un FRI, contrôlé par un ordinateur, dispose de plusieurs capteurs lui permettant d'analyser l'environnement, ainsi que de mesurer son propre état. Il applique des techniques de robotique mobile pour se déplacer. L'objectif est de réduire ou d'éliminer la tâche de conduite pour les utilisateurs d'un FR motorisé.

La différence entre un FRM et un FRI est que généralement ce dernier se compose d'une base roulante électrique standard à laquelle un ordinateur et un ensemble de capteurs ont été ajoutés pour la perception de l'environnement, ainsi que de mesurer son propre état. Ces options fournissent des informations de situations momentanées décrivant les caractéristiques de l'environnement du FR à un certain moment et qui s'appellent observations ou mesures.

à faible coût (ils sont placés autour du robot/fauteuil dans les endroits les plus sensibles à la collision pour prévenir les obstacles et protéger les composants du fauteuil).

Le prix de ces capteurs a connu une évolution énorme où quelques capteurs ne dépassent pas quelques centimes de dollars. Sur le marché, on peut trouver une grande variété de ces capteurs comme le montre la figure B.1.

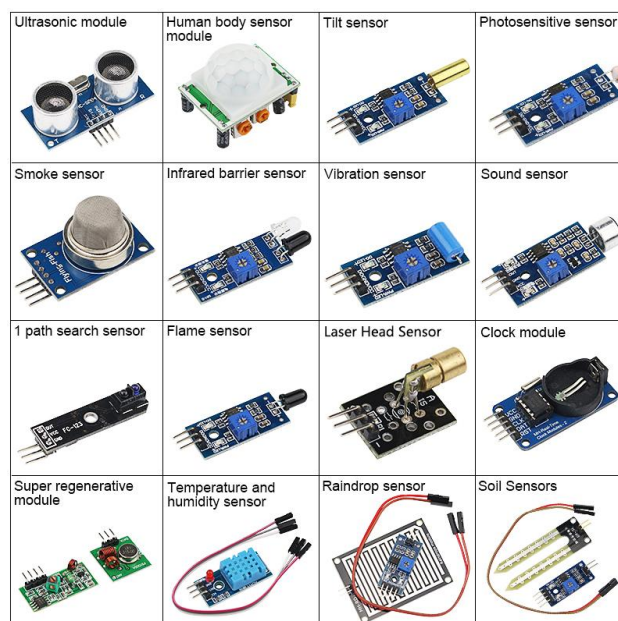


FIGURE B.1 – Différents types de capteurs.

- **Les capteurs GPS (Global Positioning System) :**

Le capteur GPS fonctionne en extérieur par le captage de signaux satellite. C'est un capteur de positionnement conçu et mis en place par le département de la défense des États-Unis. Il fournit une position en 3D à la surface de la terre et détermine la position d'un utilisateur muni d'un récepteur à l'aide des signaux radioélectriques en provenance des satellites [235]. Il assure un positionnement suffisant en extérieur, mais il n'est pas efficace pour la localisation en intérieur

- **Les télémètres Laser simple :**

La première catégorie de capteurs utilisés pour la détection d'obstacles regroupe les télémètres qui servent à mesurer des distances rapidement, facilement et avec précision (Figure B.2. Un rayon laser est projeté sur une cible qui renvoie à son tour le rayon lumineux. L'unité de traitement calcule ensuite le déphasage entre l'émission et la réception [236].



FIGURE B.2 – Un exemple de Télémètre Laser de calcul de distance

- **Les télémètres laser à balayage (Lidar) :**

Les télémètres laser à balayage fournissent une excellente précision sur une grande quantité de données pour mesurer les distances, Leurs principes de fonctionnement sont basés sur l'émission d'une impulsion laser très courte par une diode laser comme le montre la figure B.3. Ces capteurs sont plus utilisés en robotique classique que sur les FRI puisque la position de l'utilisateur gêne son installation qui doit être bien étudiée avant de la placer [237]. Aussi, ils sont robustes aux variations des conditions atmosphériques (pluie, neige) ou à des conditions dégradées d'illumination. Il existe d'autres travaux sur la fusion des données d'un télémètre laser 2D avec un système visuel monoculaire [238] pour la détection et l'estimation de la profondeur, alors que les images donnent une meilleure résolution et caractérisation de l'objet. Ce qui permet son suivi et son identification.



FIGURE B.3 – Un exemple de Télémètre Laser à balayage, fournissant 720 mesures réparties sur 360 degrés, à 5Hz (marque Ibeo)

- **Les télémètres à Ultra-Son (US) :**

Les capteurs à ultrasons sont utilisés pour contourner les obstacles, s'aligner à un mur ou en association avec la caméra, déterminer si une porte est fermée. L'essentiel de la perception est réalisée par le système de vision, en mesurant

le temps entre l'envoi de l'onde et la réception de son écho. Ils sont intégrés sous la forme de ceintures de capteurs disposés tout autour du FR.

Le capteur utilisé joue à la fois le rôle d'émetteur et de récepteur comme le montre la figure B.4. Le temps qui s'écoule entre les vibrations émettrices réceptrices créera la zone aveugle.



FIGURE B.4 – Capteurs Ultra-Son (US)

- **Les télémètres à infrarouge (IR)** : Les capteurs infrarouge sont plus directs et permettent de distinguer un mur d'une porte comme montre la figure B.5. Ils sont utilisés pour la mesure de distances, Ils rencontrent des difficultés face aux surfaces qui absorbent la lumière ou aux objets transparents et ont une portée moins grande que les capteurs ultra-sonores.

Ils utilisent une lumière infrarouge au lieu d'une onde sonore pour la détection et peuvent être basés sur différentes techniques qui permettent de recueillir plus ou moins d'information.



FIGURE B.5 – Capteur infrarouge (IR)

Le tableau B.1 montre les principaux avantages et inconvénients des différents capteurs, comme déjà mentionné ci-dessus.

Tableau B.1 – Comparaison des différents capteurs à télémètre.

	Ultrason	Infrarouge	Laser
Portée	De 1 à 250 cm	De 5 à 80 cm	Plusieurs mètres à plusieurs dizaines de mètres selon les modèles.
Directivité	Cône d'environ 30°	Cône d'environ 5°	Les plus directs (de l'ordre du degré, voire du demi-degré)
Précision	Relativement précis, mais la précision diminue avec la distance, l'angle de mesure et les conditions de température et de pression.	Relativement précis, mais la précision diminue avec la distance.	Sont précis avec un bruit de quelques centimètres sur des mesures de plusieurs mètres.
Coût	Peu chers	Peu chers	Relativement chers
Sensibilité aux interférences	Sensible à la température et à la pression. Également sensible aux autres robots utilisant la même fréquence ce qui peut poser problème dans une compétition.	Sont sensibles aux fortes sources de lumière qui contiennent un fort rayonnement infrarouge. Sont également sensibles à la couleur et à la nature des obstacles.	Ne peut pas détecter les objets réfléchissant la lumière laser (vitres, objets chromés, ...)

- **Capteur de vision :**

L'élément de base d'un système de vision est la caméra. Elle consiste en l'extraction de données à partir des images afin de percevoir, d'analyser et de comprendre la scène observée.

Une caméra est caractérisée par deux groupes de paramètres : les paramètres intrinsèques et les paramètres extrinsèques. Les premiers définissent la géométrie interne de la caméra, les seconds permettent de définir la localisation (position et orientation) tridimensionnelle de la caméra.

La caméra est utilisée pour la vision par ordinateur. Cette dernière consiste en l'extraction de données à partir des images afin de percevoir, d'analyser et de comprendre la scène observée.

Ces caméras demandent le plus de traitements et donc une puissance de calcul importante. Ces systèmes commencent à être utilisés sur les nouvelles générations de FRI, pour la détection d'obstacles, l'identification des balises définissant les trajectoires, etc. Les caméras deviennent de plus en plus petites et de moins en moins chères. Il existe les caméras stéréoscopiques, omnidirectionnelles et des caméras perspectives, etc.

Ces dernières sont constituées d'une caméra simple associée à un miroir de révolution. La projection de la scène dans le miroir est l'image fournie par ce type de capteurs. Elles fournissent une vue globale de la scène en une seule prise de vue, permettant un champ d'observation de 360° autour du capteur. Ce type de capteurs est très utilisé dans la commande référencée pour capteur, par exemple, la détection de piétons [239], "pick and place" de robots manipulateurs [240] et bien d'autres tâches robotiques. Lorsqu'il s'agit de l'utilisation des informations visuelles cette méthode s'appelle "Asservissement Visuel" [241]. Cependant, cette marge peut empêcher l'évitement d'obstacles et le passage de la porte. Son principe de fonctionnement est basé sur la mesure de l'angle de réflexion. Les mesures de distance peuvent être faites par triangulation, mesure d'intensité et mesure de temps de vol.

Le tableau B.2 fournit une classification des capteurs les plus utiles pour les applications de robot mobile.



Tableau B.2 – Classification des capteurs les plus utiles pour les applications de robots mobiles.

<b>Classification générale (utilisation typique)</b>	<b>Capteurs Système de capteurs</b>	<b>PC : Propriocept. EC : Extéroceptif</b>	<b>P : Passif A : Actif</b>
Capteur tactile (détection des contacts physiques ou de proximité ; interrupteur de sécurité)  Capteur de roue/moteur (vitesse et position d'une roue/moteur)	Interrupteur de contact, pare-chocs	EC	P
	Barrière optique	EC	A
	Capteur de proximité sans contact	PC	A
	Encodeurs de brosse	PC	P
	Potentiomètres	PC	P
	Synchros, Résolveurs	PC	A
	Encodeurs optiques	PC	A
	Encodeurs magnétiques	PC	A
	Encodeurs inductifs	PC	A
	Encodeurs captatifs	PC	A
Capteurs de direction (orientation d'un robot en relation avec un cadre référentiel fixe)	Boussole Gyroscopes Inclinomètres	EC PC EC	P P A/P
Balises au sol (localisation dans un cadre fixe)	GPS Balises optiques ou RF actives Balises ultrasoniques actives Balises réfléchissantes		A A A A
Téléométrie active (réflectivité, temps de vol et triangulation géométrique)	Capteurs de réflectance Capteurs ultrasoniques Téléporteur laser Triangulation optique (1D) Lumière structurée (2D)	EC EC EC EC EC	A A A A A
Capteurs de mouvement/vitesse (Vitesse relative à des objets de mouvement fixe)	Radar Doppler Son Doppler	EC EC	A A
Capteurs basés sur la vision (Classement visuel, analyse complète de l'image, segmentation, reconnaissance d'objet)	Cameras CCD/CMOS Classement visuel des paquets Suivie des paquets	EC	P



ANNEXE C

# Enquête par questionnaire

---



استبيان مستخدمي الكراسي المتحركة

## Enquête par questionnaire

### Utilisateurs de Fauteuils Roulants

الغرض من هذا الاستبيان هو إشراك مستخدمي الكراسي المتحركة في مشروع بحث لتحديد الاحتياجات المستقبلية للأشخاص المعنيين. إذا وافقت على المشاركة، الرجاء الإجابة على جميع الأسئلة أدناه. شكرا لكم على مشاركتكم.

المكان:

التاريخ:

L'objectif de ce questionnaire est d'offrir la possibilité, aux utilisateurs des fauteuils roulants, de participer à un projet de recherche visant l'amélioration de l'aide technique proposée aux personnes à mobilité réduite.

Si vous acceptez de participer, vous serez invité à répondre à toutes les questions ci-dessous.

Merci de votre participation à notre recherche.

Date :

Lieu :

Français	Arabe
<b>1-Vous êtes ?</b> Homme [ ]      Femme [ ]	<b>1-أنت؟</b> ذكر [ ]      أنثى [ ]
<b>2-Votre âge</b> <=15 ans [ ] 16 ans à 35 ans [ ] 36 ans à 50 ans [ ] plus de 50ans [ ]	<b>2-عمرك</b> أقل أو يساوي 15 سنة [ ] من 16 سنة إلى 35 سنة [ ] من 36 سنة إلى 50 سنة [ ] اكبر من 50سنة [ ]
<b>3-Quel type de fauteuil roulant utilisez-vous ?</b> Manuel [ ] Electrique [ ] Autre, précisez [ ] ..... .....	<b>3- ما هو نوع الكرسي المتحرك الذي تستخدمه؟</b> يدوي [ ] كهربائي [ ] آخر يرجى تحديده [ ] ..... .....
<b>4-Quelle-est actuellement votre situation professionnelle ?</b> Etudiant [ ] Travailleur [ ] Chômeur [ ]	<b>4-ما هو الوضع الحالي في وظيفتك؟</b> طالب [ ] عامل [ ] عاطل عن العمل [ ]
<b>5-Par quel type de maladie êtes-vous concerné?</b> Accident vasculaire cérébrale (AVC) [ ] Infirmité motrice cérébrale(IMC) [ ] Polyhandicapé [ ] Traumatisme crânien [ ] Malformation [ ] Amputation [ ] Myopathie [ ] Autre, précisez [ ] ..... .....	<b>5- ما هو نوع المرض الذي تسبب في إعاقتك؟</b> حادث دماغي [ ] الشلل الدماغي IMC [ ] متعدد الإعاقة [ ] صدمات الرأس [ ] تشوه [ ] بتر الأعضاء [ ] اعتلال عضلي [ ] آخر، يرجى تحديده [ ] ..... .....
<b>6- Quelle est l'origine de votre maladie ?</b> Depuis la Naissance [ ] Accident de circulation [ ] Maladie [ ] Accident de travail [ ] Autre, précisez [ ] ..... .....	<b>6- ما هو أصل المرض ؟</b> منذ الولادة [ ] حادث مروري [ ] مرض [ ] حادثة عمل [ ] آخر يرجى تحديده [ ] ..... .....
<b>7- Votre maladie vous a-t-elle empêché de poursuivre vos études ?</b> OUI [ ]      NON [ ]	<b>7-هل مرضك منعك من مواصلة الدراسة؟</b> نعم [ ]      لا [ ]
<b>8- Depuis combien de temps êtes-vous dans cette situation ?.....</b>	<b>8- منذ متى و أنت على هذه الحالة؟.....</b>
<b>9- Etes-vous pris en charge par la sécurité sociale pour le remboursement de vos frais médicaux ?</b> OUI [ ]      NON [ ]	<b>9- هل تكفل الضمان الاجتماعي لتسديد النفقات الطبية الخاصة بك ؟</b> نعم [ ]      لا [ ]

Français	Arabe
<p><b>10 Avez-Vous besoin d'aide quotidienne pour vous déplacer ?</b> OUI [ ] NON [ ]</p>	<p><b>10- هل تحتاج إلى مساعدة يومية للحركة؟</b> نعم [ ] لا [ ]</p>
<p><b>11- Combien d'années avez-vous utilisé un fauteuil roulant?</b> 0 – 5 [ ] 5 – 10 [ ] 10 – 20 [ ] 20 + [ ]</p>	<p><b>11- كم سنة استخدمت كرسيًا متحركًا؟</b> 5-0 [ ] 10-5 [ ] 20-10 [ ] +20 [ ]</p>
<p><b>12- Où utilisez-vous actuellement votre fauteuil roulant?</b> Principalement à l'intérieur [ ] Principalement à l'extérieur [ ]</p>	<p><b>12- أين تستخدم حاليًا كرسيك المتحرك؟</b> غالبًا في الخارج [ ] غالبًا في الداخل [ ]</p>
<p><b>13- Rencontrez-vous des difficultés pour accéder à votre domicile?</b> OUI [ ] NON [ ]</p>	<p><b>13- هل تواجه صعوبات في الوصول إلى البيت؟</b> نعم [ ] لا [ ]</p>
<p><b>14- Considérez-vous votre autonomie suffisante?</b> OUI [ ] NON [ ]</p>	<p><b>14- هل تعتبر اعتمادك على نفسك كافيًا؟</b> نعم [ ] لا [ ]</p>
<p><b>15- Etes-vous satisfait de votre sécurité pendant l'utilisation de votre fauteuil roulant?</b> OUI [ ] NON [ ] NON pourquoi ?.....</p>	<p><b>15- هل أنت راضٍ على سلامتك أثناء استعمالك لكرسيك المتحرك؟</b> نعم [ ] لا [ ] لا لماذا؟.....</p>
<p><b>16- Avez-vous besoin d'une assistance dans le pilotage de votre fauteuil ?</b> OUI [ ] NON [ ] NON pourquoi ?.....</p>	<p><b>16- هل تحتاج إلى المساعدة في قيادة كرسيك المتحرك؟</b> نعم [ ] لا [ ] لا لماذا؟.....</p>
<p><b>17-Seriez-vous intéressé par un dispositif qui peut vous aider à effectuer des déplacements que vous n'arrivez pas à faire aujourd'hui ?</b> Oui [ ] Non [ ] sans opinion [ ]</p>	<p><b>17- هل يهكم جهاز يساعدك على القيام بالتنقلات التي لا يمكنك القيام بها حاليًا؟</b> نعم [ ] لا [ ] بدون رأي [ ]</p>
<p><b>18- Seriez-vous intéressé par un dispositif qui peut vous aider à éviter des obstacles que vous voyez ?</b> Oui [ ] Non [ ] sans opinion [ ]</p>	<p><b>18- هل يهكم جهاز يساعدك على تجنب العقبات التي تراها؟</b> نعم [ ] لا [ ] بدون رأي [ ]</p>

Français	Arabe
<p><b>19- Seriez-vous intéressé par un dispositif qui peut vous aider à éviter des obstacles que vous ne voyez pas ?</b></p> <p>Oui [ ]</p> <p>Non [ ]</p> <p>sans opinion [ ]</p>	<p><b>19- هل يهكم جهاز يساعدك على تجنب العقبات التي لا تراها ؟</b></p> <p>[ ] نعم</p> <p>[ ] لا</p> <p>[ ] بدون رأي</p>
<p><b>20- Seriez-vous intéressé par un dispositif qui peut vous aider à éviter les obstacles sans votre intervention ?</b></p> <p>Oui [ ]</p> <p>Non [ ]</p> <p>sans opinion [ ]</p>	<p><b>20- هل يهكم جهاز يساعدك على تجنب العقبات بدون تدخلك ؟</b></p> <p>[ ] نعم</p> <p>[ ] لا</p> <p>[ ] بدون رأي</p>
<p><b>21- Quelle serait la fonction ou amélioration que vous auriez aimé rajouter à votre fauteuil ?</b></p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p><b>21- ما هي الوظيفة أو التحسين الذي تود أن تضيفها لكرسيك المتحرك؟</b></p> <p>.....</p> <p>.....</p>
<p><b>22- Seriez-vous intéressé par un fauteuil à conduite intelligente ?</b></p> <p>Oui [ ]</p> <p>Non [ ]</p> <p>sans opinion [ ]</p>	<p><b>22- هل أنت مهتم بكرسي يتمتع بالقيادة الذكية؟</b></p> <p>[ ] نعم</p> <p>[ ] لا</p> <p>[ ] بدون رأي</p>
<p><b>23- Quelles autres suggestions pourriez-vous nous faire ?</b></p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p><b>23- ماهي الاقتراحات الأخرى التي يمكنك تقديمها لنا ؟</b></p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>
<p><b>24-Quelle somme maximale seriez-vous prêt à engager pour acquérir un fauteuil roulant intelligent ?</b></p> <p>10Millions de centimes [ ]</p> <p>15Millions de centimes [ ]</p> <p>20 Millions de centimes [ ]</p> <p>30 Millions de centimes [ ]</p> <p>40 Millions de centimes [ ]</p> <p>pas intéressant [ ]</p>	<p><b>24- ماهو المبلغ الذي أنت مستعد لصفه للحصول على كرسي القيادة الذكية؟</b></p> <p>[ ] 10مليون سنتيم</p> <p>[ ] 15مليون سنتيم</p> <p>[ ] 20مليون سنتيم</p> <p>[ ] 30مليون سنتيم</p> <p>[ ] 40مليون سنتيم</p> <p>[ ] غير مثير للاهتمام</p>

جامعة باتنة 2

Université de Batna 2 Algérie



Laboratoire d'Automatique et Productique



Laboratoire LINEACT Cesi Rouen France



استبيان مستخدمي الكراسي المتحركة

## Enquête par questionnaire

### Assistants des utilisateurs du Fauteuils Roulants

الغرض من هذا الاستبيان هو إشراك مساعد مستعمل الكرسي المتحرك في مشروع بحث لتحديد الاحتياجات المستقبلية للأشخاص المعنيين. إذا وافقت على المشاركة، نطلب منك أن تجيب على جميع الأسئلة أدناه. شكرا لكم على مشاركتكم.

المكان:

التاريخ:

L'objectif de ce questionnaire est de donner la possibilité aux assistants des utilisateurs des fauteuils roulants de participer à un projet de recherche visant l'amélioration de l'aide technique proposée aux personnes à mobilité réduite.

Si vous acceptez de participer, vous serez invité à répondre à toutes les questions ci-dessous.

MERCI de votre participation à notre recherche.

Date :

Lieu :



Français	Arabe
<b>1-Vous êtes ?</b> Homme [ ]                      Femme [ ]	<b>1- أنت؟</b> ذكر [ ]                      أنثى [ ]
<b>2-Vous assistez à un(e) :</b> Homme [ ]                      Femme [ ]	<b>2- تساعد :</b> ذكر [ ]                      أنثى [ ]
<b>3- Quel est votre lien avec la personne ?</b> Parent [ ]                      quel-est le lien ?..... Ami [ ] Autre, précisez.....	<b>3- ما هي علاقتك مع الشخص؟</b> العائلة [ ]                      ماهي القرابة؟..... صديق [ ] آخر يرج تحديده.....
<b>4- Percevez-vous une indemnisation en contrepartie ?</b> OUI [ ]                      NON [ ]	<b>4- هل تحصل على أجر مقابل المساعدة التي تقدمها؟</b> نعم [ ] لا [ ]
<b>5- Quel type de fauteuil roulant est utilisé ?</b> Manuel [ ] Electrique [ ] Autre, précisez [ ] .....	<b>5- ما هو نوع الكرسي المتحرك المستعمل ؟</b> يدوي [ ] كهربائي [ ] آخر يرج تحديده [ ] .....
<b>6- Aidez-vous la personne à conduire avec son Fauteuil Roulant ?</b> Principalement à l'intérieur [ ] Principalement à l'extérieur [ ]	<b>6- هل تساعد الشخص لقيادة كرسية المتحرك؟</b> غالبا في الخارج [ ] غالبا في الداخل [ ]
<b>7- Considérez-vous que l'autonomie acquise par la personne grâce au Fauteuil Roulant est suffisante ?</b> OUI [ ]                      NON [ ] Autre, précisez [ ]	<b>7- هل تعتبر الاستقلالية التي يقدمها الكرسي للشخص الذي تساعده كافية؟</b> نعم [ ] لا [ ] آخر يرج تحديده [ ]
<b>8- Considérez-vous que la sécurité apportée par le fauteuil roulant soit suffisante?</b> OUI [ ]                      NON [ ] NON pourquoi ?.....	<b>8- هل تعتبر أن الحماية التي يقدمها الكرسي المتحرك كافية؟</b> نعم [ ] لا [ ] لا لماذا؟.....
<b>9- Considérez-vous que votre assistance est nécessaire ?</b> OUI [ ]                      NON [ ] NON pourquoi ?.....	<b>9- هل تعتقد أن قيادة الكرسي المتحرك من طرف المساعد ضرورية؟</b> نعم [ ] لا [ ] لا لماذا؟.....
<b>10- Pensez-vous qu'un fauteuil à conduite intelligente puisse apporter une amélioration au quotidien des personnes concernées?</b> Oui [ ] Non [ ] sans opinion [ ]	<b>10- هل تعتقد أن كرسيا يتمتع بقيادة ذكية سوف يحسن الحياة اليومية لمستعمليه؟</b> نعم [ ] لا [ ] بدون رأي [ ]

Français	Arabe
<p><b>11- Quelles autres suggestions pourriez-vous nous faire pour améliorer l'utilisation des fauteuils Roulants ?</b></p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>	<p><b>11- ماهي الاقتراحات الأخرى التي يمكنك تقديمها لنا لتحسين استعمال الكراسي المتحركة؟</b></p> <p>.....</p> <p>.....</p> <p>.....</p>
<p><b>12- Quelle somme proposeriez-vous pour l'acquisition d'un fauteuil roulant intelligent ?</b></p> <p>10 Millions de centimes <input type="checkbox"/></p> <p>15 Millions de centimes <input type="checkbox"/></p> <p>20 Millions de centimes <input type="checkbox"/></p> <p>30 Millions de centimes <input type="checkbox"/></p> <p>40 Millions de centimes <input type="checkbox"/></p> <p>pas intéressant <input type="checkbox"/></p>	<p><b>12- ماهو المبلغ الذي تقترحه للحصول على كرسي القيادة الذكية؟</b></p> <p>10 مليون سنتيم <input type="checkbox"/></p> <p>15 مليون سنتيم <input type="checkbox"/></p> <p>20 مليون سنتيم <input type="checkbox"/></p> <p>30 مليون سنتيم <input type="checkbox"/></p> <p>40 مليون سنتيم <input type="checkbox"/></p> <p>غير مثير للاهتمام <input type="checkbox"/></p>

# Identification des caractéristiques des solutions techniques

---

Cette partie détaille les solutions techniques identifiées dans le chapitre 4. Pour le système motorisé il faudra prévoir 02 moteurs de types (courant, puissance, poids, volume, tours/min, etc), système d'entraînement (engrenage, roue, courroie + poulie, etc.), câblage (fils, connexions, supports et fixations) et différentes fixations pour les différents composants. Aussi, il nous faudra comparer notre résultat avec des modules déjà existants. (par exemple la Motorisation de fauteuil roulant Powerstroll Version P9HD coûte 899,00 € avec 18,90 € pour la livraison chez Médical Domicile sans compter le coût d'assemblage, d'adaptation, fixation et disponibilité). Aussi nous avons le moteur intégré pour fauteuil roulant électrique 24V, 180W, avec joystick qui coûte 629,00 dollars chez Alibaba.

Nous allons voir, dans la section qui suit, les différents Kits de motorisation du FR dans le marché avec leurs marques et prix, et qui disposent des modules de propulsion capable de transformer les types de fauteuils manuels en fauteuils roulants électriques intelligents.

## **Kit Okfeet**

Kit de motorisation pour fauteuil roulant électrique (Okfeet)24V, 250W, Double moteur, Modification pour fauteuil roulant (Fournisseur Aliexpress, coût :550,15 - 764,69 € ,Puissance :201 - 300W Type de Moteur :Other charge maximale :130kg, vitesse maximale :7km/h ,Moteur :24V 250W Motoréducteur brushless à double entraînement , figure D.1.

## **Alber e-motion**

Alber e-motion M25 distribué par Invacare se compose de roues avec moteur et batteries intégrées à une vitesse jusqu'à 8.5 km/h (intérieur / extérieur), coût= 4850€ + Tva , figure D.2.



FIGURE D.1 – Kit de motorisation pour fauteuil roulant



FIGURE D.2 – Alber e-motion M25

---

### **Kit module de propulsion**

Le module de propulsion capable de transformer tout type de fauteuil roulant manuel en fauteuil électrique. Le moteur est fourni avec un kit complet simple à installer en 30 minutes, Fournisseur : Médipost-Nutristoma (Belgique) figure D.3.

- Vitesse maximale : 9 km/h - Poids : 4,5 Kg - Poids d'une batterie optionnelle : 1 Kg - Puissance des moteurs : 2x180W - Batterie : Lithium-ion - Coût = 4 285,00 €



FIGURE D.3 – Kit module de propulsion pour fauteuil roulant

### **Kit MINOTOR**

Le kit Minotor est amovible, léger, rapide à installer et peu encombrant avec 2 moteurs entraînent directement les roues. Il est possible de débrayer et de rouler librement, avec une mise en place facile et en quelques secondes. Ces moteurs sont équipés de freins électromagnétiques.

-Autonomie : 5 à 16 km selon batteries choisies (lithium ou plomb) -Vitesse réglable : jusqu'à 10 km/h Poids max. utilisateur : 120 kg , coût : 4 590,00 €, fournisseur Benoît Systèmes. figure D.4.

### **Kit BULU**

– kit de Conversion de fauteuil roulant électrique avec batterie, Moteur : engrenages BLDC de 8 pouces, Tension : 24V, Puissance = 250w, Vitesse : 2.5-7 km/h, Portée : 30 km , coût = 675,00 €, Expédition en Algérie : 83,20 € , figure D.5.

Le tableau D.1 détaille le système de motorisation du FRI et présente les différents types de moteurs avec leurs disponibilités, prix et compatibilité.

Tableau D.1 – Tableau comparatif des différents systèmes de motorisation du FRI

Moteur	Description
	- Moteur d'engrenage planétaire cc, couple élevé 100kg - vitesse : 1100rpm - Puissance : 32-40w - Voltage 12-24V - coût : 15,50 dollars
	- Motoréducteur brushless Moteur Mt11 /24v 250w Brushless Dc - Puissance : 10W-50W - Voltage 24V - Coût : 125,00 dollars
	- Moteur à engrenage cc 12v cc à couple élevé. - vitesse = 100 tr/min - Puissance : 10W - Voltage 24V - Coût : 15,00 dollars
	-Moteur réducteur cc sans balais à engrenage - Puissance : 20W à 120W - Voltage 12V/24V - Coût : 70,00 dollars
	- Moteur à engrenage CC - Vitesse(RPM) :3470-4500 r/mi - Puissance : 32-40W - Voltage 12V/24V - Coût : 14,80 dollars
	- Moteur électrique à courant continu, Type : Brossé, Modèle : BY6812, Petite taille, léger, facile à ranger et à transporter , Aucune livraison vers Algérie , Fournisseur : ebay - Vitesse(RPM) :13000 15000 tr/min - Puissance : 150W - Voltage 12V/24V - Coût : 23,99 €
	- Moteur intégré dans le moyeu roue de 24 pouces avec jante en plastique, Fournisseur : AliExpress - Puissance : 180W - Voltage : 24V - Coût : 376,11 €
	- Moteur électrique pour fauteuil roulant, paire de contrôleurs de Joystick, gauche et droite, moteur à balais et engrenages cc. Fournisseur : AliExpress. Livraison : ce fournisseur ou cette société de transport ne livre pas dans le pays ou la région choisie (Algérie). - Puissance : 200w - Voltage : 24V - Coût : 203,24 €



FIGURE D.4 – Kit MINOTOR pour fauteuil roulant



FIGURE D.5 – Kit BULLU pour fauteuil roulant

### **Arduino**

Le tableau D.2 a été établi d'après les données fournies sur le site d'Arduino ([www.arduino.cc](http://www.arduino.cc)). Les prix sont donnés en euros et en Dinars Algérien, cela ne

Tableau D.2 – Tableau comparatif des différentes cartes Arduino

Carte Arduino	Prix (euros)	Prix (DA)	Microcontrôleur ( $\mu\text{C}$ )	Type (bits)	CLK (MHz)	Alim (V)
Micro	18	3800	ATmega32U4	8	16	5
Leonardo	18	3800	ATmega32U4	8	16	5
Uno	20	4000	ATmega328P	8	16	5
Nano	20	4000	ATmega328P	8	16	5
MKR Zero	21	4200	ATSAMD21G18	32	48	3,3
101 <sup>(2)</sup>	29	5800	Intel Curie	32	32	3,3
Due	34	6200	AT91SAM3X8E	32	84	3,3
Mega	35	6300	ATmega2560	8	16	5
Zero	39	6500	ATSAMD21G18	32	48	3,3
M0 PRO	39	6500	ATSAMD21G18	32	48	3,3
Yun	69	11000	Atheros AR9331	32	400	5

veut pas dire que nous ne puissions pas trouver la carte plus ou moins cher ailleurs.

Tout d'abord, il existe plusieurs types à moindre coût, alors la UNO est idéale. Si on préfère brancher une multitude de capteurs, utiliser plusieurs périphériques en série, alors la Mega est parfaite pour ça et si on utilise quelques propriétés avec une puissance de calcul supérieure alors la DUE est le choix approprié. Enfin, si nous cherchons un véritable ordinateur embarqué comparable à une Raspberry TM, la Yun est le choix le plus évident.

### Raspberry

Nous allons voir les derniers modèles de Raspberry et quels sont leurs avantages en fonction de l'utilisation, ce tableau D.3 retrace l'historique du Raspberry Pi. Le Raspberry Pi est une carte plus autonome et n'a pas les mêmes capacités d'expansion que l'Arduino. Il offre des possibilités très intéressantes. Par exemple, vous pouvez ajouter des capteurs capacitifs, un GPS, un écran tactile, des panneaux RVB et même un capteur de gestes 3D. Le prix et la taille des deux dispositifs (Raspberry et Arduino) sont assez similaires ; nous savions déjà que Raspberry Pi et Arduino sont minuscules et peu onéreux. C'est ce qui se cache à l'intérieur qui les distingue.

### FPGA

Les FPGA ( (Field Programmable Gate Array ) sont utilisés dans de nombreuses applications. Ils sont particulièrement utiles pour implémenter des fonctions d'interface intelligent, de commande moteur, d'accélération algorithmique et de calcul haute performance (HPC), de traitement d'images et de vidéos, de vision artificielle, d'intelligence artificielle (IA), d'apprentissage automatique (ML), d'apprentissage



Tableau D.3 – Tableau comparatif des différentes cartes Raspberry

	Raspberry Pi Pico	Raspberry Pi 400	Raspberry Pi 4 B 8GB	Raspberry Pi 4 B	Raspberry Pi 3 Model A+	Raspberry Pi 3 B+	Raspberry Pi Zero WH	Raspberry Pi Zero W	Raspberry Pi A+	Raspberry Pi 3	Raspberry Pi Zero	Raspberry Pi 2	Raspberry Pi B
<b>Image</b>													
<b>Description</b>	Microcontrôleur Raspberry Pi, pas un ordinateur complet. Similaire à un Arduino nano.	Un Raspberry Pi 4 intégré à un clavier avec une amélioration de la cadence du processeur.	Version du Raspberry Pi 4 B avec 8Go de mémoire.	Fourth edition of raspberry pi.	Smaller version of raspberry pi 3b+ with less RAM.	Raspberry pi 3 with updated components.	connecteur GPIO déjà soudé	Raspberry pi zero with wifi and bluetooth.	The worst specifications Raspberry Pi microcomputer, same as pi zero, but less ram.	Third edition of Raspberry pi.	The smallest and cheapest version of Raspberry Pi	The second edition of Raspberry Pi.	First Raspberry Pi.
<b>Prix</b>	4,00 \$US	70,00 \$US	75,00 \$US	37,95 €	25,00 \$US	39,59 €	14,60 €	10,44 €	35,00 \$US	35,00 \$US	5,00 \$US	35,00 \$US	35,00 \$US
<b>Prix (DA)</b>	1100,00 DA	12000,00 DA	14000,00 DA	7200,00 DA	5000,00 DA	7500,00 DA	2500,00 DA	2000,00 DA	6000,00 DA	6000,00 DA	1600,00 DA	6000,00 DA	6000,00 DA
<b>Core Type</b>	RP2040 dual-core Arm Cortex-M0+	Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit	Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit	Cortex-A72 (ARM v8) 64-bit	Cortex-A53 64-bit	Cortex-A53 64-bit	ARM1176JZF-S	ARM1176JZF-S	ARM1176JZF-S	Cortex-A53 64-bit	ARM1176JZF-S	Cortex-A7	ARM1176JZF-S
<b>Fréquence processeur</b>	133 MHz	1,8 GHz	1,5 GHz	1,5 GHz	1,4 GHz	1,4 GHz	1 GHz	1 GHz	700 MHz	1,2 GHz	1 GHz	900 MHz	700 MHz
<b>Mémoire vive</b>	264 KB	4 GB LPDDR4	8 GB LPDDR4	1 GB, 2 GB, 4 GB LPDDR4	512 MB DDR2	1 GB DDR2	512 MB	512 MB	256 MB	1 GB DDR2	512 MB	1 GB	512 MB
<b>Ethernet</b>	Non	Oui Gigabit	Oui Gigabit	Oui Gigabit	Non	Oui Gigabit - Over USB 2.0	Non module supp (14.89K)	Non module supp (14.89K)	Non	Oui 10/100M	Non	Oui 10/100M	Oui
<b>LCD Panel</b>	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Non	Oui	Oui
<b>Camera</b>	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Oui latest version include a camera	Oui
<b>Wi-Fi</b>	Non	Oui 2.4GHz and 5GHz 802.11 b/g/n/ac	Oui 2.4GHz and 5GHz 802.11 b/g/n/ac	Oui 2.4GHz and 5GHz 802.11 b/g/n/ac	Oui 2.4GHz and 5GHz 802.11 b/g/n/ac	Oui 2.4GHz and 5GHz 802.11 b/g/n/ac	Oui 802.11n	Oui 802.11n	Non	Oui 802.11n	Non	Non	Non
<b>Bluetooth*</b>	Non	Oui 5.0	Oui 5.0	Oui 5.0	Oui 4.2, BLE	Oui 4.2, BLE	Oui 4.1 BLE	Oui 4.1 BLE	Non	Oui 4.1 BLE	Non	Non	Non
<b>Power ratings</b>		1,25 A @5V	1,25 A @5V	1,25 A @5V		1,13 A @5V	180 mA	180 mA	200 mA	1,34 A @5V	160 mA	800 mA	700 mA @5V

Tableau D.4 – Tableau comparatif des différentes cartes FPGA

	Carte Altera Cyclone EP4CE10	STMicroelectronics 6K STVD STVP	FPGA EP4CE40	Cartes FPGA SainSmart EP4CE6	Cartes FPGA P0082	Ordinateur de bureau Parallela	SeedStudio VHDL FPGA	
<b>Image</b>								
<b>Description</b>	Ce kit de développement est équipé d'OpenEP4CE10-C, qui vous permet de démarrer votre conception avec le processeur Nios II facilement et rapidement.	Cette carte dispose également d'un écran LCD (24 segments, 4 communs) de LED et de boutons poussoirs, est une carte d'évaluation à démarrage rapide pour les microcontrôleurs à très faible consommation.	Cette carte convient à effectuer des opérations de traitement d'image. La carte contient 3 SDRAM et deux MT48LC8M32B2 (512 Mbits).	Ce kit a un écran LCD attaché à la carte de développement. La carte est de la famille Cyclone IV. Il dispose également de 276480 bits de RAM.	Cette carte est basée sur la technologie Cyclone IV fabriquée par Altera. La carte est équipée de 32 Mo de RAM et d'un accéléromètre.	Il comprend un processeur Xilinx Zynq 7Z010, 1 Go de SDRAM DDR3, Ethernet, USB, HDMI, des interfaces périphériques série et 24 ports GPIO.		La carte contient 6 canaux analogiques connectés à ATmega32U4 sur Papilio DUO, 8 LED.
<b>Prix</b>	67 \$US	20,00 - 500,00 \$US	140,00 \$US	85,00 \$US	110,00 \$US	150,00 \$US	33,00 \$US	
<b>Prix (DA)</b>	1100,00 DA	1800,00 DA - 8000,00 DA	22000,00 DA	16000,00 DA	19000,00 DA	28000,00 DA	16000,00 DA	

profond (DL) de radar, de formation de faisceau, de stations de base et de communications. Ils sont capables de répondre à de nombreuses exigences de conception en matière de flexibilité, de vitesse de traitement et d'alimentation, figure D.4.

### Les capteurs

Les différents types des capteurs d'évitement d'obstacles utilisés, seuls ou combinés dans notre projet (tableau D.5) :

- Stéréo Vision
- Ultrasons (Sonar)
- Lidar
- Infrarouge
- Vision monoculaire

La fusion de capteurs est un processus par lequel les données de plusieurs capteurs différents sont « fusionnées » pour calculer une distance ou une trajectoire. La fusion de capteurs est une sous-catégorie de la fusion de données elle est également appelée fusion de données multisensorielle ou fusion de données capteur. Dans ce tableau, nous allons présenter les différents types des capteurs utilisés dans le marché.

### **Les batteries**

Il est important de comprendre le fonctionnement des batteries si on utilise un fauteuil roulant électrique. L'autonomie et l'épuisement de la batterie peuvent varier considérablement en fonction du poids du fauteuil, de la charge utile, du type de terrain et de l'état général de la batterie. Nous allons présenter quelques types de batteries de fauteuil roulant électrique disponible dans le marché (tableau D.6).

### **Les Joysticks**

L'utilisation d'un joystick est nécessaire pour piloter un FRE. Il peut être placé près de l'accoudoir du fauteuil pour être manipulé à la main, ou parfois au niveau du menton. Il permet de commander la vitesse et la direction du mouvement du fauteuil, de façon progressive. Il existe plusieurs types de joysticks avec des différents prix dans le tableau D.7. L'utilisation d'une interface tactile (tablette Android, smartphone ...) pour piloter un fauteuil roulant électrique est fixé horizontalement sur l'accoudoir du fauteuil roulant manuel, peut remplacer le Joystick avec des fonctions supplémentaires intelligentes dans des applications pour mobilité (communication avec le système de contrôle par connexion Bluetooth).

Tableau D.5 – Tableau des différents types de capteurs pour FRI

Capteurs	Description
	- Capteur Lidar, Radar Laser 3D à semi-conducteurs, reconnaissance précise, 90 degrés FOV 5mm. Coût : 46,40 € Ce fournisseur ne livre pas dans le pays ou la région choisie (Algerie)
	- Lidar, capteur 3D DTOF, Scanner Radar Lidar, balayage omnidirectionnel à 360 degrés. - coût 122,58 €. Ne peut pas être livré en Algérie.
	- RPLIDAR A1 2D, 360 degrés, 12 mètres, rayon de balayage, capteur lidar, pour la navigation des robots et évite les obstacles. - Coût : 64,15 €, fournisseur : AliExpress, Livraison gratuite
	- Capteur De Proximité d'évitement D'obstacle Infrarouge Photoélectrique, commutateur 3-80cm Plage De Détection Réglable pour robot de Voiture intelligente E18-D80NK. - Coût : 2,29 €, fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 2,24 €
	- Module de capteur infrarouge IR 4 broches pour éviter les obstacles, - Coût : 6,87 €, fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 0,90 €
	- Capteur de proximité infrarouge avec câble, détection d'évitement d'obstacles, mesure de Distance à 20-150cm. - Coût : 3,56 €, fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 2,76 €
	- Module ultrasonique avec capteur de Distance lumineuse RGB, pour évitement d'obstacles. - Coût : 5,25 €, fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 2,43 €

Capteurs	Description
	<p>- Capteurs de distance ultrasonique PWM ou UART DC5V, sonde étanche, module de capteur ultrasonique. Coût : 14,53 € , fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 3,63 €</p>
	<p>- Module à ultrasons HC-SR04/HC SR04/HCSR04, transmetteur de mesure de distance, capteur à ultrasons, Tension de fonctionnement : 5V (cc), distance de détection : 2cm-450cm, angle du capteur : pas plus de 15 degrés. Coût : 3,13 € , fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 0,47 €</p>
	<p>- Mini capteur ultrasonique 40KHZ, 10mm, Type ouvert, détecteur d'obstacles ultrasonique, longue portée, capteur de Distance ultrasonique. Coût : 25,46 € , fournisseur : AliExpress, Expédition gratuite en Algérie.</p>
	<p>- Caméra PC usb, microphone 1280x720, mini boîtier en aluminium, H.264, pour Raspberry Pi, HD 720P CMOS, 6mm à une portée de 5m à 10m Coût : 38,46 € , fournisseur : AliExpress, Expédition gratuite en Algérie.</p>
	<p>- Webcam HD, haute résolution 8 mégapixels, grand angle 3264x2448, lentille fisheye, caméra usb, pour linux Raspberry Pi Coût : 47,79 € , fournisseur : AliExpress, Expédition Algérie : 7,56 €</p>
	<p>- Caméra 5mp, Module de caméra Web, 1080P + câble de 15cm, convient pour Raspberry Pi 3 modèle B +/3/2/B+ Coût : 2,42 € , fournisseur : AliExpress, Expédition Algérie : 0,42 €</p>
	<p>- Module de caméra usb 960P MJPEG 60fps 2560X960 OV9750 CMOS, à double objectif, synchronisation, vidéo stéréo, pour caméra 3D VR 5.0 Coût : 62,65 € , fournisseur : AliExpress, Livraison gratuite Algérie</p>

Tableau D.6 – Tableau des différents modèles de batteries

Batteries	Description
	<p>- AERDU – batterie 24v 6S6P 18650 li-ion, 25v, 15ah, 420w, haute capacité, Rechargeable Coût : 79,79 € , fournisseur : AliExpress, ne peut pas être livré en Algérie.</p>
	<p>- AERDU 6S2P 5Ah 25.2V rechargeable LiIon Batterie 18650 Support d'alimentation 24v 180W 100W Moteur Électrique , Taille : 110*45*70mm(± 3mm), Poids : 600g(± 50g) Coût : 34,79 € , fournisseur : AliExpress, ne peut pas être livré en Algérie.</p>
	<p>- Pack de batterie Lithium-ion 7S4P 24V 28ah 29.4V pour BMS intégré, moteur électrique, pour fauteuil roulant, avec chargeur, Dimensions : 270x68x40mm (environ), Poids : 1700g environ Coût : 53,68 € , fournisseur : AliExpress, ne peut pas être livré en Algérie.</p>
	<p>- Batterie Lithium 24V lifepo4 pour fauteuil roulant électrique. Coût : 95,00 € , fournisseur : Alibaba, ne peut pas être livré en Algérie.</p>
	<p>- Batterie Lithium de longue durée, 12v 24v 10ah 20ah lifepo4 , pour fauteuil roulant électrique. Coût : 80.60 € , Poids : 3kg, fournisseur : Alibaba, ne peut pas être livré en Algérie.</p>
	<p>- Batterie (Mighty Max) ML35-12 SLA rechargeable sans entretien, 12V 35AH plomb-acide scellé (SLA) pour fauteuil roulant électrique. Dimensions 19,5 cm x 13,15 cm x 18,11 cm. Coût : 55.82 €(1 pack), fournisseur : Amazon.</p>

Tableau D.7 – Tableau des différents modèles de joystick

joysticks	Description
	<p>- Manette de commande pour fauteuil roulant avec Port USB pour PG VSI. Coût : 97,71 € , fournisseur : AliExpress, Expédition Vers Algérie via AliExpress : 19,83 €.</p>
	<p>- Kit de conversion de fauteuil roulant électrique 24v 250w 500w moteur (brushless) de fauteuil roulant et contrôleur de joystick pour fauteuil roulant électrique pliant. Coût : 317.66 € , fournisseur : Alibaba, livraison gratuite.</p>
	<p>- contrôleur de Joystick à 200 degrés pour fauteuil roulant électrique, moteur à balais de 30mm, 24v, 360 w. Coût : 25,97 € , fournisseur : Alibaba, livraison gratuite.</p>
	<p>- Manette de jeu sans fil, ultra léger pour fauteuil roulant électrique, plus contrôleur Joystick . Type de moteur : courant continu , Tension 24V , puissance 250W , Vitesse Limitée &lt;6 km/h. Coût : 118,60 € , fournisseur : Alibaba, livraison gratuite.</p>
	<p>- OM800-H51 contrôleur Joystick pour fauteuil roulant électrique. Coût : 80.48 € , fournisseur : Alibaba, livraison gratuite.</p>
	<p>- Interface tactile (tablette Android, smartphone ...) pour piloter un fauteuil roulant électrique par un système de contrôle à connexion Bluetooth.</p>

Tableau D.8 – Supports de fixation

Types de fixation	Description
	<p>- Fixation caméra, coût = 5,00 dollars</p>
	<p>- Fixation cablage , coût = 2,75 dollars</p>
	<p>- Fixation caméra, coût = 4,75 dollars</p>
	<p>- Fixation caméra</p>
	<p>- Fixation téléphone Portable. Coût : 4,45 €</p>
	<p>- Support de téléphone portable pour fauteuil roulant, rotation à 360. Coût : 9,95 € , fournisseur : AliExpress, Expédition en Algérie : 3,61 €.</p>
	<p>- Support de téléphone en Silicone antidérapant, réglable. Coût : 1,91 € , fournisseur : AliExpress, Expédition vers Algérie : 4,19 €.</p>





# Bibliographie

- [1] Partenariat Mondial pour les Technologies d'Assistance. ATscale. Analyse de produit : Fauteuil roulant, 2019. (Cité en pages [xi](#), [16](#) et [20](#).)
- [2] Dan Ding and Rory A Cooper. Electric powered wheelchairs. *IEEE Control Systems*, 25(2) :22–34, 2005. (Cité en pages [xi](#), [24](#), [25](#) et [33](#).)
- [3] Sebti Fougou, Steven J Fenves, Conrad Bock, Sudarsan Rachuri, and Ram D Sriram. A core product model for plm with an illustrative xml implementation. In *International Conference on Product Lifecycle Management*, volume 1, pages 21–32, 2005. (Cité en pages [xiv](#), [84](#), [85](#), [86](#) et [87](#).)
- [4] Guide ISA CA 17314. *démarche d'ingénierie système automobile, usage interne PSA*. Guide ISA, 20 décembre 1999. (Cité en pages [xiv](#) et [90](#).)
- [5] Jeff A Estefan et al. Survey of model-based systems engineering (mbse) methodologies. *In cose MBSE Focus Group*, 25(8) :1–12, 2007. (Cité en pages [xiv](#) et [117](#).)
- [6] Rory A Cooper and Louis A Quatrano. Research on physical activity and health among people with disabilities : a consensus statement. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 36(2), 1999. (Cité en page [9](#).)
- [7] Brad E Dicianno, James Joseph, Stacy Eckstein, Christina K Zigler, Eleanor Quinby, Mark R Schmeler, Richard M Schein, Jon Pearlman, and Rory A Cooper. The voice of the consumer : a survey of veterans and other users of assistive technology. *Military medicine*, 183(11-12) :e518–e525, 2018. (Cité en page [9](#).)
- [8] Office of the Surgeon General, Rory A Cooper, Paul F Pasquina, Ron Drach, et al. *Warrior Transition Leader : Medical Rehabilitation Handbook : Medical Rehabilitation Handbook*. Government Printing Office, 2013. (Cité en page [9](#).)
- [9] Roger O Smith, Marcia J Scherer, Rory Cooper, Diane Bell, David A Hobbs, Cecilia Pettersson, Nicky Seymour, Johan Borg, Michelle J Johnson, Joseph P Lane, et al. Assistive technology products : a position paper from the first

- global research, innovation, and education on assistive technology (great) summit. *Disability and Rehabilitation : Assistive Technology*, 13(5) :473–485, 2018. (Cité en page 9.)
- [10] Rory A Cooper and Rosemarie Cooper. Rehabilitation engineering : a perspective on the past 40-years and thoughts for the future. *Medical engineering & physics*, 72 :3–12, 2019. (Cité en page 9.)
- [11] Laura A McClure, Michael L Boninger, Michelle L Oyster, Steve Williams, Bethlyn Houlihan, Jesse A Lieberman, and Rory A Cooper. Wheelchair repairs, breakdown, and adverse consequences for people with traumatic spinal cord injury. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 90(12) :2034–2038, 2009. (Cité en page 9.)
- [12] Joy Hammel, Susan Magasi, Allen Heinemann, Gale Whiteneck, Jennifer Bogner, and Evelyn Rodriguez. What does participation mean? an insider perspective from people with disabilities. *Disability and rehabilitation*, 30(19) :1445–1460, 2008. (Cité en page 9.)
- [13] S David Algood, Rory A Cooper, Shirley G Fitzgerald, Rosemarie Cooper, and Michael L Boninger. Effect of a pushrim-activated power-assist wheelchair on the functional capabilities of persons with tetraplegia. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 86(3) :380–386, 2005. (Cité en page 9.)
- [14] Henri-Jacques Stiker. *Les métamorphoses du handicap de 1970 à nos jours : soi-même, avec les autres*. PUG, 2009. (Cité en page 9.)
- [15] Sally Sainsbury. *Registered as disabled*. Social Administration Trust, 1973. (Cité en page 10.)
- [16] Amelia I Harris. *Handicapped and impaired in Great Britain*, volume 1. HMSO, 1971. (Cité en page 10.)
- [17] Eda Topliss et al. *Provision for the disabled*. Basil Blackwell & Mott Ltd, 108 Cowley Road, Oxford OX4 1JF, 1975. (Cité en page 10.)
- [18] M Blaxter. The meaning of disability [sociology of social & medical care series], 1976. (Cité en page 10.)

## Bibliographie

---

- [19] Saad Z Nagi. An epidemiology of disability among adults in the united states. *The Milbank Memorial Fund Quarterly. Health and Society*, pages 439–467, 1976. (Cité en page 10.)
- [20] Peter Townsend. *Poverty in the United Kingdom : a survey of household resources and standards of living*. Univ of California Press, 1979. (Cité en page 10.)
- [21] Claude Hamonet. Les personnes handicapées, coll.«. *Que sais-je*, 1990. (Cité en pages 10 et 11.)
- [22] Isabelle Ville, Emmanuelle Fillion, Jean-François Ravaud, Alexandre Dézé, Yann Aucante, and Tom Shakespeare. *Introduction à la sociologie du handicap- Histoire, politiques et expérience*. De Boeck supérieur, 2020. (Cité en page 11.)
- [23] Allison Ruby Reid-Cunningham. Anthropological theories of disability. *Journal of Human Behavior in the Social Environment*, 19(1) :99–111, 2009. (Cité en page 11.)
- [24] Claude Hamonet. Les mécanismes d’exclusion et de marginalisation du corps dans le système de santé, apport de la démarche innovante de la réadaptation. *Boetsch, G. et al., Corps normalisé, corps stigmatisé, corps racialisé. Bruxelles : De Boeck*, 2007. (Cité en page 11.)
- [25] World Health Organization et al. *Classification internationale des handicaps ; déficiences, incapacités et désavantages ; un manuel de classification des conséquences des maladies*. Paris : INSERM, 1988. (Cité en page 11.)
- [26] Devva Kasnitz and Russell P Shuttleworth. Anthropology and disability studies. *Semiotics and dis/ability : Interrogating categories of difference*, pages 19–41, 2001. (Cité en page 11.)
- [27] World Health Organization et al. *WHO global disability action plan 2014-2021 : Better health for all people with disability*. World Health Organization, Apr 2014. (Cité en page 13.)
- [28] World Health Organization. Disability and health, 2018. (Cité en page 13.)
- [29] WHO. Organisation mondiale de la santé, 2021 WHO. (Cité en page 13.)

- [30] Brigitte Rohwerder. Disability in north africa. 2018. (Cité en page 13.)
- [31] National office of statistics, 2013. <http://www.ons.dz/>. (Cité en pages 13 et 17.)
- [32] National consultative commission of promotion and protection of human rights algeria, 2013. (Cité en page 13.)
- [33] Elaine Treffer, Shirley G Fitzgerald, Douglas A Hobson, Thomas Bursick, and Robert Joseph. Outcomes of wheelchair systems intervention with residents of long-term care facilities. *Assistive Technology*, 16(1) :18–27, 2004. (Cité en page 15.)
- [34] Luis Paulo Reis, Rodrigo AM Braga, Márcio Sousa, and Antonio Paulo Moreira. Intellwheels mmi : A flexible interface for an intelligent wheelchair. In *Robot Soccer World Cup*, pages 296–307. Springer, 2009. (Cité en page 15.)
- [35] Groce Kaplan. Mainstreaming disability in mdg policies, processes and mechanisms. *UN Secretary General's Office*, 2011. (Cité en page 15.)
- [36] International Organization for Standardization. Iso 7176-26 :2007 : Wheelchairs – part 26 : Vocabulary, 2007. (Cité en page 15.)
- [37] Rory A. Cooper . Engineering manual and electric powered wheelchairs. *Critical Reviews™ in Biomedical Engineering*, 27 :27–73, 1999. (Cité en page 15.)
- [38] Organisation mondiale de la Santé. Participation du secteur de la santé dans la convention de minamata sur le mercure : résultats des ateliers régionaux de l'organisation mondiale de la santé pour les ministres de la santé. Technical report, Organisation mondiale de la Santé, 2018. (Cité en page 15.)
- [39] World Health Organization et al. A guide to establishing event-based surveillance. 2008. (Cité en pages 15, 19 et 20.)
- [40] UN Disability. United nations-disability dept of economics and social affairs, 2010. (Cité en page 16.)
- [41] Organisation des Nations Unies. Programme d'action mondial concernant les personnes handicapées. *Paris : ONU*, 1982. (Cité en page 16.)

## Bibliographie

---

- [42] League of Arab States. Disability in the arab region : an overview. 2014. (Cité en page 17.)
- [43] Michael L Boninger, Aaron L Souza, Rory A Cooper, Shirley G Fitzgerald, Alicia M Koontz, and Brian T Fay. Propulsion patterns and pushrim biomechanics in manual wheelchair propulsion. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 83(5) :718–723, 2002. (Cité en page 20.)
- [44] W Mark Richter, Russell Rodriguez, Kevin R Woods, and Peter W Axelson. Consequences of a cross slope on wheelchair handrim biomechanics. *Archives of physical medicine and rehabilitation*, 88(1) :76–80, 2007. (Cité en page 20.)
- [45] Alicia M Koontz, Rory A Cooper, Michael L Boninger, Yusheng Yang, Bradley G Impink, and Lucas HV Van Der Woude. A kinetic analysis of manual wheelchair propulsion during start-up on select indoor and outdoor surfaces. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 42(4), 2005. (Cité en page 20.)
- [46] Greg Shaw. Wheelchair seat comfort for the institutionalized elderly. *Assistive Technology*, 3(1) :11–23, 1991. (Cité en page 20.)
- [47] LH Van der Woude, Dirk-Jan Veeger, RH Rozendal, and TJ Sargeant. Seat height in handrim wheelchair propulsion. *J Rehabil Res Dev*, 26(4) :31–50, 1989. (Cité en page 20.)
- [48] Arnaud Faupin, Philippe Campillo, Thierry Weissland, Philippe Gorce, and André Thevenon. The effects of rear-wheel camber on the mechanical parameters produced during the wheelchair sprinting of handibasketball athletes. *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 41, 2004. (Cité en page 20.)
- [49] Richard Simpson, Edmund LoPresti, Steve Hayashi, Songfeng Guo, Dan Ding, William Ammer, Vinod Sharma, and Rory Cooper. A prototype power assist wheelchair that provides for obstacle detection and avoidance for those with visual impairments. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 2(1) :30, 2005. (Cité en page 21.)
- [50] Michael L Boninger, Mark Baldwin, Rory A Cooper, Alicia Koontz, and Leighton Chan. Manual wheelchair pushrim biomechanics and axle position. *Ar-*

- chives of physical medicine and rehabilitation*, 81(5) :608–613, 2000. (Cité en page 21.)
- [51] Global Industry Analysts Inc. *Wheelchairs (powered and manual) - a global strategic business report*. MCP-3368, September 29 2016. (Cité en page 22.)
- [52] NY Albany. *Electric Wheelchair Market - Global Industry Analysis, Size, Share, Growth, Trends and Forecast, 2014 - 2020*. Transparency Market Research, March 12 2015. (Cité en page 22.)
- [53] National Research Council of Canada. Division of Mechanical Engineering. *A Wheel Chair Electric Drive Designed for the Use of Quadriplegics*. NRC, Division of Mechanical Engineering, 1953. (Cité en page 22.)
- [54] Xavier Attali and Francois Pelisse. Looking back on the evolution of electric wheelchairs. *Medical engineering & physics*, 23(10) :735, 2001. (Cité en page 22.)
- [55] Sidi Mohamed Meliani. *Modélisation du système pilote-véhicule dans une tâche de contrôle manuel de fauteuil roulant électrique*. Theses, Université Paul Verlaine - Metz, 2009. (Cité en page 23.)
- [56] Hicham Zatla. *Modélisation et analyse comportementale du système Pilote-fauteuil roulant électrique*. PhD thesis, Université de Lorraine; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018. (Cité en page 23.)
- [57] Jr Andrew Karchak and James R Allen. Wheelchair drive package, July 8 1975. US Patent 3,893,529. (Cité en page 26.)
- [58] Theodore A Trkla. All purpose wheelchair, August 21 1990. US Patent 4,949,408. (Cité en page 27.)
- [59] Daniel A Nolan. Wheelchair voice control apparatus, September 22 1998. US Patent 5,812,978. (Cité en page 27.)
- [60] Willis Martin. Convertible wheelchair and separate lift module for connecting to and elevating the wheelchair, March 15 2005. US Patent 6,866,288. (Cité en page 28.)

## Bibliographie

---

- [61] Thomas T. Frankie. Automated wheelchair, March 17 2009. US Patent 7,503,567 B2. (Cité en page 29.)
- [62] Lazo Starcevic. Wheelchair for stairs and obstacles, April 22 2010. US Patent App. 12/443,693. (Cité en page 29.)
- [63] Ingvor Pettersson, Gerd Ahlström, and Kristina Törnquist. The value of an outdoor powered wheelchair with regard to the quality of life of persons with stroke : a follow-up study. *Assistive technology*, 19(3) :143–153, 2007. (Cité en page 30.)
- [64] Frédéric Leishman, Odile Horn, and Guy Bourhis. Smart wheelchair control through a deictic approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 58(10) :1149–1158, 2010. (Cité en page 30.)
- [65] Alain Pruski, Moural Ennaji, and Yann Morere. Vahm : A user adapted intelligent wheelchair. In *Control Applications, 2002. Proceedings of the 2002 International Conference on*, volume 2, pages 784–789. IEEE, 2002. (Cité en pages 30, 32 et 33.)
- [66] World Health Organization et al. Guidelines on the provision of manual wheelchairs in less resourced settings. 2008. (Cité en page 31.)
- [67] Richard Simpson, Edmund LoPresti, Steve Hayashi, Illah Nourbakhsh, and David Miller. The smart wheelchair component system. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 41(3B) :429, 2004. (Cité en pages 31 et 182.)
- [68] Rodrigo AM Braga, Marcelo Petry, Antonio Paulo Moreira, and Luis Paulo Reis. Concept and design of the intellwheels platform for developing intelligent wheelchairs. In *Informatics in control, automation and robotics*, pages 191–203. Springer, 2009. (Cité en pages 31 et 183.)
- [69] Richard C Simpson. Smart wheelchairs : A literature review. *Journal of rehabilitation research and development*, 42(4) :423, 2005. (Cité en pages 31, 32 et 33.)

- [70] Mohd Razali Md Tomari, Yoshinori Kobayashi, and Yoshinori Kuno. Development of smart wheelchair system for a user with severe motor impairment. *Procedia Engineering*, 41 :538–546, 2012. (Cité en page 31.)
- [71] Annemarie Kokosy, Thierry Floquet, Gareth Howells, Huosheng Hu, M Pepper, Mohamed Sakel, and C Donze. Sysiass ? an intelligent powered wheelchair. 2013. (Cité en page 31.)
- [72] Edmund F LoPresti, Vinod Sharma, Richard C Simpson, and L Casimir Mostowy. Performance testing of collision-avoidance system for power wheelchairs. *J Rehabil Res Dev*, 48(5) :529–44, 2011. (Cité en page 31.)
- [73] R Madarasz, Loren Heiny, Robert Crompt, and Neal Mazur. The design of an autonomous vehicle for the disabled. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 2(3) :117–126, 1986. (Cité en pages 31 et 180.)
- [74] G Bourhis, K Moumen, P Pino, S Rohmer, and A Pruski. Assisted navigation for a powered wheelchair. In *Proceedings of IEEE Systems Man and Cybernetics Conference-SMC*, volume 3, pages 553–558. IEEE, 1993. (Cité en page 31.)
- [75] David A Bell, Johann Borenstein, Simon P Levine, Yoram Koren, and J Jaros. An assistive navigation system for wheelchairs based upon mobile robot obstacle avoidance. In *Proceedings of the 1994 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 2018–2022. IEEE, 1994. (Cité en page 31.)
- [76] Manuel Mazo, Francisco J Rodriguez, José L Lázaro, Jesús Ureña, Juan C Garcia, Enrique Santiso, Pedro Revenga, and J Jesus Garcia. Wheelchair for physically disabled people with voice, ultrasonic and infrared sensor control. *Autonomous Robots*, 2(3) :203–224, 1995. (Cité en page 31.)
- [77] Christian Bühler, Ralf Hoelper, Helmut Hoyer, and Wolfram Humann. Autonomous robot technology for advanced wheelchair and robotic aids for people with disabilities. *Robotics and autonomous systems*, 14(2-3) :213–222, 1995. (Cité en page 31.)
- [78] Jae-Woong Min, Kyoobin Lee, Soo-Chul Lim, and Dong-Soo Kwon. Human-friendly interfaces of wheelchair robotic system for handicapped persons. In



## Bibliographie

---

- IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, volume 2, pages 1505–1510. IEEE, 2002. (Cité en page 31.)
- [79] Linda Fehr, W Edwin Langbein, and Steven B Skaar. Adequacy of power wheelchair control interfaces for persons with severe disabilities : A clinical survey. *Journal of rehabilitation research and development*, 37(3) :353–360, 2000. (Cité en page 31.)
- [80] L. W. Korba, P. J. Nelson, S. Lang, D. Green, and R. Liscano. [593] development of a smart wheelchair. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 28(1) :463–464, 1 1991. (Cité en page 33.)
- [81] Paulette van Vliet and Alan M Wing. A new challenge—robotics in the rehabilitation of the neurologically motor impaired. *Physical Therapy*, 71(1) :39–47, 1991. (Cité en page 33.)
- [82] Helmut Hoyer and Ralf Hoelper. Open control architecture for an intelligent omnidirectional wheelchair. In *Proc. 1st TIDE Congress, Brussels*, pages 93–97, 1993. (Cité en pages 33 et 180.)
- [83] PD Nisbet and I Craig. Mobility and mobility training for severely disabled children : results of the “smart” wheelchair project. In *RESNA 17th Annual Conference*, pages 341–343. ERIC, 1994. (Cité en page 33.)
- [84] Paul Nisbet, John Craig, Phil Odor, and Stuart Aitken. ‘smart’wheelchairs for mobility training. *Technology and Disability*, 5(1) :49–62, 1996. (Cité en page 33.)
- [85] David M Brienza and Jennifer Angelo. A force feedback joystick and control algorithm for wheelchair obstacle avoidance. *Disability and Rehabilitation*, 18(3) :123–129, 1996. (Cité en page 33.)
- [86] John L Dallaway, Robin D Jackson, and Paul HA Timmers. Rehabilitation robotics in europe. *IEEE Transactions on rehabilitation engineering*, 3(1) :35–45, 1995. (Cité en page 33.)
- [87] David P Miller and Marc G Slack. Design and testing of a low-cost robotic wheelchair prototype. *Autonomous robots*, 2(1) :77–88, 1995. (Cité en pages 33 et 180.)

- [88] Parris Wellman, Venkat Krovi, and V Kianar. An adaptive mobility system for the disabled. In *Robotics and Automation, 1994. Proceedings., 1994 IEEE International Conference on*, pages 2006–2011. IEEE, 1994. (Cité en page 33.)
- [89] Rory A Cooper. *Rehabilitation engineering applied to mobility and manipulation*. CRC Press, 1995. (Cité en page 33.)
- [90] Richard C Simpson and Simon P Levine. Adaptive shared control of a smart wheelchair operated by voice control. In *Intelligent Robots and Systems, 1997. IROS'97., Proceedings of the 1997 IEEE/RSJ International Conference on*, volume 2, pages 622–626. IEEE, 1997. (Cité en page 33.)
- [91] Simon P Levine, David A Bell, Lincoln A Jaros, Richard C Simpson, Yoram Koren, and Johann Borenstein. The navchair assistive wheelchair navigation system. *IEEE transactions on rehabilitation engineering*, 7(4) :443–451, 1999. (Cité en page 33.)
- [92] Ulrich Borgolte, Helmut Hoyer, Christian Bühler, Helmut Heck, and Ralf Hoelper. Architectural concepts of a semi-autonomous wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 22(3-4) :233–253, 1998. (Cité en page 33.)
- [93] David P Miller. Assistive robotics : an overview. In *Assistive Technology and Artificial Intelligence*, pages 126–136. Springer, 1998. (Cité en pages 33 et 181.)
- [94] Gabriel Pires, Rui Araujo, Urbano Nunes, and AT De Almeida. Robchair—a powered wheelchair using a behaviour-based navigation. In *Proceedings of International Workshop on Advanced Motion Control*, pages 536–541, 1998. (Cité en page 33.)
- [95] Debbie Field. Powered mobility : A literature review illustrating the importance of a multifaceted approach. *Assistive Technology*, 11(1) :20–33, 1999. (Cité en page 33.)
- [96] Yoshinori Kuno, Saturo Nakanishi, Teruhisa Murashima, Nobutaka Shimada, and Yoshiaki Shirai. Intelligent wheelchair based on the integration of human and environment observations. In *Information Intelligence and Systems, 1999. Proceedings. 1999 International Conference on*, pages 342–349. IEEE, 1999. (Cité en page 33.)

## Bibliographie

---

- [97] Pei Jia, Huosheng H Hu, Tao Lu, and Kui Yuan. Head gesture recognition for hands-free control of an intelligent wheelchair. *Industrial Robot : An International Journal*, 34(1) :60–68, 2007. (Cité en page 33.)
- [98] Erwin Prassler, Jens Scholz, and Paolo Fiorini. A robotics wheelchair for crowded public environment. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 8(1) :38–45, 2001. (Cité en page 33.)
- [99] Ferran Galán, Marnix Nuttin, Eileen Lew, Pierre W Ferrez, Gerolf Vanacker, Johan Philips, and J del R Millán. A brain-actuated wheelchair : asynchronous and non-invasive brain–computer interfaces for continuous control of robots. *Clinical neurophysiology*, 119(9) :2159–2169, 2008. (Cité en page 33.)
- [100] Sarangi P Parikh, Valdir Grassi, Vijay Kumar, and Jr Jun Okamoto. Usability study of a control framework for an intelligent wheelchair. In *Robotics and Automation, 2005. ICRA 2005. Proceedings of the 2005 IEEE International Conference on*, pages 4745–4750. IEEE, 2005. (Cité en page 33.)
- [101] Alex Mihailidis, Pantelis Elinas, Jennifer Boger, and Jesse Hoey. An intelligent powered wheelchair to enable mobility of cognitively impaired older adults : An anticollision system. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 15(1) :136–143, 2007. (Cité en page 33.)
- [102] Holly A Yanco and Karen Zita Haigh. Automation as caregiver : A survey of issues and technologies. *Am. Assoc. Artif. Intell*, 2 :39–53, 2002. (Cité en page 33.)
- [103] Michael A Goodrich, Alan C Schultz, et al. Human–robot interaction : a survey. *Foundations and Trends® in Human–Computer Interaction*, 1(3) :203–275, 2008. (Cité en page 33.)
- [104] Bonci Andrea, Longhi Sauro, Monteriù Andrea, and Vaccarini Massimo. Navigation system for a smart wheelchair. *Journal of Zhejiang University-Science A*, 6(2) :110–117, 2005. (Cité en page 33.)
- [105] M’hamed Sahnoun and G Bourhis. Conception et simulation d’une commande à retour d’effort pour fauteuil roulant électrique. *Sciences et Technologies pour le Handicap*, 1(2) :123–141, 2007. (Cité en page 33.)

- [106] Ana C Lopes, Gabriel Pires, and Urbano Nunes. Assisted navigation for a brain-actuated intelligent wheelchair. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(3) :245–258, 2013. (Cité en page 34.)
- [107] Brígida Mónica Faria, Luís Paulo Reis, and Nuno Lau. A survey on intelligent wheelchair prototypes and simulators. In *New Perspectives in Information Systems and Technologies, Volume 1*, pages 545–557. Springer, 2014. (Cité en page 34.)
- [108] Rui Zhang, Yuanqing Li, Yongyong Yan, Hao Zhang, Shaoyu Wu, Tianyou Yu, and Zhenghui Gu. Control of a wheelchair in an indoor environment based on a brain-computer interface and automated navigation. *IEEE transactions on neural systems and rehabilitation engineering*, 24(1) :128–139, 2016. (Cité en page 34.)
- [109] Jesse Leaman and Hung Manh La. A comprehensive review of smart wheelchairs : past, present, and future. *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 47(4) :486–499, 2017. (Cité en page 34.)
- [110] Hyun W Ka, Richard Simpson, and Younghyun Chung. Intelligent single switch wheelchair navigation. *Disability and Rehabilitation : Assistive Technology*, 7(6) :501–506, 2012. (Cité en page 34.)
- [111] Sarah McGarry, Lois Moir, and Sonya Girdler. The smart wheelchair : is it an appropriate mobility training tool for children with physical disabilities? *Disability and Rehabilitation : Assistive Technology*, 7(5) :372–380, 2012. (Cité en page 34.)
- [112] Shafaque Anjum Mohd Shakir Sheikh and Dinesh R Rotake. An evolutionary approach for smart wheelchair system. In *Communications and Signal Processing (ICCSP), 2015 International Conference on*, pages 1811–1815. IEEE, 2015. (Cité en page 34.)
- [113] Antonis Argyros, Pantelis Georgiadis, Panos Trahanias, and Dimitris Tsakiris. Semi-autonomous navigation of a robotic wheelchair. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 34(3) :315–329, 2002. (Cité en pages 35 et 157.)

## Bibliographie

---

- [114] Taishi Sawabe, Masayuki Kanbara, Norimichi Ukita, Tetsushi Ikeda, Luis Yoi-chi Morales Saiki, Atsushi Watanabe, and Norihiro Hagita. Comfortable autonomous navigation based on collision prediction in blind occluded regions. In *2015 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety (ICVES)*, pages 75–80. IEEE, 2015. (Cité en page 38.)
- [115] Oussama Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. In *Autonomous robot vehicles*, pages 396–404. Springer, 1986. (Cité en page 39.)
- [116] Hendri Himawan Triharminto, Oyas Wahyunggoro, Teguh Bharata Adji, Adha Cahyadi, Igi Ardiyanto, et al. Local information using stereo camera in artificial potential field based path planning. *IAENG Int. J. Comput. Sci.*, 44(3) :316–326, 2017. (Cité en page 39.)
- [117] Oscar Montiel, Ulises Orozco-Rosas, and Roberto Sepúlveda. Path planning for mobile robots using bacterial potential field for avoiding static and dynamic obstacles. *Expert Systems with Applications*, 42(12) :5177–5191, 2015. (Cité en page 39.)
- [118] Stevine Obura Onyango, Yskandar Hamam, Karim Djouani, Boubaker Daachi, and Nico Steyn. A driving behaviour model of electrical wheelchair users. *Computational intelligence and neuroscience*, 2016, 2016. (Cité en page 39.)
- [119] Franco J Solari, Alejandro F Rozenfeld, Sebastián A Villar, and Gerardo G Acosta. Artificial potential fields for the obstacles avoidance system of an auv using a mechanical scanning sonar. In *2016 3rd IEEE/OES South American International Symposium on Oceanic Engineering (SAISOE)*, pages 1–6. IEEE, 2016. (Cité en page 39.)
- [120] Qiubo Zhong, Jie Zhao, and Chunya Tong. Tracking for humanoid robot based on kinect. In *2014 International Conference on Mechatronics and Control (ICMC)*, pages 1191–1194. IEEE, 2014. (Cité en page 39.)
- [121] Hiroshi Igarashi and Masayoshi Kakikura. Path and posture planning for walking robots by artificial potential field method. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2004. Proceedings. ICRA'04. 2004*, volume 3, pages 2165–2170. IEEE, 2004. (Cité en page 39.)

- [122] Johann Borenstein, Yoram Koren, et al. The vector field histogram-fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE transactions on robotics and automation*, 7(3) :278–288, 1991. (Cité en page 39.)
- [123] Dieter Fox, Wolfram Burgard, and Sebastian Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 4(1) :23–33, 1997. (Cité en page 40.)
- [124] Johann Borenstein, HR Everett, Liqiang Feng, et al. Where am i?" sensors and methods for mobile robot positioning. *University of Michigan*, 119(120) :27, 1996. (Cité en page 40.)
- [125] Mohammad Abdel Kareem Jaradat, Mohammad Al-Rousan, and Lara Qadani. Reinforcement based mobile robot navigation in dynamic environment. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 27(1) :135–149, 2011. (Cité en page 41.)
- [126] Luca Cavanini, Flavia Benetazzo, Alessandro Freddi, Sauro Longhi, and Andrea Monteriu. Slam-based autonomous wheelchair navigation system for aal scenarios. In *2014 IEEE/ASME 10th International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications (MESA)*, pages 1–5. IEEE, 2014. (Cité en page 41.)
- [127] Takuma Ito, Takenobu Inoue, Motoki Shino, and Minoru Kamata. Development of a driver model in powered wheelchair operation. In *International Conference on Digital Human Modeling*, pages 384–393. Springer, 2009. (Cité en page 49.)
- [128] Alexandros André Chaaoui, Pau Climent-Pérez, and Francisco Flórez-Revuelta. A review on vision techniques applied to human behaviour analysis for ambient-assisted living. *Expert Systems with Applications*, 39(12) :10873–10888, 2012. (Cité en page 52.)
- [129] George Vavoulas, Charikleia Chatzaki, Thodoris Malliotakis, Matthew Peditis, and Manolis Tsiknakis. The mobiact dataset : Recognition of activities of daily living using smartphones. In *ICT4AgeingWell*, pages 143–151, 2016. (Cité en page 52.)

## Bibliographie

---

- [130] Jianxin Wu, Adebola Osuntogun, Tanzeem Choudhury, Matthai Philipose, and James M Rehg. A scalable approach to activity recognition based on object use. In *Computer Vision, 2007. ICCV 2007. IEEE 11th International Conference on*, pages 1–8. IEEE, 2007. (Cité en pages 52 et 53.)
- [131] Mounira Harzallah and François Vernadat. It-based competency modeling and management : from theory to practice in enterprise engineering and operations. *Computers in industry*, 48(2) :157–179, 2002. (Cité en page 52.)
- [132] P Siebers, Tim Baines, S Mason, and J Ladbrook. Modelling human variation in assembly line models. In *proceedings of the 2004 Operational Research Society Simulation Workshop (SW04), UK*. Citeseer, 2004. (Cité en page 52.)
- [133] William G Kennedy. Modelling human behaviour in agent-based models. In *Agent-based models of geographical systems*, pages 167–179. Springer, 2012. (Cité en page 52.)
- [134] Charles Jones. Behavioral theory in simulation : Ambiguous results from simple relationships. In *Proceedings the 23rd International Conference of the System Dynamics Society, USA*, 2005. (Cité en page 52.)
- [135] Juan Martínez-Miranda, Arantza Aldea, René Bañares-Alcántara, and Matías Alvarado. Teaks : Simulation of human performance at work to support team configuration. In *Proceedings of the fifth international joint conference on Autonomous agents and multiagent systems*, pages 114–116. ACM, 2006. (Cité en page 53.)
- [136] Sally C Brailsford, Paul R Harper, and Jennifer Sykes. Incorporating human behaviour in simulation models of screening for breast cancer. *European Journal of Operational Research*, 219(3) :491–507, 2012. (Cité en page 53.)
- [137] Farshid Abdi and Shaghayegh Abolmakarem. Customer behavior mining framework (cbmf) using clustering and classification techniques. *Journal of Industrial Engineering International*, pages 1–18, 2018. (Cité en page 53.)
- [138] Lionel Kieffer and Frédéric Audard. Modéliser les chaînes de déplacements : reconstruire la mobilité quotidienne à travers le prisme des déplacements secondaires. In *CIST2014-Fronts et frontières des sciences du territoire*, pages 251–255, 2014. (Cité en page 53.)



- [139] Gennaro Nicola Bifulco, Armando Cartenì, and Andrea Papola. An activity-based approach for complex travel behaviour modelling. *European Transport Research Review*, 2(4) :209–221, 2010. (Cité en page 53.)
- [140] Michal Šimeček, Vít Gabrhel, Marek Tögel, and Michal Lazor. Travel behaviour of seniors in eastern europe : a comparative study of brno and bratislava. *European Transport Research Review*, 10(1) :16, 2018. (Cité en page 53.)
- [141] Jean-Christophe Vilatte. Méthodologie de l'enquête par questionnaire. *Laboratoire Culture & Communication Université d'Avignon*, 2007. (Cité en page 55.)
- [142] Shaofeng Liu and Iain M Boyle. Engineering design : perspectives, challenges, and recent advances. *Journal of Engineering Design*, 20(1) :7–19, 2009. (Cité en page 58.)
- [143] William G Cochran. *Sampling techniques*. John Wiley & Sons, 2007. (Cité en page 61.)
- [144] Grady Booch, Ivar Jacobson, James Rumbaugh, et al. The unified modeling language. *Unix Review*, 14(13) :5, 1996. (Cité en page 71.)
- [145] George A Miller. The magical number seven, plus or minus two : Some limits on our capacity for processing information. *Psychological review*, 101(2) :343, 1994. (Cité en page 71.)
- [146] Alexandre Thibault. *Contribution à l'intégration produit : processus de fabrication, application au domaine de la forge*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2008. (Cité en page 72.)
- [147] Nathalie Lahonde. *Optimisation du processus de conception : proposition d'un modèle de sélection des méthodes pour l'aide à la décision*. PhD thesis, Arts et Métiers ParisTech, 2010. (Cité en page 72.)
- [148] International Council on Systems Engineering. *Systems engineering handbook : A " what to " guide for all se practitioners*. INCOSE, 2004. (Cité en page 72.)
- [149] ME Wicklund. *Usability in practice*, 1994. (Cité en page 73.)



## Bibliographie

---

- [150] Sören Wilhelms. Function-and constraint-based conceptual design support using easily exchangeable, reusable principle solution elements. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing : AI EDAM*, 19(3) :201, 2005. (Cité en page 73.)
- [151] Damien Motte et al. A review of the fundamentals of systematic engineering design process models. In *DS 48 : Proceedings DESIGN 2008, the 10th International Design Conference, Dubrovnik, Croatia*, pages 199–210, 2008. (Cité en page 73.)
- [152] BM Li, SQ Xie, and ZQ Sang. Step-based data sharing and exchange in one-of-a-kind product collaborative design for cloud manufacturing. *Advances in Mechanical Engineering*, 5 :135291, 2013. (Cité en page 74.)
- [153] Qing Song Ai, Yan Wang, and Quan Liu. An intelligent method of product scheme design based on product gene. *Advances in Mechanical Engineering*, 5 :489257, 2013. (Cité en page 74.)
- [154] International Institute of Business Analysis. *A Guide to the Business Analysis Body of Knowledge (BABOK Guide), Version 2.0*. International Institute of Business Analysis, 2009. (Cité en page 74.)
- [155] Gerhard Pahl and Wolfgang Beitz. *Engineering design : a systematic approach*. Springer Science & Business Media, 2013. (Cité en page 75.)
- [156] Gerhard Pahl and Wolfgang Beitz. Conceptual design. In *Engineering Design*, pages 139–198. Springer, 1996. (Cité en page 76.)
- [157] Lucienne TM Blessing and Amaresh Chakrabarti. *DRM : A design research methodology*. Springer, 2009. (Cité en page 76.)
- [158] Amaresh Chakrabarti. Design creativity research. In *Product Research*, pages 17–39. Springer, 2009. (Cité en page 76.)
- [159] Susan Finger and John R Dixon. A review of research in mechanical engineering design. part i : Descriptive, prescriptive, and computer-based models of design processes. *Research in engineering design*, 1(1) :51–67, 1989. (Cité en page 76.)

- [160] Susan Finger and John R Dixon. A review of research in mechanical engineering design. part ii : Representations, analysis, and design for the life cycle. *Research in engineering design*, 1(2) :121–137, 1989. (Cité en page 76.)
- [161] Herbert Birkhofer. *The future of design methodology*. Springer, 2011. (Cité en page 77.)
- [162] Thomas J Howard, Stephen J Culley, and Elies Dekoninck. Describing the creative design process by the integration of engineering design and cognitive psychology literature. *Design studies*, 29(2) :160–180, 2008. (Cité en page 77.)
- [163] Boehm Barry et al. Software engineering economics. *New York*, 197, 1981. (Cité en page 78.)
- [164] Mary Shaw. Writing good software engineering research papers. In *25th International Conference on Software Engineering, 2003. Proceedings.*, pages 726–736. IEEE, 2003. (Cité en page 78.)
- [165] Jean-Paul Calvez. *Spécification et conception des systèmes : une méthodologie*. masson, 1990. (Cité en page 79.)
- [166] Henri Brenier. *Les spécifications fonctionnelles : automatismes industriels et temps réel*. Dunod paris, France, 2001. (Cité en page 79.)
- [167] Barry W Boehm, Terence E Gray, and Thomas Seewaldt. Prototyping versus specifying : a multiproject experiment. *IEEE transactions on Software Engineering*, (3) :290–303, 1984. (Cité en page 80.)
- [168] Balakrishnan Chandrasekaran. Design problem solving : A task analysis. *AI Magazine*, 11(4) :59, Dec. 1990. (Cité en page 82.)
- [169] Patrick Serrafero. De l’innovation à la routine en conception éco-performante ou de la confrontation des idées pour le client à la vérité de l’ingénieur. *Marche et organisations*, (1) :51–64, 2013. (Cité en pages 82 et 114.)
- [170] Sébastien Menand. *Modélisation pour la réutilisation du processus de conception multi acteurs de produits industriels : application à la conception fonctionnelle des systèmes de direction automobile*. PhD thesis, Grenoble INPG, 2002. (Cité en page 82.)

## Bibliographie

---

- [171] Mourad Messaadia. *Ingénierie système et système de production manufacturière : intégration de l'évolution des exigences dans le PLM*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008. (Cité en page 82.)
- [172] Sergio Terzi, Jacopo Cassina, and Hervé Panetto. Development of a metamodel to foster interoperability along the product lifecycle traceability. In *Interoperability of Enterprise Software and Applications*, pages 1–11. Springer, 2006. (Cité en page 84.)
- [173] Steven J Fenves, Sebti Foufou, Conrad E Bock, N Bouillon, and Ram D Sriram. Cpm 2 : A revised core product model for representing design information. 2005. (Cité en page 84.)
- [174] Emmanuel Grison. *L'étonnant parcours du républicain JH Hassenfratz (1755-1827) : du faubourg Montmartre au Corps des Mines*. Presses des MINES, 1996. (Cité en page 88.)
- [175] Fabrice Gunther. *Étude de l'efficacité des outils de l'analyse fonctionnelle dans l'enseignement et l'apprentissage de systèmes techniques au collège*. PhD thesis, Aix-Marseille, 2016. (Cité en page 88.)
- [176] Ronald Arthur Howard. *The foundations of decision analysis revisited*. Cite-seer, 2007. (Cité en page 89.)
- [177] L Zehtaban and D Roller. Systematic functional analysis methods for design retrieval and documentation. *International Journal of Computer and Information Engineering*, 6(12) :1711–1716, 2012. (Cité en page 89.)
- [178] Delafollie Gérard. *Analyse de la valeur / Gérard Delafollie,...* Hachette Technique, right 1991. (Cité en page 89.)
- [179] Marvin Rausand and Arnljot Hoyland. *System reliability theory : models, statistical methods, and applications*, volume 396. John Wiley & Sons, 2003. (Cité en page 89.)
- [180] David Maliniak. Engineering essentials—don't be a separatist—think "system"—a holistic approach to chip/package/pc-board co-design can go a long way toward success. *Electronic Design*, 55(3) :51, 2007. (Cité en page 89.)

- [181] SysML Merge Team. Systems modeling language (sysml) specification. *OMG document : ad/2006-03-01*, 2006. (Cité en page 90.)
- [182] João Pimentel, Jaelson Castro, John Mylopoulos, Konstantinos Angelopoulos, and Vítor E Silva Souza. From requirements to statecharts via design refinement. In *Proceedings of the 29th Annual ACM Symposium on Applied Computing*, pages 995–1000, 2014. (Cité en page 97.)
- [183] Bradley Camburn, Vimal Viswanathan, Julie Linsey, David Anderson, Daniel Jensen, Richard Crawford, Kevin Otto, and Kristin Wood. Design prototyping methods : state of the art in strategies, techniques, and guidelines. *Design Science*, 3, 2017. (Cité en page 97.)
- [184] XUE Rui, Claude Baron, Philippe Esteban, et al. Aligning systems engineering and project management standards to improve the management of processes. In *Progress in Systems Engineering*, pages 547–553. Springer, 2015. (Cité en page 97.)
- [185] Benjamin Fontan. *Méthodologie de conception de systèmes temps réel et distribués en contexte UML/SysML*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2008. (Cité en page 98.)
- [186] Dragos Dobre. *Contribution à la modélisation d'un système interactif d'aide à la conduite d'un procédé industriel*. PhD thesis, Nancy 1, 2010. (Cité en page 98.)
- [187] Jean-Pierre Lamy. Sysml, un langage modèle. *Journal Technologie*, 179 :32–48, 2012. (Cité en page 103.)
- [188] Hadrien Szigeti, Mourad Messaadia, Anirban Majumdar, and Benoit Eynard. Steep analysis as a tool for building technology roadmaps. In *Internationale challenges e-2011 conference, Florence*, pages 26–28, 2011. (Cité en page 113.)
- [189] Matthias Schöttle, Nishanth Thimmegowda, Omar Alam, Jörg Kienzle, and Gunter Mussbacher. Feature modelling and traceability for concern-driven software development with touchcore. In *Companion Proceedings of the 14th International Conference on Modularity*, pages 11–14, 2015. (Cité en page 113.)

## Bibliographie

---

- [190] Wilco Engelsman, Dick Quartel, Henk Jonkers, and Marten van Sinderen. Extending enterprise architecture modelling with business goals and requirements. *Enterprise information systems*, 5(1) :9–36, 2011. (Cité en page 113.)
- [191] Inah Omoronyia, Guttorm Sindre, and Tor Stålhane. Exploring a bayesian and linear approach to requirements traceability. *Information and Software Technology*, 53(8) :851–871, 2011. (Cité en page 113.)
- [192] Zhan-Shan Li, Fei-hong Kou, Xiao-chun Cheng, and Tao Wang. Model-based product redesign. *Ijcsns*, 6 :100–108, 2006. (Cité en page 114.)
- [193] M Messaadia, AEK Sahraoui, K-D Thoben, and C Hans. Systems engineering framework to support maintenance systems. In *2006 IEEE International Technology Management Conference (ICE)*, pages 1–8. IEEE, 2006. (Cité en page 116.)
- [194] AEK Sahraoui. Requirements engineering : the automata based elicitation and related issues. In *International Conference on Software Engineering Research and Practice (SERP'02), Las Vegas (USA)*, 2002. (Cité en page 116.)
- [195] Mohamad Hani El Jamal. *Contribution à l'évolution des exigences et son impact sur la sécurité*. PhD thesis, Université Paul Sabatier-Toulouse III, 2006. (Cité en page 116.)
- [196] Abdelmonaam Abid. *Approche basée sur l'ingénierie système pour la conception intégrée des systèmes manufacturiers reconfigurables*. PhD thesis, Université Paris-Saclay ; École nationale d'ingénieurs de Sfax (Tunisie), 2019. (Cité en page 117.)
- [197] A. SADIG and Abd-El-Kader Sahraoui. Requirements engineering practice in developing countries : elicitation and traceability processes. In *International Conference on Software Engineering Research and Practice ( SERP )*, page 7p., Las Vegas, United States, July 2016. (Cité en page 118.)
- [198] Ann M Hickey and Alan M Davis. Elicitation technique selection : how do experts do it ? In *Proceedings. 11th IEEE International Requirements Engineering Conference, 2003.*, pages 169–178. IEEE, 2003. (Cité en page 119.)

- [199] Hina Saeeda, Junyu Dong, Yong Wang, and Muhammad Adil Abid. A proposed framework for improved software requirements elicitation process in scrum : Implementation by a real-life norway-based it project. *Journal of Software : Evolution and Process*, 32(7) :e2247, 2020. (Cité en page 119.)
- [200] Donald C Gause and Gerald M Weinberg. *Exploring requirements : quality before design*, volume 7. Dorset House New York, 1989. (Cité en page 119.)
- [201] Mourad Messaadia, Mohamad Hani El-Jamal, and A-E-K Sahraoui. On systems engineering deployment and requirements evolution. In *18th International Conference on Systems Engineering (ICSEng'05)*, pages 427–432. IEEE, 2005. (Cité en page 121.)
- [202] Muneera Bano, Salma Imtiaz, Naveed Ikram, Mahmood Niazi, and Muhammad Usman. Causes of requirement change-a systematic literature review. 2012. (Cité en page 121.)
- [203] Richard C Simpson, Edmund F LoPresti, and Rory A Cooper. How many people would benefit from a smart wheelchair? *Journal of Rehabilitation Research & Development*, 45(1), 2008. (Cité en page 141.)
- [204] Fitri Utaminingrum, M Ali Fauzi, Yuita Arum Sari, Renaldi Primaswara, and Sigit Adinugroho. Eye movement as navigator for disabled person. In *Proceedings of the 2016 International Conference on Communication and Information Systems*, pages 1–5, 2016. (Cité en page 146.)
- [205] Amberlay Ruíz-Serrano, Miriam C Reyes-Fernández, Rubén Posada-Gómez, Albino Martínez-Sibaja, and Alberto A Aguilar-Lasserre. Obstacle avoidance embedded system for a smart wheelchair with a multimodal navigation interface. In *2014 11th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE)*, pages 1–6. IEEE, 2014. (Cité en page 146.)
- [206] Fitri Utaminingrum, Hurriyatul Fitriyah, Randy Cahya Wihandika, M Ali Fauzi, Dahnia Syauqy, and Rizal Maulana. Fast obstacle distance estimation using laser line imaging technique for smart wheelchair. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*, 6(4) :1602, 2016. (Cité en page 146.)

## Bibliographie

---

- [207] Fitri Utaminingrum, Tri Astoto Kurniawan, M Ali Fauzi, Rizal Maulana, Dah-nial Syauqy, Randy Cahya Wihandika, Yuita Arum Sari, and Putra Pandu Adikara. A laser-vision based obstacle detection and distance estimation for smart wheelchair navigation. In *2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing (ICSIP)*, pages 123–127. IEEE, 2016. (Cité en page 146.)
- [208] Jianfei Zhang, Jingchuan Wang, and Weidong Chen. A control system of driver assistance and human following for smart wheelchair. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO 2014)*, pages 1927–1932. IEEE, 2014. (Cité en pages 146 et 184.)
- [209] Shraddha Uddhav Khadilkar and Narendra Wagdarikar. Android phone controlled voice, gesture and touch screen operated smart wheelchair. In *2015 International Conference on Pervasive Computing (ICPC)*, pages 1–4. IEEE, 2015. (Cité en page 146.)
- [210] François Pasteau, Alexandre Krupa, and Marie Babel. Vision-based assistance for wheelchair navigation along corridors. In *2014 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pages 4430–4435. IEEE, 2014. (Cité en page 157.)
- [211] Nicholas D Marchuk, Dan Ding, and Steve Gaukrodger. Development of a virtual platform for assessment and training of power wheelchair driving. In *30th RESNA International Conference*, 2007. (Cité en page 158.)
- [212] Morgan Quigley, Ken Conley, Brian Gerkey, Josh Faust, Tully Foote, Jeremy Leibs, Rob Wheeler, Andrew Y Ng, et al. Ros : an open-source robot operating system. In *ICRA workshop on open source software*, volume 3, page 5. Kobe, Japan, 2009. (Cité en pages 159 et 160.)
- [213] Pierre Kancir. *Méthodologie de conception de système multi-robots : de la simulation à la démonstration*. PhD thesis, Université de Bretagne Sud, 2018. (Cité en page 159.)
- [214] Guy Bourhis, Odile Horn, Olivier Habert, and Alain Pruski. An autonomous vehicle for people with motor disabilities. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 8(1) :20–28, 2001. (Cité en pages 180 et 182.)



- [215] Venkat Krovi, Parris Wellman, Vijay Kumar, and William Harwin. Design of a walking wheelchair for the motor disabled. In *Proc. 4th International Conference on Rehabilitation Robotics*, pages 125–131, 1994. (Cité en page 180.)
- [216] Simon P Levine. The navchair control system for automatic assistive wheelchair navigation. *Journal of Rehabilitation Research and Development*, 30 :406, 1994. (Cité en page 181.)
- [217] Panos E Trahanias, Manolis IA Lourakis, SA Argyros, and Stelios C Orphanoudakis. Navigational support for robotic wheelchair platforms : an approach that combines vision and range sensors. In *Proceedings of International Conference on Robotics and Automation*, volume 2, pages 1265–1270. IEEE, 1997. (Cité en page 181.)
- [218] H Hoyer, U Borgolte, and A Jochheim. The omni-wheelchair-state of the art. In *Proceedings of Conference on Technology and Persons with Disabilities, Los Angeles*, 1999. (Cité en page 181.)
- [219] Christian Martens, Nils Ruchel, Oliver Lang, Oleg Ivlev, and Axel Graser. A friend for assisting handicapped people. *IEEE Robotics & Automation Magazine*, 8(1) :57–65, 2001. (Cité en page 181.)
- [220] D Ding, EF LoPresti, RC Simpson, and RA Cooper. Interpreting joystick signals for wheelchair navigation. In *Proceedings of the RESNA 2003 Annual Conference*, 2003. (Cité en page 182.)
- [221] R Simpson, E LoPresti, S Hayashi, S Guo, R Frisch, A Martin, W Ammer, D Ding, and R Cooper. Smart power assistance module for manual wheelchairs. In *Technology and Disability : Research, Design, Practice and Policy : 26th International Annual Conference on Assistive Technology for People with Disabilities (RESNA)/[CD-ROM]*, pages 19–23, 2003. (Cité en page 182.)
- [222] L. project lurch - the autonomous wheelchair, 2011. <http://airwiki.ws.dei.polimi.it/index.php/LURCH-The-autonomous-wheelchair/>. (Cité en page 183.)
- [223] Borja Bonail, Julio Abascal, and Luis Gardeazabal. Wheelchair-based open robotic platform and its performance within the ambiennet project. In *Procee-*



## Bibliographie

---

- dings of the 2nd International Conference on PErvasive Technologies Related to Assistive Environments*, pages 1–6, 2009. (Cité en page 184.)
- [224] Régis Grasse, Yann Morère, and Alain Pruski. Assisted navigation for persons with reduced mobility : path recognition through particle filtering (condensation algorithm). *Journal of intelligent & robotic systems*, 60(1) :19–57, 2010. (Cité en page 184.)
- [225] O Horn, Amine Hadj Abdelkader Mohamed, F Leishman, and Guillaume Bourhis. Intuitive command modes for robotics assistance to mobility. *AMSE journals, Advances in modelling, series Modelling C*, 71, 2011. (Cité en page 184.)
- [226] Eric Demeester, Emmanuel B. Vander Poorten, Alexander Hüntemann, and Joris De Schutter. Wheelchair navigation assistance in the fp7 project radhar : Objectives and current state. 2012. (Cité en page 184.)
- [227] Harold Soh and Yiannis Demiris. Towards early mobility independence : An intelligent paediatric wheelchair with case studies. 2012. (Cité en page 184.)
- [228] Masashi Yokozuka, Naohisa Hashimoto, Kohji Tomita, and Osamu Matsmoto. Development of autonomous wheelchair for indoor and outdoor traveling. In *International Internet of Things Summit*, pages 91–96. Springer, 2014. (Cité en page 185.)
- [229] Jesse Leaman, Hung Manh La, and Luan Nguyen. Development of a smart wheelchair for people with disabilities. In *2016 IEEE International Conference on Multisensor Fusion and Integration for Intelligent Systems (MFI)*, pages 279–284. IEEE, 2016. (Cité en page 185.)
- [230] Louise Devigne, Marie Babel, Florian Nouviale, Vishnu K Narayanan, François Pasteau, and Philippe Gallien. Design of an immersive simulator for assisted power wheelchair driving. In *2017 International Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR)*, pages 995–1000. IEEE, 2017. (Cité en page 185.)
- [231] Rafael Arnay, Javier Hernández-Aceituno, Jonay Toledo, and Leopoldo Acosta. Laser and optical flow fusion for a non-intrusive obstacle detection system on an intelligent wheelchair. *IEEE Sensors Journal*, 18(9) :3799–3805, 2018. (Cité en page 186.)

- [232] Matthew Aquilina, Marvin K Bugeja, and Simon G Fabri. Smart wheelchairs : Using robotics to bridge the gap between prototypes and cost-effective set-ups. In *ICINCO (2)*, pages 181–189, 2019. (Cité en page 186.)
- [233] Isabella Gomez Torres, Gaurav Parmar, Samarth Aggarwal, Nathaniel Mansur, and Alec Guthrie. Affordable smart wheelchair. In *Extended abstracts of the 2019 chi conference on human factors in computing systems*, pages 1–6, 2019. (Cité en page 186.)
- [234] Patricia Marques Almeida. Intellwheels-controlling an intelligent wheelchair using a multimodal interface. 2021. (Cité en page 186.)
- [235] Jay Farrell. *Aided navigation : GPS with high rate sensors*. McGraw-Hill, Inc., 2008. (Cité en page 188.)
- [236] Marcel Riess. *Qualification d’un télémètre à balayage laser pour la robotique mobile : Intégration et expérimentations*. PhD thesis, 2000. (Cité en page 188.)
- [237] RS Rao, K Conn, Sang-Hack Jung, Jayantha Katupitiya, Terry Kientz, Vijay Kumar, J Ostrowski, Sarangi Patel, and Camillo J Taylor. Human robot interaction : application to smart wheelchairs. In *Proceedings 2002 IEEE international conference on robotics and automation (Cat. No. 02CH37292)*, volume 4, pages 3583–3588. IEEE, 2002. (Cité en page 189.)
- [238] Gwennael Gate, Amaury Breheret, and Fawzi Nashashibi. Centralized fusion for fast people detection in dense environment. In *2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 76–81. IEEE, 2009. (Cité en page 189.)
- [239] Piotr Dollár, Ron Appel, Serge Belongie, and Pietro Perona. Fast feature pyramids for object detection. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 36(8) :1532–1545, 2014. (Cité en page 192.)
- [240] AJ Sbnchez and José M Martínez. Robot-arm pick and place behavior programming system using visual perception. In *Proceedings 15th International Conference on Pattern Recognition. ICPR-2000*, volume 4, pages 507–510. IEEE, 2000. (Cité en page 192.)

## Bibliographie

---

- [241] François Chaumette. *La relation vision-commande : théorie et application à des tâches robotiques*. PhD thesis, Rennes 1, 1990. (Cité en page 192.)