



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
جامعة محمد بوضياف - المسيلة
UNIVERSITE MOHAMED BOUDAIF- M'sila



كلية تكنولوجيا

FACULTE DE TECHNOLOGIE
سقم إلكترونيك
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

MEMOIRE DE MASTER

DOMAINE: SCIENCES TECHNIQUES
FILIERE ELECTRONIQUE
OPTION: CONTROLE INDUSTRIELLE

Présenté le 08/06/2015
par

Adoui Ali

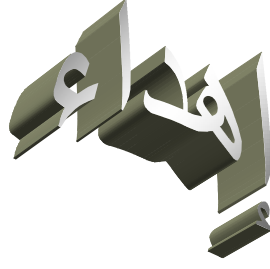
Modélisation et contrôle d'un fauteuil roulant électrique

Encadreur : MEZAACHE HATEM

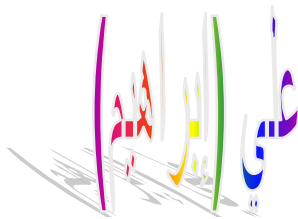
Université de M'sila

Promotion 2015

Département d'électronique



أهدي ثمرة جهدي الذي تم أولا و قبل كلي شئ بعون الله و توفيقه
و الى نبي الهدى وحببي محمد" صلى الله عليه و سلم" و خير الانام
إلى من كان سببا في وجودي ** و أنارا لي دربي و طريقي
إلى من سكن قلبي و فؤادي بحنانهما غذياني
لأنبل كلمتين نطق بهما لساني ** والداي الغاليان أبي و أمي
إليك يا أمي يا منبع الحب و الحنان ** إليك يا من سهرتي ليالي و ليالي
فد متي لي و دامت بركاتك ترعاني يا نعم الأم الغالية .
إليك يا أب رمز العطاء والسخاء و بك أهتدي و أقتدي
و كنت خير الموجه في دراستي فلا قلم يوفي حقك و لا كلما تكفي لتعظيم شأنك يا نعم الأب
إلى سندي في حياتي إخوتي و أخواتي .
بداية بالمرحومة – رحمها الله و أسكنها فسيح جناته – الكتكوتة الصغيرة (قطر الندى) و
إلى أختاي لينده و رنده و إخوتي حسين ،نصر الدين ،و إلى التوأم أسامة و أنيس و الصغير
زين الدين و إلى جدي و جدتي و أخوالي و خالاتي و أعمامي و عماتي و إلى من لقاني بهم
القدر و أحسن اللقاء إبراهيم ،أيمن ، عبد المالك ، محمد ،خالد إسماعيل توفيق فارس ،
فيصل ، حسام و إلى أعز صديق الذي شاركني الغرفة بحلوها و مرها (160) حثحات
صابرو إلى من أشرف على هذا العمل أستاذي المحترم – مزعاش حاتم – و إلى الذي
علمني الصبر و التفاؤل الأخ و الصديق بلحشر محمد و إلى زملائي في الدراسة شعبة
مراقبة صناعية جميعا و إلى من كل من الى من يعيش بالصبر الثقة والإيمان والأمل و يقدر
قيمة الحياة.
ومن ذكرهم قلبي و لم يدونهم قلبي و إلى كل هؤلاء أهدي ثمرة جهدي.





الشكر أولا و أخرا على نعمته أن هداني و أمدني بالعزم و الإرادة في انجازي هذا العمل .
يسرني أن أتقدم بجزيل الشكر لأستاذي المحترم مزعاش حاتم لمرافقته و إشرافه في إعداد
هذه المذكرة و الذي كان له الفضل في توجيهي وإرشادي و نتقدم بجزيل الشكر إلى كل من
ساعدني في عملي سواء بالكتب أو النصيحة.



Introduction Générale.....	01
----------------------------	----

Chapitre I Etat de l'art

I-1_Introduction	04
I-2_ L'histoire du fauteuil roulant.....	04
I-3_ Les origines du fauteuil roulant	05
I-4_Description d'un fauteuil roulant manuel	07
I-5_Caractéristiques d'un fauteuil roulant	09
I-6_ La problématique de la locomotion en FRM	09
I-6-1_ L'autonomie et les contraintes environnementales	09
I-6-2_Problématique médicale à l'utilisation du FRM	10
I-6-3_ Objectifs de la recherche scientifique.....	11
I-7_ Exemple d'un fauteuil roulant électrique	11
I- 8_ Descriptif du fauteuil roulant électrique.....	11
a) Fauteuil d'intérieur.....	12
b) Fauteuil d'extérieur.....	12
c) Fauteuil verticalisateur.....	12
d) Fauteuil à hauteur variable.....	12
I -9_Equipement du fauteuil.....	12
I-10_ Captures et mesures.....	13
I-10-1_Capteur proprioceptifs.....	13
I-10 -2_ Capteur extéroceptifs.....	18
I-11_Conclusion.....	20

Chapitre II : Modélisation du fauteuil roulant

II-1_ Introduction.....	23
II-2_Modèle cinématique	23
II-2-1_Configurations de fauteuil roulant le modèle cinématique.....	25

II-2-2_ Configuration différentiel.....	25
II-3_ Modèle dynamique du fauteuil.....	26
II-4 _ Conclusion.....	29

Chapitre III Notion de base et généralité la logique floue

III-1_ Introduction à la logique floue.....	31
III-2_ Construction d'un correcteur flou	31
III-3_Structure d'un contrôleur flou.....	32
1) Structure du régulateur.....	32
2) Configuration interne.....	33
3) Operation de Défuzzification.....	35
III-4_L'apprentissage en logique floue.....	36
III-4-1_L'apprentissage des paramètres.....	37
III-4-2_L'apprentissage structurel.....	38
III-5_Sélection du contrôleur parmi un ensemble.....	39
III-6_Conclusion.....	40

Chapitre IV Systèmes de contrôle et d'évitement d'obstacles

IV-1_Introduction.....	42
IV-2_ Évitement d'obstacles	42
IV-3_Les méthodes évitement d'obstacles	42
IV-3-1_Méthode des champs de potentiel.....	43
IV-3-2_Méthode Vecteur Field Histogramme.....	44
IV-3-3 Méthode de la fenêtre dynamique.....	44
IV-3-4_Méthode de réseaux de neurones	45
IV-3-5_Méthode de la logique floue.....	45
IV-4_D'évitement d'obstacles avec une trajectoire de référence.....	46

IV-4-1_Trajectoire de navigation.....	46
IV-4-2_Bande élastique.....	46
IV-5_D'évitement d'obstacles sans trajectoire de référence.....	47
IV-5-1_Domaine des angles de braquage.....	48
IV-5-2_Diagramme de proximité.....	48
IV-6_Histogramme de champs de vecteurs.....	48
IV-7_Analyse de l'environnement.....	49
IV-8_Détermination du point cible.....	51
IV-9_le système de navigation.....	53
A_ Module de détection d'obstacles.....	53
B_Contrôleur flou de navigation libre.....	54
IV-10_Configuration interne d'un contrôleur flou.....	54
IV-11_Conclusion.....	55

Chapitre V Application et Résultats de Simulation

V-1_Introduction.....	57
V-2 Fonctionnements du système propose.....	57
V-3_Organigramme de programme principal.....	59
V-4_Organigramme d'évitement d'obstacle avec logique flou.....	60
V-5_Résultats de simulation.....	60
V-6_Conclusion.....	64
Conclusion générales.....	66

Bibliographiques

Références bibliographique.....	67
Liste des figure	76
Liste des symboles.....	77

INTRODUCTION

Un nombre important de personnes handicapés moteurs ne peuvent pas utiliser un fauteuil électrique standard ou le conduisent difficilement. Pour permettre à ces personnes de se déplacer d'une manière autonome des chercheurs se sont intéressés depuis plus de vingt ans à l'amélioration de l'interface homme-machine soit en filtrant les actions de l'utilisateur sur le joystick classique du fauteuil soit en implémentant de nouvelles interfaces de commande. Un autre axe de recherche a concerné le développement de fauteuils roulants électriques (FRE) « intelligents ». [1]

L'intelligence d'un fauteuil roulant réside dans sa capacité à percevoir l'environnement grâce à différents types de capteurs et de cameras. De nombreux prototypes de fauteuils intelligents ont ainsi été développés dans les laboratoires de recherche. La plupart des technologies et méthodes de la fauteuil roulant ont été implémentées et testées sans que malheureusement cela n'aboutisse à de réels progrès pour l'utilisateur. [20] Seules des fonctionnalités de bas niveau (détection d'obstacles, suivi de lignes) sont actuellement commercialisées et donc accessibles à tout le monde.

Dans le cadre de notre mémoire nous avons proposé un contrôleur flou qui permet d'améliorer la méthode de navigation d'un fauteuil roulant pour lui assurer une bonne autonomie dans son environnement d'évolution.

Le travail présenté dans ce mémoire est donc organisé en cinq chapitres qui sont structurés comme suit :

Le premier chapitre donne une présentation sur les fauteuils roulants et aussi Les origines du fauteuil roulant et La problématique de la locomotion en FRM et Capteurs et mesures

L'objectif du deuxième chapitre est de présenter une description pour un fauteuil roulant, par la suite on a choisi une modélisation cinématique et dynamique qui est utilisée dans notre simulation.

Le troisième chapitre est consacré pour la présentation des notions de base et des généralités sur la logique floue.

INTRODUCTION GENERALE

Dans le quatrième chapitre nous avons donné une présentation sur les méthodes d'évitement d'obstacles qui existent ceci nous a permis de choisir la logique floue pour la simulation de notre système d'évitement d'obstacle pour notre fauteuil roulant.

Le cinquième chapitre est le fruit de notre travail, où on a présenté la démarche de notre application, où on a proposé un système de commande basé sur la logique floue pour assurer sa navigation dans son environnement d'évolution.

A la suite nous présentons quelques résultats de simulation et à la fin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre

01

Etat De L'art

I-1_ Introduction :

Ce chapitre est consacré pour donner une description sur les fauteuils roulants. Le fauteuil roulant est un dispositif de mobilité qui peut déplacer, soit par les poignées ou en braquant les roues. Aujourd'hui, il ya beaucoup d'options et de nombreux différents types de fauteuil roulants comme les fauteuils roulants électriques, triporteurs et quadri porteurs. Les fauteuils roulants sont utilisés par les personnes qui éprouvent des difficultés ou ne peut pas marcher par eux-mêmes. [1]



Figure I.1 : Fauteuil roulant

I-2_L'histoire du fauteuil roulant :

La première image qui est documenté de meubles sur roulettes a été trouvé sur un vase grec en 530 avant JC L'image était d'un lit d'enfant sur un ensemble de quatre roues, ce qui donne l'image d'attacher les roues au mobilier. Ils ont ensuite trouvé des preuves d'un char sur des roues à rayons en Chine en 1300 avant JC [2]. Des fauteuils roulants ont été à l'origine dénommé <<chaises d'invalides >> et en 1554 l'un des premiers fauteuils a été faite pour Philippe II d'Espagne. Plus tard, en 1655, un horloger handicapé appelé Stephen Farfler construit lui-même une chaise à trois roues pour aider à marche. Sur la suite en 1881, le <<push jante a été inventé qui signifie pas de plus sales pour les utilisateurs de fauteuils roulants, ils pourraient utiliser la jante poussée pour déplaces les roues et de ne pas se couvrir de boue. De là, les fauteuils sont développé de plus en plus au fil des ans, plus d'options, des options légères, sièges réglables et ainsi de suite. De chaises roulantes est venue

l'invention de chaises électrique et de scooters, qui prend le concept de base du fauteuil roulant, mais au lieu d'être auto propulser le fauteuil est déplacé vers l'avant par l'électricité et du pouvoir. Le premier fauteuil motorisé a été inventé en 1916, mais en raison de leur coût des chaises roulantes manuelles étaient toujours le choix le plus populaire. Les chaises à propulsion étaient également très lourdes et s'il difficile de se déplacer [2].

En 1933, Harry Jennings inventé un fauteuil roulant en acier léger motorisé. IL a inventé ce parce que son ami a été pris dans un accident minier qui a fait déborder le dos et il a du utiliser un fauteuil roulant lourd et non pliable que c'était tout ce son ami se tant de choses sur la chaise roulante mis à travailler sur l'invention fauteuil roulant léger et pliable.

Après avoir inventé la chaise, les deux amis ont vu le potentiel dans l'entreprise et mettre en place la masse fa mis briquant de la société internationale et Ernest Jennings [2].

I-3_ Les origines du fauteuil roulant :

Les premières illustrations de la chaise roulant datent de 6^e siècle avant Jésus Christ, en Chine. Cependant, il probable que son apparition soit antérieure et aux environs de 3500-4000 ans avant Jésus Christ avec l'apparition de la chaise et de la roue.

L'utilisation de la chaise roulante est cependant restée confidentielle pendant très long temps, limitée à quelques personnalités importantes. De ce fait, jusqu'au 16^{ème} siècle, l'utilisation des sièges roulants est restée anecdotique dans le monde. Au 16^{ème} siècle, le roi d'Espagne Philippe II DE Hasbourg utilisait un siège roulant, déplacé par une tierce personne ; ce siège était en bois, matelassé, équipé de roulettes et le dossier et le repose-pied étaient inclinables. Des sièges roulants ont également été retrouvés lors de l'inventaire du château de Versailles, attestant de l'utilisation de ces appareils à la cour de Louis XIV [2].

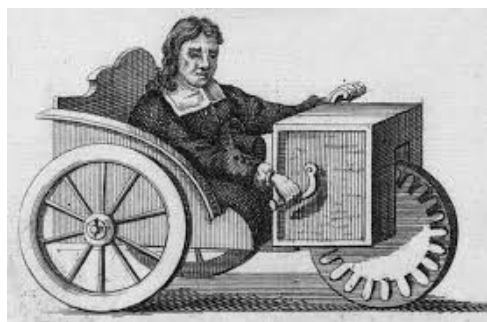


Figure I.2 : Stephen Farfler et le premier roulant permettant l'autonomie de son Utilisateur(1655).

Les premières traces historiques d'un fauteuil roulant permettant une certaine autonomie de déplacement remontent qu'à milieu du 17^{ème} siècle. En 1655, Stephen Farfler, un jeune horloger paraplégique, fabrique un véhicule roulant muni d'une roue avant indentée et actionnée manuellement par l'utilisateur à l'aide d'une manivelle horizontale.

La seconde trace historique d'un fauteuil roulant autonome Trouve en Angleterre à la fin de 18^{ème} siècle puisqu'en 1783, John Dawson proposa le premier fauteuil commercialisable, à trois roues, et dont le repose-pied et le dossier étaient ajustable à l'utilisateur. A la même époque, à Paris, le révolutionnaire Georges Gouthon utilisait un fauteuil à tournique qui fit d'ailleurs l'objet du premier article sur le fauteuil roulant dans une revue médicale et qui était composé de trois roues, dont deux à l'avant qui étaient actionnées à l'aide de deux manivelles verticales (figure I-18).

C'est grâce à ce fauteuil que Georges Couthon, atteint d'une paralysie des inférieurs à se rendre à l'Assemblée Législative et mener une vie politique des actives.

Au cours du 19^{ème} siècle, l'utilisation du fauteuil roulant s'est progressivement généralisée à la suite de la 1^{ère} guerre mondiale. Ainsi, aux Etats-Unis, la Guerre de Sécession (1861-1865) est à l'origine de l'utilisation massive de fauteuil roulant.

En Europe, les conséquences de la Première Guerre Mondiale (1914-1918) poussèrent l'Angleterre à fournir gratuitement des fauteuils roulants à ses infirmes de guerre. Entre-temps, les roues courantes étaient apparues, permettant la propulsion manuelle (1881) et les roues à rayons en acier remplacent les roues en

bois (1900). Jusqu'aux années 1930, le fauteuil roulant n'a plus subi d'améliorations notables.

Il fallu attendre 1933 avec la mise sur le marché par Herbert Everest et Harry Jining du premier fauteuil roulant pliable et en métal léger [2]. Ce fauteuil était équipé de deux grandes roues à l'arrière sur lesquelles étaient fixées deux anneaux permettant la propulsion (mains courantes), de deux petites roues mobiles à l'avant, et d'un repose-pied réglable en hauteur (figure I-3).

Le cadre était en forme de "X" ce qui permettait de le plier et facilitait ainsi son transport. Ce fauteuil possédait ainsi déjà les principales caractéristiques des fauteuils roulants actuellement commercialisés dans le monde entier. Il est à l'origine de la généralisation de l'utilisation du fauteuil roulant manuel à propulsion par mains courantes au cours du 20^{ème} siècle.

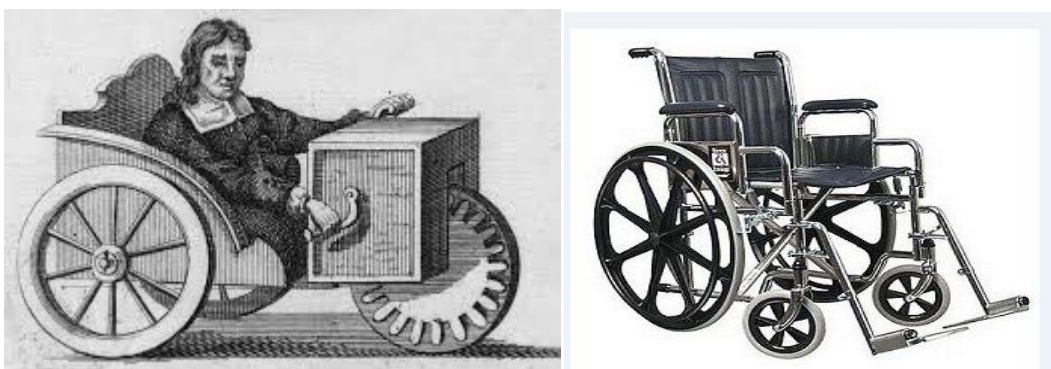


Figure I-3: à gauche, fauteuil à tournique utilisé par George Couthon (1755-1794) et à droite, modèle d'Everest & Jennings (1933)

A partir des années 1950, sont apparus les premiers fauteuils roulants électriques à l'usage des personnes souffrant de déficiences motrices sévères. Cependant, le fauteuil roulant manuel n'a pas été abandonné et son utilisation est restée très largement répandue comme en attestent les résultats des enquêtes <<H.I.D.>> réalisées en 1998 et en 1999 en France, où la prévalence était respectivement de 5,4 et de 59 personnes pour 10000 habitants[2].

I-4 _Description d'un fauteuil roulant manuel :

Un fauteuil roulant manuel peut être de type standard, actif, confort ou sport. Cette classification n'est pas officielle mais est couramment utilisée. Ce fauteuil roulant manuel présenté sur la figure I-4 est constitué de :



Figure I-4 un fauteuil roulant manuel

- a) L'assise_: peut être fixe ou inclinable, afin de permettre une meilleure installation et de limiter les risques de glissement vers l'avant. Elle peut être en mousse ou en toile (réglable en tension pour certaines gammes). Souvent, un coussin est installé dessus pour améliorer le confort et limiter les risques d'escarre.
- b) Le dossier : peut également être fixe ou inclinable. Il peut aussi être pliant à mi-hauteur ou rabattable afin de diminuer l'encombrement lors du rangement ou de déplacement en voiture. Il peut être haut ou bas, ce qui influe sur l'équilibre de la personne. Il peut être réglable en tension, en inclinaison, rembourré.
- c) Les accoudoirs : ils peuvent être fixes, amovibles ou rabattable. Ils permettent un véritable maintien du membre supérieur, mais peuvent gêner lors du transfert ou de la propulsion du fauteuil roulant. C'est pour quoi chez certaines personnes, on choisit de retirer les accoudoirs et de n'utiliser que les protèges-vêtements ou les garde-boue, ce qui augmente la surface d'appui pour le transfert des personnes prenant appui sur la roue.
- d) Les repose-pieds : peuvent très constitués d'une palette monobloc ou de palettes. La potence peut être fixe, inclinable ou escamotable. Ils peuvent être accompagnés de repose-jambes.
- e) Un fauteuil roulant comporte deux petites roues avant et deux grandes roues arrière. Il existe des pneus gonflables et des pneus bandage. Les mains courants (qui servent pour la propulsion) peuvent être faites de différents

matières, être recouvertes de grips antidérapants ou posséder des plots de propulsion. Le fauteuil roulant possède également, la plupart du temps, des roues anti-bascules, situées à l'arrière.

- f) Les freins : sont indispensables sur un fauteuil roulant manuel. Ils peuvent avoir des rallonges, être rabattables pour un aspect plus esthétique. Ils sont à tirer, à pousser ou à ciseaux (sous le châssis). [3].

I-5 _ Caractéristiques d'un fauteuil roulant :

Les fauteuils roulants peuvent donc avoir différentes caractéristiques comme nous l'avons vu dans la description. Pour autant, toutes les variantes ne sont pas employées pour des personnes atteintes de paraplégie, ainsi je ne vais pas les présenter dans ce chapitre mais n'en parlerai pas par la suite. En plus des possibilités vues dans la description, le choix du mode de propulsion est important. Le châssis est également important : il peut être pliant (par croisillons ou comme ciseaux)[3].

I-6_ La problématique de la locomotion en FRM :

I-6-1_ L'autonomie et les contraintes environnementales :

Après la seconde guerre mondiale, l'utilisation du FRM (fauteuil roulant mécanique) est très largement répandue, tout d'abord chez les vétérans de la guerre présentant des atteintes médullaires, notamment au Canada avec le modèle d'Everest & Jennings. À cette époque, ont été publiées les premières études médicales et scientifiques portant sur le FRM. L'objectif de ces publications était en quelque sorte d'assurer. Ces études discutaient notamment des améliorations techniques qui pouvaient lui être apportées telles que des freins, un système de stabilisation ou un système d'élévation du sujet.

Par la suite, dans les années 1960-1980, de nombreux articles ont porté sur les indications de prescription ou de sélection d'un FRM, afin de favoriser son utilisation.

Cependant, bien que le FRM permet de rendre une certaine autonomie à son utilisateur, des problèmes d'accessibilité ont rapidement été rapportés tels que l'accès aux établissements scolaires, par exemple. Il apparaissait alors nécessaire que le FRM soit le plus adapté possible à son utilisateur et à son environnement. Ainsi, des modifications ont été largement décrites dans des revues médicales, afin

d'améliore son confort, de faciliter les transferts pour entrer ou sortir du siège et de faciliter son rangement dans une automobile, par exemple. Des mesures ou anthropométriques, portant sur l'espace occupé ou accessible confiné en FRM ont été rapportées, et ont permis de définir des normes pour l'accessibilité des bâtiments, par exemple [2].

I-6-2_ Problématique médicale à l'utilisation du FRM :

Bien que l'utilisation du FRM semble pouvoir redonner une certaine autonomie à ses utilisateurs, les médecins se sont rapidement aperçu que son usage conduisait souvent à une sédentarisation, entraînant des problèmes d'obésité, etc. Aussi, pour favoriser l'activité physique journalière, la pratique sportive a été vivement encouragée basketball, marathon, jusqu'aux sports de combat comme le kung-fu et le karaté. Mais la pratique intensive et prolongée du FRM peut engendrer des blessures et des douleurs spécifiques, notamment à l'épaule, et niveau du coude, du poignet et de la main.

Ainsi, selon les études réalisées entre 1991 et 2000, il a été rapporté que 30 à 73% des individus paraplégiques souffraient de douleur à l'épaule. Par ailleurs, la station assise et prolongée des utilisateurs de FRM entraîne des problèmes dermatologiques comme les escarres ou les ulcères de pression, dus à l'immobilité, à la sensibilité et à l'incontinence.

De nombreuses études ont été menées pour évaluer la qualité mécanique du coussin d'assise et son effet sur la température de la peau et sur l'humidité au niveau de l'assise ainsi à des troubles secondaires comme l'obésité et le diabète. Une activité physique régulière est recommandée pour en limiter les risques des douleurs et de blessures musculaires, ligamentaires et articulaires au niveau des membres supérieurs peuvent cependant apparaître suite à une utilisation intensive et prolongée. En outre, ces symptômes sont reconnus comme une cause majeure de l'abandon de l'usage du FRM, donc la sédentarisation des utilisateurs, ses collaborateurs ont ainsi montré que les douleurs des membres supérieurs étaient le seul facteur corrélé avec une faible qualité de vie chez les sujets en FRM. La difficulté pour le thérapeute est de faire pratiquer une activité physique journalière,

adaptée à l'individu, et de limiter les problèmes orthopédiques et donc favoriser l'utilisation du FRM dans le temps [2].

I-6-3_ Objectifs de la recherche scientifique :

Au regard des problématiques rencontrées par les utilisateurs de FRM au niveau de leur autonomie et de leur santé, van der soude et al, ont résumé les enjeux de la recherche sur le FRM en trois grands domaines :

- L'amélioration du FRM en termes de conception et de principes mécanique de propulsion.
- L'amélioration des capacités physique du sujet, c'est-à-dire L'amélioration des techniques de propulsion, ainsi que des techniques de réadaptation et des programmes d'entraînement.
- L'amélioration de l'interface entre le sujet et son FRM, c'est-à-dire l'ergonomie du FRM par rapport au sujet et l'adéquation du système {sujet+FRM} avec l'environnement physique extérieur (rampes d'accès, ascenseur, largeurs des couloirs, etc.)[2].

I-7_ Exemple d'un fauteuil roulant électrique



Figure I-5 : fauteuil roulant électrique

I- 8_ Descriptif du fauteuil roulant électrique

Les fauteuils roulants à propulsion par moteur électrique sont indiqués pour les personnes ne pouvant se déplacer seules en fauteuil roulant manuel. Ils permettent de retrouver une indépendance notamment au niveau des sorties, à

l'extérieur du domicile. La conduite du fauteuil s'effectue par commande électronique mais parfois l'utilisation d'une commande spéciale est indispensable. [4]

Il existe différents types de fauteuils qui sont présentés dans la figure I.5.



Figure I.6. Les différents types de fauteuils (A: Fauteuil d'intérieur, B: Fauteuil d'extérieur, C: Fauteuil verticalisateur, D: Fauteuil à hauteur variable)

a) **Fauteuil d'intérieur :**

Pliant, il est moins volumineux qu'un fauteuil d'extérieur. Notons qu'il est cependant difficile et fatigant pour la tierce personne de le plier. Son autonomie va de 10 à 16 km et sa vitesse est réglable de 0 à 6 km/h. On peut le mettre dans le coffre d'une voiture.

b) **Fauteuil d'extérieur :**

Non pliant, il est plus volumineux. Son autonomie va de 16 à 45 km et sa vitesse est réglable de 0 à 10 km/h. Ce fauteuil nécessite un moyen de transport adapté car on ne peut pas le mettre dans un coffre de voiture. Le diamètre de ses roues permet de franchir des seuils ou des petits obstacles.

c) **Fauteuil verticalisateur**

La verticalisation permet de quitter la position assise pour se placer en position verticale. Elle permet également de mieux appréhender l'environnement et peut être important pour l'intégration sociale. Le fauteuil doit être équipé de cales genoux et d'une sangle au niveau du tronc.

d) **Fauteuil à hauteur variable:**

Permet de lever l'utilisateur en position assise. Tout comme le verticaliste il permet de mieux appréhender l'environnement et peut être important pour l'intégration sociale. Certains fauteuils électriques peuvent combiner verticalisateur et hauteur variable en position assise.

I-9_ Équipement du fauteuil

Le fauteuil roulant était équipé d'une seule caméra sur le côté gauche (figure I.7) au début de mon stage. Une deuxième caméra a été installée à l'arrière de mon stage, mais elle n'est pas encore utilisée dans la partie logiciel. À terme, des capteurs de proximité seront ajoutés afin d'éviter toutes collisions.

Le fauteuil est équipé d'un système mis au point par François Pasteur, fonctionnant avec ROS (Robot Operating System), qui nous permet de commander le fauteuil, mais aussi d'obtenir les informations des capteurs par lesquels nous pouvons ainsi tester différents algorithmes facilement directement sur le fauteuil roulant. [3]



Figure I-7 : Fauteuil roulant utilisé dans le projet APA sh.

Nous pouvons distinguer la caméra sur l'avant gauche du fauteuil, ainsi que le boîtier permettant de contrôler le fauteuil par à l'arrière.

I-10_ Capteurs et mesures

Afin de pouvoir naviguer dans l'environnement, le fauteuil est muni d'un ensemble de capteurs.

Des capteurs proprioceptifs lui permettent de calculer son état interne, alors que des capteurs extéroceptifs lui permettent de capter l'état de l'environnement.

I-10-1_ Capteur proprioceptifs

Les capteurs proprioceptifs principaux sont utilisés pour capter la position du fauteuil. En effet, le fauteuil est muni d'encodeurs de position sur chacune des roues, comme illustré dans la Figure I-8.

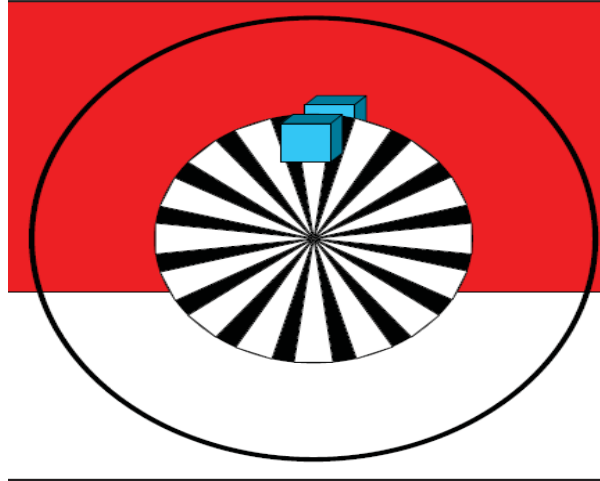


Figure I-8 Encodeur

Les encodeurs calculent la vitesse angulaire des roues et, par intégration numérique, la position angulaire de rotation des roues.

Il est trivial d'affirmer que la vitesse ainsi que la position des deux roues d'un même côté du robot sont égales[5].

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_r = \omega_l, \quad \theta_r = \theta_l \\ \omega_{rr} = \omega_{rl}, \quad \theta_{rr} = \theta_{rl} \end{array} \right. \quad \text{I-1}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \omega_{rr} = \omega_{rl}, \quad \theta_{rr} = \theta_{rl} \\ \omega_{ll} = \omega_{lr}, \quad \theta_{ll} = \theta_{lr} \end{array} \right. \quad \text{I-2}$$

Où ω_r , ω_l , ω_{rr} , ω_{rl} , ω_{ll} et ω_{lr} représentent respectivement les vitesses de la roue avant droite, arrière droite, avant gauche et arrière gauche.

La connaissance de ces quantités permet de déduire plusieurs grandeurs utiles à la navigation du robot; les vitesses linéaire et angulaire du fauteuil sont calculées selon la formule suivante.

$$\left\{ \begin{array}{l} v = \frac{\omega_r + \omega_l}{2} L \\ \omega = \frac{\omega_r - \omega_l}{2} \end{array} \right. \quad \text{I-3}$$

Où L représente la distance entre les centres des roues droite et gauche (avant ou arrière).

Dans certains cas de navigation, il est nécessaire de connaître le rayon de courbure instantanée de la trajectoire du robot. Ce rayon peut être obtenu selon la formule suivante.

$$= - \quad \text{I-4}$$

En combinant les équations 2.11 et 2.12 on peut déduire :

$$= - * \text{ ——— } \quad \text{I-5}$$

On peut remarquer que, en fonction des vitesses des roues droite et gauche, le rayon de courbure peut prendre toutes les valeurs de $-\infty$ à $+\infty$. Cela met en évidence un atout primordial de cette architecture du robot; il n'y a pas de rayon de courbure minimal imposé, contrairement aux types standard de véhicules avec braquage d'Ackermann.

En mesurant la vitesse des roues, il est donc possible de connaître l'abscisse curviligne S instantanée du robot par intégration de la relation (I-6) :[2]

$$\begin{cases} S = \quad + \int \frac{() \quad ()}{\quad} \\ \theta = \quad + \frac{() + \quad ()}{\quad} \end{cases} \quad \text{I-6}$$

Réellement, lorsque le robot se déplace, le contact roues-sol n'est pas parfait et il existe un petit glissement tout au long du déplacement du robot. Donc la vitesse réelle du robot n'est pas exactement égale à celle donnée par la formule (I-6), mais plutôt inférieure, puisque lorsque les roues glissent, elles comptabilisent une vitesse de rotation alors que le robot se déplace moins vite; il faut donc y ajouter un facteur d'erreur positif :

$$\begin{cases} = \text{ ——— } - \\ = \frac{-}{2} - \end{cases} \quad \text{I-7}$$

Où e et δ représentent l'erreur de calcul due aux glissements non mesurés des roues sur le sol et sont supposés positifs en moyenne. v et ω représentent les vitesses linéaire et angulaire réelles.

La position réelle du robot devrait alors être

$$\begin{cases} x = x_0 + \int v \cos(\theta) dt - e \\ y = y_0 + \int v \sin(\theta) dt - \delta \end{cases} \quad \text{I-8}$$

En combinant les équations (2.14), (2.15) et (2.16), on obtient :

$$\begin{cases} \dot{x} - v \cos(\theta) = -\frac{e}{\Delta t} \\ \dot{y} - v \sin(\theta) = -\frac{\delta}{\Delta t} \end{cases} \quad \text{I-9}$$

Vu qu'il est pratiquement impossible de quantifier l'erreur due au glissement puisqu'elle dépend d'une multitude de paramètres dont la vitesse instantanée, la nature du terrain, ainsi que des facteurs stochastiques, on fait une étude plutôt qualitative : si on prend la valeur minimale de l'erreur[4] :

$$\begin{cases} e = \min(e) \\ \delta = \min(\delta) \end{cases} \quad \text{I-10}$$

Dans ces conditions, on peut fixer une borne inférieure à l'erreur de position :

$$\begin{cases} \dot{x} - v \cos(\theta) \geq -\frac{e}{\Delta t} \\ \dot{y} - v \sin(\theta) \geq -\frac{\delta}{\Delta t} \end{cases} \quad \text{I-11}$$

En d'autres termes,

$$\begin{cases} \dot{x} \geq v \cos(\theta) - \frac{e}{\Delta t} \\ \dot{y} \geq v \sin(\theta) - \frac{\delta}{\Delta t} \end{cases} \quad \text{I-12}$$

On voit donc que l'erreur entre la position réelle et la position calculée croît avec le temps.

Afin de remédier à ce problème, le fauteuil roulant est muni d'un système de positionnement global (*GPS*) qui permet de mesurer la position du fauteuil roulant sans passer par une intégration de la vitesse des roues. Une antenne de réception ainsi qu'un décodeur sont installés sur le fauteuil roulant pour capter le signal satellite en tout temps.

Ce dispositif permet bien de ne plus passer par une intégration de la vitesse, mais il présente certains désavantages qui ont fait qu'on a dû se limiter au calcul de la vitesse tel qu'expliqué précédemment. En effet, lorsque le fauteuil roulant évolue dans un environnement fermé, le signal *GPS* est trop atténué par les murs et plafonds environnants ce qui fait qu'il est impossible de mesurer la position du robot par *GPS*. Même si le fauteuil roulant se trouve à l'extérieur, dans le cadre de notre application, ses déplacements sont limités à quelques mètres. Or la précision du positionnement global commercial est de quelques mètres, ce qui est trop imprécis pour les petites distances parcourues par le fauteuil roulant dans le cadre des expériences menées.

Un meilleur compromis dans le cadre de petits déplacements (six à sept mètres) serait d'utiliser un système de positionnement local par triangulation basé sur des balises fixées à des endroits déterminés dans l'environnement du fauteuil roulant. L'installation d'un tel système nécessite un matériel spécifique et un temps d'installation et de test qui n'étaient pas disponibles.

Nous avons donc opté pour le positionnement par intégration de vitesse qui présente un bon compromis précision-distance.

Afin d'améliorer la navigation du fauteuil roulant, il est aussi équipé d'une boussole électronique sensible.

Mis à part les capteurs proprioceptifs cinématiques et inertiels, le fauteuil roulant est équipé d'un nombre de capteurs électriques qui permettent de mesurer différents courants et tensions dans les circuits du fauteuil roulant. Ces capteurs sont utilisés dans une boucle de commande interne qui permet de garantir que les vitesses réelles convergentes toujours vers les vitesses de référence désirées. Ces capteurs ne sont pas considérés dans notre étude puisque les boucles de stabilisation

internes ne sont pas prises en compte et on ne considère que le système global cinématique.[5]

I-10 -2_ Capteurs extéroceptifs

Afin de capter l'état de son environnement, le fauteuil roulant est muni d'une batterie de capteurs lui donnant différents niveaux de connaissance du milieu. Pour reconnaître une collision avec un obstacle, le fauteuil roulant est muni d'interrupteurs au niveau des pare-chocs, qui se ferment au contact avec un obstacle. Au point de contact, l'interrupteur se ferme et envoie un signal logique VRAI au microprocesseur de contrôle du fauteuil roulant qui traite alors l'événement. Ces capteurs ne sont pas utilisés pour la navigation à proprement parler, mais plutôt comme mesure de sécurité en cas de collision (Figure 1-9). Ils sont placés à l'arrière du fauteuil roulant, puisque d'autres capteurs placés à l'avant peuvent les remplacer pour détecter une collision.

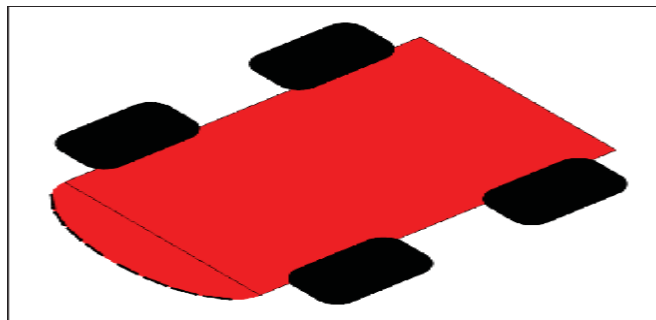


Figure I-9 Capteurs de collision

Tout autour du fauteuil roulant sont disposés 16 capteurs ultrasoniques de distance. Ces sonars envoient un signal sonore haute-fréquence dans une direction déterminée et reçoivent l'onde réfléchie après un certain temps qui dépend de la distance à un obstacle

(Figure I :10). En fonction de ce temps, les capteurs retournent au microcontrôleur du robot la distance le séparant de l'obstacle. La distance perceptible par les sonars varie entre 40cm et 5m.[5]

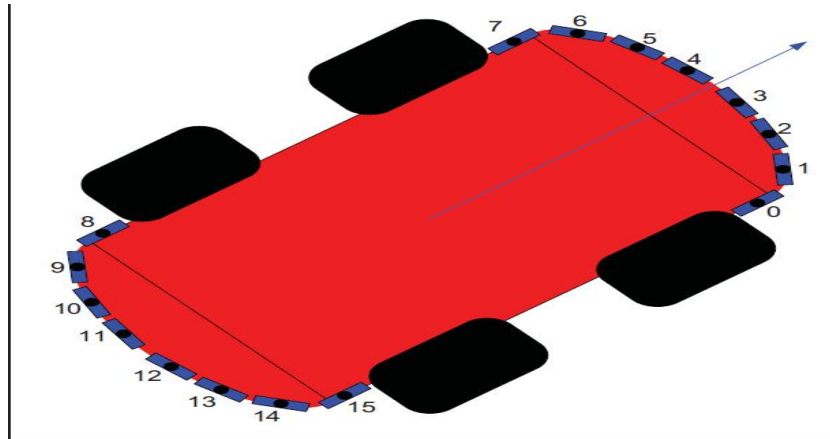


Figure I :10 Sonars

Les sonars sont orientés de la façon suivante par rapport à l'axe.

Sonar 0:- 90°	Sonar 8: 90°
Sonar 1:- 50°	Sonar 9: 130°
Sonar 2 :- 30°	Sonar 10: 150°
Sonar 3 :- 10°	Sonar 11: 170°
Sonar 4 : 10°	Sonar 12: - 170°
Sonar 5 : 30°	Sonar 13: - 150°
Sonar 6 : 50°	Sonar 14: - 130°
Sonar 7 : 90°	Sonar 15: - 90°

Le robot est aussi équipé d'un *Laser Range Finder* (LRF). Ce dispositif émet un rayon Laser qui oscille à haute-fréquence entre - 180° et 180° (Figure I :10). Il permet aussi, par la mesure du rayon réfléchi sur la surface de l'obstacle, de déterminer la position de ce dernier.

Ce dispositif a une résolution et une portée bien plus grandes que celles des sonars : au lieu de donner des distances pour certaines directions bien déterminées, il donne plutôt un profil presque continu de l'environnement devant le fauteuil roulant.[5]

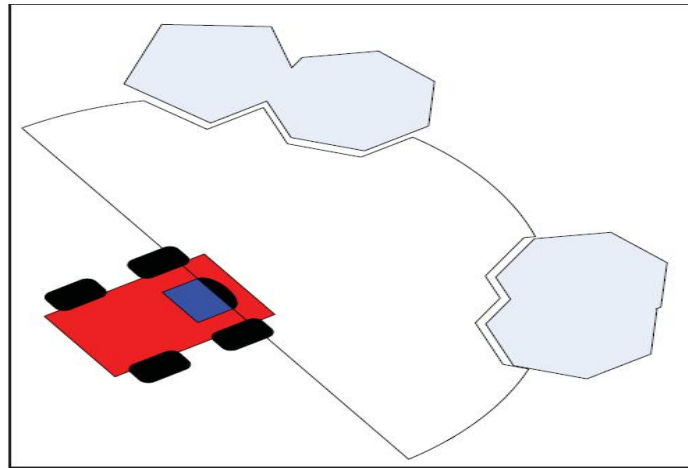
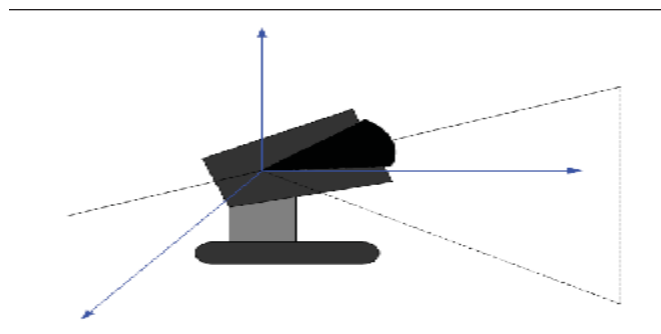


Figure I-11 Laser Range Finder

Il est aussi possible d'installer une caméra *PTZ* (*Pan-Tilt-Zoom*). Cette caméra permet d'acquérir des images vidéo de l'environnement qui peuvent être utilisés pour plusieurs applications, dont le suivi de routes tracées, suivi d'objets...

Figure I :12 Caméra *PTZ*

I-10 _Conclusion:

Ce chapitre présenté les étapes de l'évolution du fauteuil roulant, et consacré à détailler les différents types des capteurs .

ce dispositif de mobilité commence à utilisé datent de 6^{ème} siècle avant Jésus Christ, en Chine, avec une forme très grand, très lourde et mauvaises caractéristique.

Avec le temps les chercheurs faits plusieurs améliorations sur le fauteuil roulant en termes de conception et de principes mécaniques de propulsion, l'amélioration des capacités physiques du sujet, c'est-à-dire l'amélioration des techniques de

propulsion, ainsi que des technique de réadaptation et des programmes d'entraînement.

Au cours de ces dernières années, des sociétés fabriques des fauteuils roulants utilisent l'intelligence artificielle c'est-à-dire travaillent est marchent comme des robots mobiles ou la personne peut simplement s'asseoir dans le fauteuil se déplacer automatiquement.

Chapitre

02

*Modélisation Du
Fauteuil Roulant*

II-1_ Introduction

Ce chapitre consiste à représenter le comportement du fauteuil roulant par des équations algébriques, de point de vue vitesse (*modèle cinématique*) ou de point de vue des efforts mis en jeu (*modèle dynamique*).

II-2_ Modélé cinématique

Équations cinématiques du fauteuil roulant

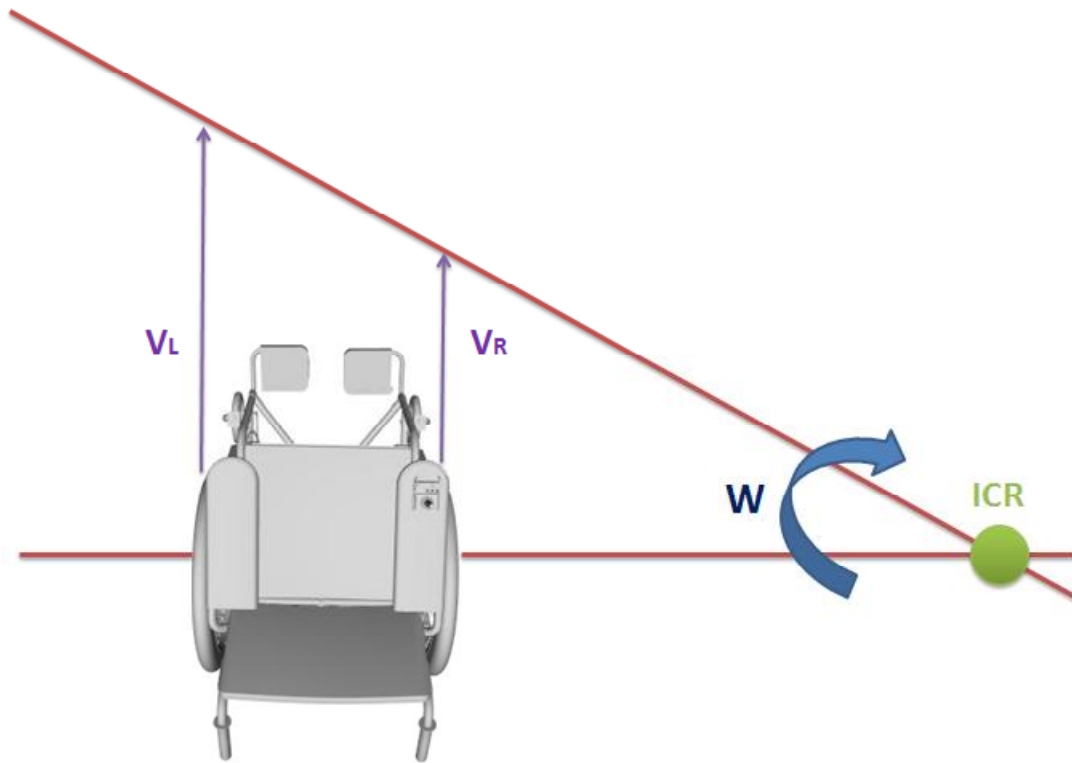


Figure II.1 : centre instantané de rotation (ICR)

Le fauteuil peut être poussé à une position quelconque par les roues arrière vitesses . Il peut être coordonné par le (x, y) la position du centre de fauteuil roulant dans l'espace cartésien et ϕ l' angle de cap du fauteuil roulant de l'axe - x , comme indiqué dans les **figure II.1** et **figure II.2** .

Si ω_L et ω_R sont les vitesses angulaires actionnés sur la droite et la roue gauche , respectivement , alors la droite et la roue gauche vitesses linéaires sans glisser sont :

$$v_L = r_L \omega_L \quad \text{II.1}$$

Et les vitesses linéaires et angulaires du fauteuil roulant sont :

$$v = \frac{v_L + v_R}{2} \quad \text{II.2}$$

$$\omega = \frac{\omega_L + \omega_R}{2}$$

Où r est le rayon de la roue , b est la distance du point C à chaque roue , est la vitesse d'avancement du fauteuil roulant sans glisser et W est la vitesse angulaire du fauteuil roulant.

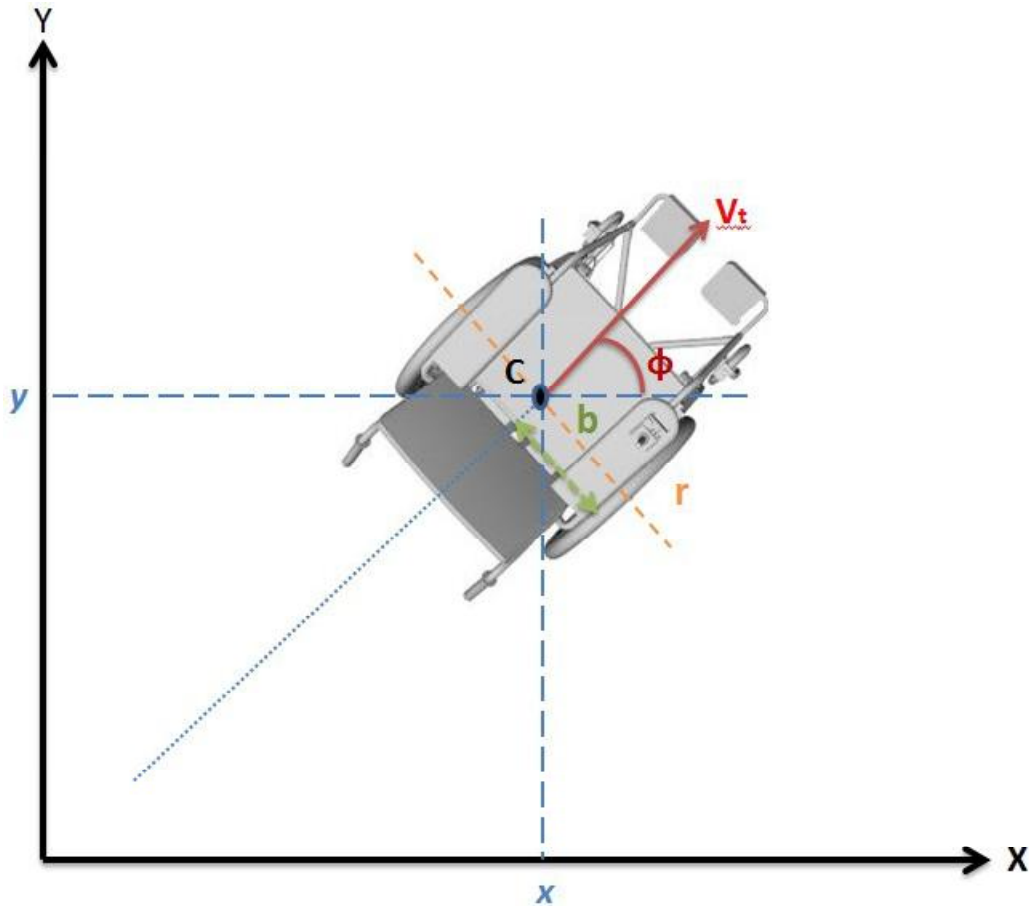


Figure II.2: La géométrie du fauteuil roulant

En utilisant les relations ci-dessus de la vitesse absolue du point C est lié à W et par les cinématiques équations suivantes [14] :

$$\dot{\theta} =$$

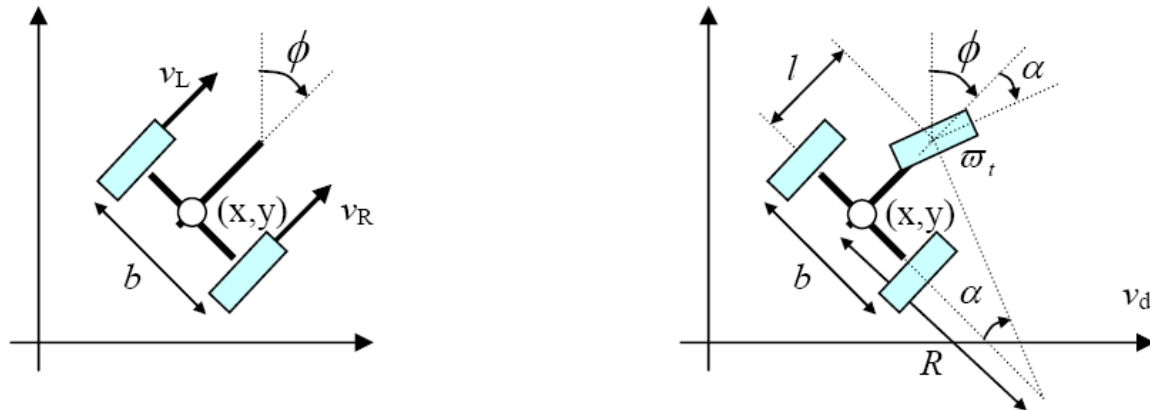
$$\dot{\phi} =$$

$$\dot{\psi} =$$

II.3

Il convient de noter que le centre de rotation est le point de l'axe entre les deux roues arrière et l'axe reliant les deux points d'extrémité des vecteurs de vitesse de roue intersection comme le montre la **figure II.2**.

II-2-1_Configurations de fauteuil roulant le modèle cinématique.



Différentiel

Classique véhicule à trois roues

Figure II.3 Configurations de fauteuil roulant typiques

Les deux esquisses présentées dans la figure II.3 montrent le différentiel et threewheeled classique Fauteuil. Les différentiel utilisation de configuration vitesses indépendantes dans les deux roues gauche et droite (V_L , et V_R , respectivement) à se déplacer dans le plan 2D à un particulier point (x, y) et l'orientation ϕ spécifique. Le fauteuil à trois roues utilise un seul angle contrôlée et la roue de vitesse pour passer à une position et l'orientation souhaitée.[7]

II-2-2_ Configuration différentiel.

Supposons pour le modèle de configuration différentielle, que L et R π sont les correspondants les vitesses angulaires des roues gauche et droite. Compte tenu du rayon des roues que r , la vitesses linéaires et angulaires du fauteuil correspondant sont donnés par :

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \dot{\theta}_L \cos \phi \\ r \dot{\theta}_L \sin \phi \end{bmatrix} \quad \text{II.4}$$

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \dot{\theta}_R \cos \phi \\ r \dot{\theta}_R \sin \phi \end{bmatrix} \quad \text{II.5}$$

Où b est le biais du fauteuil (séparation des deux roues centrales).

En outre, si les vitesses linéaires et angulaires sont fournies, les vitesses angulaires des roues peuvent être obtenues par

$$\dot{\theta}_L = \frac{\dot{x} \sin \phi - \dot{y} \cos \phi}{b} \quad \text{II.6}$$

$$\dot{\theta}_R = \frac{\dot{x} \cos \phi + \dot{y} \sin \phi}{b} \quad \text{II.7}$$

En substituant les équations (II.4) et (II.5) dans le modèle de fauteuil roulant, nous avons trouvé

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(\ddot{\theta})}{(\ddot{\theta})} \\ \frac{(\ddot{\theta})}{-} \end{bmatrix} \cdot + \begin{bmatrix} \frac{(\ddot{\theta})}{(\ddot{\theta})} \\ \frac{(\ddot{\theta})}{-} \end{bmatrix} \cdot \quad \text{II.8}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{(\ddot{\theta})}{(\ddot{\theta})} & \frac{(\ddot{\theta})}{(\ddot{\theta})} \\ \frac{(\ddot{\theta})}{-} & \frac{(\ddot{\theta})}{-} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} \quad \text{II.9}$$

II-3_Model dynamique

Nous allons déterminer le modèle dynamique du fauteuil réel qui est l'élément à contrôler. Ce modèle sera implémenté dans notre simulateur de conduite et utilisé dans les différents modèles du système fauteuil roulant étudiés dans les chapitres qui suivent. Un certain nombre de modèles dynamiques ont été décrits dans la littérature dans un but de simulation. La plupart de ces modèles sont à peu près similaires, la différence se situant au niveau des entrées/sorties du processus.

Le modèle dynamique du fauteuil est fonction de plusieurs éléments ou sous-systèmes: les éléments rigides (assises et matériels embarqués), les éléments mobiles (roues motrices et roues libres), les éléments de propulsion (moteurs électriques) et enfin la personne contrôlant le processus qui sera considérée comme une masse rigide. La dynamique du fauteuil roulant électrique repose principalement sur celle des moteurs à courant continu. Plusieurs modèles sont été proposés dans la littérature [11], [12] basés sur le système de coordonnées de la Figure II.4.

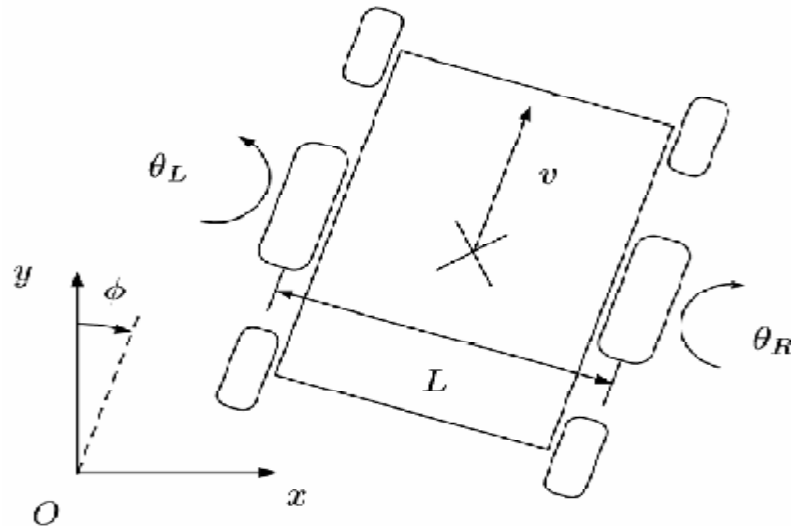


Figure II.4 : Système de référence pour l'analyse de la dynamique du fauteuil.

C'est un modèle du deuxième ordre avec des paramètres qui sont fonction du type de fauteuil utilisé, notamment l'inertie imposée à chaque moteur. Celle-ci change avec le rayon de rotation (emplacement des roues motrices), l'assise, la distance entre les roues motrices et les roues libres, la hauteur totale du fauteuil, le poids de l'utilisateur, etc. D'autres paramètres sont liés directement aux moteurs et aux réducteurs comme les coefficients de viscosité. Si on se réfère au système de coordonnées de la Figure II.4, l'équation dynamique du mouvement du fauteuil s'écrit comme suit [11], [12] :

$$\begin{bmatrix} \ddot{\phi} \\ \ddot{\theta}_L \\ \ddot{\theta}_R \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta}_L \\ \dot{\theta}_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{pmatrix} - & + & - \\ + & - & + \\ - & + & - \end{pmatrix} \sin(\phi) \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{II.10}$$

$$= \begin{bmatrix} - & + & + & - & + & - & - & - & - \\ & & - & - & - & & - & + & + & - & + & - \end{bmatrix} \quad \text{II.11}$$

ET

$$= \begin{bmatrix} - & + & 0 \\ 0 & - & + \end{bmatrix} \quad \text{II.12}$$

Le terme $(- +) \sin(\psi)$ qui exprime le couple résistant, est dû à l'inclinaison de la surface de déplacement du fauteuil roulant électrique, comme le montre la Figure II.5. Ici, g représente l'accélération gravitationnelle de (II.5)

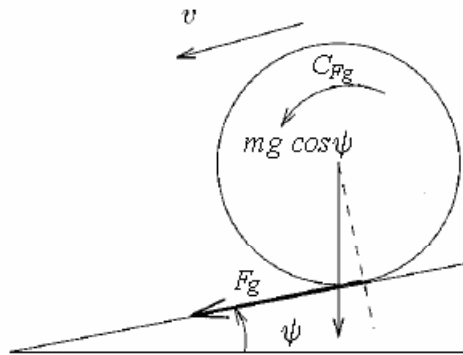


Figure II.5 : Système de référence pour l'analyse de la dynamique du fauteuil

Comme nous l'avons mentionné auparavant, les tests se font, dans notre étude, sur une surface plane horizontale donc l'angle d'inclinaison, par conséquent, le couple résistant est nul. L'équation dynamique (II. 12) devient :

$$\begin{bmatrix} \ddot{\theta} \\ \ddot{\psi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vdots \\ \vdots \end{bmatrix} \quad \text{II.13}$$

Le modèle dynamique dépend de plusieurs paramètres étroitement liés à la structure du fauteuil et sur lesquels nous ne possédons que très peu d'informations, notamment sur ceux liés aux données du constructeur (caractéristiques des moteurs). Néanmoins, durant plusieurs tests de conduite effectués sur notre fauteuil, nous avons constaté que certains paramètres ont plus d'influence que d'autres sur la dynamique du fauteuil, particulièrement ses

moments d'inertie (déterminés par calcul en appliquant les lois de la physique), la masse du fauteuil et de l'opérateur et les forces agissant sur les roues motrices. Une détermination approximative des autres paramètres (différents coefficients de viscosité) est suffisante pour obtenir une bonne estimation du modèle dynamique réel du fauteuil roulant électrique. On peut noter par ailleurs qu'un travail d'identification a déjà été effectué au laboratoire concernant un fauteuil électrique Power Push [11], [12]. Il a abouti à un modèle dynamique comportant 16 fonctions de transfert d'ordre 2, chacune correspondant à un cas de déplacement : avant, avant gauche, avant droit, arrière gauche, arrière droit, rotation gauche, rotation droite. Chaque cas de déplacement du fauteuil est appliqué au deux moteurs.

Notre étude ne porte pas sur le même fauteuil mais les deux structures électriques et mécaniques sont proches. Ceci nous conforte donc dans l'idée qu'un modèle dynamique d'ordre 2 pour le fauteuil simulé est une approximation réaliste.

II-4_ Conclusion

L'étude présentée dans ce sous nous renseigne sur les caractéristiques cinématiques et dynamiques du fauteuil roulant que nous allons le commandé par un contrôleur flou pour assurer sa navigation dans un environnement intérieur connu sans percussioin avec les obstacles qu'il rencontre dans son chemin.

Chapitre

03

*Notion De Base Et
Généralité Sur La
Logique Floue*

III-1_ Introduction à la logique floue

Si les processus commandés sont linéaires, (c'est-à-dire lorsque les grandeurs de sortie sont reliées aux grandeurs d'entrée par des équations différentielles linéaires) ils peuvent être alors modélisés par un modèle mathématique (fonction de transfert en « p » pour les systèmes à temps continu ou en « z » pour les systèmes à temps échantillonnés). Le concepteur devra alors calculer les valeurs des paramètres de réglage du régulateur (gain, durées d'intégration et de dérivation) pour satisfaire aux exigences d'un cahier des charges (temps de montée, dépassement). Le système régulé sera correct s'il est peu sensible aux perturbations (on dira alors qu'il est robuste).

Certains processus sont par nature difficilement modélisables (thermique, chimique), variables dans le temps ou encore ne peuvent être correctement représentés par un modèle linéaire. Dans ce cas, les paramètres de réglage du régulateur ne seront pas optimaux et le système pourra ne pas être correctement contrôlé. Dans une approche « *logique floue* », on ne se préoccupe pas d'une modélisation mathématique du processus mais, par contre, on suppose le processus non régulé bien connu par un opérateur humain, l'objectif est toute fois de l'automatiser. On parle alors de connaissance par un « *expert* » qui sait ce qu'il faut faire pour que ça marche dans tous les cas de figure.

III-2_ Construction d'un correcteur flou

L'idée d'appliquer les techniques floues au domaine du contrôle des processus a été proposée la première fois par *Chang et Zadeh* en 1972 [13]. Leur démarche reposait sur une approche à base de modèle en utilisant le concept de fonction floue.

Toutefois, il est intéressant de noter que les premières applications en contrôle flou ont été effectuées par *Mamdani* et son équipe [23], en utilisant une approche de type heuristique qui a ses racines dans le champ de l'intelligence artificielle. L'idée développée a été d'utiliser les techniques floues pour leur capacité à exprimer, de manière simple et sous une forme linguistique, des règles de comportement comme cela été mis en évidence par *Zadeh* dans [19]. Cette approche a conduit à de nombreux développements dans la communauté du contrôle flou. Le domaine des contrôleurs

flous de type proportionnel-intégral-dérivé, ou plus généralement de type linéaire, reste encore très actif aujourd'hui [13], [16].

Une autre approche, qui a donné des développements très riches, a été proposée par *Takagi et Sugeno* en 1985 [24], [21]. Elle repose aussi sur une représentation à base de règle. Toutefois, à la différence des contrôleurs de type *Mamdani*, la partie conclusion des règles s'exprime de manière numérique sous la forme d'une constante, d'un polynôme ou, de manière plus générale, par une fonction ou une équation différentielle dépendant des variables associées aux prémisses des règles. Ce type de représentation peut être utilisé pour modéliser un processus ou pour synthétiser un contrôleur flou. Cette approche, orientée modèle, a fourni la plupart des résultats théoriques en contrôle flou. En l'absence de modèle analytique, la loi de commande peut être synthétisée à partir d'une relation entrée-sortie sous forme d'un système flou de type *Takagi-Sugeno*. Les erreurs de modélisation peuvent être prises en compte par différentes techniques : contrôleurs flous adaptatifs, contrôleurs flous robustes utilisant une synthèse H_∞ [15].

III-3_ Structure d'un contrôleur flou

1) Structure du régulateur

La figure (III.1) présente un système qui contient un régulateur flou. Il a une structure identique à un système à réglage par feedback classique (ou réglage par contre réaction d'état). Il est constitué de :

- S : le système à régler
- OCM : l'organe de commande
- RLF : le régulateur par logique floue.
- W : la grandeur de consigne
- U_{cm} : le signal de commande fournit par le RLF
- U : la grandeur de commande fournie par l'OCM
- V : une perturbation
- Y : la grandeur à régler (ou sortie)

- Y_M : le vecteur qui contient les grandeurs mesurées

Ce dernier contient en général la grandeur à régler y et, le cas échéant, d'autres grandeurs mesurées qui sont déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du système à régler.

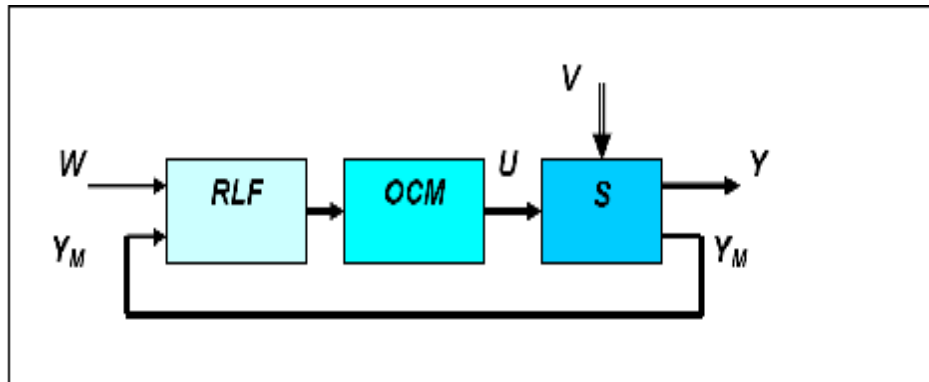


Figure III.1 Structure d'un régleur multi variable par logique floue.

2) Configuration interne

Pour rappel, par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue[16].

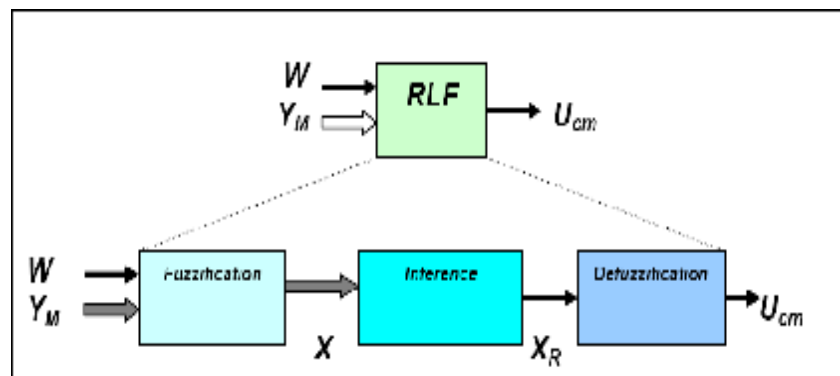


Figure III.2 Configuration interne d'un régleur par logique floue.

Les trois parties de la structure générale du contrôleur

Dans la configuration interne d'un régulateur par logique floue, on distingue trois parties[15] :

1. **La fuzzification** : conversion des valeurs d'entrées (grandeurs physiques) en grandeurs floues réunies dans le vecteur x .
2. **L'inférence** (avec la base de règles) : prise des décisions (chaque règle activée donne un sous-ensemble flou de sortie).
3. **La défuzzification** : conversion des sous-ensembles flous de sortie en valeurs déterminées.

III-3-1_ Opération de fuzzification

La grandeur d'entrée du contrôleur doit d'abord être fuzzifiée, c'est-à-dire que l'on va fixer les valeurs linguistiques ainsi que la forme des fonctions d'appartenance. Cette opération doit être faite également sur la variable de sortie. Bien sûr cette sortie fuzzifiée n'est pas exploitable pour attaquer l'interface de puissance. Il faudra donc avoir en tête de faire une opération de « *défuzzification* » pour résoudre ce problème[16].

III-3-2_Règles « d'inférence »

• Méthode MAX-MIN

- Au niveau de la condition : **ET** est représenté par la fonction **Min**, **OU** est représenté par la fonction **Max**
- Au niveau de la conclusion : **OU** est représenté par la fonction **Max**, **ALORS** est représenté par la fonction **Min** (d'où la désignation)

• Méthode MAX-PROD

- Au niveau de la condition : **ET** est représenté par la fonction **Min**, **OU** est représenté par la fonction **Max**
- Au niveau de la conclusion : **OU** est représenté par la fonction **Max**, **ALORS** est représenté par la fonction **Prod** (d'où la désignation)

• Méthode SOMME-PROD

Il s'agit de la Somme Pondérée (ou Moyenne) :

- Au niveau de la condition : **ET** est représenté par la fonction **Prod**, **OU** est représenté par la fonction **Somme**.

- Au niveau de la conclusion : **OU** est représenté par la fonction **Somme**, **ALORS** est représenté par la fonction **Prod** (d'où la désignation)

- **Base de règles « d'inférence »**

Le rôle de l'expert est ici présent car c'est lui qui va fixer les règles de la commande qui vont porter uniquement sur les valeurs linguistiques des variables.

La liste des règles est appelée **base d'inférence** (**inférence** : opération logique par laquelle on admet une proposition en vertu de sa liaison avec d'autres propositions tenues pour vraies : Nouveau Petit Robert). On parle aussi de **moteur d'inférence**. Il n'est pas nécessaire que toutes les cases du tableau soient remplies. On peut trouver les règles énoncées critiquables, elles ne sont données qu'à titre d'exemples et doivent être adaptées en fonction de chaque processus.

A ce stade, on a donc la sortie définie sous forme linguistique avec des degrés d'appartenance précis. Il faut maintenant passer à une grandeur qui, elle, sera interprétable par l'interface de commande [20].

III.3.3 Opération de Défuzzification

Les méthodes d'inférence fournissent une fonction d'appartenance résultante pour la variable de sortie. Il s'agit donc d'une information floue qu'il faut transformer en grandeur physique.

On distingue 4 méthodes de défuzzification :

1) Méthode du maximum :

La sortie correspond à l'abscisse du maximum de la fonction d'appartenance résultante.

Trois cas peuvent se produire :

Dans le premier cas, il n'y a pas de problèmes. Dans les deux autres cas, une ambiguïté apparaît. Il n'y a pas de règle générale sur la décision à prendre. Certains

opérateurs préféreront prendre la plus petite sortie, d'autres la plus grande et d'autres une valeur moyenne.

Remarque: méthode simple, rapide et facile mais elle introduit des ambiguïtés et une discontinuité de la sortie.

2) Méthode de la moyenne des maxima :

Dans le cas où plusieurs sous-ensembles auraient la même hauteur maximale, on réalise leur moyenne. Un des inconvénients (l'ambiguïté) de la méthode du maximum est enlevé.

3) Méthode du centroïde :

La sortie correspond à l'abscisse du centre de gravité de la surface de la fonction d'appartenance résultante.

Il existe deux méthodes :

- On prend l'union des sous-ensembles flous de sortie et on en tire le centroïde global (calculs très lourds).
- On prend chaque sous-ensemble séparément et on calcul son centroïde, puis on réalise la moyenne de tous les centroïdes.

Remarque: on n'a plus de discontinuités et d'ambiguïtés, mais cette méthode est plus complexe et demande des calculs plus importants.

4) Méthode de la somme pondérée :

Il s'agit d'un compromis entre les deux méthodes précédentes. On calcule individuellement les sorties relatives à chaque règle selon le principe de la moyenne des maxima, puis on réalise leur moyenne pondérée.

Après ces notions de base de la logique floue et ses applications, nous constatons que cette technique convient à notre cas. Malgré les inconvénients qu'elle possède, cela ne nuit pas à son efficacité et sa souplesse dans la commande des systèmes complexes ce qui justifie notre choix.

III-4_L'apprentissage en logique floue

Les premiers travaux dans le domaine de l'apprentissage pour systèmes flous ont été réalisés par Procky et Mamdani dans le cadre des contrôleurs flous auto-organisés (Self Organizing Controller). Le principe général utilisé est celui de l'apprentissage renforcé. Le but est d'apprendre à un contrôleur flou à suivre une trajectoire de référence (ou atteindre un point). Le résultat de ses commandes est jugé grâce à une table de performance permettant d'indiquer les corrections nécessaires. Ces corrections sont alors répercutées sur les différentes règles en tenant compte de leur rôle pour le calcul de la commande finale. [16] a proposé une adaptation de l'algorithme (*Q-Learning*) à un contrôleur flou. Le contrôleur est formé d'un ensemble d'agents acceptant tous les mêmes entrées. Pour chaque situation, la sélection de l'agent actif est réalisée grâce à la fonction d'utilité Q . Le renforcement reçu est alors distribué sur les différentes règles en fonction de leur degré d'activation. Après apprentissage, il est possible de former un nouvel agent constitué des règles de chaque agent ayant reçu le plus de renforcement. Cet algorithme ne propose pas la modification ou la création de nouvelles règles mais de réaliser une sélection des règles les plus appropriées parmi une base existante.

Les deux approches précédentes ont pour principe commun d'essayer de construire une base de règles par apprentissage renforcé. Il existe deux types d'apprentissage pour un système flou :

1. L'apprentissage des paramètres. Il permet de régler la valeur des différents paramètres attachés aux fonctions d'appartenance et (ou) aux opérateurs de combinaison.
2. L'apprentissage structurel. Son but est de déterminer le nombre de règles ainsi que les variables mises en jeu.

III-4-1_L'apprentissage des paramètres

Le but de l'apprentissage est de déterminer la valeur des différents paramètres utilisés de manière à minimiser l'erreur commise par rapport aux ensembles. Ces paramètres peuvent être attachés aux opérateurs de combinaison [18] ou aux fonctions d'appartenance des différentes données linguistiques. L'approche la plus simple

consiste à positionner les différentes parties condition des règles manuellement ou grâce à un algorithme de catégorisation et d'ajuster uniquement la partie conclusion.

Rappelons que dans le cadre d'un contrôleur de type Sugeno avec une partie conclusion constante, la valeur de sortie est donnée par :

$$= \frac{\Sigma}{\Sigma} \quad \text{III-27}$$

La valeur de sortie est donc une combinaison linéaire des termes recherchés. La minimisation de l'erreur peut être obtenue directement par une méthode de type simplexe [17] ou descente de gradient [20] par exemple. La modification exclusive de la partie droite peut être insuffisante. Il faut alors avoir recours à une adaptation de l'ensemble de paramètres du système flou. Cela peut être réalisé grâce à différentes techniques d'optimisation telles que le recuit simulé

[22] ou à nouveau la descente de gradient.

Le calcul de gradient de chaque paramètre intervenant dans la partie gauche d'une règle est un problème à priori non trivial. On peut constater néanmoins que les opérateurs réalisés dans les différentes étapes de l'évaluation d'une base de règles sont similaires aux opérateurs réalisés par certains neurones formels. Un système flou peut être transformé en un réseau à propagation unilatérale et être modifié par rétro propagation du gradient. Le rapprochement de la logique floue et des réseaux de neurones afin de combiner leurs avantages respectifs est une grande préoccupation des chercheurs des deux axes. Ces formalismes sont tous les deux utilisés pour résoudre des problèmes semblables caractérisés par une absence de modèle. Le contrôle flou permet la prise en compte de connaissances initiales mais reste figé. Les réseaux de neurones ne peuvent incorporer cette connaissance initiale mais sont capable d'adaptation [15],[16].

III-4-2_ L'apprentissage structurel

Le but de cet apprentissage est de déterminer la structure d'un contrôleur décrivant une base d'exemples fournie. Les méthodes développées peuvent être séparées en deux catégories :

1. celles basées sur l'analyse de la distribution des points d'exemples,

2. celles basées sur la recherche du meilleur contrôleur parmi l'ensemble des contrôleurs possibles.

III-5_ Sélection du contrôleur parmi un ensemble

Le principe général de ces méthodes est de réaliser une recherche au sein de l'espace formé par l'ensemble des contrôleurs possibles. A notre connaissance, la première approche dans ce domaine est celle de [20]. Le but est de déterminer les variables intervenant dans le contrôleur, les parties conditions et les parties conclusion des règles. Le principe est le suivant :

1. Un sous ensemble de l'ensemble total des variables du problème est choisi grâce à une heuristique. A partir de cet ensemble, la partie condition et conclusion optimales sont calculées. Le contrôleur obtenu est évalué par rapport à l'ensemble des exemples (par un critère quadratique d'erreur). Le choix initial des sous ensemble de variables est alors remis en cause de manière à réduire cette erreur.

2. étant donné un choix de variables, les parties conditions optimales peuvent être déterminées (en tenant compte des parties conclusions calculées).

3. étant donné un choix de variables et de parties conditions, les différentes conclusions sont générées afin de réduire l'erreur quadratique par rapport aux exemples.

La détermination d'un contrôleur nécessite donc de nombreuses itérations entre les trois étapes rendant l'algorithme peu adapté à un calcul en ligne. Il est de plus nécessaire de connaître initialement la totalité des exemples.

Le problème de recherche d'un élément parmi un ensemble vaste d'éléments possibles est un problème type des algorithmes génétiques [20], [19]. Herrera par exemple code une règle floue au sein d'un chromosome destiné à évaluer. La quantité de chaque chromosome, permettant de sélectionner les candidats au croisement, est jugée selon 4 critères :

1. le nombre d'exemples positifs. Ce sont les exemples de la base initiale en accord avec la règle.

2. le degré d'activation moyen de la règle sur l'ensemble des exemples positifs.

3. le nombre d'exemples négatifs. Ce sont les exemples en contradiction avec la règle.

4. le degré de participation de la règle sur la totalité des exemples

III-6_Conclusion :

Nous avons vu dans ce chapitre la variété des notions de la logique floue, on a commencé par une définition des ensembles flous et la variable linguistique, ainsi que les fonctions d'appartenances, la fuzzification et les règle d'inférence, en dernier lieu les méthodes de défuzzification ont été présentées.

Chapitre

04

*Systemes de Contrôle
et d'Evitement
d'Obstacles*

IV-1_ Introduction

Ce chapitre traite la fonctionnalité d'évitement d'obstacles. L'évitement d'obstacles est un comportement de base présent dans quasiment tous les fauteuils roulants. Il est indispensable pour permettre au fauteuil roulant de fonctionner dans un environnement inconnu et pour gérer les écarts entre le modèle interne et le modèle réel.

La plupart des méthodes d'évitement d'obstacles sont des méthodes locales. En effet, les Méthodes globales qui considèrent un modèle complet de l'environnement, se ramènent au problème de la planification de mouvement. Parmi les méthodes locales d'évitement d'obstacles, on peut distinguer deux catégories: les méthodes utilisant une trajectoire de référence et celles n'en utilisant pas. Le type de système et d'application oriente le choix vers une catégorie ou l'autre. Enfin un autre type de méthodes doit être mentionné, qui tient compte explicitement de la taille des obstacles pour réaliser un mouvement sans collision, ce qui définit une nouvelle problématique [21].

IV-2_ Évitement d'obstacles :

L'évitement d'obstacles est un comportement de base présent dans quasiment tous les fauteuils roulants. Il est indispensable pour permettre au fauteuil de fonctionner dans un environnement dynamique et pour gérer les écarts entre le modèle interne et le monde réel. Les méthodes d'évitement d'obstacles doivent avoir une perception correcte de l'environnement.

IV-3_ Les méthodes évitement d'obstacles :

Il existe plusieurs méthodes parmi lesquelles on cite :

- Ø Méthode des champs de potentiel
- Ø Méthode Field Histogramme
- Ø Méthode de la fenêtre dynamique
- Ø Méthode de réseaux neurones
- Ø Méthode de la logique floue

IV-3-1_ Méthode des champs de potentiel

Dans la méthode d'évitement d'obstacles par champs de potentiels, on assimile le fauteuil à une particule se déplaçant suivant les lignes de courant d'un potentiel créé en fonction de l'environnement perçu par le fauteuil roulant. Ce potentiel traduit différents objectifs tels que l'évitement d'obstacles ou une direction de déplacement préférée. Il est calculé par sommation de différentes primitives de potentiels traduisant chacun de ces objectifs

(Figure IV.1). Ces différents potentiels peuvent avoir une étendue spatiale limitée ou non (par exemple, n'avoir une influence que près des obstacles) et leur intensité peut dépendre ou non de la distance.

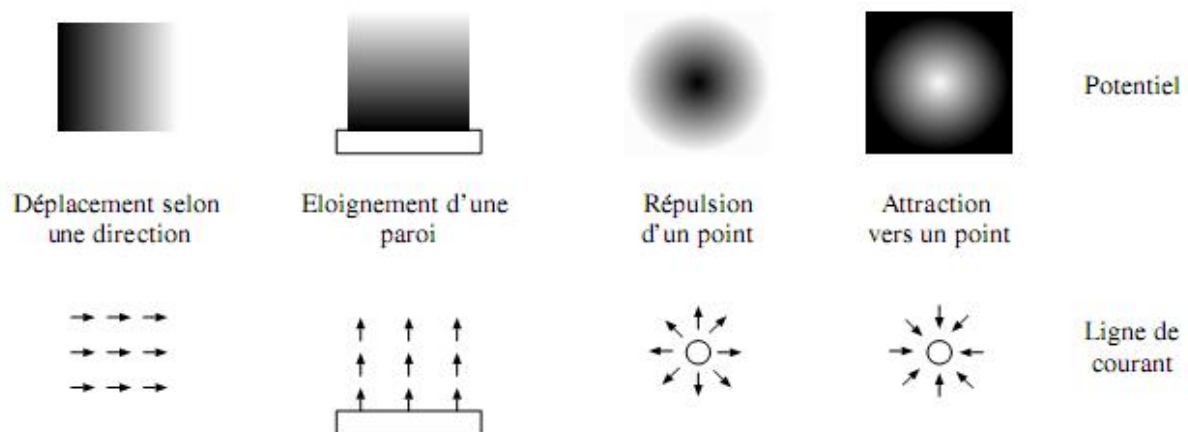


Figure IV.1 : « Illustration de potentiels primitifs dont la combinaison guide les déplacements. Le fauteuil roulant se déplacera selon les lignes de courant ».

Le gradient de ce potentiel donne, en chaque point de l'espace, la direction de déplacement du fauteuil roulant. Comme c'est ce gradient, et non la valeur absolue du potentiel, qui nous intéresse, il est possible de calculer directement en chaque point sa valeur par une simple somme vectorielle en ajoutant les valeurs issues des différents potentiels primitifs. Ainsi, pour un fauteuil roulant se déplaçant en ligne droite en espace ouvert et évitant les obstacles qu'il peut rencontrer, nous obtenons par exemple les lignes de courant illustrées.

De plus, dans la pratique, pour l'évitement d'obstacles, le potentiel est en général calculé dans l'espace relatif au fauteuil et ne sert qu'à décider de la vitesse et de la direction courante. Il n'est donc nécessaire de l'estimer que pour la position courante du fauteuil roulant, en sommant simplement la contribution des différents éléments perçus [2].

IV-3-2_ Method Vector Field Histogram:

Cette méthode a été conçue spécifiquement pour utiliser une grille d'occupation locale construite à partir de capteurs à ultrasons. Cette grille est construite de manière très rapide par la méthode « Histogramme in motion mapping » qui produit une grille dont chaque cellule contient un nombre d'autant plus élevé qu'elle a souvent été perçue comme contenant un obstacle.

Un histogramme représentant l'occupation de l'environnement autour du fauteuil roulant est ensuite construit à partir de cette grille d'occupation locale. Pour cela, l'environnement est discrétisé en secteurs angulaires pour lesquels la somme des valeurs des cellules est calculée.

Un seuil permettant de tolérer un certain bruit est ensuite utilisé pour déterminer les directions possibles pour le fauteuil roulant : toutes les directions dont la valeur est inférieure au seuil sont considérées.

Le choix de la direction est finalement réalisé parmi les directions possibles en fonction de contraintes externes (par exemple la direction la plus proche de la direction du but).

Cette méthode est extrêmement rapide et a permis historiquement un déplacement réactif à des vitesses assez élevées (environ 1 m/s). Diverses améliorations pour permettre le réglage de la vitesse du fauteuil roulant en fonction de la densité des obstacles sont possibles [2].

IV-3-3_ Méthode de la fenêtre dynamique :

La méthode de la fenêtre dynamique permet, à partir de la perception locale de l'environnement, de sélectionner un couple (v, ω) de vitesses de translation et de rotation du fauteuil roulant qui répond à différentes contraintes, dont celle d'éviter les obstacles. Un tel couple de vitesses, lorsqu'il est appliqué au fauteuil roulant, produit une trajectoire circulaire, pour laquelle la satisfaction des différentes contraintes peut être évaluée. A l'issue de l'évaluation de toutes les contraintes pour tous les couples de vitesses possibles, la méthode de la fenêtre dynamique permet de sélectionner le couple le plus pertinent (qui répond le mieux aux contraintes) [2].

La contrainte d'évitement d'obstacles est une contrainte dure au sens où elle est binaire (succès / échec) et doit obligatoirement être satisfaite. Elle est évaluée pour chacune des trajectoires possibles à partir de la perception locale de l'environnement à un instant donné et de la position estimée du fauteuil roulant à un pas de temps fixé dans le futur pour la trajectoire courante. Si le fauteuil roulant n'a pas rencontré d'obstacles à cet horizon, la contrainte est respectée ; dans le cas contraire, elle ne l'est pas.

IV-3-4_ Méthode de réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones désignent à la fois l'étude de ces systèmes biologiques et leur modélisation informatique, plus ou moins simplifiée, à différentes applications, comme la reconnaissance de caractères, son premier terrain d'application historique, ou la navigation des fauteuils roulants autonomes. Dans ce cadre a été définie la notion de réseaux de neurones artificiels.

Dans un réseau de neurones artificiel, chaque neurone possède plusieurs entrées et une sortie. Chacune de ses entrées se voit affecter un poids (dit poids synaptique) différent, et si la somme ainsi pondérée des signaux des différentes entrées dépasse un seuil, la sortie prend une valeur positive (le neurone déclenche) [3].

Un réseau complet est constitué de différentes couches de neurones. Les premières couches correspondent à des couches de détection, en fauteuil roulant les neurones correspondants sont directement liés aux informations délivrées par les capteurs du fauteuil roulant. Les couches supérieures correspondent plutôt à des couches d'interprétation, et pour un fauteuil elles seront plutôt liées aux effecteurs. De plus il y a généralement un certain nombre de couches intermédiaires entre les couches d'entrée et de sortie.

IV-3-5_ Méthode de la logique floue

La logique binaire présente l'avantage de la simplicité, mais est assez éloignée de la façon humaine de raisonner. Si on prend l'exemple de la qualification de la proximité d'un obstacle, la logique floue permet de faire intervenir des notions telles que « assez près » ou « très loin », au lieu de se cantonner à une définition binaire « obstacle ou pas obstacle ». Celle-ci a été formalisée par Zadeh en 1965 [4].

IV-4_ D'évitement d'obstacles avec une trajectoire de référence

Dès lors que la cinématique du système est plus complexe, le calcul préalable d'une trajectoire de référence qui sera adaptée lors de l'exécution s'avère nécessaire. Nous présentons deux méthodes utilisant une trajectoire de référence pour l'évitement réactif d'obstacles.

IV-4-1_ Trajectoire de navigation

Une méthode proposée par repose sur l'enchaînement de trajectoires élémentaires (Sensor Based Maneuvers SMB), dans le contexte d'une voiture automatisée roulant sur une route [4]. Les SMB sont par exemple le suivi d'un couloir de route, le changement de file ou le parking parallèle. Les paramètres de chacune de ces modalités sont définis par les informations sensorielles. Un contrôleur, amélioré dans par un réseau de neurones, permet d'enchaîner ces différentes modalités [5].

IV-4-2_ Bande élastique

La méthode proposée par utilise une trajectoire initialement planifiée qui est représentée par une série de boules adjacentes (appelées «bulles») dans l'espace des configurations. Le rayon d'une boule centrée en une configuration est la distance de cette configuration à l'obstacle le plus proche. Ainsi une trajectoire est sans collision dès lors que les «bulles» qui la composent se recouvrent. Développée pour des systèmes sans contraintes cinématiques, cette technique considère la trajectoire comme une bande élastique, se modifiant sous l'action de forces répulsives générées par les obstacles, et de forces internes de contraction ou d'élasticité. Du fait de la représentation en bulles, la mise à jour de la trajectoire sous l'action des forces est très rapide [6].

Cette technique a été étendue à un fauteuil roulant de type voiture par [7]. La «forme» des «bulles» est ici donnée par la métrique des trajectoires de Reeds et Shepp (combinaisons d'arcs de cercle et de lignes droites) Le lissage de la courbe joignant les centres des «bulles» est réalisé en utilisant une courbe de Bézier [8].

Mais pour certains systèmes on ne connaît pas la plus courte distance entre une configuration et un obstacle. La méthode de la bande élastique ne peut donc s'appliquer qu'au prix d'approximations sur la forme des trajectoires de tels systèmes, ce qui rend impossible la navigation en environnement très contraint.

L'ensemble de ces considérations, concernant les limitations des méthodes utilisant une trajectoire de référence ou des techniques proposées pour les systèmes à cinématique plus simple, motive le développement d'une méthode générique d'évitement d'obstacles pour systèmes non holonomes.

IV-5_ d'évitement d'obstacles sans trajectoire de référence

Pour certains systèmes et dans certains contextes applicatifs, la définition d'une trajectoire comme une série de points de passage est possible. Des méthodes d'évitement d'obstacles ont été développées qui calculent des commandes permettant de rejoindre un point de passage en évitant les collisions avec les obstacles détectés.

IV-5-1_ Domaine des angles de braquage

Cette approche a été proposée par pour un fauteuil roulant de type uni cycle. Il s'agit de calculer pour un ensemble de vitesses linéaires du domaine des angles de braquage (SAF) qui n'entraînent pas de collision avec les obstacles perçus. Cette méthode utilise une discrétisation en grille du plan de travail autour du fauteuil roulant. Elle exploite la possibilité de pré-calculer et de stocker dans des tables de recherche les SAF pour chaque cellule obstacle de la grille [9].

IV-5-2_ Diagramme de proximité

Cette approche proposée par repose sur un diagramme de proximité des obstacles, mis à jour au fur et à mesure du déplacement du fauteuil roulant [11]. En fonction de l'allure de ce diagramme (nombre de passages sans obstacles, longueur des passages, etc.), un comportement adapté (exploration, avancement vers la cible, retour en arrière, etc.) est sélectionné. La direction de mouvement la plus prometteuse par rapport à la cible est alors choisie. Cette méthode a été appliquée à un fauteuil roulant de type uni cycle grâce à une expression des obstacles dans l'espace des points accessibles en un mouvement élémentaire (un arc de cercle en l'occurrence), obtenue par une transformation dans l'espace dit «Ego-cinématique» [12].

L'exposé de ces différentes méthodes et de leurs hypothèses fait immédiatement apparaître leur inadéquation à des systèmes à cinématique plus complexe évoluant dans des environnements fortement contraints. On ne peut en effet généralement pas présupposer de la forme des trajectoires. De même les discrétisations en grille de l'espace de travail, proposées par certaines méthodes, ne permettent pas les mouvements arbitrairement proches des obstacles.

IV-6_ Histogramme de champs de vecteurs

Dans la lignée des approches par champs de potentiels, sont apparus les histogrammes par champs de vecteurs (Vector Field Histogramm VFH). Ceux-ci, introduits par Koren et Bernstein sont nés de la combinaison des champs de potentiels et des grilles d'occupation : un histogramme basé sur une grille cartésienne de l'environnement, cette dernière est construit et mis à jour au fur et à mesure de la

navigation pour de reporter la présence d'obstacles à proximité du fauteuil roulant (Figure IV.2 (a)). Afin de choisir une direction à suivre, un histogramme polaire est construit à partir de la grille d'occupation : en discrétisant les différentes directions possibles autour du fauteuil roulant, l'histogramme polaire est construit en pondérant pour chaque secteur de la discrétisation polaire les cellules traversées de la grille d'occupation contenant des obstacles. Une fois cet histogramme polaire construit, des « vallées candidates » sont déterminées comme les suites de secteurs contigus de l'histogramme polaire libres d'obstacles (Figure IV.2 (b)). La direction à prendre par le système est alors déterminée par le milieu de la vallée menant le plus directement au but. Initialement conçue pour la navigation de fauteuil roulant holonomes (pouvant naviguer dans toutes les directions), cette méthode a été étendue à plusieurs reprises afin de prendre en compte les dimensions du fauteuil roulant (par un espace de configuration implicite) et ses contraintes de vitesse. Plus tard, les VFH ont été combinés à une recherche A* afin de trouver un chemin menant vers le but et d'échapper ainsi aux minimum locaux. Les méthodes VFH disposent néanmoins encore de fortes limitations : Elles ne prennent ni en compte la dynamique du système fauteuil roulant, ni l'éventuelle présence d'obstacles; le mouvement instantané du fauteuil roulant est calculé uniquement à partir des informations sur la position courante des obstacles, leur vitesse n'est en aucun cas considérée.

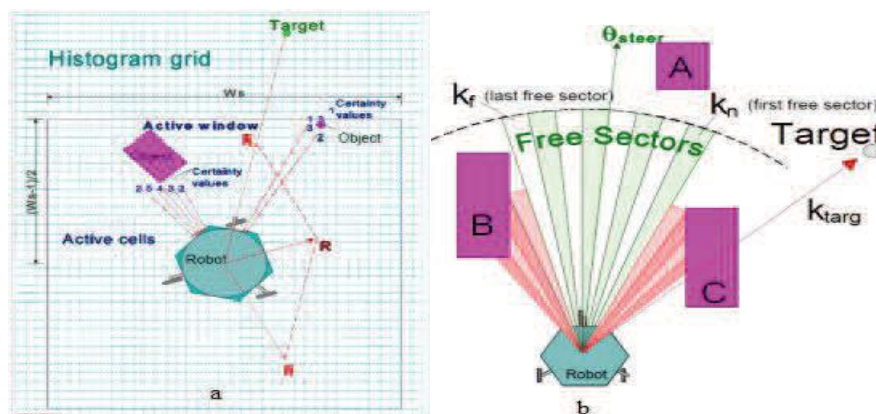


Figure. IV.2 : Histogramme de champs de vecteurs (a) Fenêtre active autour du fauteuil roulant dans laquelle sont mise à jour les probabilités d'occupation par les

obstacles, (b) Histogramme polaire calculé à partir de la grille d'occupation. Les vallées libres d'obstacles sont déterminées afin de choisir une direction à suivre.

IV-7_ Analyse de l'environnement

Notre perception étant basée sur les mesures du capteur laser, nous disposons d'un aperçu de l'environnement particulièrement riche qui nous permet d'anticiper la variabilité de l'environnement au fur et à mesure de l'avancée du fauteuil. Pour établir notre méthode, nous intéressons à la manière dont une personne analyse l'environnement lorsqu'elle longe un mur dans un couloir en conduite manuelle. Ainsi nous remarquons qu'un utilisateur effectue plusieurs contrôles sur l'environnement afin d'évaluer la situation dans laquelle il se situe, et ajuste ou corrige en conséquence sa trajectoire. Il évalue tout d'abord la distance le séparant du mur suivi qu'il essaye de maintenir constante afin de garantir le suivi lors de son avancée.

Ensuite, il estime la largeur du passage emprunté en évaluant l'espace disponible entre le mur suivi et les obstacles du côté opposé. Si le passage se restreint, il adapte sa vitesse et se centre dans celui-ci. Enfin, il surveille l'approche d'un obstacle en mesurant la distance entre le fauteuil roulant et les obstacles se situant à l'avant. En fonction de ces trois observations, l'utilisateur corrige sa trajectoire et adapte sa vitesse. En s'inspirant de cette analyse, nous cherchons à mesurer ces trois distances significatives à partir de notre perception (on se place dans le cas d'un suivi de mur à droite, l'autre fonctionnant symétriquement) :[10]

La première est la distance de suivi. Elle correspond à la distance mesurée entre le centre du repère global et l'obstacle le plus proche du fauteuil sur sa droite.

L'objectif consiste à la maintenir égale à une distance de sécurité.

La deuxième est la distance aux éventuels obstacles se situant en face du Fauteuil roulant. Elle est mesurée entre le centre du repère global et l'obstacle le plus proche en face du fauteuil roulant et permet d'ajuster la vitesse d'avance du fauteuil roulant.

Enfin, la troisième est la distance mesurée à gauche du fauteuil roulant. Elle caractérise la largeur du passage que l'on emprunte. Elle permet d'ajuster la distance de sécurité en cas de manque d'espace. Pour évaluer ces trois distances, on établit trois zones (Fig. IV.3.). Dans chacune d'elles, on recherche le point de mesure le plus proche du centre du repère global. On considère la distance séparant ces deux points comme étant la distance significative de cette zone. Ainsi sera la distance mesurée dans la zone à gauche, la distance de la zone avant (ouverture de 60°), et la distance de la zone à droite.[6]

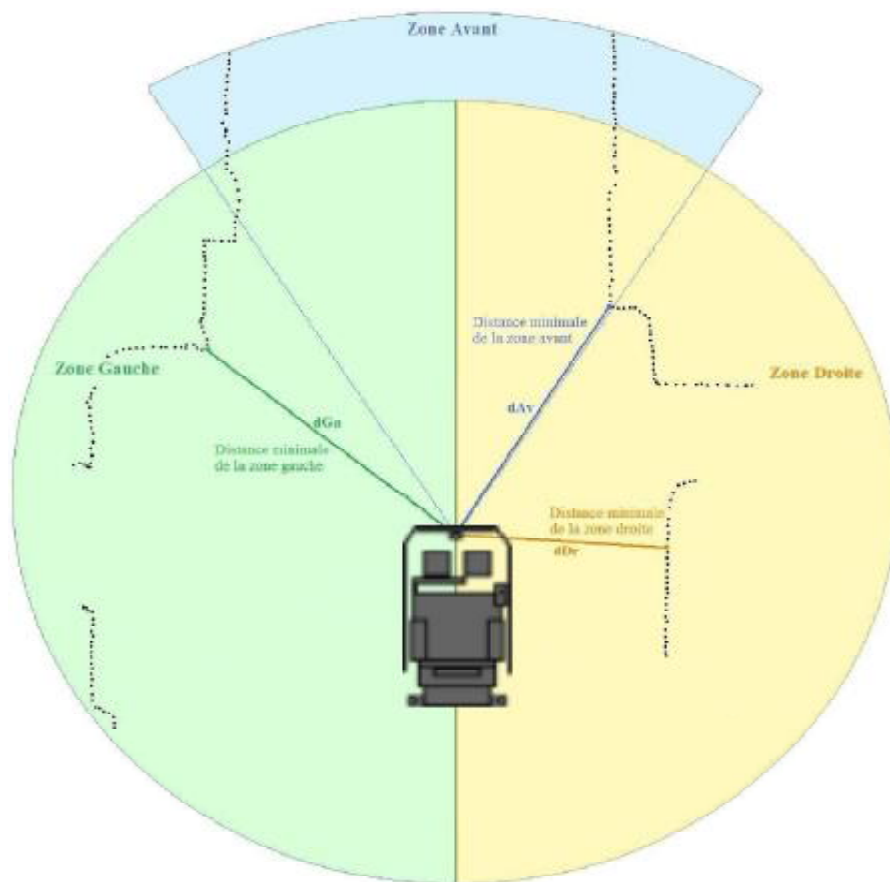


Figure. IV.3 : Détermination des distances significatives du suivi de mur.

IV-8_ Détermination du point cible

Plusieurs paramètres doivent être déterminés afin de mettre en œuvre le suivi du mur. Tout d'abord, il est nécessaire de définir la distance de sécurité, nommée , que le fauteuil doit maintenir avec le mur. Celle-ci est variable et doit s'adapter à l'environnement. Ensuite, il faut définir la succession de points cibles

qui permettront d'obtenir une trajectoire de suivi confortable. Tous ces paramètres sont déterminés à partir des trois distances significatives , et .

•Distance de sécurité

La distance de sécurité dépend de la largeur du fauteuil et de l'espace disponible dans l'environnement. En effet, lorsque l'espace emprunté par le fauteuil est restreint, il est nécessaire de s'approcher du mur suivi pour ne pas entrer en collision avec un mur opposé. Par exemple, dans un couloir, s'écarter trop du mur suivi revient à coller le mur opposé. La distance de sécurité doit donc varier pour s'adapter à l'environnement. Cela permet par exemple de centrer le fauteuil dans un couloir étroit, ou, d'approcher le fauteuil près du mur lorsque l'on croise une personne dans un couloir. Sa plage de variation s'étend d'une valeur maximale lorsque l'espace est libre, à une valeur minimale quand le passage emprunté est restreint. Ces deux limites sont déterminées en fonction de la taille du fauteuil. Ainsi, est fixée à 40cm, ce qui correspond à la demi-largeur du fauteuil (les distances sont mesurées à partir de l'axe en y du repère global) avec une marge de sécurité d'environ cinq centimètres et est choisie à 80cm, ce qui correspond à un peu plus de la largeur du fauteuil (afin de laisser un espace confortable pour manœuvrer, sans pour autant être trop loin du mur suivi). La variation de ne doit être ni trop rapide sous peine de réagir trop violemment à l'environnement, ni trop lente pour éviter des collisions. Pour la déterminer, nous utilisons la distance significative de la manière suivante. Si est inférieure à la distance de sécurité précédente, signifiant que le passage emprunté est moins large qu'à l'instant précédent, alors la distance de sécurité est diminuée progressivement jusqu'à sa valeur minimale. Ensuite, si le passage s'élargit à nouveau, la distance de sécurité est augmentée progressivement jusqu'à sa valeur maximale. Pour cela, à chaque itération des mesures, un incrément, nommée Δ , est ajouté ou enlevé à la distance de sécurité. Il est choisi empiriquement à 10mm de manière à éviter un changement brutal de direction et permet de réduire suffisamment rapidement la distance de sécurité pour éviter une collision à l'approche d'un obstacle du côté opposé au suivi. La détermination de à partir de est décrite par l'algorithme (IV.1). [14]

Si $> (- 1)$ Alors

Si $<$ Alors $() = (- 1) + D$

Si $>$ Alors $() =$

Sinon

Si $>$ Alors $() = (- 1) - D$

Si $<$ Alors $() =$

IV-9_ le système de navigation propose :

Afin de contrôler le mouvement du fauteuil, un module de détection d'obstacles et deux contrôleurs de type Mamdani ont été conçus et mis en œuvre. La figure 4 présente la structure de base du système de navigation composé d'un module de détection d'obstacles, un contrôleur flou de navigation libre et d'un contrôleur flou d'évitement d'obstacles. Cette structure permet de déterminer en temps réel l'angle de braquage à assigner au fauteuil roulant pour lui permettre de naviguer de façon autonome dans son environnement.

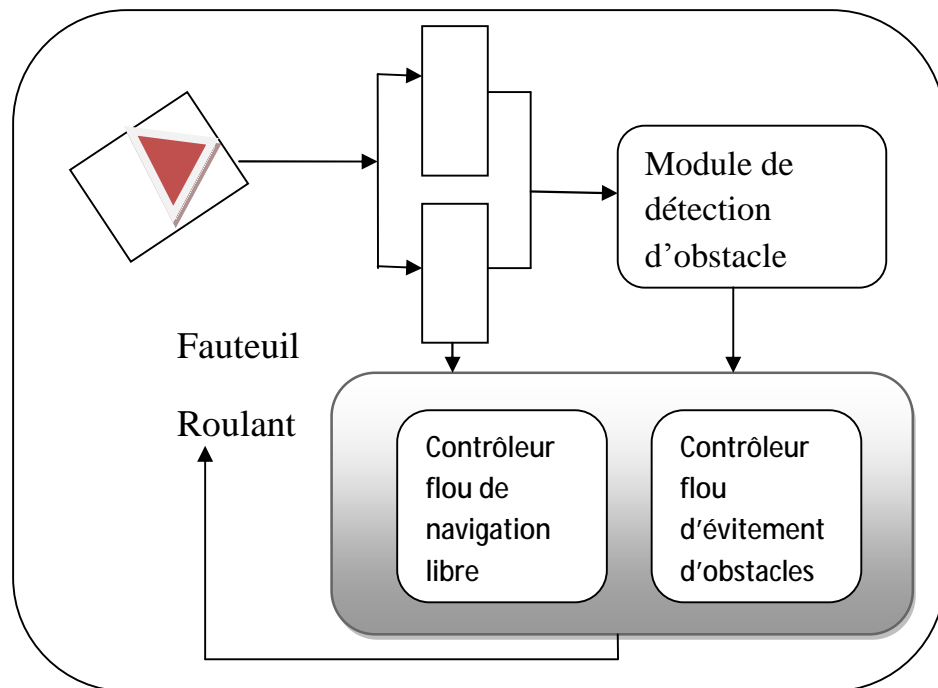


Figure IV.4 Structure de base du système de navigation proposé

IV-9-1_ Module de détection d'obstacles

Nous avons décomposé le champ global de perception du fauteuil roulant en trois secteurs de détection. Chaque secteur comporte un capteur ultrason pour obtenir une plus grande précision relative à la position des obstacles par rapport au fauteuil roulant. Ces secteurs sont : Latéral Négatif : champs latéral négatif du fauteuil roulant.

Dans Avant : champs avant du fauteuil roulant. Latéral Positif : champs latéral positif du fauteuil roulant .

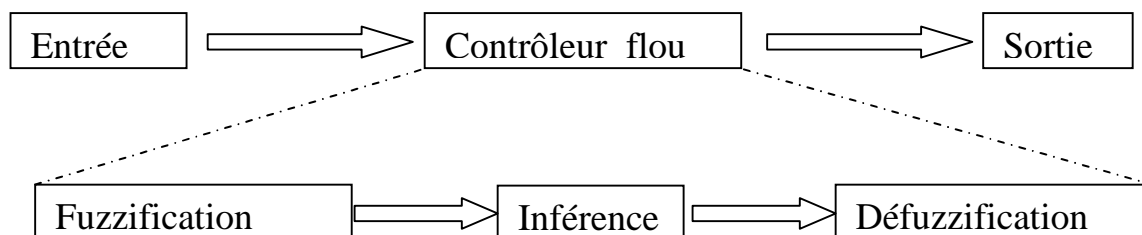
Ce module chargé de la détection d'obstacles et la possibilité de collision dans les trois principaux secteurs. Il acquiert les informations relatives à l'état actuel de l'environnement (q l'angle entre l'axe portant le point obstacle et le centre de repère et l'axe du fauteuil roulant), puis il réalise un balayage de façon continue afin de déterminer en temps réel les obstacles détectés dans les différents champs de perception qui sont Latéral Négatif, Dans Avant et Latéral Positif[25].

IV-9-2_ Contrôleur flou de navigation libre

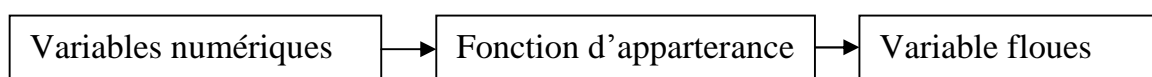
Si le fauteuil roulant ne reçoit aucune information de ses capteurs au cours de son déplacement, il considère que le chemin est libre, donc dans cette situation le comportement Aller vers la cible est la plus approprié. Le contrôleur reçoit comme entrées q l'angle entre la cible et le fauteuil roulant et renvoie en sortie la commande, qui correspond au changement de direction du fauteuil roulant.

La structure de base du contrôleur flou comporte trois parties la Fuzzification, l'inférence et la défuzzification. Nous allons décrire brièvement dans ce qui suit chaque composant[25].

IV-10_ Configuration interne d'un contrôleur flou



•Fuzzification

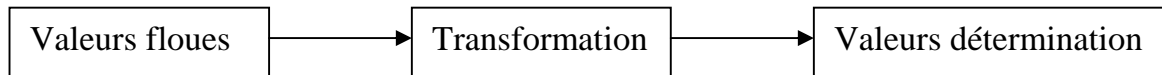


Règles floues $S_i (E_1 \text{ est } A_1) \text{ et ou } (E_2 \text{ est } A_2) \text{ Alors } \dots\dots\dots S \text{ est } A$

L'opérateur ET correspond à la formation du minimum ou produit.

L'opérateur OU correspond à la formation du maximum ou somme[24].

· Défuzzification



Méthode généralement utilisée est le centre de gravité[24].

IV-11_Conclusion

L'évitement d'obstacles se fait allusion aux méthodologies de formation de chemin au fauteuil roulant pour surmonter les obstacles inattendus. Le mouvement résultant dépend de l'emplacement réel du fauteuil roulant et sur les lectures de détecteurs. Il y a une variété riche d'algorithmes pour l'évitement d'obstacles de la déplanification fondamentale aux changements réactifs de la stratégie de contrôle.

Les techniques proposées diffèrent sur l'utilisation de données sensorielles et sur les stratégies de contrôle du mouvement pour surmonter les obstacles.

Chapitre

05

*Application et
résultats de
simulation*

V-1_ Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter notre travail en utilisant le logiciel MATLAB, qui consiste à donner au fauteuil roulant une certaine autonomie, qui apparaisse dans l'habilité de se mouvoir d'un point initial vers une cible, en évitant les obstacles statique.

Pour cela, on a choisi de suivre les organigrammes principaux, présentés dans le chapitre précédent. C'est la méthode de déformation de trajectoire qu'on a jugée la plus convenable donc notre cas pour raison de sa souplesse avec un environnement de type route et sa réactivité qui consiste d'agir a tout changement éventuelle dans l'environnement ainsi que la facilite des calcules et la possibilité de l'introduire en temps réels.

V-2_Fonctionnement du système proposé

Si le fauteuil ne reçoit aucune information de ses capteurs au cours de son déplacement, il considère que le chemin est libre c'est-à-dire aucun présence des obstacles, donc dans cette situation le fauteuil se déplace vers la cible jusqu'à ce que un obstacle soit détecté par l'un des capteurs dans l'un des champs de perception précédemment motionné. est modifié par le contrôleur flou d'évitement d'obstacle de telle sorte que le fauteuil freine d'autant plus qu'il est loin de l'obstacle. Une trajectoire est représentée comme un ensemble de points de passage reliant le point de départ au point d'arrivée.

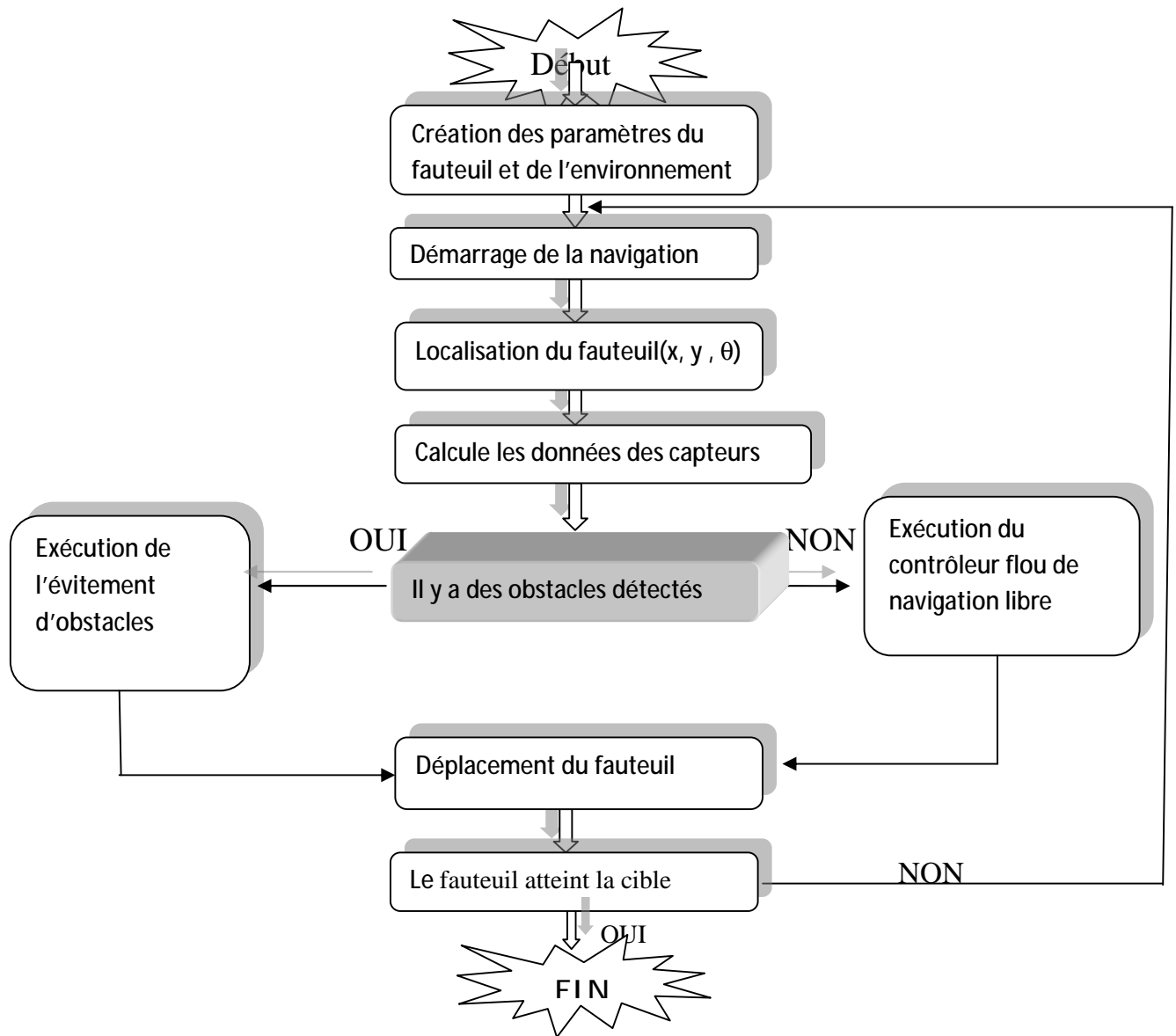


Figure V-1_ L'architecture fonctionnelle du système proposé

V-3 _ Organigramme de programme principal

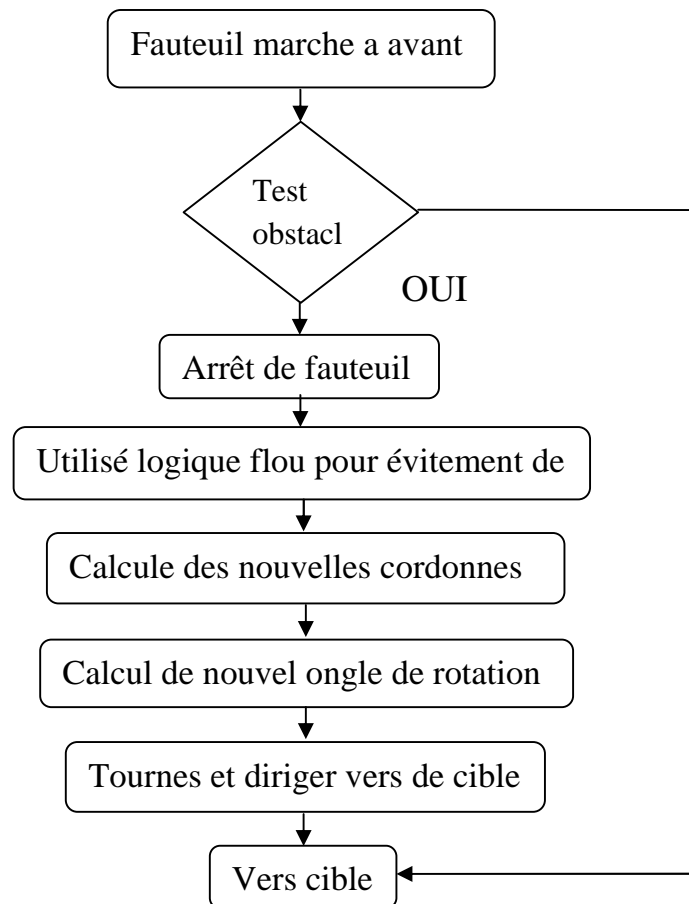
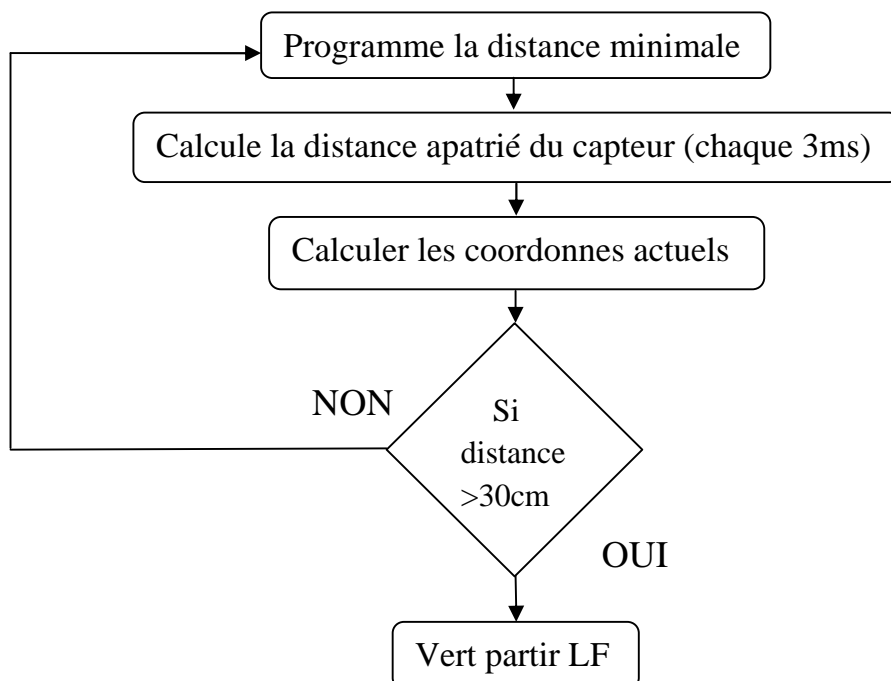
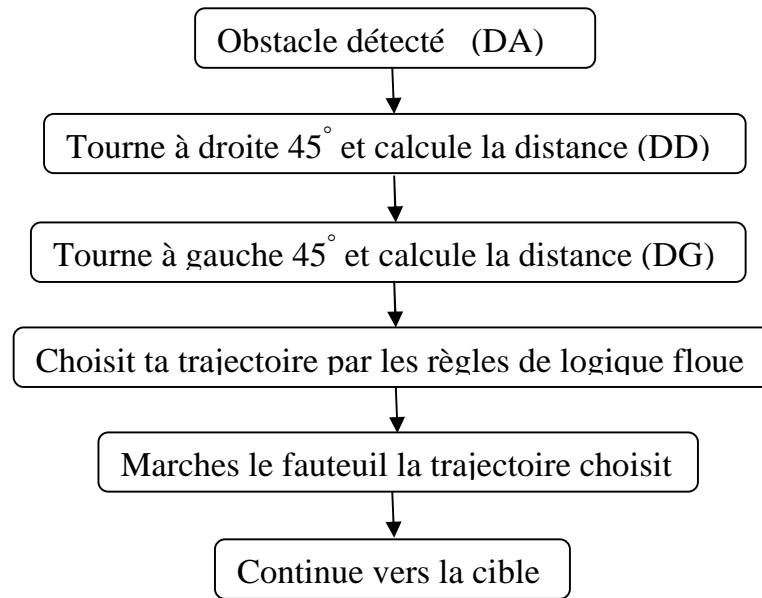


Figure V.2 : Organigramme de détection d'obstacle



V-4_ Organigramme d'évitement d'obstacle avec logique floue



V-5_ Résultats de simulation

Dans cette phase, nous présenterons les résultats de simulation de notre système en utilisant MATLAB qui est un environnement de travail complet.

Aller vers cible

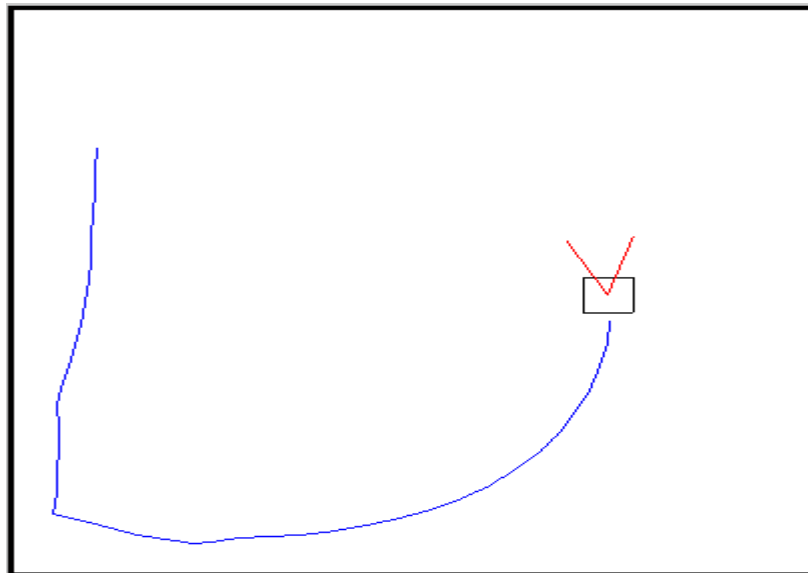


Figure V.3 Navigation libre avec la cible devant le fauteuil roulant (il n'y a pas d'obstacle)

En cas d'absence d'obstacles et si la cible est en face du fauteuil roulant, la trajectoire décrite lors du déplacement de notre fauteuil roulant peut être classée dans la catégorie de trajectoire rectiligne comme le montrent les figures ci-dessous.

A- Présence d'un seul obstacle :

On va commencer notre simulation en présence d'un seul obstacle, performances de cette technique :

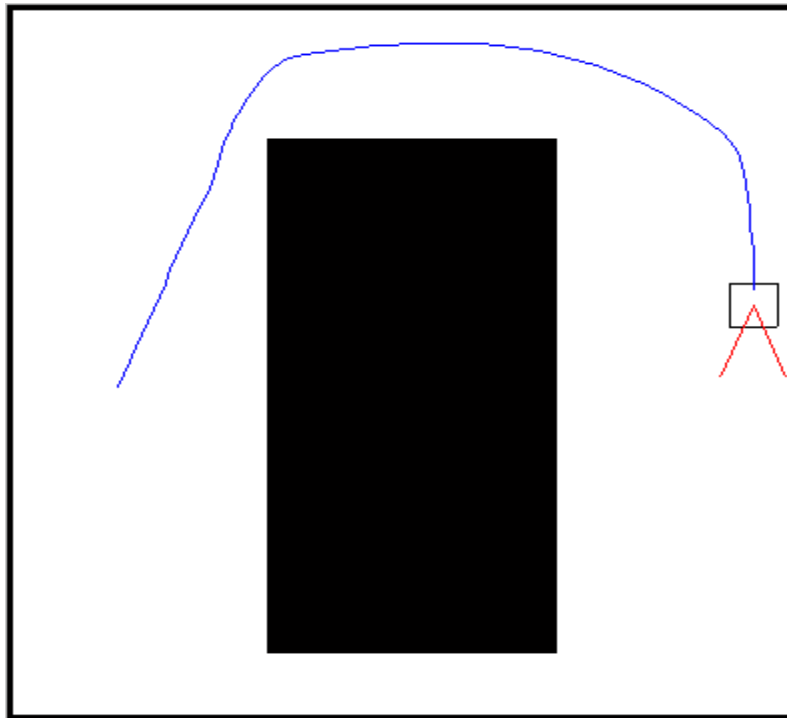


Figure V.4 Présence d'un seul obstacle

D'après la figure ci-dessus on remarque que le fauteuil roulant se dirige vers le but avec une trajectoire de forme rectiligne qui a pratiquement l'allure d'une droite et cela suite à la commande imposée. Cependant quand il arrive à l'obstacle, il dévie avec un certain angle de sa trajectoire pour éviter la collision avec l'obstacle puis il suit sa trajectoire vers le but sous forme d'une droite. Ce comportement répond bien à l'influence de la technique proposée.

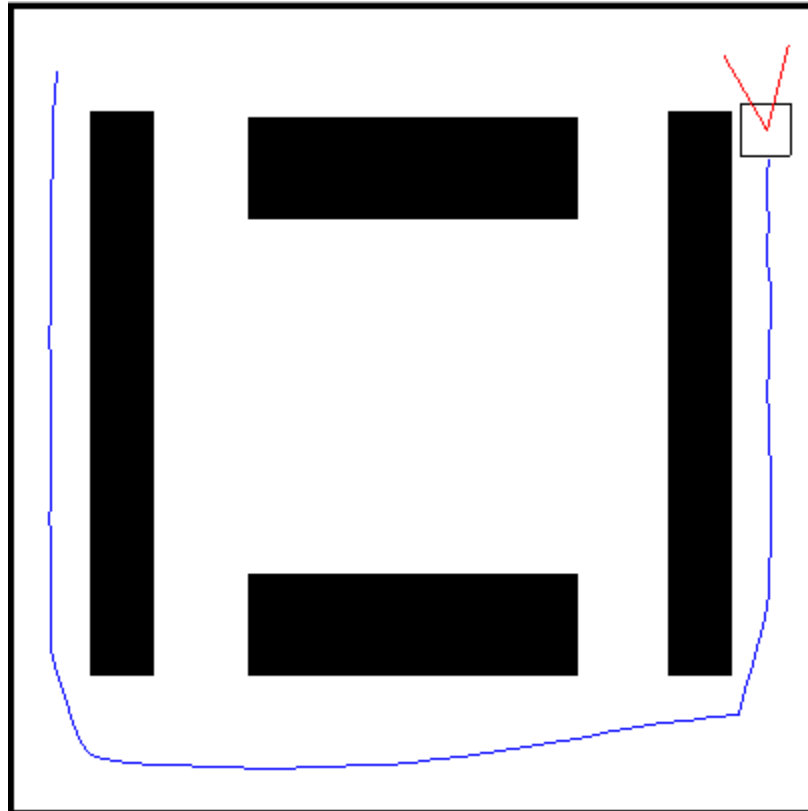


Figure V.5: Présence de quatre obstacles

A partir de la figure ci-dessus on constate que le fauteuil roulant suit une trajectoire de forme rectiligne qui peut être vue comme un ensemble de segment de droites pour arriver au but sans collision avec les trois obstacles, ce qui interprète l'efficacité de cette technique.

C- Présence de plusieurs obstacles :

On suppose que notre environnement d'évolution contiens six obstacles, ces derniers gênent le fauteuil roulant dans son déplacement du point de départ a l'arrivée au but.

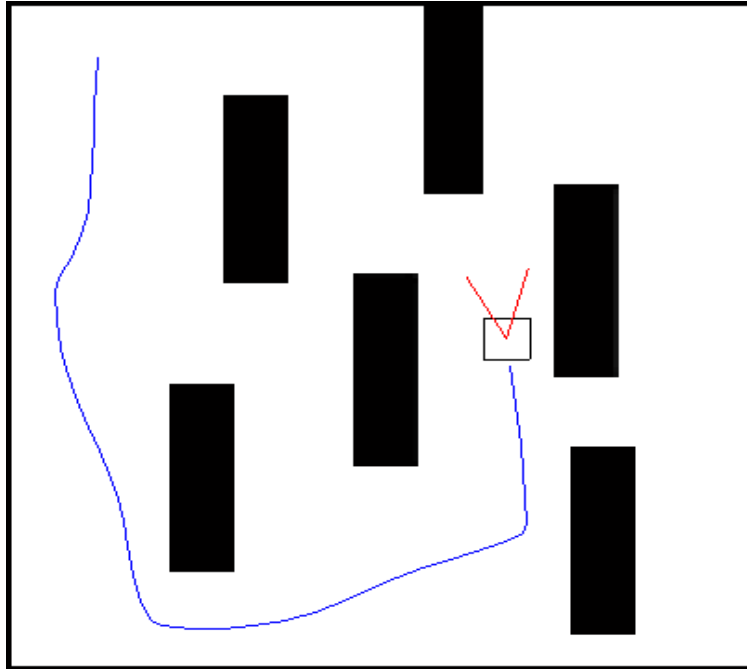


Figure V.6: Présence de 6 obstacles

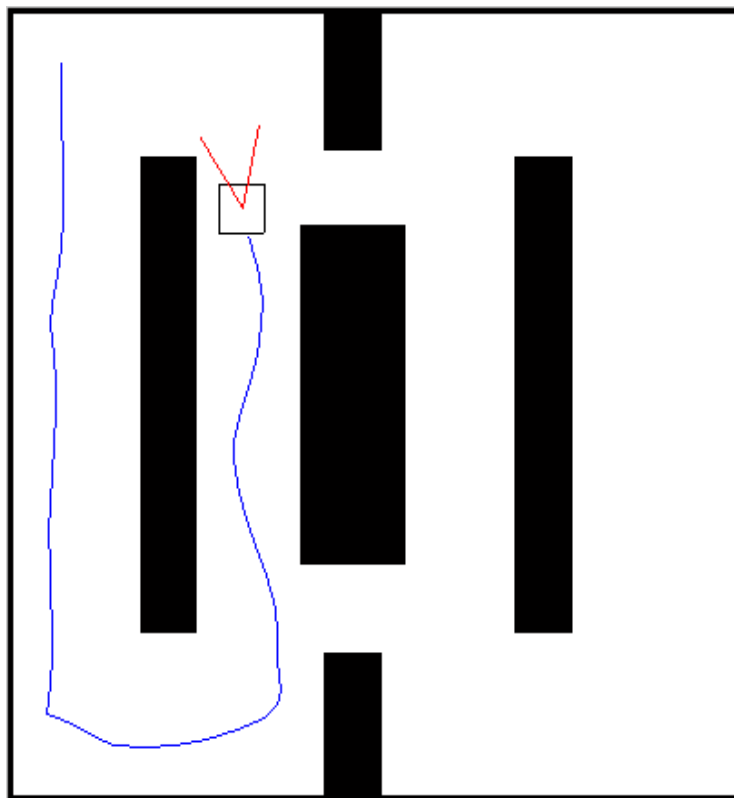


Figure V.7: Présence de 6 obstacles

Les figures ci-dessus présentent quelques environnements d'évolution et les trajectoires parcourus par notre fauteuil roulant, ce dernier évite carrément tous les obstacles et tend vers le but en suivant une trajectoire quelconque.

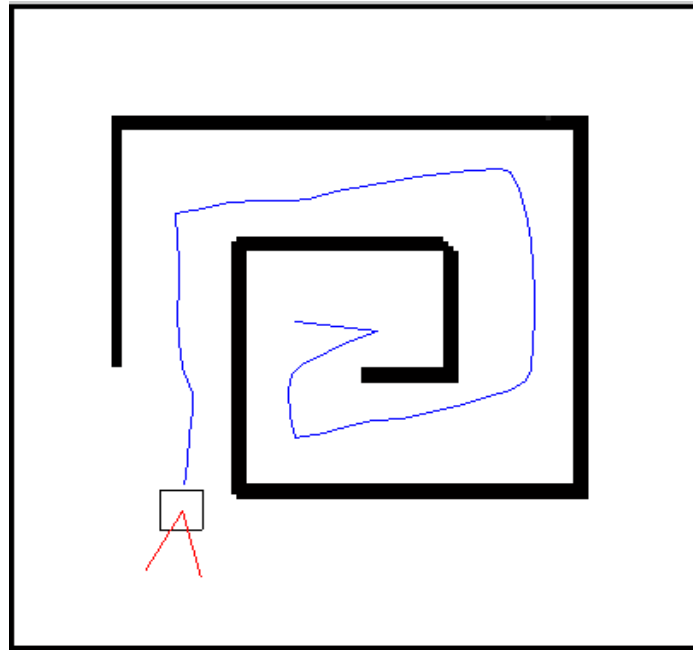


Figure V.8: Présence d'un obstacle spirale.

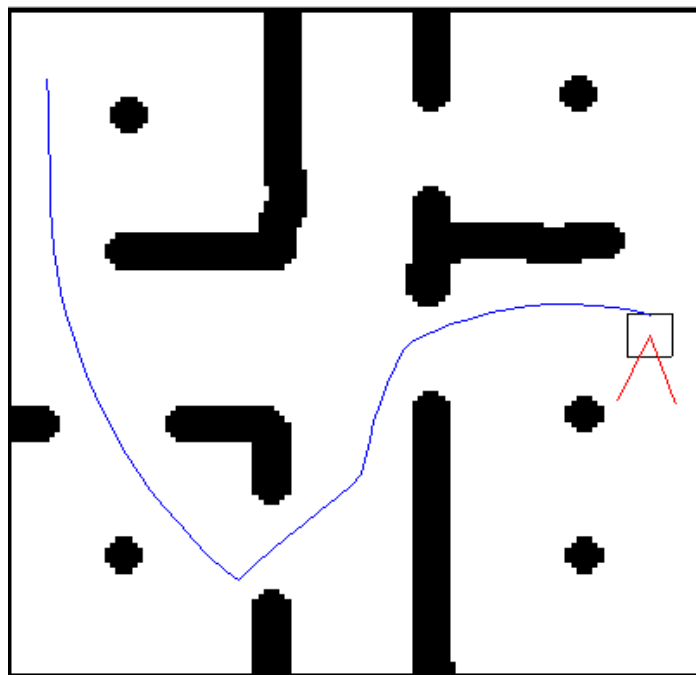


Figure V.9: Présence le plusieurs obstacles

V.6- Conclusion

Dans se chapitre, nous avons présenté des résultats de simulation sur des situations particulières de l'environnement. Les résultats obtenus nous ont permis de visualiser la trajectoire suivie par le fauteuil roulant tout en évitent les obstacles pour atteindre son but.

Ceci nous permet de conclure que le système de navigation et de perception proposé ont données des résultats acceptables.

Conclusion général

Conclusion Générale

Le problème de navigation avec évitement d'obstacles, pour un fauteuil roulant, est l'un des plus récents problèmes de la robot mobile, ce qui a influencé sur la disponibilité de la documentation traitant ce problème. Par conséquent, la phase de recherche bibliographique de notre projet nous a requis beaucoup d'effort et de temps.

Plusieurs recherches ont été faites pour résoudre ce problème, certaines sont basées sur une approche géométrique alors que d'autre sont basées sur connaissance humaine dans un souci de simulation du raisonnement humain. Dans ce mémoire, nous avons essayé d'apporter une solution à ce problème pour le cas d'un fauteuil roulant électrique évoluant dans un environnement connue.

La méthode adoptée rentre dans le cadre des méthodes sur la connaissance. Elle repose sur la définition d'une manœuvre. L'idée de base est d'atteindre les composants du but final (position finale)

Notre travail est basé sur l'utilisation de la logique floue, pour la commande du fauteuil roulant et aussi dans la l'étape d'évitement d'obstacle. Les résultats obtenus en simulation sont acceptables et encourageants surtout pour des environnements bien connus.

Le travail présenté dans ce mémoire pourra être amélioré. Pour cela nous pensons qu'il serait très intéressant de reprendre ce travail en faisant doter le fauteuil roulant par un bon dispositif de perception comme une caméra ou plusieurs capteurs pour qu'il puisse avoir plus d'information sur son environnement d'évolution, et de généralisé l'approche pour n'importe quel type d'environnement,

Résumé :

Durant les dernières années, les fauteuils roulants ont connus une grande importance d'utilisation par les gens handicapés, ceci a mené les chercheurs dans le domaine de la robotique d'effectuer plusieurs recherches pour assurer le soulagement de ces gens.

Des différentes techniques de contrôle ont été proposées et elles sont l'objet de recherches pour résoudre les problèmes de commande de mouvement et de déplacement des fauteuils roulants, ces techniques sont basées sur des approches de contrôle intelligentes telles que la logique floue et les réseaux neuronaux. Ces approches nous permet d'avoir un fauteuil roulant intelligent, qui assure le déplacement des gens handicapés ont utilisent un minimum d'effort.

Mots clés : robotique mobile, fauteuil roulant électrique, logique floue, réseaux de neurones artificiels, suivie de trajectoire.

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Modeling and control of an electric wheelchair with joystick on the wheel system (university of twenty) March 2006
- [2] Sauret Christophe. (Cinétique et énergétique de la propulsion en fauteuil roulant manuel). Thèse de doctorat en information 2010, Université de plaise pascal.
- [3] Navigation semi-autonome d'un fauteuil roulant franchissement de porte (université de Rennes)
- [4] Arciniegas (J.I.), Cios (K.J.) et Eltimashi (A.H). Fuzzy Inference, Radial Basis Functions and Control of Flexible Robotic Manipulators. *In: Proc. Of International Conference on Artificial Neural Networks*, 2d. par Gielen (S.) et Kappen (B.). pp.301-304.-Amsterdam, The Netherlands, septembre 1993.
- [5] Navigation d'un robot mobile en environnement inconnu utilisant les champs potentiels artificiels. Montréal, le 26/11/2009(Joe Sfeir)
- [6] A. Fattouh. 'Identification of the wheelchair VAHM', Rapport interne LASC, University de Metz, 2005.
- [7]F. Fuji and K.Wada. "For Better Maneuverability of the Electrically Powered Wheelchair a Pilot Model Based Approach". In: Proc. IEEE Int. Symp. On Micromechatronics and Human Science, 2003.
- [8] F. Fuji, K. Wada. "Analysis on the Manual Control Characteristics of the Human Pilot During the Operation of the Powered Wheelchair". Advanced Robotics, 2005.
- [9]<http://www.hmcproducts.com/fileadmin/PRODUCTS/ProductCatalogue/>
- [10] M. Sahnoun. "Conception et Simulation d'une Commande à Retour d'Effort pour Fauteuil Roulant Electrique". Thèse de Doctorat, Metz, 2007.
- [11] Bouslama F., Ichikawa A., Fuzzy control rules and their natural control laws, *Fuzzy Sets and systems*, 1992.
- [12] Chang S., Zadeh L.,- On Fuzzy Mapping and Control, *IEEE Trans. On Systems, Man and Cybernetics*, SMC 2, pp.30-34, 1972
- [13] Chen (S.), Cowan (C.F.N.) et Grant (P.M.). Orthogonal Least Squares Learning Algorithm for Radial Basis Function Networks. *IEEE Transactions on Neural Networks*, mars 1991, ISSN: 1045-9227.
- [14] Krzysztof K.- Modelling and identification in robotics :*Advances in Industrial Control*. Springer.1998.
- [15] Glorennec (P.Y.). Un réseau Neuro-flou évolutif. *In : Proc. Of the Fourth International Conference on Neural Networks and Applications*, Nîmes, novembre 1991.
- [16]Glorennec (P.Y.).- Logique Neuro-Floue. *In : Actes des Troisièmes journées Nationales : Les applications des ensembles flous*, Nîmes, France, octobre 1993.
- [17] H.Ghodbane'Navigation d'un robot mobile en presence d'obstacle'. Memoires de magister, 2001.

Bibliographie

- [18] Goto (Y.) ET Stentz (A.).- Mobile Robot Navigation: The CMU System. *IEEE Expert*, 1987.
- [19] Lee (M.A.) Takagi [H.).- Interacting Design Stages of Fuzzy Systems using Genetic Algorithms. In: Proc. Of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems, San Francisco, CA, USA, mars 1993.
- [20] Takagi (T.) et Sugeno (M.). “Fuzzy Identification of Systems and *Its Applications to Modeling and Control*”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, janvier 1985 ISSN 9472.
- [21] Zadeh L.,-Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes-I, *Information Sciences*, 8, pp.199-249, 1975.
- [22] Sugeno (M.) et Yasukawa (T.).- A fuzzy logic based approach to qualitative modeling, In : *IEEE transaction Fuzzy Syst*, pp. 7 31, 1993.
- [23]Olivier LEFERBRE « navigation autonome sans collision pour robot mobile non holonomes » thèse doctorat institut national poly technique de Toulouse France 12juillet 2006.
- 23] Real time obstacle avoidance for manipulators and mobile robot international journal of robotics research 1986.
- [24]Berdiaouch Fatah navigation visuelle et évitement obstacle Uni de Sétif mémoire stennue de : 24 /02/2010.
- [25] A.fatmi; A.Al .yahmadi, «a fuzzy logic based navigation of a robots mobile” *International journal applied mathematics and computer sciences* 1,2 spring 2005.

Liste des figures

Figure I-1	Fauteuil roulant	4
Figure I-2	Stephen Farfler et le premier roulant permettant l'autonomie de son Utilisateur(1655).	6
Figure I-3	à gauche, fauteuil à tournique utilisé par George Couthon (1755-1794)et à droite, modèle d'Everest & Jennings(1933)	7
Figure I-4	un fauteuil roulant manuel	8
Figure I-5	fauteuil roulant électrique	11
Figure I-6	Les différents types de fauteuils (A: Fauteuil d'intérieur, B: Fauteuil d'extérieur, C: Fauteuil verticalisateur, D: Fauteuil à hauteur variable)	12
Figure I-7	Fauteuil roulant utilisé dans le projet APA sh. Nous pouvons distinguer la caméra sur l'avant gauche du fauteuil, ainsi que le boîtier permettant de contrôler le fauteuil par à l'arrière.	13
Figure I-8	Encodeur	14
Figure I-9	Figure I-9 Capteurs de collision	18
Figure I-10	Sonars	19
Figure I-11	Laser Range Finder	20
Figure I-12	Caméra PTZ	20
Figure II-1	centre instantané de rotation (ICR)	23
Figure II-2	La géométrie du fauteuil roulant	24
Figure II-3	configurations de robots mobiles typiques	25
Figure II-4	Système de référence pour l'analyse de la dynamique du fauteuil	27
Figure II-5	Système de référence pour l'analyse de la dynamique du fauteuil	28
Figure III-1	Structure d'un réglage multi variable par logique floue	33
Figure III-2	Configuration interne d'un régulateur par logique fl	33

	floue.	
Figure IV-1	Illustration de potentiels primitifs dont la combinaison guide les déplacements du fauteuil. Le fauteuil se déplacera selon les lignes de courant	43
Figure IV-2	Histogramme de champs de vecteurs (a) Fenêtre active autour du robot dans laquelle sont mise à jour les probabilités d'occupation par les obstacles, (b) Histogramme polaire calculé à partir de la grille d'occupation. Les vallées libres d'obstacles sont déterminées afin de choisir une direction à suivre.	49
Figure IV-3	Détermination des distances significatives du suivi de mur.	51
Figure IV-4	Structure de base du système de navigation proposé	53
Figure V-1	L'architecture fonctionnelle du système proposé	58
Figure V-2	Organigramme de détection d'obstacle	59
Figure V-3	Navigation libre avec la cible devant le robot (il n'y a pas d'obstacle)	60
Figure V-4	Présence d'un seul obstacle	61
Figure V-5	Présence de quatre obstacles	62
Figure V-6	Présence de 6 obstacles	63
Figure V-7	Présence de 6 obstacles	63
Figure V-8	Présence d'un obstacle spirale.	64
Figure V-9	Présence le plusieurs obstacles	64

Liste des symboles

Symboles	Désignations
	Moment d'inertie du fauteuil autour de l'axe z (axe vertical)
	Moment d'inertie de l'armature (moteur + réducteur)
	Moment d'inertie d'une roue motrice
σ	Rapport de réduction (réducteur de vitesse)
M	Rapport de réduction (réducteur de vitesse)
	Masse d'une roue motrice
R	Rayon des roues motrices
L	Distance entre les deux roues motrices
	Coefficient du frottement visqueux des roulements moteurs
,	Couple fauteuil gauche et droit
,	Angle de rotation des roues motrices gauche et droite
,	Forces de réactions agissant sur les roues motrices causées par le frottement de surface de déplacement
,	Couple exercé sur le mouvement de rotation des roues
.	Vitesse de l'effecteur par rapport au repère de base
	L'angle d'obstacle
é	