

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département de Génie Électrique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de master en :

ELECTRONIQUE

OPTION : AUTOMATIQUE

THEME

Suivi de trajectoires d'un robot mobile par la logique floue

Présenté par :

- REDJRADJ Djillali
- KACIMI Fares

Dirigé par :

Mme S. MEZZAH

Membres du Jury :

Mr HADDAR

Mr SABI

2013/2014

Remerciements

*Toute la gratitude et le merci à Dieu notre créateur qui nous a donné
La force pour effectuer et achever ce travail.
Ainsi nos parents qui nous aident.*

*Nous tenons à remercier en premier lieu et très chaleureusement
notre promoteur :*

Madame le professeur MEZZAH Samia

*Pour avoir accepté de diriger notre travail, pour ses précieux
conseils,
Pour son esprit d'ouverture et sa disponibilité. Grâce à lui,
Notre travail s'est déroulé.*

*Nous remercions toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de loin à la
Finalisation de ce travail, nous tenons à leur
Exprimer notre vive gratitude.*

*Enfin nos remerciements s'adressent aux membres de jury qui nous feront
L'honneur de juger notre travail.*

Djillali et Fares

Dédicaces

J'ai toujours *pensé* faire ou *offrir* quelque chose à mes parents en signe de reconnaissance pour tout ce qu'ils ont consenti des efforts rien que pour me voir réussir, Et voilà, l'occasion est venue.

A ceux qui m'ont donné la *vie*, symbole de beauté, et de fierté, de sagesse et de patience.

A ceux qui sont la source de mon *inspiration* et de mon *courage*, à qui je dois de l'*amour* et la *reconnaissance*,

☉ *A mes parents.*

☉ *A ma sœur et à mon frère, je vous réserve toujours une place dans mon cœur et mes pensées.*

☉ *A toute ma famille*

☉ *A mon binôme*

☉ *A tout mes amis*

☉ *A mes amis de la promo*

☉ *Et à tous ceux qui ont contribué à ma réussite.*

Djillali





Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À Celle à qui mon cœur depuis sa naissance n'a pas pu éprouver qu'amour et reconnaissance, à celle qui a donné un sens à mon existence en m'offrant une éducation digne de confiance

À ma chère Mère.

À mon père, pour son amour et son soutien moral depuis mon enfance.

Père merci.

À tout les membres de ma petite famille ; ma sœur : Linda et à mes frères : Lamine, Kamel, Walid et Nabil.

À mes meilleurs amis ,et tous les étudiants de la promo automatique 2014

Fares

Sommaire

Introduction générale	01
-----------------------------	----

Chapitre 01 : Généralités sur les robots mobiles

1.1 Introduction	04
1.2 Définition	04
1.3 Aperçu historique.....	06
1.4 Présentation générale des robots mobiles	08
1.5 Classification	09
1.6 Domaines d'application	10
1.7 Architecture des robots mobiles	10
1.8 Les robots mobiles à roues	11
1.8.1 L'unicycle.....	12
1.8.2 Le tricycle	12
1.8.3 Les véhicules (structures d'Ackerman).....	13
1.8.4 Robot à traction synchrone	13
1.9 La perception	14
1.9.1 Capteurs en robotiques mobile.....	14
1.9.1.1 Définitions d'un capteur	14
1.9.1.2 Classification des capteurs	15
1.9.1.3 Différents types de capteurs.....	16
1.10 La localisation	24
1.10.1 Localisation relative ou à l'estime	26
1.10.1.1 Odométrie directe	26
1.10.1.2 Odométrie indirecte	27
1.10.2 Localisation absolue	27
1.11 La navigation	27
1.12 Conclusion	29

Chapitre 02 : La logique floue et la commande

2.1	Introduction	31
2.2	Notions De Bases De La Logique Floue.....	31
2.2.1	La théorie des ensembles flous.....	31
2.2.2	Différence entre ensemble flou et ensemble booléen.....	32
2.2.2.1	Variables linguistiques.....	32
2.2.2.2	Définitions.....	33
2.2.2.3	Caractéristiques d'un ensemble flou.....	33
2.2.2.4	Opérations sur les ensembles flous.....	34
2.2.2.5	Le principe d'extension.....	35
2.3	La Commande En Logique Floue.....	36
2.3.1	Acquisition de la connaissance et écriture de la base de règles.....	36
2.3.2	Les étapes de la commande floue.....	37
2.3.2.1	Mise en forme des entrées, normalisation.....	39
2.3.2.2	Fuzzification.....	39
2.3.2.3	Traitement des prémisses composées.....	41
2.3.2.4	Inférence floue.....	41
2.3.2.5	Agrégation des règles.....	42
2.3.2.6	Défuzzification.....	44
2.3.2.7	Dénormalisation.....	46
2.3.3	Réglage, stabilité et robustesse d'un contrôleur flou	46
2.3.3.1	Réglage.....	46
2.3.3.2	Stabilité.....	47
2.3.3.3	Robustesse.....	50
2.4	Conclusion.....	50

Chapitre 03 : La conception du contrôleur flou

3.1. Introduction	52
3.2. Conception d'un contrôleur flou	53
3.2.1. Choix de la structure du contrôleur	54
3.2.2. Choix de la stratégie de fuzzification	54
3.2.3. Etablissement des règles d'inférence	56
3.2.4. Choix de la méthode d'inférence	56
3.2.5. Choix de la structure de défuzzification.....	57

Chapitre 04 : Application pour le suivi de trajectoires par un robot mobile

4.1. Introduction	59
4.2. Le robot mobile	59
4.2.1. Modélisation cinématique.....	60
4.2.1.1. Définitions	60
4.2.1.2. Roulement sans glissement	61
4.2.1.3. Centre instantané de rotation.....	64
4.2.1.4. Robot de type tricycle.....	64
4.3. La stratégie de poursuite	64
4.4. Le contrôleur conçu	67
4.5. Résultats de simulation	69
4.6. Conclusion	71
Conclusion générale	72

Liste des figures

Figure 1.1. *La tortue de Grey Walter (nommée "machina speculatrix" et surnommée Elsie) et une illustration de sa trajectoire pour rejoindre sa niche.*

Figure 1.2. *A gauche : Robot "Beast" de l'université John Hopkins dans les années 1960.*

A droite : Le robot Shakey de Stanford en 1969 a été une plate-forme de démonstration des recherches en intelligence artificielle.

Figure 1.3. *Le Stanford Cart date de la fin des années 1970. Le robot Hilare du LAAS a été construit en 1977.*

Figure 1.4. *Genghis, développé par Rodney Brooks au MIT au début des années 1990.*

Figure 1.5. *Robot mobile à commande différentielle.*

Figure 1.6. *Robot mobile de type unicycle.*

Figure 1.7. *Robot mobile de type tricycle.*

Figure 1.8. *Robot mobile de type voiture.*

Figure 1.9. *Robot mobile à traction synchrone.*

Figure 1.10. *Boucle de commande.*

Figure 1.11. *Gyroscope mécanique de Foucault.*

Figure 1.12. *Gyromètre Futaba à structure vibrante.*

Figure 2.1. *Ensemble booléen et ensemble flou*

Figure 2.2. *Une personne mesurant 1.36 m est petite avec un degré d'appartenance 0.4 et moyenne avec un degré de 0.6*

Figure 2.3. *Support, noyau, hauteur et α -coupe d'un ensemble flou.*

Figure 2.4. *Singleton flou.*

Figure 2.5. *Exemple de partition floue.*

Figure 2.6. *Structure de base d'un contrôleur flou.*

Figure 2.7. *Conversion numérique symbolique.*

Figure 2.8. *Exemple de fonctions d'appartenance.*

Figure 2.9. *Exemple de modificateurs linguistiques.*

Figure 2.10. *Illustration de la méthode de Mamdani.*

Figure 2.11. *Défuzzification par la méthode des hauteurs.*

Figure 2.12. *Variantes de la méthode des hauteurs.*

Figure 2.13 *Défuzzification par un centre de gravité.*

Figure 2.14. *Défuzzification par un centre des aires.*

Figure 2.15. *Défuzzification par un centre des maxima.*

Figure.3.1. *Procédure de conception de contrôleur flou.*

Figure.3.2. *Partition des entrées et de la sortie du contrôleur flou.*

Figure.3.3. *Fonctions d'appartenance de d*

Figure.3.4. *Fonctions d'appartenance de Θ_a*

Figure.3.5. *Fonctions d'appartenance de v*

Figure.3.6. *Fonctions d'appartenance de η*

Figure.3.7. *La surface de décision du contrôleur flou.*

Figure 4.1. *Structure du robot mobile.*

Figure 4.2. *Repérage d'un robot mobile.*

Figure 4.3. *Caractérisation du roulement sans glissement.*

Figure 4.4. *Paramétrage du robot mobile.*

Figure 4.5. *Principe de la poursuite.*

Figure 4.6. *Principe de la poursuite.*

Figure 4.7. *Structure du contrôleur conçu.*

Figure 4.8. *1^{er} essai de navigation du robot vers une cible*

Figure 4.9. *2^{eme} essai de navigation du robot vers une cible*

Figure 4.10. *3^{eme} essai de suivi de trajectoire du robot.*

Figure 4.11. *4^{eme} essai de suivi de trajectoire du robot.*

Liste des tableaux

Tableau 1.1. *Domaines d'application du robot mobile*

Tableau 2.1. Principales t-normes et t-conormes

Table 3.1. *La table des règles pour v*

Table 3.2. *La table des règles pour η*

Introduction générale

La robotique mobile cherche depuis des années à rendre une machine mobile autonome face à son environnement pour qu'elle puisse sans intervention humaine accomplir les missions qui lui sont confiées. Le spectre des missions que les roboticiens veulent voir accomplir par leurs machines est immense : exploration en terrain inconnu, manipulation d'objets, assistance aux personnes handicapées, transport automatisé, etc. De grand progrès ont été accomplis dans tous les domaines de la robotique : perception et modélisation de l'environnement, commande automatique des actionneurs, planification de mouvements, ordonnancement de tâches, gestion de l'énergie,...

Bien que la machine autonome parfaite, capable de s'adapter à de nombreuses situations et capable d'estimer ses possibilités d'actions, n'existe pas encore, des applications concrètes des techniques de robotique mobile ont été réalisées. Ces applications très remarquables ne sont toutefois que des cas particuliers pour lesquels des solutions plus ou moins spécifiques ont été développées. En effet, les problèmes posés par la navigation autonome d'un véhicule sont très nombreux et font l'objet de plusieurs recherches. En simplifiant, une machine autonome peut être définie comme étant l'association d'une intelligence artificielle avec des capacités de perception et de modélisation de son environnement et de son propre état ; elle doit être aussi dotée de capacités d'actions sur son propre état et sur son environnement.

Toutes ces capacités sont nécessaires mais chacune amène ses difficultés. Alors, pour progresser, les chercheurs de chaque spécialité isolent les problèmes, proposent des solutions et les comparent. Les robots d'expérimentations des laboratoires deviennent alors les cobayes. On implante sur leurs calculateurs un planificateur de mouvement à réseau probabiliste, on connecte sur leurs bus d'acquisition une paire de caméras ou un capteur télémétrique laser ou autre système de perception et on étudie les possibilités d'actions obtenues.

Introduction générale

Dans ce travail, on s'intéresse à la navigation d'un robot mobile à roues. Plus précisément au suivi d'une trajectoire par un robot mobile tricycle. Dans le cas idéal d'un environnement exactement modélisé et où la cinématique du robot est parfaitement maîtrisée les étapes de la navigation se résument simplement comme étant la planification d'une trajectoire puis son exécution. Mais alors pourquoi nos voitures ne sont-elles pas entièrement automatiques ?

Dans la réalité nous faisons, sans nous en rendre compte, des actions extrêmement complexes lorsque nous nous déplaçons : nous estimons notre position, nous analysons en permanence les objets qui nous entourent et nous nous mouvons ; c'est dans cette optique que les robots mobiles sont développés.

Pour imiter les compétences d'un bon conducteur d'automobile, la logique floue est la technique la plus convenable pour la représentation des connaissances imprécises d'un expert. Notre travail concerne la conception d'un contrôleur flou pour la poursuite de trajectoire par un robot mobile d'intérieur. Notre intérêt est concentré sur l'optimisation du temps de traitement pour conserver l'aspect temps réel du contrôleur conçu. Cela nous a mené à proposer une méthode basée sur la logique classique sur laquelle on a introduit deux modifications pour rendre le raisonnement en logique traditionnelle plus souple et imiter le comportement d'un contrôleur flou.

Ce mémoire est organisé comme suit : dans le chapitre 1, nous allons faire un tour rapide dans le monde de la robotique mobile pour examiner en bref les différentes parties constitutives d'un robot mobile. Le chapitre 2 est consacré à la logique floue et à la commande floue, où, nous exposerons les principales théories de la logique floue nécessaires à la conception d'un contrôleur. La méthode générale de conception du contrôleur flou est présentée dans le chapitre 3. Dans le chapitre 4, nous présenterons l'application réalisée et les résultats de simulation de quelques trajectoires aléatoires que le robot doit suivre. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale récapitulant ce qui a été fait et exposant les perspectives de notre travail.

Chapitre 01 :

Généralités sur les robots mobiles

1.1. Introduction

De manière générale, on regroupe sous l'appellation *robots mobiles* l'ensemble des robots à base mobile, par opposition notamment aux robots manipulateurs. L'usage veut néanmoins que l'on désigne le plus souvent par ce terme les robots mobiles à roues. Les autres robots mobiles sont en effet le plus souvent désignés par leur type de locomotion, qu'ils soient marcheurs, sous-marins ou aériens.

On peut estimer que les robots mobiles à roues constituent la grande partie des robots mobiles. Historiquement, leur étude est venue assez tôt, suivant celle des robots manipulateurs. Leur faible complexité en a fait de bons premiers sujets d'étude pour les roboticiens intéressés par les systèmes autonomes. Cependant, malgré leur simplicité apparente, ces systèmes ont soulevé un grand nombre de problèmes difficiles. De ce fait, les applications industrielles utilisant des robots mobiles sont rares. Cela est dû au fait que, contrairement aux robots manipulateurs qui travaillent exclusivement dans des espaces connus et de manière répétitive, les robots mobiles sont destinés à évoluer de manière autonome dans des environnements dynamiques qui peuvent ne pas être connus.

Néanmoins, l'intérêt indéniable de la robotique mobile est d'avoir permis d'augmenter considérablement les connaissances sur la localisation et la navigation des robots mobiles autonomes.

1.2. Définitions

En général, on peut définir un robot mobile comme étant une machine équipée de capacités de perception, de décision et d'action qui lui permettent d'agir de manière autonome dans son environnement en fonction de la perception qu'il en a. [1]

En particulier, *un robot mobile autonome* est un système mécanique, électronique et informatique complexe mettant en œuvre :

- Un ensemble de capteurs (extéroceptifs et/ou proprioceptifs) :

Les capteurs extéroceptifs ont pour objectif d'acquérir des informations sur l'environnement proche du véhicule. Les capteurs proprioceptifs fournissent des données sur l'état interne du robot (telles que sa vitesse ou sa position).

- Un ensemble d'effecteurs :

L'objectif du robot est d'atteindre un objectif dans son environnement en évitant les obstacles. Le problème que l'on doit résoudre est de déterminer en fonction des données capteurs quelles commandes doivent être envoyées à chaque instant au robot pour atteindre cet objectif. Ces effecteurs ont comme but de permettre au robot d'évoluer dans un monde prévu à l'origine pour l'homme. Les plus courants sont les systèmes à roues, mais il existe aussi des robots à chenilles, à pattes ou se déplaçant par reptation.

Le type de locomotion définit deux types de contraintes :

- Les contraintes cinématiques, qui portent sur la géométrie des déplacements possibles du robot.
- Les contraintes dynamiques, liées aux effets du mouvement (accélérations bornées, vitesses bornées, présence de forces d'inertie ou de friction)

Selon sa cinématique, un robot est dit :

- **Holonome**, s'il peut se déplacer instantanément dans toutes les directions.
- **Non-holonome**, si ses déplacements autorisés sont des courbes dont la courbure est bornée.

1.3. Aperçu historique

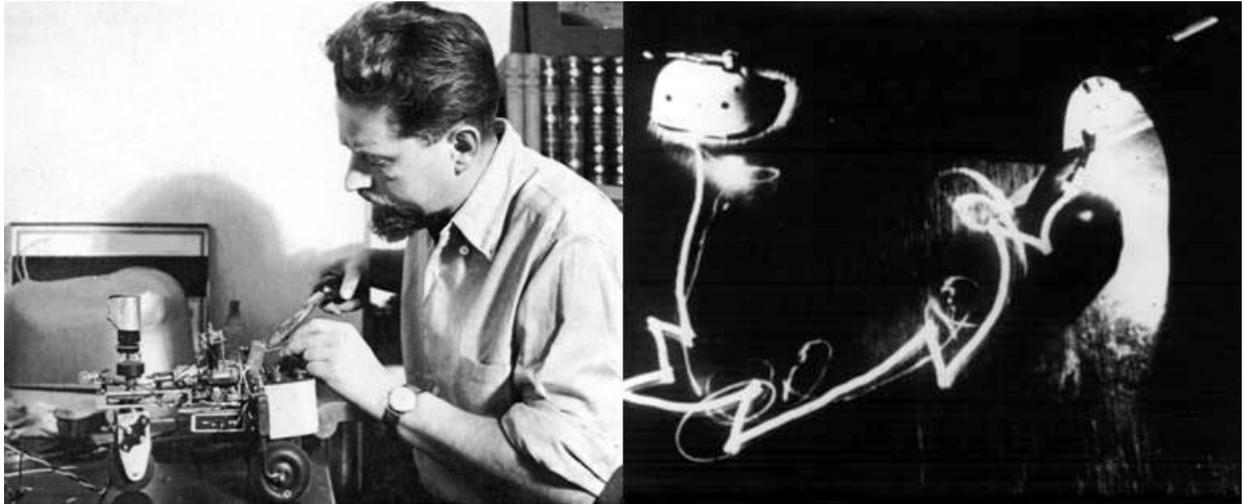


Figure 1.1. La tortue de Grey Walter (nommée “machina speculatrix” et surnommée Elsie) et une illustration de sa trajectoire pour rejoindre sa niche.

La Tortue construite par Grey Walter dans les années 1950 (Figure 1.1), est l'un des premiers robots mobiles autonomes. Grey Walter n'utilise que quelques composants analogiques, dont des tubes à vide, mais son robot est capable de se diriger vers une lumière qui marque un but, de s'arrêter face à des obstacles et de recharger ses batteries lorsqu'il arrive dans sa niche. Toutes ces fonctions sont réalisées dans un environnement entièrement préparé, mais restent des fonctions de base qui sont toujours des sujets de recherche et de développement technologiques pour les rendre de plus en plus génériques et robustes.

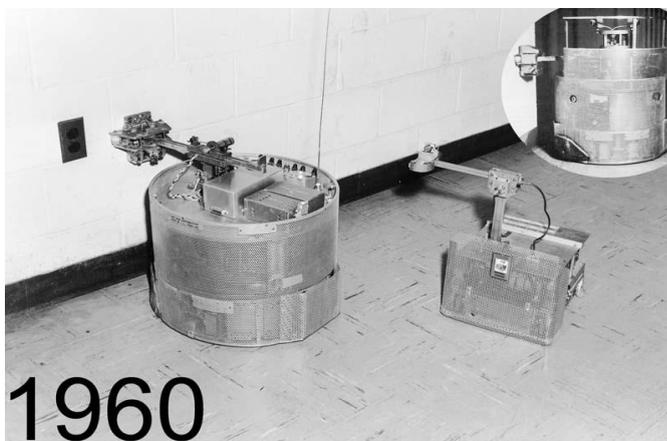
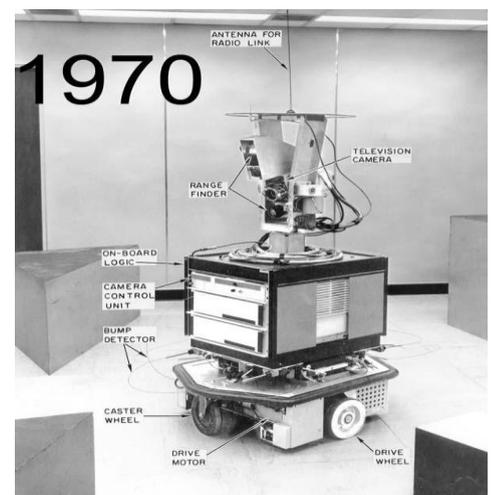


Figure 1.2. A gauche : Robot "Beast" de l'université John Hopkins dans les années 1960.



A droite : Le robot Shakey de Stanford en 1969 a été une plate-forme de démonstration des recherches en intelligence artificielle.

Dans les années 60, les recherches en électronique vont conduire, avec l'apparition du transistor, à des robots plus complexes mais qui vont réaliser des tâches similaires. Ainsi le robot "Beast" (Figure 1.2) de l'université John Hopkins est capable de se déplacer au centre des couloirs en utilisant des capteurs ultrason, de chercher des prises électriques (noires sur des murs blanc) en utilisant des photo-diodes et de s'y recharger.

Les premiers liens entre la recherche en intelligence artificielle et la robotique apparaissent à Stanford en 1969 avec Shakey (Figure 1.2). Ce robot utilise des télémètres à ultrason et une caméra et sert de plate-forme pour la recherche en intelligence artificielle, qui à l'époque travaille essentiellement sur des approches symboliques de la planification. La perception de l'environnement, qui à l'époque est considérée comme un problème séparé, voire secondaire, se révèle particulièrement complexe et conduit là aussi à de fortes contraintes sur l'environnement. Ces développements de poursuivent avec le Stanford Cart dans la fin des années 1970, avec notamment les premières utilisations de la stéréo-vision pour la détection d'obstacles et la modélisation de l'environnement. En France, le robot Hilare est le premier robot construit au LAAS, à Toulouse (Figure 1.3).

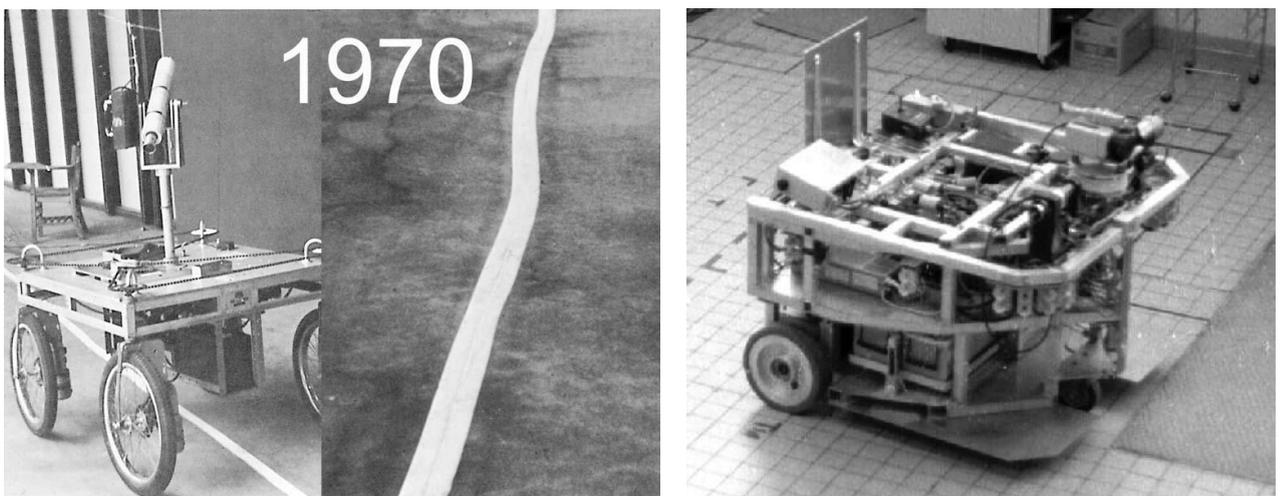


Figure 1.3. *Le Stanford Cart date de la fin des années 1970. Le robot Hilare du LAAS a été construit en 1977.*

Une étape importante est à signaler au début des années 1990 avec la mise en avant de la robotique réactive, représentée notamment par Rodney Brooks. Cette nouvelle approche de la robotique, qui met la perception au centre de la problématique, a permis de passer de gros robots très lents à de petits robots (Figure 1.4), beaucoup plus réactifs et adaptés à leur environnement.

Ces robots n'utilisent pas ou peu de modélisation du monde, problématique qui s'est avérée être extrêmement complexe.



Figure 1.4. *Genghis, développé par Rodney Brooks au MIT au début des années 1990.*

Ces développements ont continué et l'arrivée sur le marché depuis les années 1990 de plates-formes intégrées telles que le Pioneer de la société Mobile Robots a permis à de très nombreux laboratoires de travailler sur la robotique mobile et à conduit à une explosion de la diversité des thèmes de recherche. Ainsi, même si les problèmes de déplacement dans l'espace et de modélisation de l'environnement restent difficiles et cruciaux, des laboratoires ont pu par exemple travailler sur des approches multi-robot, la problématique de l'apprentissage ou sur les problèmes d'interactions entre les hommes et les robots.[2]

1.4. Présentation générale des robots mobiles

Les robots mobiles ont une place particulière en robotique. Leur intérêt réside dans leur mobilité qui ouvre des applications dans de nombreux domaines. Comme les robots manipulateurs, ils sont destinés à assister l'homme dans les tâches pénibles (transport de charges lourdes), monotones ou en ambiance hostile (nucléaire, marine, spatiale, lutte contre l'incendie, surveillance...).

L'aspect particulier de la mobilité impose une complexité technologique et méthodologique qui s'ajoute en général aux problèmes rencontrés par les robots manipulateurs. La résolution de ces problèmes passe par l'emploi de toutes les ressources disponibles tant au niveau technologique (capteurs, motricité, énergie) qu'à celui du traitement des informations par l'utilisation des techniques de l'intelligence artificielle ou de processeurs particuliers (vectoriels, cellulaires).

L'autonomie du robot mobile est une faculté qui lui permet de s'adapter ou de prendre une décision dans le but de réaliser une tâche malgré un manque d'informations préliminaires ou éventuellement erronées. Dans d'autres cas d'utilisation, comme celui des véhicules d'exploration de planètes, l'autonomie est un point fondamental puisque la télécommande est alors impossible par le fait de la durée du temps de transmission des informations.

1.5. Classification

Une classification est proposée dans la littérature qui définit le degré d'autonomie du robot mobile. [3]

- Véhicule télécommandé par un opérateur qui lui impose chaque tâche élémentaire à réaliser.
- Véhicule télécommandé au sens de la tâche à réaliser. Le véhicule contrôle automatiquement ses actions.
- Véhicule semi-autonome réalisant sans l'aide de l'opérateur des tâches prédéfinies.
- Véhicule autonome qui réalise des tâches semi-définies. Ce type de véhicule pose des problèmes d'un niveau de complexité élevé de représentation des connaissances, de capacité décisionnelle et de génération de plans qui sont résolus à bord dans la mesure du possible.

L'ensemble des problèmes particuliers liés à la conception de tels robots sont :

- La conception mécanique liée à la mobilité
- La détermination de la position et de la latitude (orientation)
- La détermination du chemin optimal pour atteindre le lieu de la tâche.

1.6. Domaines d'application

Le tableau ci-après résume de manière non exhaustive les diverses applications des robots mobiles.

Industrie nucléaire	<ul style="list-style-type: none">- Surveillance de sites.- Manipulation de matériaux radioactifs.- Démantèlement de centrales.
Sécurité civile.	<ul style="list-style-type: none">- Neutralisation d'activité terroriste.- Déminage.- Pose d'explosif.- Surveillance de munitions.
Militaire.	<ul style="list-style-type: none">- Surveillance, patrouille- Pose d'explosif.- Manipulation de munitions.
Chimique.	<ul style="list-style-type: none">- Surveillance de site.- Manipulation de matériaux toxiques
Médecine.	<ul style="list-style-type: none">- Assistance d'urgence.- Aide aux handicapés physiques, aux aveugles.
Lutte contre l'incendie.	<ul style="list-style-type: none">- Localisation d'une source d'incendie.- Détection de fumée.- Suppression de flammes.
Sous-marine.	<ul style="list-style-type: none">- Pose de câble.- Recherche de nodules.- Recherche de navires immergés.- Inspection des fonds marins.
Agricole.	<ul style="list-style-type: none">- Cueillette de fruits.- Traite, moisson, traitement de vignes.....
Construction BTP.	<ul style="list-style-type: none">- Projection mortier.- Lissage du béton.
Nettoyage.	<ul style="list-style-type: none">- Coque de navire.- Nettoyage industriel.
Espace.	<ul style="list-style-type: none">- Exploration.
Industrie.	<ul style="list-style-type: none">- Convoyage.- Surveillance.

Tableau 1.1. *Domaines d'application du robot mobile*

1.7. Architectures des robots mobiles

L'architecture des robots mobiles se structure en quatre éléments :

- La structure mécanique et la motricité
- Les organes de sécurité

- Le système de traitement des informations et gestion des tâches.
- Le système de localisation.

1.8. Les robots mobiles à roues

Les roues sont le moyen de locomotion le plus répandu en matière de robotique mobile [4]. En fait, les robots mobiles à roues sont faciles à réaliser et présentent de grandes possibilités de déplacement et de manœuvrabilité avec une vitesse et une accélération importantes. Bien évidemment, pour un ensemble donné de roues, toute disposition ne conduit pas à une solution viable. Un mauvais choix peut limiter la mobilité du robot ou occasionner d'éventuels blocages. Par exemple, un robot équipé de deux roues fixes non parallèles ne pourrait pas aller en ligne droite ! Pour qu'une disposition de roues soit viable et n'entraîne pas de glissement des roues sur le sol, il faut qu'il existe pour toutes ces roues un unique point de vitesse nulle autour duquel tourne le robot de façon instantanée. Ce point, lorsqu'il existe, est appelé *centre instantané de rotation (CIR)*. Les points de vitesse nulle liés aux roues se trouvent sur leurs axes de rotation, il est donc nécessaire que le point d'intersection des axes de rotation des différentes roues soit unique. Pour cette raison, il existe en pratique trois principales catégories de robots mobiles à roues, que l'on va présenter par la suite. En général, les robots mobiles à roues ont des structures à locomotion différentielle. La figure 1.5 montre une structure type de robot mobile à commande différentielle où le déplacement est assuré par le biais de deux moteurs d'entraînement indépendants, chacun d'eux est lié à une roue motrice.

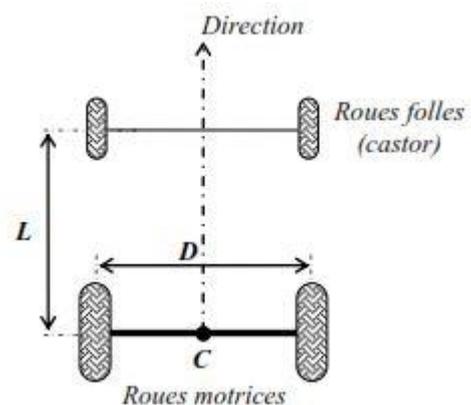


Figure 1.5. Robot mobile à commande différentielle

En ce qui concerne la commande des moteurs, cette indépendance permet au robot mobile de changer de direction en jouant uniquement sur les vitesses des deux roues motrices. Les roues folles sont libres, leur rôle essentiel est d'assurer la stabilité de la plate-forme du robot.

1.8.1. L'unicycle

On désigne par unicycle un robot actionné par deux roues indépendantes et possédant éventuellement un certain nombre de roues folles assurant sa stabilité. Le schéma d'un robot de type unicycle est donné à la figure 1.6. On y a omis les roues folles, qui n'interviennent pas dans la cinématique, dans la mesure où elles ont été judicieusement placées. Ce type de robot est très répandu en raison de sa simplicité de construction et de ses propriétés cinématiques intéressantes.

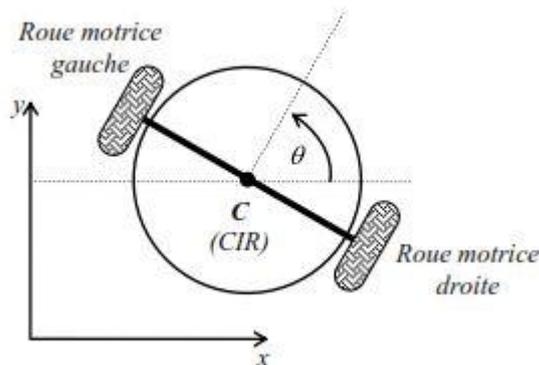


Figure 1.6. Robot mobile de type unicycle

1.8.2. Le tricycle

L'architecture d'un robot mobile de type tricycle est donnée sur la figure 1.7, il utilise une roue motrice avant et deux roues passives arrières (ou vice versa). Le mouvement est conféré au robot par deux actions : la vitesse longitudinale et l'orientation de la roue orientable. Ce type de robots est très

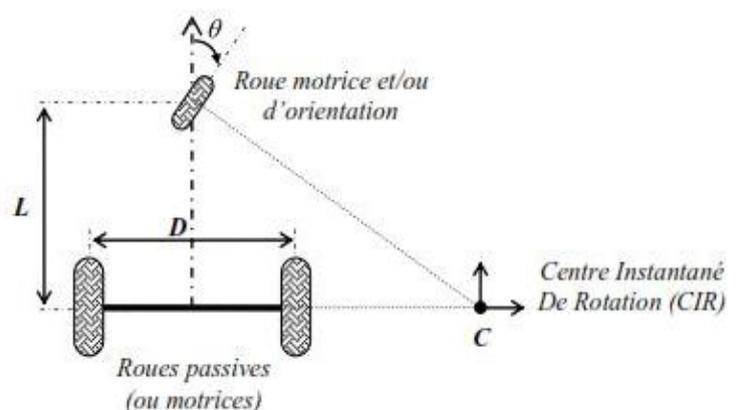


Figure 1.7. Robot mobile de type tricycle

connu dans les applications des AGVs pour leur simplicité inhérente. Pour la commande et la localisation ce type de robot : un capteur d'orientation est associé à la roue orientable, et deux encodeurs sont associés aux roues motrices.

1.8.3. Les véhicules (structure d'ackerman)

Le cas du robot de type voiture est très similaire à celui du tricycle. La différence se situe au niveau du train avant, qui comporte deux roues au lieu d'une. Cela va de soit, on rencontre beaucoup plus souvent ce type de systèmes. On parle de robot dès lors que la voiture considérée est autonome, donc sans chauffeur ni télé-pilotage. Il s'agit là d'un des grands défis issus de la robotique mobile. La figure 1.4 représente ce type d'architecture.

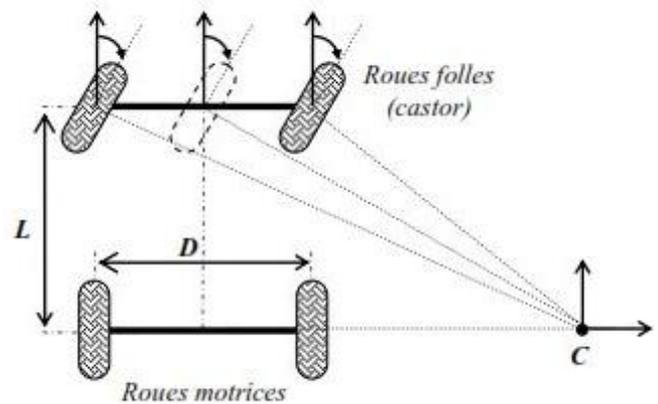


Figure 1.8. Robot mobile de type voiture

1.8.4. Robot à traction synchrone

La traction synchrone est une technique utilisée pour minimiser l'effet de glissement et augmenter la force de traction.

On rencontre ce type de robot dans l'industrie automobile, et dans les robots tous terrains. La configuration du robot à traction synchrone est similaire à un robot à trois roues couplées de façon qu'elles soient actionnées en même temps. La figure 1.9 montre un robot à quatre roues couplées avec des chaînes

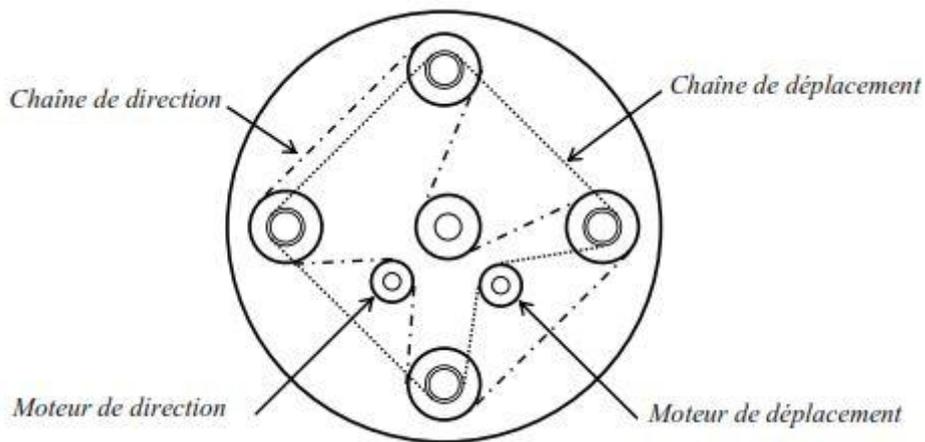


Figure 1.9. Robot mobile à traction synchrone.

1.9. La perception

La notion de perception en robotique mobile est relative à la capacité du robot à recueillir, traiter et mettre en forme des informations qui lui sont utiles pour agir et réagir dans l'environnement qui l'entoure. Elle est donc la faculté de détecter et/ou appréhender l'environnement proche ou éloigné du robot. Alors que pour des tâches de manipulation on peut considérer que l'environnement du robot est relativement structuré, ce n'est plus le cas lorsqu'il s'agit de naviguer de manière autonome dans des lieux très partiellement connus. Aussi, pour extraire les informations utiles à l'accomplissement de sa tâche, il est nécessaire que le robot dispose de nombreux capteurs mesurant aussi bien son état interne que l'état de l'environnement dans lequel il évolue. Le choix des capteurs dépend bien évidemment de l'application envisagée.

La perception est nécessaire pour la sécurité du robot, la modélisation de l'environnement et l'évitement et le contournement d'obstacles.

1.9.1. Capteurs en Robotique mobile

1.9.1.1. Définition d'un capteur

Le capteur est un instrument qui permet de déceler l'information contenue dans un objet ou issue d'un phénomène. Ce dispositif est soumis à l'action d'une mesurante non

électrique, et fournit un signal électrique à sa sortie. Il va assurer la mesure permanente des grandeurs réelles en question. [5]

1.9.1.2. Classification des capteurs

La classification des capteurs est réalisée suivant les phénomènes qu'ils mesurent : force, énergie, distance, champ magnétique etc....

Par conséquent, la classification peut être élaborée suivant que les capteurs utilisent un phénomène physique générateur de tension ou de courant, on parle alors de capteurs actifs, ou qu'ils nécessitent une source d'alimentation pour pouvoir traduire la variation du phénomène en tension, ce sont alors des capteurs passifs. Ils peuvent se classer aussi selon la forme de l'information qu'ils délivrent (analogique ou numérique). La figure suivante montre les deux types de capteurs qu'on doit trouver sur un robot mobile et qui sont :

- Les capteurs externes (extéroceptifs) qui permettent de fournir certaines connaissances de l'environnement de travail.
- Les capteurs internes (proprioceptifs) qui renseignent sur l'état du robot et qui permettent de connaître la trajectoire suivie par le robot.

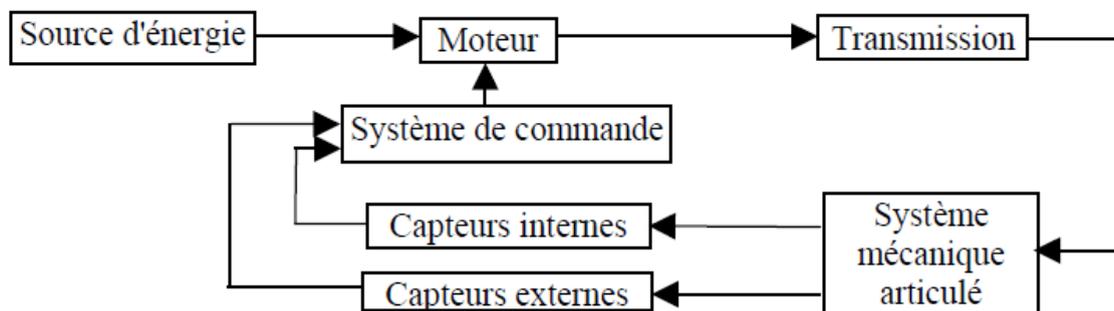


Figure 1.10. Boucle de commande.

1.9.1.3. Différents types de capteurs

A. Capteurs internes

Dans les procédures mécaniques, ces capteurs fournissent, par intégration, des informations élémentaires sur les paramètres cinématiques du robot, permettant ainsi un contrôle permanent de la bonne exécution du mouvement. Les informations sensorielles gérées dans ce cadre sont généralement des vitesses, des accélérations, des angles de giration ou des angles d'attitude.

On peut regrouper ces capteurs internes en deux familles :

- Les capteurs de déplacement qui comprennent les odomètres, les accéléromètres, les radars Doppler et les mesureurs optiques. Cette catégorie permet de mesurer des déplacements élémentaires, des variations de vitesse ou d'accélération sur des trajectoires rectilignes ou curvilignes.
- Les capteurs d'attitude, qui mesurent deux types de données : les angles de cap et les angles de roulis et de tangage. Ils sont principalement constitués par les gyroscopes et les gyromètres, les capteurs inertiels composites, les inclinomètres et les magnétomètres. Ces capteurs sont en majorité de type inertiels.

A.1. Les capteurs de déplacement

Les odomètres

Les odomètres permettent de fournir une quantification des déplacements curvilignes du robot en mesurant la rotation de ses roues. Le calcul de la position relative du robot est réalisé par intégration des rotations élémentaires des roues.

Les odomètres sont généralement composés de codeurs incrémentaux qui permettent de mesurer les angles de rotation avec une précision qui dépend de la résolution du codeur. Des méthodes fondamentales sont utilisées pour la mesure de position. Dans une première méthode, le capteur est lié à la partie mobile du robot (ex : les roues dans notre cas) et fournit un signal dont la variation traduit la position. Il existe des codeurs digitaux absolus où la position est déterminée par la lecture optique d'une graduation codée en binaire portée par un disque solidaire. Dans la seconde le

capteur délivre une impulsion à chaque déplacement élémentaire : la position est déterminée par comptage des impulsions émises, ou décomptage selon le sens du déplacement. Il s'agit de capteur incrémental. L'information de déplacement nécessitera la connaissance du diamètre des roues, de l'entraxe des roues, de la structure mécanique et cinématique du véhicule.

Il faut noter cependant que ce capteur est fortement utilisé en robotique mobile puisqu'il présente l'avantage d'être simple à mettre en oeuvre et surtout d'être peu coûteux.

Les accéléromètres

Un accéléromètre fournit, en sortie, une tension proportionnelle à l'accélération linéaire dans une direction fixée par sa géométrie. Généralement, trois accéléromètres sont associés aux axes du repère du robot. La valeur mesurée selon l'axe vertical comprend l'effet de la gravité, qui doit être compensé afin de pouvoir accéder à l'accélération verticale propre du robot. Pour cela, il est nécessaire soit de stabiliser la plate-forme inertielle dans le plan horizontal, soit d'utiliser des capteurs supplémentaires, les inclinomètres, qui fourniront une estimation de la verticale locale permettant la compensation des mesures. La première solution se révèle coûteuse et délicate lors de la mise en oeuvre ; de ce fait, elle est peu utilisée en robotique. La seconde solution est simple, du point de vue de la mise en oeuvre, mais présente l'inconvénient de ne fournir une information fiable qu'en régime quasi statique. En effet, la bande passante des inclinomètres est très basse (de 0 à 2.5 Hz) vis-à-vis de celle des accéléromètres (de 100 à 1000 Hz). En raison de leur mode de calcul (double intégration de la mesure), les positions obtenues à partir d'accéléromètres sont entachées d'erreurs, principalement liées aux vibrations et à une mauvaise estimation de la verticale. Ces erreurs se manifestent sous la forme d'une dérive (couramment de l'ordre de 1 à 8 cm/s).

En raison de l'importance de ces dérives, les mesures de position et d'orientation estimées à partir de mesures brutes provenant de capteurs inertiels (gyromètres et

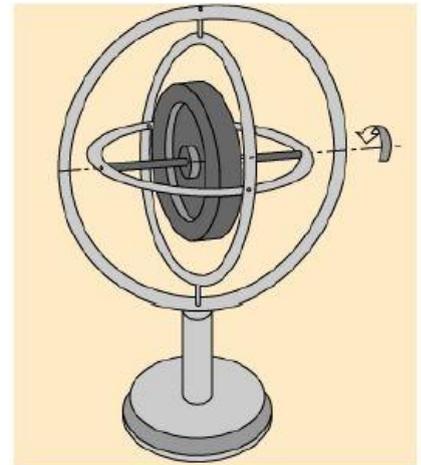
accéléromètres) sont inutilisables sans un filtrage qui prend en considération une modélisation des termes de dérive.

A.2. Les capteurs d'attitude

Les capteurs d'attitude permettent d'estimer les paramètres intrinsèques du robot que sont les angles de cap, de roulis et de tangage. Ces capteurs sont principalement de type inertiel. Ils ont pour point commun d'être généralement coûteux et sensibles au bruit, d'où une intégration moins fréquente dans les systèmes embarqués que les odomètres.

Les gyroscopes

Les gyroscopes permettent de mesurer une variation angulaire. Ils sont intéressants en robotique mobile parce qu'ils peuvent compenser les défauts des



odomètres. Une erreur d'orientation odométrique peut entraîner une erreur de

Figure 1.11. Gyroscope mécanique de Foucault

position cumulative qui peut être diminuée voire compensée par l'utilisation conjointe de gyroscopes. Les gyroscopes très précis sont trop onéreux pour être utilisés en robotique mobile. Cependant, les gyroscopes à fibre optique, connu pour leur grande précision, ont vu leur prix chuter et sont donc devenus une solution attractive pour la navigation en robotique mobile.

Les gyromètres

Le gyromètre est un capteur qui permet de mesurer une vitesse angulaire. Deux technologies sont actuellement disponibles, permettant un rapport coût/performance compatible avec des applications robotiques : les gyromètres piézoélectriques et les gyromètres à fibres optiques. Dans le premier cas,



Figure 1.12. Gyromètre Futaba à structure vibrante

le principe de mesure exploite la variation d'amplitude d'un oscillateur piézoélectrique, induite par la force de Coriolis due au mouvement de rotation appliqué au capteur. Ce type de capteur à faible coût présente des dérives de l'ordre de $0.2^\circ /s$, dont l'influence sur le calcul de l'orientation peut être limitée grâce à l'utilisation de techniques de filtrage temporel. Il faut également noter que ces capteurs sont sensibles aux variations de températures. Les capteurs à fibre optique, plus récents, sont basés sur la différence de trajets optiques entre deux faisceaux laser qui se propagent en sens opposés dans une boucle circulaire de fibres optiques. Lorsque la boucle est immobile, les trajets optiques sont identiques. Soumise à un mouvement de rotation, la différence de trajet optique est alors proportionnelle à la vitesse angulaire (effet Sagnac). Là encore, les mesures d'orientation fournies par l'intégration des vitesses angulaires sont entachées d'erreurs croissantes avec le temps, mais dans un rapport environ cinquante fois plus faible que dans le cas des capteurs piézoélectriques (de l'ordre de $0.005^\circ/s$). En contrepartie, en raison de leur principe de mesure, ils possèdent une vitesse minimum de fonctionnement assez élevée, de l'ordre de $0.05^\circ/s$. A titre d'exemple, en considérant un robot mobile admettant une erreur angulaire de 1° au terme d'un déplacement linéaire de 10 m, cette erreur ne sera observable par un gyromètre à fibre optique que si la vitesse d'avancement du robot est supérieure à 0.5 m/s.

Les gyrocompas

Le gyrocompas est un capteur qui permet de mesurer le cap. Il est composé d'un gyroscope et d'un compas magnétique. Le gyrocompas conserve le nord magnétique durant tout le déplacement du véhicule, après l'avoir initialement déterminé de façon autonome.

Le magnétomètre ou compas magnétique

Le magnétomètre qui est aussi appelé compas magnétique mesure la direction du champ magnétique terrestre pour déduire l'orientation du robot. Parmi toutes les technologies adoptées pour ce type de capteur, la mieux adaptée pour la robotique

mobile est celle dite à vanne de flux. Elle a l'avantage de consommer peu d'énergie, de n'avoir aucune pièce mobile, d'être résistante aux chocs et vibrations et d'être peu coûteuse. Toutefois, les mesures sont perturbées par l'environnement magnétique du robot (comme par exemple les lignes d'énergie ou les structures en acier). Ceci rend difficile l'utilisation de ce capteur en milieu intérieur. Néanmoins, ce capteur a par exemple été intégré avec succès dans un système de localisation basé sur le filtrage de Kalman étendu.

La caractéristique principale de ce capteur est sa précision moyenne qui, sur un long trajet, est relativement bonne.

A.3. Autres types de capteurs proprioceptifs

Au cours de ces dernières années, l'application à la robotique mobile de capteurs mettant en œuvre d'autres principes de mesure s'est accrue, principalement en raison de la diminution des coûts et de la meilleure intégration des algorithmes de traitement. Parmi ceux dont l'utilisation semble très prometteuse, on peut citer les capteurs à effet Doppler et les capteurs d'attitude (compas, inclinomètres).

Capteurs à effet Doppler

Ils permettent de mesurer une vitesse relative entre le véhicule et une surface (par exemple le sol) en utilisant l'effet de décalage en fréquence entre une onde émise et le faisceau réfléchi sur la surface durant le déplacement (effet Doppler-Fizeau). Ces techniques sont couramment utilisées en aviation et dans le domaine maritime, mais commencent juste à être appliquées à la robotique, notamment la robotique agricole. Les capteurs utilisent des ultrasons ou des ondes hyperfréquences et permettent d'estimer la vitesse avec une résolution d'environ 2 cm/s, pour des gammes de mesures comprises entre 0 et 20 m/s. Ces techniques présentent l'avantage d'être insensibles au glissement des roues, mais leurs performances se dégradent rapidement en cas de mesure de faibles vitesses, contrairement aux capteurs optiques à corrélation. Puisque la mesure s'effectue selon une direction, ces capteurs sont principalement utilisés pour estimer la vitesse d'avancement du véhicule.

Capteurs d'attitude : compas, inclinomètres

Les capteurs d'attitude sont très utilisés sur des robots se déplaçant en terrain accidenté, afin de mesurer le cap par rapport au nord magnétique, et les angles de roulis et de tangage. Les inclinomètres sont précis à l'arrêt, mais la précision se dégrade lorsque la mesure est acquise durant les mouvements.

B Les capteurs externes

Les capteurs extéroceptifs permettent de percevoir le milieu d'évolution du robot. Ils sont généralement le complément indispensable aux capteurs présentés précédemment. Des méthodes de fusion de données seront alors utilisées pour conditionner et traiter les informations sensorielles de natures différentes. Deux familles de capteurs extéroceptifs embarqués peuvent être identifiées : les capteurs télémétriques et les systèmes de vision. Ces capteurs servent pour les actions suivantes :

- Vérification et amélioration de la trajectoire suivie par le robot.
- Mesure des interactions entre le robot et l'environnement.
- Perception de l'environnement.
- Prévention et sécurité.

Parmi les capteurs externes qui seront étudiés dans les sections suivantes, on retiendra pour notre part le capteur ultrasonore et le capteur de vision azimutale qui est un capteur de type CCD.

Le capteur ultrasonore fait partie des capteurs de distance à portée moyenne. On le trouve sur tous les robots mobiles. Souvent plusieurs capteurs sont montés autour du robot formant une ceinture de sécurité. Leur rôle principal est la détection des obstacles. Son principe de fonctionnement est comme suit : Un faisceau émis est réfléchi par un obstacle et capté par le capteur. La durée séparant l'émission et la réception est mesurée, ce qui donne la distance.

On propose d'installer le capteur CCD au sommet du robot. On se limite à une acquisition simple des angles d'azimut des différentes balises installées dans l'environnement de travail du robot.

B.1. Les capteurs télémétriques

Le fonctionnement des capteurs utilisés classiquement en robotique mobile est présenté dans les sections suivantes. Les lasers d'abord puis les capteurs à infrarouge sont introduits. Les capteurs à ultrasons sont ensuite développés plus abondamment. En effet, en raison de leur coût faible par rapport aux autres capteurs, ils ont été choisis dans notre travail.

B.2. Les capteurs laser

Le capteur laser est basé sur l'émission d'une onde électromagnétique structurée. Ce capteur permet donc d'obtenir un faisceau d'ondes très concentré, contrairement aux capteurs ultrasonores. Les systèmes laser possèdent de nombreux avantages qui en font des capteurs souvent utilisés dans les applications de robotique mobile :

- ✓ La résolution angulaire : des faisceaux angulairement très fins peuvent être obtenus avec des lentilles d'émission de petite taille, du fait de la courte longueur d'onde émise.
- ✓ La réponse optique des cibles : les longueurs d'ondes courtes permettent d'obtenir un écho pour des angles d'incidence du faisceau sur la cible allant jusqu'à 75°, et améliorent de ce fait la probabilité de détection.
- ✓ La précision sur la mesure de distance par rapport à la portée, pour les télémètres, est importante. Une précision de l'ordre du dixième de millimètre peut être obtenue sur des distances de l'ordre de 30 mètres.

L'inconvénient majeur du laser se situe au niveau de l'électronique de mesure qui doit être capable, étant donnée la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques, de mesurer des intervalles de l'ordre de la pS pour des précisions de distance de l'ordre du millimètre. Ceci implique un matériel coûteux et complexe.

En robotique les systèmes laser sont utilisés principalement de trois manières différentes :

- ✓ En télémètre : ils sont alors utilisés, tout comme les capteurs à ultrasons, pour des mesures de distances.
- ✓ En goniomètre : ils sont utilisés pour des mesures d'angles.
- ✓ En source de lumière structurée : ils sont généralement utilisés pour la modélisation 3D de l'environnement. La source laser sera dans ce cas toujours associée à une caméra et fournira des informations sur la profondeur.

Plusieurs principes sont utilisés pour la mesure de distance avec des dispositifs optiques.

Le premier est la triangulation : des mesures d'angles permettent de déterminer la distance de la cible. Les mesures réalisées présentent une résolution correcte et un temps d'acquisition compatible avec la robotique mobile. Mais la précision décroissante avec la distance, il existe des zones d'ombre importantes et le capteur est assez encombrant.

Le second principe est la mesure d'intensité. Une onde lumineuse étant émise et réfléchiée par une cible, un récepteur mesure le niveau du signal qu'il reçoit pour en déduire la longueur de la course du faisceau. L'inconvénient majeur provient d'une atténuation très différente suivant l'état de surface de la cible. Des systèmes à plusieurs récepteurs commencent à voir le jour qui permettent de s'affranchir en partie de l'état de surface de la cible.

Le troisième est l'interférométrie. Ces mesures à incréments (de part leur nature même) atteignent une très grande précision mais connaissent un problème d'ambiguïté de mesure à un modulo près. Ils doivent donc être couplés avec un autre dispositif pour obtenir une approximation de la distance mesurée. Ces systèmes sont encombrants et sensibles aux vibrations, ce qui les rend peu adaptés à la robotique mobile.

Le dernier est la mesure par temps de vol. Pour de grandes distances, une mesure directe est envisageable. Pour des distances plus courtes, une modulation sinusoïdale

ramène à une mesure de déphasage sur l'onde modulée. On peut aussi combiner les deux.

B.3. Les capteurs à infrarouge

Leur utilisation est similaire à celle des lasers. Les mesures de distance peuvent être faites par triangulation, mesure d'intensité et mesure de temps de vol. On a aussi parfois des angles d'ouverture importants à l'émission.

B.4. Les capteurs à ultrasons

Contrairement aux autres types de capteurs, ceux-ci émettent une onde qui se propage dans l'air (le plus souvent). Cela augmente beaucoup le temps d'acquisition, la vitesse du son étant très faible devant celle de la lumière. En revanche, la mesure par temps de vol est ici aisée avec une électronique simple. L'atténuation de l'onde est importante dans ce milieu : les distances mesurées restent faibles (quelques dizaines de mètres) mais suffisantes en intérieur.

1.10. La localisation

La localisation d'un robot mobile s'effectue par des capteurs proprioceptifs et/ou extéroceptifs. Cette localisation est d'autant plus nécessaire que le lieu d'évolution est encombré et complexe. Le comportement de l'être vivant illustre bien ces propos, en effet il doit toujours connaître sa situation pour se déplacer d'un point à un autre, soit en identifiant des repères artificiels, on parle de localisation absolue, soit tout simplement en mesurant les distances parcourues et les directions empruntées depuis sa position initiales. Un robot mobile doit connaître ses coordonnées de position pour être autonomes vis-à-vis de l'espace et de l'intervention humaine.

Les premières applications de robotique mobiles consistaient essentiellement en des tâches répétitives. Ces robots nécessitaient soit l'intervention humaine à distance pour beaucoup d'opérations, un environnement structuré avec des systèmes de guidage passifs ou actifs. Le filoguidage, ou guidage inductif, est une des techniques les plus utilisées pour les robots mobiles d'atelier. Le principe consiste à

encastrer, dans le sol, un fil parcouru par un courant alternatif. Une force électromotrice est induite dans deux bobines disposées sous le robot de part et d'autre du fil inductif. Le guidage consiste à minimiser la différence entre les deux forces électromotrices induites afin de maintenir par asservissement le robot mobile sur la trajectoire matérialisée par le fil. Ce fil sert également à transmettre des informations au robot. La modification de la trajectoire avec ce système de guidage nécessite des travaux importants qui peuvent entraîner l'arrêt de toute ou d'une partie de la production.

Dans le cas du guidage optique, la position relative du robot mobile est obtenue par la réflexion d'une onde lumineuse sur une piste matérialisée par des peintures ou des bandes adhésives réfléchissantes disposées sur le sol. Le signal détecté est maximal si le faisceau lumineux se réfléchit sur la bande, et il est minimal quand le faisceau se réfléchit en dehors de la bande. Des marquages particuliers sont disposés en certains endroits stratégiques pour informer le robot mobile sur l'évolution de la trajectoire, sur sa position ou sur le point d'arrêt. Ce système ne fonctionne correctement que si le contraste entre le sol et le marquage au sol est suffisant, ainsi, il ne supporte pas les poussières et convient mal au milieu industriel.

La lourdeur de ces systèmes de guidage : statisme de l'installation, difficultés pour le faire évoluer ... etc, ont conduit les chercheurs à étudier d'autres systèmes plus souples d'utilisation et plus performants [6].

C'est ainsi que les méthodes de localisation se regroupent en deux catégories, soit :

- La localisation à l'estime ou relative qui est obtenue par des informations issues de capteurs proprioceptifs.
- La localisation absolue qui est obtenue par des informations issues de capteurs extéroceptifs.

1.10.1. Localisation relative ou à l'estime

Cette méthode est basée sur l'intégration des déplacements élémentaires du robot mobile, on l'appelle aussi localisation relative car les coordonnées du robot sont calculées en fonction de la position précédente et du déplacement en cours.

Les erreurs dues à cette méthode peuvent être importantes car cumulatives avec la distance et fonction du type de trajectoires. On distingue deux méthodes principales de localisation relative :

- La méthode odométrique (directe ou indirecte)
- La méthode inertielle.

1.10.1.1. Odométrie directe

La technique de l'odométrie est très utilisée pour localiser les robots mobiles, elle présente l'avantage d'être simple d'emploi et d'un coût faible. Son principe repose sur la mesure de la vitesse angulaire de rotation des roues motrices. Pour un robot mobile à roues non orientables, on déduit à partir de la somme et de la différence des vitesses de rotation de chaque roue, la vitesse linéaire du robot ainsi que sa vitesse angulaire. Le déplacement du robot est obtenu par l'intégration des déplacements élémentaires entre deux instants et ainsi de proche en proche on obtient une estimation de la position à partir d'une référence initiale. Ceci suppose de parfaites conditions d'évolution.

La mesure des angles est généralement faite par des codeurs optiques incrémentaux couplés à des roues qui peuvent être distinctes des roues motrices.

Les erreurs de cette technique peuvent être de différentes natures. Elles peuvent être systématiques et constantes ou non selon qu'elles sont liées à des paramètres du robot mobile (longueur de l'entraxe, diamètre des roues...) ou à l'environnement. Ainsi, l'état du terrain introduit des erreurs de même que le glissement des roues. Des

erreurs peuvent provenir de la résolution des capteurs numériques de mesure et de la discrétisation des calculs.

1.10.1.2. Odométrie indirecte

La localisation relative par odométrie indirecte s'effectue par des moyens inertiels qui mesurent soit la vitesse soit l'accélération puis par intégration, on en déduit les déplacements élémentaires. Ces moyens permettent une localisation précise pour certains engins parcourant de longues distances.

Il existe d'autres méthodes de localisation relative, mais toutes présentent des dérives assez importantes qui ne peuvent être compensées que par des informations supplémentaires issues d'un autre mode de localisation.

1.10.2. Localisation absolue

Les inconvénients cités ci-dessous ont conduit à développer des systèmes de localisation absolue qui fournissent la position et l'orientation du robot mobile par rapport à des points fixes du repère de travail donc en coordonnées absolues.

Pour se faire le robot doit effectuer des mesures par rapport à l'environnement. Ces mesures sont fournies par des capteurs dits extéroceptifs ou externes car ils ne s'intéressent pas aux mouvements internes du robot, comme c'est le cas pour l'odométrie [6].

1.11. La navigation

Les sections précédentes ont permis de mettre en place les outils nécessaires pour faire naviguer un robot mobile dans un environnement d'intérieur : la compréhension du mode de locomotion et de localisation de ce robot dans son environnement. Il s'agit maintenant d'utiliser au mieux la motricité du robot et sa localisation pour accomplir la tâche de navigation de manière autonome.

Un mouvement est une application définie en fonction du temps t , reliant un point initial à l'instant t_0 à un point final à l'instant t_f . Une trajectoire est le support d'un mouvement. Il s'agit donc d'une courbe paramétrée par une variable s quelconque, par exemple l'abscisse curviligne normalisée ($s \in [0,1]$) de la courbe sur laquelle se déplace le robot. L'évolution du paramètre s en fonction du temps t est appelée mouvement sur la trajectoire.

Le problème de navigation d'un robot mobile consiste de la manière la plus générale à trouver un mouvement dans l'espace des configurations sans collisions, traditionnellement noté C_{free} . Ce mouvement amène le robot d'une configuration initiale $q_0 = q(t_0)$ à une configuration finale $q_f = q(t_f)$. On peut néanmoins donner des définitions différentes de la tâche de navigation à accomplir, selon le but recherché par exemple on peut souhaiter seulement placer le robot dans une zone donnée et relâcher la contrainte d'orientation, ...et

La tâche de navigation ainsi définie est donc limitée à un seul mouvement. Il existe néanmoins une très grande variété de travaux et de méthodes permettant d'aborder ce problème difficile. Pour différencier les techniques de navigation, on peut de manière générale distinguer deux approches :

- La première consiste à planifier le mouvement dans l'espace des configurations et à l'exécuter par asservissement du robot sur le mouvement de consigne (schéma planification exécution) ;
- La seconde consiste à offrir un ensemble de primitives plus réactives. Elles correspondent alors à des sous tâches (suivre un mur, éviter un obstacle) dont on estime que l'enchaînement est du ressort d'un planificateur de tâches ayant décomposé la tâche globale.

1.12. Conclusion

Les robots mobiles à roues sont les robots mobiles les plus répandus, vu leurs structures mécaniques simples et leur commande relativement plus facile que les autres robots mobiles qui diffèrent par leurs moyens de locomotion.

La commande d'un robot mobile se divise en trois étapes principales : perception, décision et action. La dernière étape concerne l'exécution des mouvements planifiés, c'est une étape que doit maîtriser un robot mobile pour accomplir ses missions avec succès.

Chapitre 02 :

La logique floue et la commande.

2.1. Introduction

Parmi les récents développements des techniques de commande, l'introduction de nouvelles techniques telles que la logique floue, a suscité un intérêt sans cesse croissant depuis les quelques dernières décennies. Il suffit de voir les nombreuses applications industrielles qui en découlent et de consulter l'abondante littérature sur le sujet pour s'en convaincre. L'intérêt de la logique floue réside dans sa capacité à traiter, l'imprécis, l'incertitude et le vague. Elle est issue de la capacité de l'homme à décider et agir de façon pertinente malgré le flou des connaissances disponibles et a été introduite dans le but d'approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances. Aussi, le succès de la commande floue trouve en grande partie son origine dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistiques « *si ... alors* » facilement interprétables. L'utilisation de la commande floue est particulièrement intéressante lorsqu'on ne dispose pas de modèle mathématique précis du processus à commander ou lorsque ce dernier présente de trop fortes non linéarités ou imprécisions. Dans ce chapitre, nous présenterons quelques aspects théoriques de la logique floue, ainsi que les bases de son application pour la commande de processus.

2.2. Notions De Bases De La Logique Floue

2.2.1. La théorie des ensembles flous

Ce n'est qu'à partir de 1965 que L. A. Zadeh, professeur à l'université de Berkeley, jeta les bases de ce qu'il dénomma « *fuzzy set* » (ensemble flou), prenant ainsi en considération le problème posé par les connaissances imprécises ou vagues. La notion d'ensemble flou permet alors des graduations dans l'appartenance d'un élément à une classe, c'est-à-dire autorise un élément à appartenir plus ou moins fortement à cette classe.

2.2.2. Différence entre ensemble flou et ensemble booléen

Alors qu'un ensemble booléen est défini par sa fonction caractéristique f à valeurs 0 ou 1, un ensemble flou est défini par sa fonction d'appartenance μ à valeurs dans l'intervalle $[0, 1]$.

Considérons l'exemple suivant :

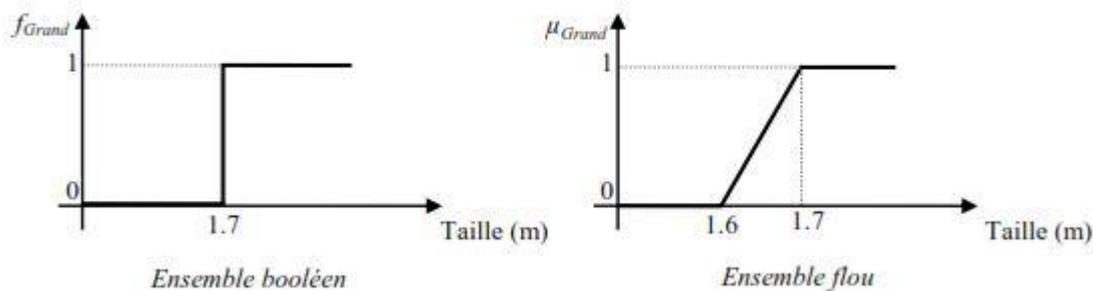


Figure 2.1. Ensemble booléen et ensemble flou

L'ensemble des tailles possibles d'un individu représente l'univers de discours de la variable « taille ». « Grand » est une valeur linguistique de cette variable. Soit 1.65 m la taille de X . dans le cas de l'ensemble booléen X n'appartient pas à la classe des « Grands ». Dans le cas de l'ensemble flou X appartient à la classe des « Grands » avec un certain degré d'appartenance. La notion d'ensemble flou évite l'utilisation arbitraire des limites rigides d'appartenance à des classes, il serait aberrant de considérer qu'un individu de 1.70 m est grand, mais qu'un individu de 1.695 m ne l'est pas.

2.2.2.1. Variables linguistiques

Une variable linguistique est représentée par un triplet (V, U, T_V) où V est la variable linguistique elle-même, U est l'univers de discours et T_V l'ensemble des caractérisations floues de la variable. Considérons par exemple la variable *taille* définie sur l'ensemble des entiers positifs et caractérisée par les ensembles flous *petit*, *moyen*, *grand*. La variable *taille* est alors représentée par le triplet suivant : $\{taille, R^+, (petit, moyen, grand)\}$.

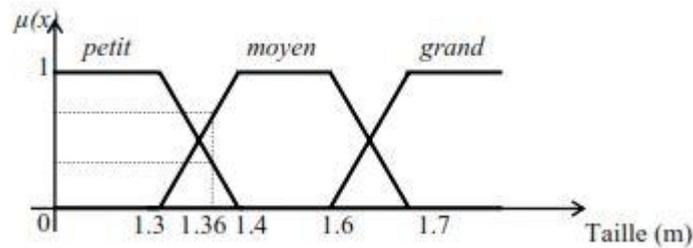


Figure 2.2. Une personne mesurant 1.36 m est petite avec un degré d'appartenance 0.4 et moyenne avec un degré de 0.6

2.2.2.2. Définitions

Un ensemble flou A est défini sur l'univers de discours X est noté :

$A = \int \mu_A(x)/x$, dans le cas continu,

$A = \sum_i^n \mu_A(x_i)/x_i$ dans le cas discret

2.2.2.3. Caractéristiques d'un ensemble flou

Ce sont essentiellement celles qui montrent dans quelle mesure l'ensemble flou diffère de l'ensemble booléen.

- **Support** : $\text{supp}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) \neq 0\}$ c'est l'ensemble booléen des éléments de X qui appartiennent au moins un peu à l'ensemble flou.
- **Hauteur** : $h(A) = \sup_{x \in X} \mu_A(x)$ c'est le plus fort degré d'appartenance avec lequel un élément de X appartient à l'ensemble flou, ce dernier est dit normalisé si sa hauteur est de 1.
- **Noyau** : $\text{noy}(A) = \{x \in X / \mu_A(x) = 1\}$ c'est l'ensemble booléen de tous les éléments appartenant de façon absolue à l'ensemble flou.
- **Coupe de niveau α ou α -coupe** : $\alpha\text{-coupe}(A) = A_\alpha = \{x \in X / \mu_A(x) \geq \alpha\}$,
C'est l'ensemble booléen des éléments de X qui appartiennent à A avec un degré d'appartenance au moins égal à α .
- **Singleton flou de X** : $\mu_{\{x\}}(x) = 1$ et $\mu_{\{x\}}(y) = 0 \forall y \neq x$.
- **Ensemble flou convexe** : un ensemble flou A est convexe si :

$$\mu_A(\lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2) \geq \min(\mu_A(x_1), \mu_A(x_2)), \text{ tel que } x_1, x_2 \in X, \lambda \in [0, 1]$$

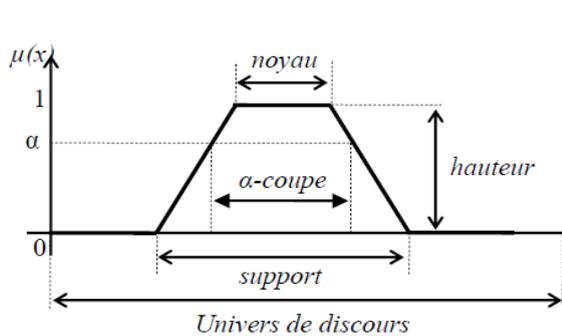


Figure 2.3. Support, noyau, hauteur et α -coupe d'un ensemble flou.

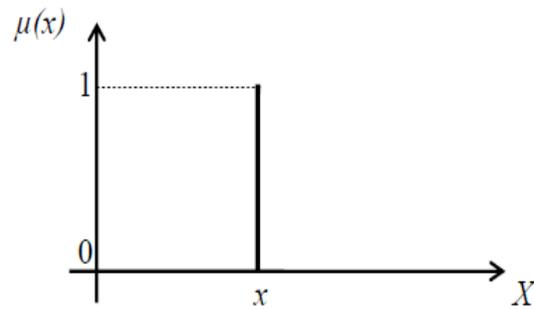


Figure 2.4. Singleton flou.

Partition floue : N ensembles flous (A_1, A_2, \dots, A_N) définie sur l'univers de discours X forment une partition floue si :

$$\forall x \in X, \sum_{i=1}^N \mu_{A_i}(x) = 1$$

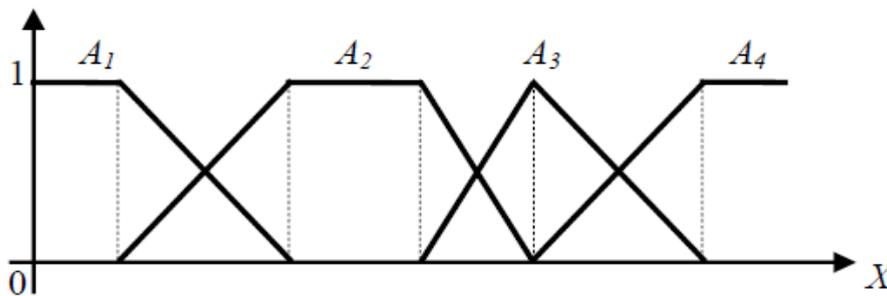


Figure 2.5. Exemple de partition floue.

Une partition floue composée d'ensembles flous convexes normaux implique que pas plus de deux fonctions d'appartenance se recouvrent.

2.2.2.4. Opérations sur les ensembles flous

Nous définissons, ci-dessous, les notions d'intersection, d'union et de complémentarité d'ensembles flous. Soient A et B deux ensembles flous décrits par leurs fonctions d'appartenance $\mu_A(x)$ et $\mu_B(x)$. Une définition de l'union floue mène à la fonction d'appartenance donnée par :

$$\mu_{A \cup B}(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Et une définition de l'intersection floue mène à la fonction d'appartenance donnée par :

$$\mu_{A \cap B}(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

Chapitre 02 : La logique floue et la commande

En ajoutant la définition de la fonction d'appartenance du complément flou :

$$\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$$

Il existe d'autres opérateurs qui sont les normes triangulaires (t-normes) pour l'intersection et les conormes triangulaires (t-conormes) pour l'union.

Le Tableau ci-dessous montre les principales opérations :

	t-normes	t-conormes
Zadeh (1973)	$\min(x, y)$	$\max(x, y)$
Bandler et Kahout (1980)	$x.y$	$x + y - x.y$
Lukasiewicz, Giles (1976)	$\max(x + y - 1, 0)$	$\max(x + y, 1)$
Weber (1983)	$\begin{cases} x, & \text{si } y = 1 \\ y, & \text{si } x = 1 \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases}$	$\begin{cases} x, & \text{si } y = 0 \\ y, & \text{si } x = 0 \\ 0, & \text{ailleurs} \end{cases}$
Hamacher (1978) $\gamma > 0$	$\frac{x.y}{\gamma + (1-\gamma)(x+y-x.y)}$	$\frac{x+y-(2-\gamma)x.y}{1-(1-\gamma)x.y}$
Dubois et Prade (1986) $\alpha \in [0, 1]$	$\frac{x.y}{\max(x, y, \alpha)}$	$\frac{x+y+x.y-\min(x, y, 1-\alpha)}{\max(1-\alpha, 1-y, \alpha)}$

Tableau 2.1. Principales t-normes et t-conormes

- **Complémentation :** $\mu_{A^c}(x) = 1 - \mu_A(x)$ avec $A \cup A^c \neq U$ et $A \cap A^c \neq \emptyset$

2.2.2.5. Le principe d'extension :

Le principe d'extension a été introduit par L.A. Zadeh en 1975 et constitue l'un des concepts les plus importants de la théorie des ensembles flous. Il permet l'extension de référence Y , éventuellement identique au premier. Il est alors possible de définir un ensemble flou B de Y de la donnée d'un ensemble flou A de

$$\forall y \in Y, \mu_B(y)$$

$$\begin{cases} \sup\{x \in X/y = f(x)\} \mu_A(x) & \text{si } \{x \in X/y = f(x)\} \neq \emptyset \\ 0 & \text{sinon} \end{cases}$$

2.3. La Commande en logique floue :

Bien que la logique floue possède un champ d'application extrêmement vaste (commande, classification, aide à la décision, base de données imprécises,...) nous nous intéressons à son utilisation dans le domaine de la commande. Cette partie a comme objectif la présentation des principes de base de la commande floue.

L'objectif d'une commande floue est de traiter des problèmes de commande de processus, le plus souvent à partir des connaissances des experts ou d'opérateurs qualifiés travaillant sur le processus. L'acquisition et l'écriture des règles font l'objet du paragraphe 2.3.1.

Les différentes étapes dans le traitement de ces règles sont exposées dans le paragraphe 2.3.2. La fuzzification, le traitement des prémisses composées, l'inférence floue, l'agrégation des règles et la défuzzification en sont les phases principales. Enfin, dans le paragraphe 2.3.3, nous abordons le problème du réglage, de la stabilité et de la robustesse d'un contrôleur flou.

2.3.1. Acquisition de la connaissance et écriture de la base de règles

L'algorithme de commande consiste en une collection de règles floues appelée base de règles. Plusieurs solutions peuvent être envisagées pour obtenir ces règles :

- L'extraction des connaissances d'opérateurs humains est certainement la méthode la plus utilisée pour la commande des systèmes complexes. Elle peut être obtenue directement sous forme de règles énoncées par des experts dans la commande du processus ou bien à partir d'un jeu de données entrées sorties représentatifs du comportement de l'opérateur humain. Dans le second cas, il s'agit de construire un modèle flou des actions de commande prises par l'opérateur [6].

- A l'image de la démarche usuelle en automatique, le contrôleur flou peut être obtenu à partir d'un modèle flou du processus (règles à conclusion polynomiale [6], modèle d'état flou). L'inversion de ce modèle conduit directement à un contrôleur flou. Cependant, l'utilisation de ce modèle inverse en tant que contrôleur n'est envisageable que lorsque le système à commander est minimum de phase. Dans le cas contraire, cela conduirait à une instabilité du système en boucle fermée. L'utilisation à la fois directe et indirecte (après inversion) du modèle flou du processus conduit à des lois de commande floue par modèle interne ou prédictif
- Les connaissances des automaticiens sur le comportement des processus vis-à-vis de certaines classes d'entrées (par exemple, les réponses temporelles) peuvent aussi être utilisées pour la réalisation de contrôleurs flous. Il existe également des règles d'équivalence entre contrôleurs classiques de type P.I.D et les contrôleurs flous [7]. Une table de règles très connue en régulation est celle de Mac Vicar-Whelan [8]. Ces contrôleurs sont des versions floues des contrôleurs usuels.

En commande, les règles floues utilisées sont généralement de la forme :

Si (X_1 est A_1) et (X_2 est A_2) ALORS (Y est B)

Lorsque les règles floues sont de sémantiques plus complexes, elles peuvent facilement s'écrire sous une forme plus simple du même type que précédemment.

2.3.2. Les différentes étapes de la commande floue

Un contrôleur flou est un système à base de connaissances particulier, utilisant un raisonnement en profondeur limité, dans une procédure de chaînage avant règles (activation des règles par les prémisses). Toutes les règles activables (prémisse caractérisée par un degré d'appartenance non nul) sont activées. On considère ensuite une « moyenne » sur le résultat de ces règles pour engendrer une

décision finale. On peut distinguer plusieurs étapes dans le traitement des règles. Un schéma représentatif peut être le suivant :

Les variables caractéristiques du système à commander et les consignes définissent les variables d'entrée du contrôleur flou. Les variables caractéristiques sont en général, les grandeurs de sortie du processus et, le cas échéant, d'autres mesures déterminantes pour saisir l'évolution dynamique du processus. Les variables de sortie du contrôleur flou sont les commandes à appliquer au processus.

La base de connaissances est composée d'une base de données et d'une base de règles.

La base de données regroupe :

- les ensembles flous associés aux variables d'entrée et de sortie du contrôleur flou,
- les facteurs d'échelle (gains) en entrée (normalisation) et en sortie (dénormalisation).

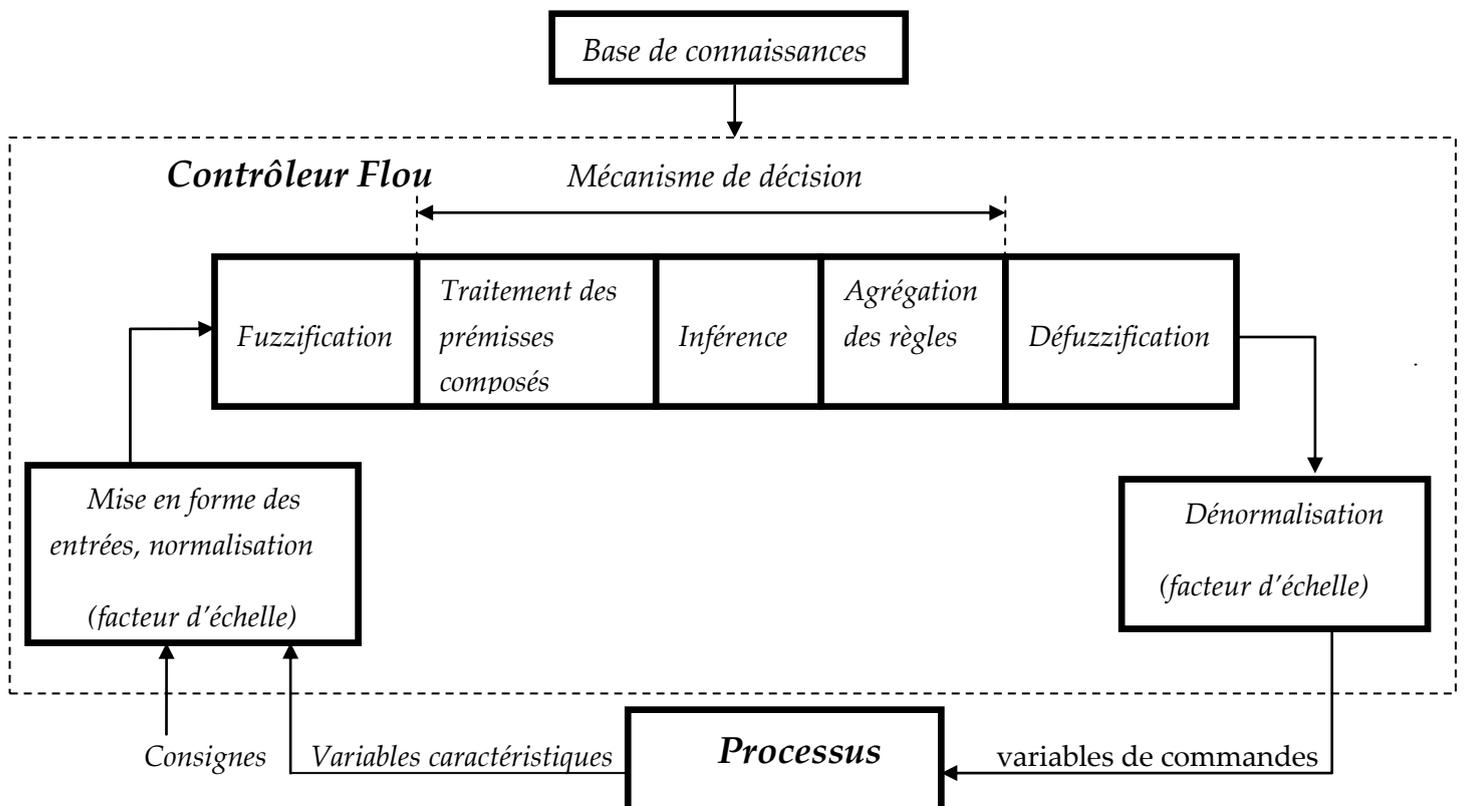


Figure 2.6. Structure de base d'un contrôleur flou.

On distingue classiquement trois parties dans la structure d'un contrôleur flou : la fuzzification, le mécanisme de décision et la défuzzification.

- I. La fuzzification est l'étape qui permet de transformer une grandeur mesurée sur le processus en un ensemble flou.
- II. Le mécanisme de décision permet de calculer l'ensemble flou associé à la commande.
- III. La défuzzification est l'étape qui permet de transformer l'ensemble flou, obtenu par le calcul précédent, en une grandeur de commande à appliquer au processus.

Les opérations de normalisation et de dénormalisation sont des étapes optionnelles.

Nous allons maintenant revenir en détail sur les différentes étapes dans le traitement des règles.[9]

2.3.2.1. Mise en forme des entrées, normalisation

Cette première étape permet le traitement des variables d'entrée du contrôleur flou, par exemple, calcul d'erreurs et de variations d'erreurs. L'utilisation de domaines normalisés (univers de discours compris entre -1 et 1) nécessite une transformation d'échelle transformant les grandeurs physiques des entrées en des valeurs normalisées appartenant à l'intervalle [-1, 1].

2.3.2.2. Fuzzification

C'est l'opération de *projection* de variables physiques réelles sur des ensembles flous caractérisant les valeurs linguistiques prises par ces variables. Deux cas peuvent se présenter selon que la mesure d'une variable physique réelle est précise (valeur numérique) ou pas (issue par exemple d'un capteur flou) :

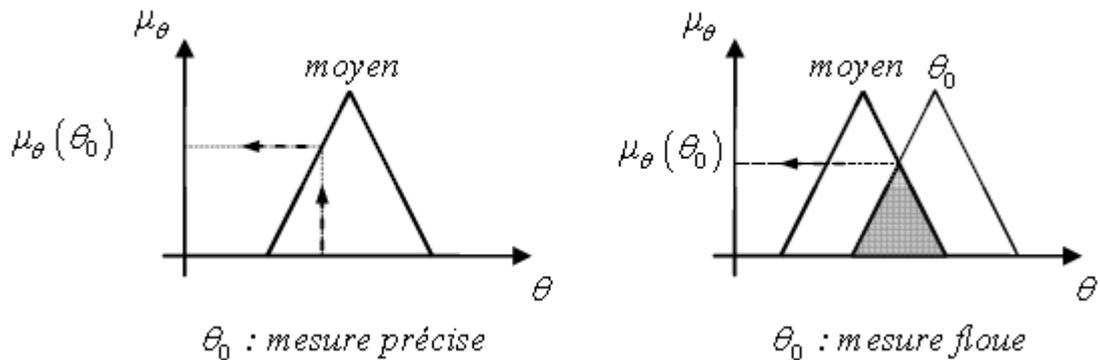


Figure 2.7. Conversion numérique symbolique.

Le choix de la forme des fonctions d'appartenance (triangulaires, trapézoïdales, exponentielles, gaussiennes,...) est arbitraire. Des études comparatives ont montré, selon différentes formes de fonctions d'appartenance, des résultats pratiquement similaires en boucle fermée mais les formes triangulaires facilitent la programmation ce qui explique qu'elles soient le plus fréquemment utilisées. Quant au nombre de fonctions d'appartenance, il est généralement impair car elles se répartissent autour de zéro. Un exemple de fonctions d'appartenance triangulaires est donné dans la figure 2.8.

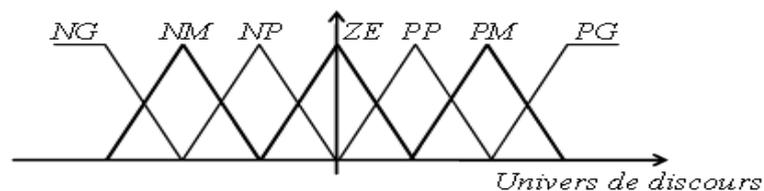


Figure 2.8. Exemple de fonctions d'appartenance.

NG, NM, ..., PG sont des valeurs linguistiques, avec :

- NG : « Négatif Grand »
- NM : « Négatif Moyen »
- NP : « Négatif Petit »
- ZE : « Zéro »
- PP : « Positif Petit »
- PM : « Positif Moyen »
- PG : « Positif Grand »

2.3.2.3. Traitement des prémisses composées

En général, les prémisses des règles vont comporter plusieurs clauses liées par des connecteurs « ET », « OU » et « NON ». Dans la pratique, pour les opérations de conjonction et de disjonction, on a souvent recours, parmi les normes et conormes triangulaires, aux opérateurs *min* et *max*. quant à la négation A^C d'un ensemble flou A, elle est caractérisée par : $\mu_c(x) = 1 - \mu_A(x)$.

Des modificateurs linguistiques peuvent aussi être utilisés dans l'écriture des règles, par exemples :

$$\mu_{\text{Peu } A} = \sqrt{\mu_A}$$

$$\mu_{\text{Très } A} = \mu_A^2$$

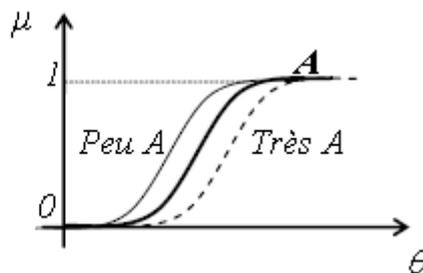


Figure 2.9. Exemple de modificateurs linguistiques.

2.3.2.4. Inférence floue

Elle repose sur l'utilisation d'un opérateur d'implication, lequel permet d'évaluer un degré de vérité d'une règle R de la forme « Si X est A alors Y est B ». En d'autres termes, cet opérateur quantifie la force de la liaison entre la prémisse et la conclusion de la règle.

Il existe de nombreux et différents opérateurs d'implication selon l'interprétation logique que l'on donne à l'implication « A implique B » ($A \rightarrow B$). On distingue ainsi l'implication classique où « A implique B » est définie par :

« Non A Ou B » de l'implication dite conjonctive où « A implique B » est définie par « A Et B » ($A \cap B$).

Les opérateurs les plus courants en commande sont de type conjonctif :

$$\begin{cases} \text{l' implication de Mamdani (1974) : } \mu_R(x, y) = \min(\mu_A(x), \mu_B(y)) \\ \text{l' implication de Larsen (1980) : } \mu_R(x, y) = \mu_A(x) \cdot \mu_B(y) \end{cases}$$

Soit la règle : « Si la cylindrée du véhicule est importante, alors sa consommation en carburant est élevée ». Cette règle doit pouvoir être utilisée pour un véhicule donné dont on connaît précisément la cylindrée, qui n'est pas forcément typique de la caractérisation « importante », et doit également fournir une conclusion relative à sa consommation en carburant si la cylindrée du moteur n'est que relativement importante, par exemple. Dans la logique classique, le modus ponens ne permettrait pas d'obtenir une conclusion que si l'on savait exactement que la cylindrée du véhicule considérée est importante. Il faut donc modifier le modus ponens pour atteindre la souplesse de raisonnement souhaitée. Le modus ponens trouve son équivalent flou dans le cadre du raisonnement approximatif sous la forme du *modus ponens généralisé* que nous présentons formellement ci-après.

	Logique classique	Logique floue
Fait	<i>X est A</i>	<i>X est A'</i>
Règle	<u><i>Si X est A alors Y est B</i></u>	<u><i>Si X est A alors Y est B</i></u>
Dédution	<i>Y est B</i>	<i>Y est B'</i>

La logique floue permet ainsi de déduire un nouveau fait *B'* caractérisé par :

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} T(\mu_{A'}(y), \mu_R(x, y))$$

Pour une t-norme *T* appelé opérateur de modus ponens généralisé.

En commande, l'opérateur de Zadeh est couramment utilisé :

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} \min(\mu_{A'}(y), \mu_R(x, y))$$

Si *A'* est un singleton x_0 , alors :

$$\mu_{B'}(y) = \sup_{x \in X} \min(\mu_{A'}(y), \mu_R(x, y)) = \mu_R(x_0, y)$$

Pour l'implication de Mamdani, on obtient :

$$\mu_{B'}(y) = \min(\mu_A(x_0), \mu_B(y))$$

2.3.2.5. Agrégation des règles

Selon le type de l'implication, classique ou conjonctive, l'opérateur utilisé pour agréger les règles est, respectivement, de type conjonctif ou disjonctif. Ainsi, en commande, l'implication étant généralement de type conjonctif, cela revient à considérer que les règles sont liées par un opérateur *OU*. En pratique, on utilise l'opérateur *max* :

$$\mu_{B'}(y) = \max_{i=1 \text{ à } N} \min(\mu_{B_i'}(y))$$

Avant de décrire la prochaine étape consistant à transformer le résultat de l'agrégation des règles en une valeur précise de commande, considérons d'abord un exemple classique illustrant le raisonnement de Mamdani.

L'exemple illustré par la figure 2.10 considère les deux règles suivantes :

R₁ : Si (x₁ est ZE et x₂ est ZE) alors y est ZE

R₂ : Si (x₁ est PP et x₂ est PP) alors y est PP

La méthode de Mamdani repose sur l'utilisation de l'opérateur *min* pour la combinaison des prémisses et pour l'implication. Chaque règle est activée séparément et les conclusions sont agrégées pour définir l'ensemble flou associé à la variable de sortie *y*. l'agrégation des règles est réalisée par l'opérateur *max*.

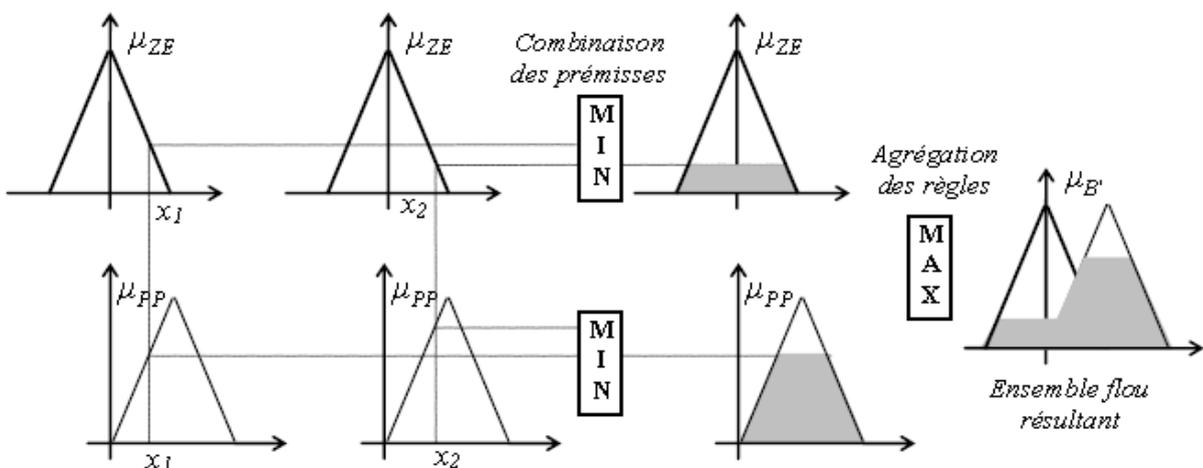


Figure 2.10. Illustration de la méthode de Mamdani.

2.3.2.6. Défuzzification

La défuzzification consiste à transformer l'ensemble flou résultant de l'agrégation des règles en une grandeur de commande précise. Là aussi il existe plusieurs méthodes, parmi lesquelles :

- Le dernier des maxima,
- La moyenne des maxima,
- Le centre de gravité,
- Le centre des aires,
- Le centre de la plus grande surface,
- Le centre des maxima.

Les méthodes de défuzzification les plus utilisées en commande floue sont le centre de gravité, le centre des aires et le centre des maxima.

La méthode de la hauteur et ses variantes

La méthode de la hauteur consiste à choisir comme grandeur de commande la valeur du maximum.

$$U = \arg\{\max(\mu_{B'}(y))\}$$

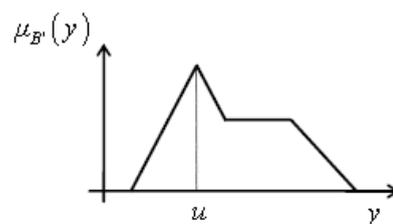


Figure 2.11. Défuzzification par la méthode des hauteurs.

Premier des maxima : y_1

Derniers des maxima : y_2

Moyenne des maxima : $u = \frac{y_1 + y_2}{2}$

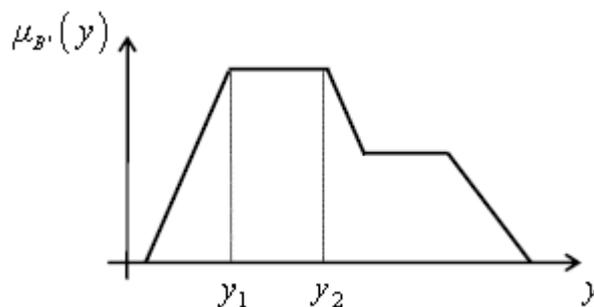


Figure 2.12. Variantes de la méthode des hauteurs

Dans le cas où la fonction d'appartenance $\mu_{B'}(y)$ a plus d'un maximum, on a le choix entre le premier, et le dernier ou la moyenne des maxima. la moyenne des maxima est similaire à la méthode du premier des maxima et consiste tout simplement à en faire la moyenne.

Ces méthodes nécessitent peu de calculs mais peuvent introduire des discontinuités dans la loi de commande, ce qui explique pourquoi elles sont si peu utilisées en commande floue.

Le centre de gravité

$$u = \frac{\int \mu_{B'}(y) \cdot y \cdot dy}{\int \mu_{B'}(y) \cdot dy}$$

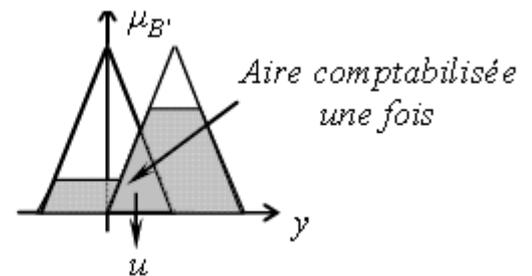


Figure 2.13 Défuzzification par un centre de gravité.

C'est la méthode de défuzzification la plus connue en commande floue. Cette méthode fournit intuitivement la valeur la plus représentative de l'ensemble flou issu de l'agrégation des règles. C'est aussi la méthode la plus coûteuse en temps de calcul

Le centre des aires (centre des sommes)

Cette méthode est similaire à la précédente mais ne nécessite pas le calcul de $\mu_{B'}(y)$. L'idée est de considérer la contribution de chaque aire individuellement. L'ensemble B' est alors construit à partir de la somme de chaque aire. Ainsi, les aires qui se recouvrent, si elles existent, sont comptabilisées plus d'une fois.

Avec n nombre d'aires.

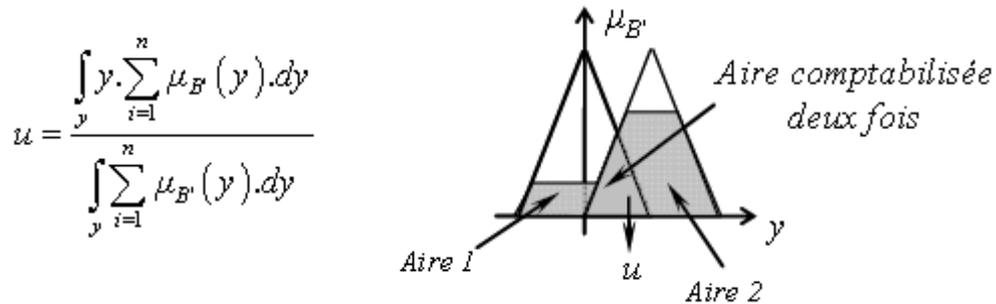


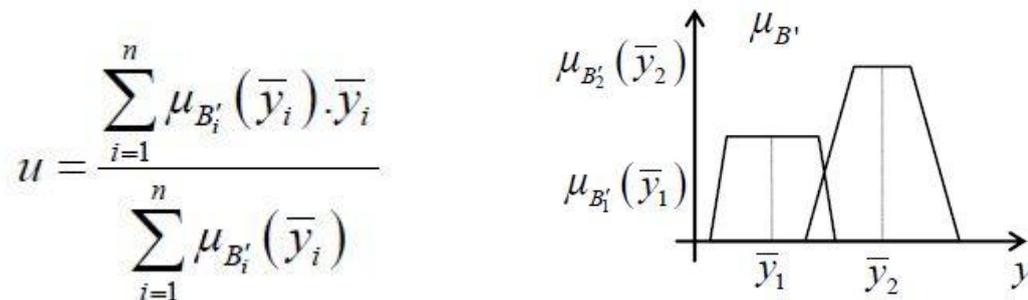
Figure 2.14. Défuzzification par un centre des aires

Le centre de la plus grande surface

Cette méthode consiste à trouver le centre de gravité de la plus grande surface.

Le centre des maxima

Cette méthode considère le maximum de chacune des contributions et en fait la moyenne pondérée.



Avec n nombre d'aires. Figure 2.15. Défuzzification par un centre des maxima.

2.3.2.7. Dénormalisation

Cette dernière étape transforme les valeurs normalisées des variables de commande en des valeurs appartenant à leur domaine physique respectif.

2.3.3. Réglage, stabilité et robustesse d'un contrôleur flou

2.3.3.1. Réglage

Un contrôleur flou possède de nombreux paramètres de réglage, ce qui peut, à priori, effrayer ses utilisateurs potentiels. En effet, contrairement aux

contrôleurs classiques, le contrôleur flou possède un nombre plus conséquent de paramètres, et offre, par la même, davantage de degrés de liberté.[10]

On peut distinguer parmi les choix et les réglages à faire :

- L'expression des règles,
- La définition des variables et des valeurs linguistiques, avec leurs fonctions d'appartenance associées,
- La méthode d'implication,
- La méthode d'inférence,
- La méthode de défuzzification,
- Les facteurs d'échelle sur les entrées et les sorties du contrôleur.

Cependant, on constate une certaine insensibilité du résultat au choix des méthodes d'implication, d'inférence et de défuzzification. Pour les autres paramètres, un réglage séquentiel est possible :

- Facteurs d'échelle,
- Fonctions d'appartenance,
- Règles.

Le réglage par essais successifs de ces nombreux paramètres étant assez long et fastidieux, diverses techniques d'autoréglage, d'optimisation et d'apprentissage ont été développées ces dernières années. On peut citer, à titre d'exemple, les techniques de la programmation mathématique, les réseaux de neurones, les algorithmes génétiques.

2.3.3.2. Stabilité

L'analyse de la stabilité est à priori difficile dans une approche de type « système à base de connaissances » dont l'objectif est d'éviter l'utilisation de modèle mathématique du procédé. Une modélisation floue du système bouclé est alors nécessaire pour l'analyse de la stabilité. Toutefois, si une caractérisation mathématique du processus à commander existe, le contrôleur flou étant, en général, un contrôleur

non linéaire, certains résultats de la théorie des systèmes non linéaires peuvent être utilisés. On distingue alors deux grandes familles d'approches :

- *La méthode directe de Lyapunov* : cette méthode permet d'affirmer la stabilité asymptotique d'un état d'équilibre s'il existe une fonction de Lyapunov $V(x,t)$ définie positive telle que sa dérivée $\frac{\partial V(x,t)}{\partial t}$ soit définie négative.
- *L'approche entrée sortie* : cette approche permet d'affirmer la stabilité d'un système si la sortie de celui-ci, en réponse à une entrée bornée, est elle-même bornée.

Nous choisissons ici de distinguer les différentes méthodes d'analyse de la stabilité selon que l'on dispose du modèle mathématique du processus ou pas. La liste des méthodes ici citées est non exhaustive, on peut se référer à pour en avoir un aperçu plus complet.

Il n'existe pas de modèle mathématique du processus

Dans ce cas, le système en boucle fermée est modélisé par un système flou. Les méthodes d'analyse de la stabilité dépendent alors du type du modèle.

- Si le modèle du système en boucle fermée est un modèle symbolique (de type Mamdani ou modèle aux relations floues) du type temps discret, la stabilité n'est pas étudiée au sens classique du terme et de nouvelles définitions de la stabilité sont introduites. On parle alors de la stabilité d'un symbole flou.
- Dans le cas où le système en boucle fermée est modélisé par un système flou de type Sugeno, des propriétés de stabilité asymptotique peuvent être démontrées à partir de l'utilisation de fonctions de Lyapunov quadratiques.
- Dans le cas où le modèle du système en boucle fermée est un modèle hybride on utilise également des fonctions de Lyapunov quadratiques pour

étudier la stabilité. Les modèles linguistiques et modèles de Sugeno sont deux cas particuliers de modèles hybrides.

Il existe un modèle mathématique du processus à commander

Dans ce cas, on peut faire appel à diverses méthodes d'analyse de la stabilité issues de la théorie des systèmes non linéaires. Ces méthodes diffèrent selon que le contrôleur flou a une expression mathématique simple ou pas.

- Si le contrôleur flou peut facilement se mettre sous forme analytique l'on est ramené à l'étude de la stabilité asymptotique d'un système en boucle fermée non linéaire et on peut alors utiliser la méthode directe de Lyapunov.
- Pour des contrôleurs flous plus complexes, l'expression mathématique étant inexploitable, on doit alors se contenter d'une propriété de secteur géométrique : le contrôleur flou est considéré comme une fonction mathématique non linéaire évoluant dans un secteur géométrique bien défini. On cherchera alors les conditions de stabilité absolue correspondantes à ce secteur, lesquelles peuvent s'exprimer soit dans un formalisme d'état soit dans un formalisme entrée sortie.

Les conditions les plus générales de stabilité peuvent être obtenues sans aucune hypothèse sur la nature du système (linéaire, non linéaire, variant, invariant, de dimension finie ou infinie). Cependant, bien que générales, ces conditions sont uniquement suffisantes et difficilement exploitables. C'est pourquoi le système est généralement supposé linéaire invariant de dimension finie bouclé par une non linéarité (ici, contrôleur flou). Selon les propriétés géométriques de cette non linéarité, différents critères de stabilité sont obtenus : critère du cercle, critère de conicité, lemme borné réel, lemme positif réel.

2.3.3.3. Robustesse

La robustesse, bien que maintes fois constatée, ne possède aucune démonstration rigoureuse. Son explication est à chercher dans l'aspect non linéaire de cette commande qui peut apparaître comme un contrôleur de type P.I.D à gains variables ou préprogrammés, selon le point de fonctionnement. Toutefois, si le modèle du système en boucle fermée est un modèle « *flou dynamique* » de Sugeno, on peut se reporter aux travaux de l'automatique classique.

2.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la logique floue et à l'utilisation de la logique floue en commande. L'accent a particulièrement été mis sur les différentes étapes dans le traitement des règles d'un contrôleur flou.

Retenons, que l'intérêt majeur de la logique floue en commande réside dans sa capacité à traduire une stratégie de contrôle d'un opérateur qualifié en un ensemble de règles linguistique facilement interprétables.

Nous disposons maintenant des notions élémentaires relatives à la commande en logique floue. Dans le chapitre suivant, on abordera la conception d'un contrôleur flou de type Mamdani de telle façon à limiter le temps de calcul, et on le comparera avec un contrôleur conçu selon des modifications proposées.

Chapitre 03 :

La conception du contrôleur flou

3.1. Introduction

Comme l'on a vu dans le deuxième chapitre, la logique floue qui est la logique sur laquelle est basée la commande floue, est plus proche en son esprit au raisonnement humain et au langage naturel que les systèmes logiques traditionnels. Elle fournit principalement des moyens efficaces pour la capture de la nature approximative et inexacte du monde réel. La partie la plus importante d'un contrôleur flou est un ensemble de règles de commande reliées par les concepts d'implication et de composition floues, et des règles d'inférence floue. De ce fait, un contrôleur flou représente un algorithme qui peut convertir une stratégie formelle (linguistique) de commande basée sur les connaissances d'un expert en une stratégie automatique de commande. L'expérience a montré que la commande floue donne de meilleurs résultats que les algorithmes de commande conventionnelle.

Cependant, il n'existe pas de procédure systématique pour la conception de contrôleurs flous, cela est dû à la grande diversité des choix des paramètres et d'opérateurs dans l'algorithme de commande floue. Le concepteur doit choisir :

- Une stratégie de fuzzification,
- Une méthode pour l'élaboration de la base de règles,
- Une logique de prise de décision, et
- Une stratégie de défuzzification.

Dans ce chapitre, nous présenterons dans la section 3.1 une méthode de conception d'un contrôleur flou de type Mamdani. Nous avons choisi de le rendre le plus simple et le plus rapide possible pour des raisons d'optimisation du temps de traitement. Cela est motivé par la conservation de l'aspect temps réel de notre contrôleur. Dans la section 3.2, nous présenterons en détails la procédure de conception de notre contrôleur flou et les choix optés pendant cette conception.

3.2. Conception d'un contrôleur flou

La procédure générale de conception de contrôleurs flous [9] comporte les étapes montrées sur la figure 3.1. Comme on le remarque les retours à des étapes précédentes interviennent à plusieurs niveaux. En particulier, on a mis en évidence l'étape de modification qui doit être primordiale à plusieurs reprises.

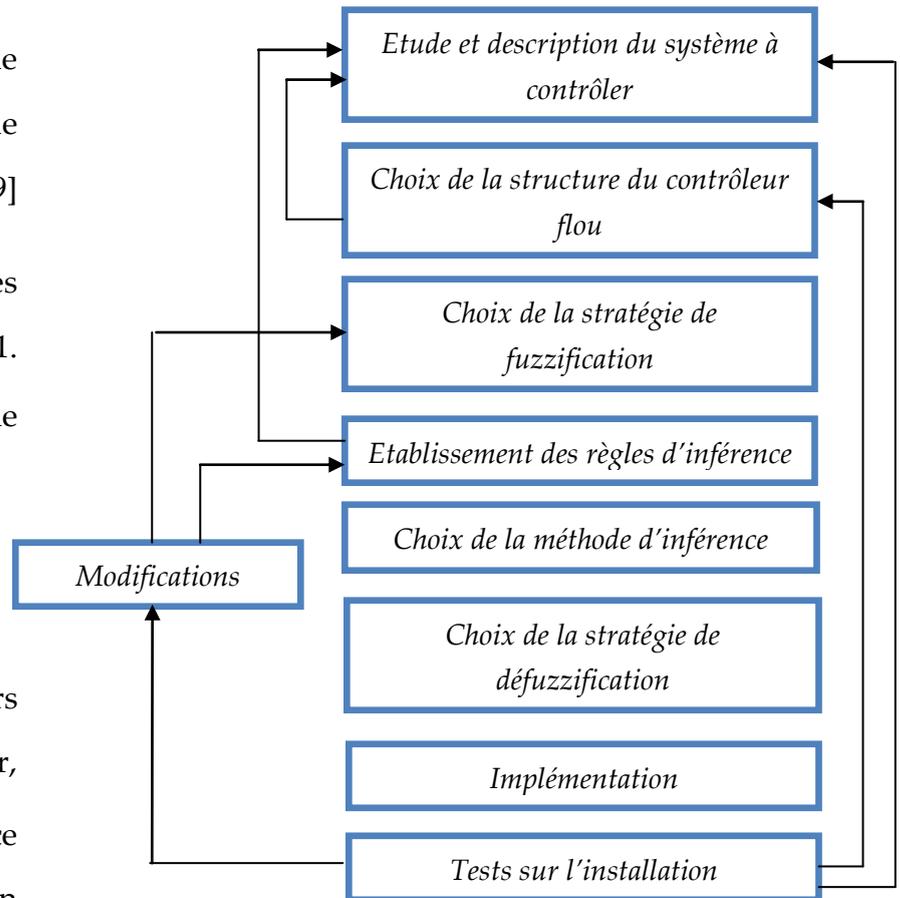


Figure.3.1. Procédure de conception de contrôleur flou.

Cette procédure de conception de régulateurs flous présente l'avantage qu'il ne faut pas établir un modèle pour le système à régler. Par contre, l'inconvénient est qu'il faut faire beaucoup de tests sur l'installation réelle, ce qui nécessite du temps et beaucoup de précautions. Malgré tout, le temps de développement total peut être inférieur à celui nécessaire à la conception avec établissement de modèle.

3.2.1. Choix de la structure du contrôleur

Comme nous l'avons déjà mentionné, nous avons choisi la structure du contrôleur proposée par Mamdani, qui est un contrôleur à deux entrées : *l'erreur de distance* et *l'erreur de orientation* au point cible. La sortie du contrôleur est la commande au processus.

3.2.2. Choix de la stratégie de fuzzification

Il s'agit du choix des formes des fonctions d'appartenance, et leur répartition sur l'univers de discours. Dans notre cas, nous avons choisi de travailler sur des univers de discours partitionnés en trois classes (sous ensembles flous) pour l'entrée d , cinq pour l'entrée Θ_d , six pour la sortie v et sept pour la sortie η . La forme la plus utilisée en commande floue est la forme triangulaire pour les entrées singleton pour les sorties, pour cela nous utiliserons des fonctions d'appartenance triangulaires pour les entrées et singleton pour la sortie. La figure 3.2 montre un exemple de partition flou de l'univers de discours pour les fonctions d'appartenance triangulaires.

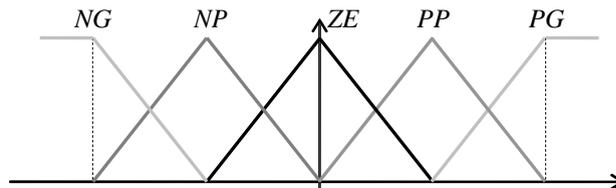


Figure.3.2. Partition des entrées et de la sortie du contrôleur flou

Les fonctions d'appartenance sont définies comme suit :

Les entrées :

- d : Erreur de distance au point cible.

Z : Zéro

M : Moyenne

G : Grande

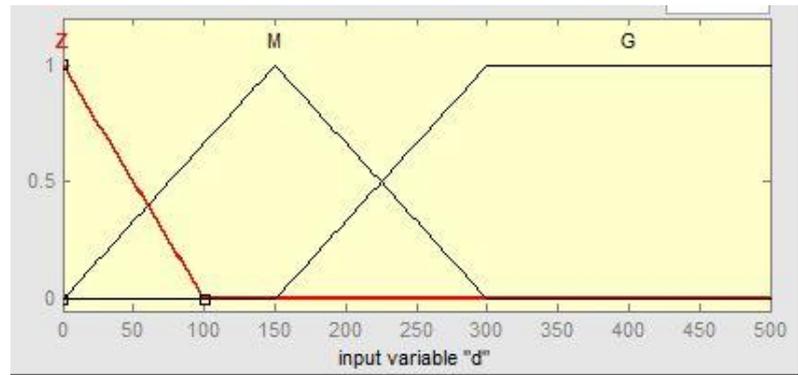


Figure.3.3. Fonctions d'appartenance de d

Θ_a : Erreur d'orientation par rapport au point cible.

NG : Négatif Grand

NM : Négatif Moyen

Z : Zéro

PM : Positif Moyen

PG : Positif Grand

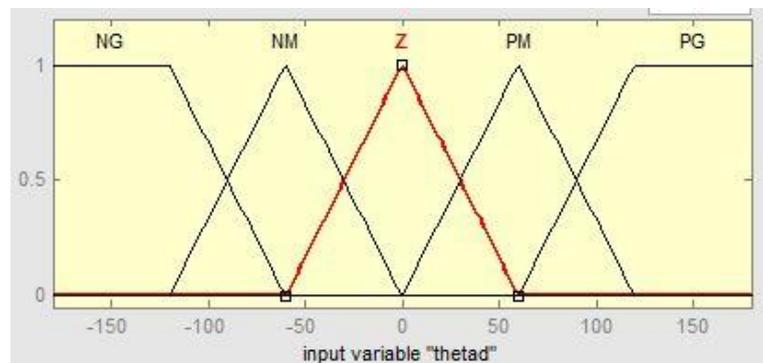


Figure.3.4. Fonctions d'appartenance de Θ_a

Les sorties :

V : vitesse linéaires des deux roues arrière.

N : Nul TL : Très Lent

L : Lent M : Moyenne

R : Rapide TR : Très Rapide

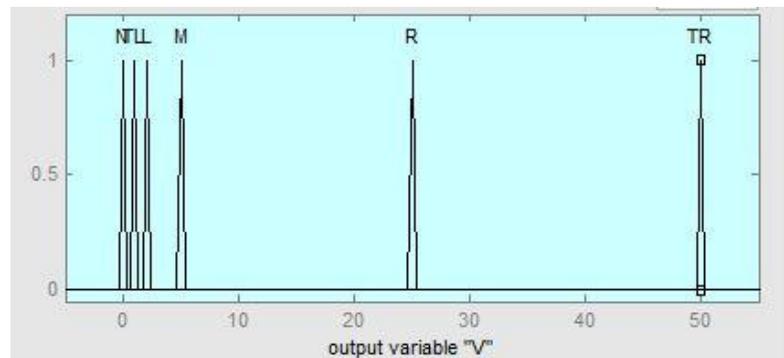


Figure.3.5. Fonctions d'appartenance de v

η : vitesse angulaire de rotation de la roue d'orientation avant

TG : Très gauche MG : Moyen Gauche

G : Gauche Droit : Droit

D : Droite MD : Moyenne Droite

TD : Très Droit

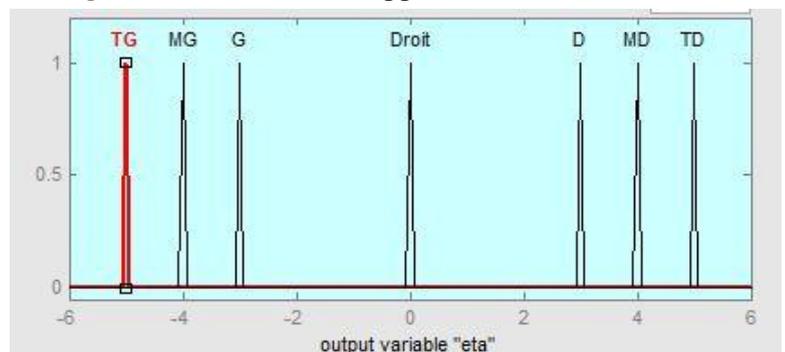


Figure.3.6. Fonctions d'appartenance de η

Chapitre 03 : La conception du contrôleur flou

3.2.3. Etablissement des règles d'inférence

Sur la base de la description du système à régler avec des variables linguistiques et de la définition des fonctions d'appartenance pour les variables d'entrée et de sortie, on peut établir les règles d'inférence.

Nous avons utilisé une base de règle que l'on trouve dans la plupart des applications où la dynamique du système étudié présente une certaine symétrie autour d'un certain état stable. Les tables 3.1 et 3.2 représentent les tables des règles retenues dans notre étude.

v		d		
		Z	M	G
Θ_d	NG	TL	L	L
	NP	TL	M	M
	Z	N	R	TR
	PP	TL	M	M
	PG	TL	L	L

Table 3.1. La table des règles pour v

η		d		
		Z	M	G
Θ_d	NG	MG	TG	TG
	NP	G	MG	MG
	Z	Droit	Droit	Droit
	PP	D	MD	MD
	PG	MD	TD	TD

Table 3.2. La table des règles pour η

3.2.4. Choix de la méthode d'inférence

Les opérateurs *min* et *max* tels qu'ils sont définis par Zadeh sont utilisés pour inférer les règles, et l'opérateur *max* pour l'agrégation des règles.

3.2.5. Choix de la stratégie de défuzzification

La méthode la plus utilisée en commande floue est celle du centre de gravité.

La surface de décision (contrôle) du contrôleur conçu est donnée sur la figure

3.7. Elle représente la non linéarité et la souplesse de la commande floue.

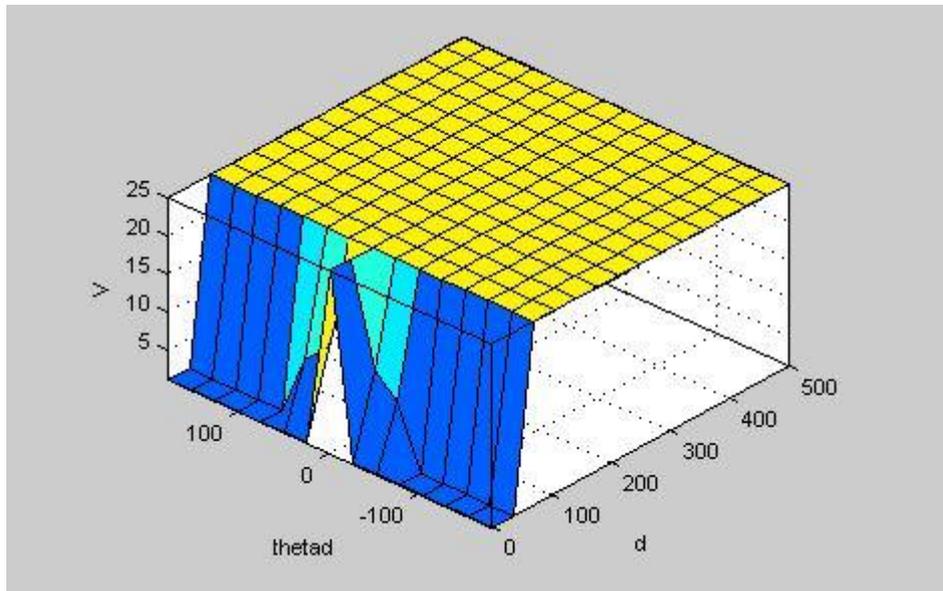


Figure.3.7. *La surface de décision du contrôleur flou.*

Chapitre 04 :

Application pour le suivi de trajectoires
par un robot mobile

4.1 Introduction

Dans le vaste domaine de la robotique mobile, l'étude du déplacement a une grande importance. De nombreuses approches du déplacement existent en utilisant différents types de capteurs.

Les robots mobiles, connaissant leurs positions, se déplacent d'un point à un autre avec diverses contraintes. Dans certains cas, seule l'atteinte du point final est importante, sans se préoccuper du trajet. Dans d'autres cas, le trajet parcouru est important tout comme sa dépendance du temps ; la trajectoire à suivre par le robot doit être définie.

Généralement, seul le chemin à suivre est défini. Le robot doit atteindre le point final selon une route indépendante du temps. C'est la tâche qui va nous intéresser dans ce chapitre.

Nous commencerons ce chapitre par la présentation du robot mobile utilisé pour la simulation, ainsi que son modèle cinématique, dans la section 4.2. Dans la section 4.3, nous expliquerons la stratégie de la poursuite de trajectoire utilisée. Le contrôleur conçu pour ce fait est présenté dans la section 4.4 et les résultats de simulation de la poursuite de quelques exemples de trajectoires sont donnés dans la section 4.5.

4.2. Le robot mobile

La structure du robot mobile utilisé est donnée sur la figure 4.1. C'est un robot de type tricycle. Il possède deux roues fixes de même axe, dotées d'un moteur muni d'un encodeur odométrique pour la mesure de la position. La roue avant est une roue d'orientation, son rôle est d'orienter la direction du robot, elle est dotée d'un capteur d'orientation qui donne la mesure de l'angle de braquage du robot.

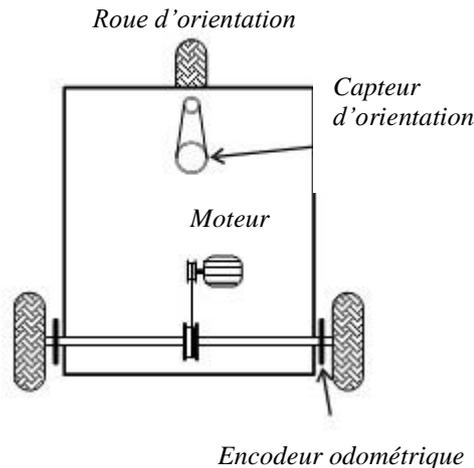


Figure 4.1. Structure du robot mobile

4.2.1 Modélisation cinématique

Pour la modélisation cinématique du robot mobile, nous avons besoin de déterminer les équations de quelques paramètres du robot. La figure 4.2 représente le paramétrage nécessaire pour la modélisation de notre robot mobile.

4.2.1.1 Définitions

On note $R = (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$ un repère fixe quelconque, dont l'axe \vec{z} est vertical et $R' = (O', \vec{x}', \vec{y}', \vec{z}')$ un repère mobile lié au robot. On choisit généralement pour O' un point remarquable de la plate-forme, typiquement le centre de l'axe des roues motrices s'il existe, comme illustré à la figure 4.3.

Par analogie avec la manipulation, on appelle *situation* ou souvent *posture* du robot le vecteur :

$$\xi = \begin{pmatrix} x \\ y \\ \theta \end{pmatrix}$$

où x et y sont respectivement l'abscisse et l'ordonnée du point O' dans R et θ l'angle

(\vec{x}, \vec{x}') La situation du robot est donc définie sur un espace M de dimension $m = 3$, comparable à l'espace opérationnel d'un manipulateur plan.

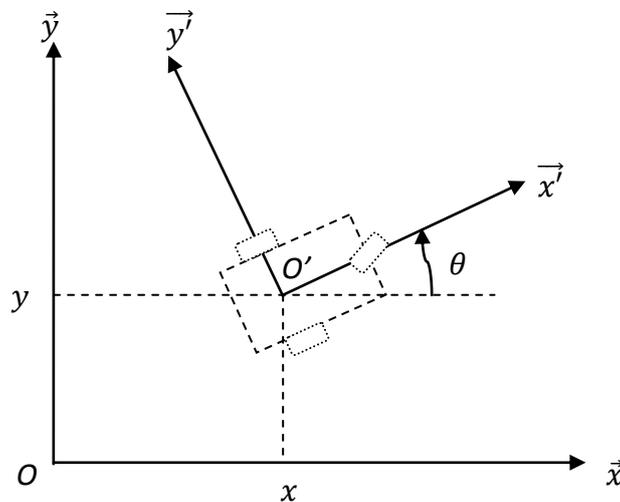


Figure 4.2. Repérage d'un robot mobile

La posture du robot exprimée dans son propre repère peut être exprimée en fonction de ξ en utilisant la matrice d'orientation :

$$\xi' = R(\theta) \cdot \xi = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \xi$$

avec $R(\theta)$ est la matrice de rotation ayant la propriété : $R(\theta)^{-1} = R(\theta)^T$. Cette matrice peut être utilisée pour la transformation des vitesses :

$$\xi' = R(\theta) \cdot \xi$$

4.2.1.2 Roulement sans glissement

La locomotion à l'aide de roues exploite la friction au contact entre roue et sol. Pour cela, la nature du contact (régularité, matériaux en contact) a une forte influence sur les propriétés du mouvement relatif de la roue par rapport au sol. Dans de bonnes conditions, il y a roulement sans glissement (**r.s.g.**) de la roue sur le sol, c'est-à-dire que la vitesse relative de la roue par rapport au sol au point de contact est

nulle. Théoriquement, pour vérifier cette condition, il faut réunir les hypothèses suivantes :

- le contact entre la roue et le sol est ponctuel.
- les roues sont indéformables, de rayon r .

En pratique le contact se fait sur une surface, ce qui engendre bien évidemment de légers glissements. De même, alors qu'il est raisonnable de dire que des roues pleines sont indéformables, cette hypothèse est largement fautive avec des roues équipées de pneus. Malgré cela, on supposera toujours qu'il y a *r.s.g.* et, par ailleurs, que le sol est parfaitement plan. Mathématiquement, on peut traduire la condition de *r.s.g.* sur une roue. Soit:

P : centre de la roue,

Q : point de contact de la roue avec le sol,

φ : angle de rotation propre de la roue (*dans le sens trigonométrique*),

θ : Angle entre le plan de la roue et le plan (o, x, z) (*orientation*),

On a : $P = (x, y, r)^T$, $Q = (x, y, 0)^T$, $V_P = (x, y, 0)^T$;

La nullité de la vitesse relative \overline{V}_q roue/sol, au point de contact, permet d'obtenir une relation vectorielle entre la vitesse \overline{V}_p du centre P de la roue et la vitesse de rotation \overline{W} de la roue:

$$\overline{V}_q = \overline{V}_p + \overline{W} \wedge \overline{PQ} = \vec{0}$$

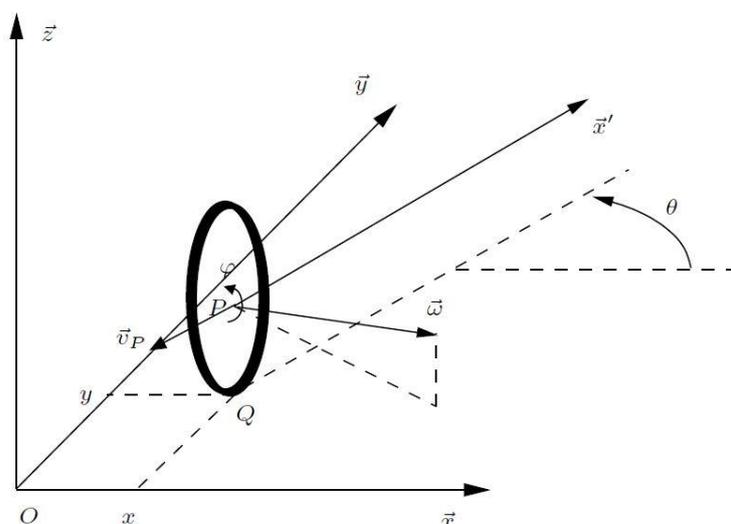


Figure 4.3. Caractérisation du roulement sans glissement

La partie $\overrightarrow{W} \wedge \overrightarrow{PQ}$ correspond au mouvement généré par la rotation de la roue. Il vient alors :

$$\overrightarrow{V_Q} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \dot{\varphi} \cdot \sin \theta \\ \dot{\varphi} \cdot \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} x \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ -r \end{pmatrix}$$

On obtient alors :

$$\overrightarrow{V_Q} = \begin{pmatrix} \dot{x} + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \theta \\ \dot{y} + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

Ceci qui se traduit par les deux contraintes scalaires :

$$\dot{x} + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \theta = 0$$

$$\dot{y} + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \theta = 0$$

Que l'on peut transformer dans le repère mobile associé à la roue, pour faire apparaître les composantes de vitesse dans le plan de la roue et perpendiculairement à la roue :

$$R(\theta) \cdot \begin{pmatrix} \dot{x} + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \cos \theta \\ \dot{y} + r \cdot \dot{\varphi} \cdot \sin \theta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{x} \cdot \cos \theta + \dot{y} \cdot \sin \theta + r \cdot \dot{\varphi} \\ -\dot{x} \cdot \sin \theta + \dot{y} \cdot \cos \theta \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\dot{x} \cdot \cos \theta + \dot{y} \cdot \sin \theta = -r \cdot \dot{\varphi}$$

(Mouvement généré par la rotation dans le plan de la roue : pas de patinage)

$$-\dot{x} \cdot \sin \theta + \dot{y} \cdot \cos \theta = 0$$

(Pas de mouvement dans le plan \perp à la roue : pas de dérapage)

Ces contraintes traduisent le fait que le vecteur $\overrightarrow{V_p}$ soit dans le plan de la roue et ait pour module $r \cdot \dot{\varphi}$

4.2.1.3 Centre instantané de rotation

Bien évidemment, pour un ensemble de roues donné, toute disposition ne conduit pas à une solution viable. Par exemple, un robot équipé de deux roues fixes non parallèles ne pourrait pas aller en ligne droite. Pour qu'une disposition de roues soit viable et n'entraîne pas de glissement des roues sur le sol, il faut qu'il existe pour toutes ces roues un unique point de vitesse nulle autour duquel tourne le robot de façon instantanée. Ce point, lorsqu'il existe, est appelé centre instantané de rotation (CIR). Les points de vitesse nulle liés aux roues se trouvant sur leur axe de rotation, il est donc nécessaire que le point d'intersection des axes de rotation des différentes roues soit unique.

4.2.1.4 Robot de type tricycle

Ce robot est constitué de deux roues fixes de même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal du robot. Le mouvement est conféré au robot par deux actions : la vitesse longitudinale et l'orientation de la roue orientable. De ce point de vue, il est donc très proche d'une voiture.

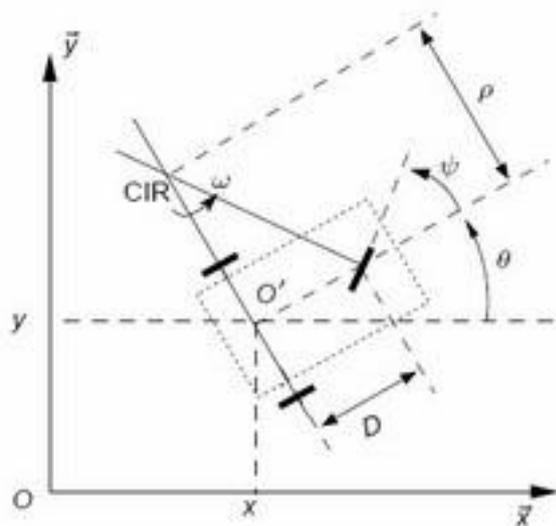


Figure 4.4. Paramétrage du robot mobile

Le CIR du robot se situe à la rencontre des axes des roues fixes et de la roue orientable. On peut déterminer ρ à partir de l'angle d'orientation de la roue avant, ψ

$$\rho = \frac{D}{\tan(\psi)}$$

On détermine w à partir de la vitesse linéaire v du véhicule (vitesse en O') :

$$v = w \cdot \rho \Leftrightarrow w = \frac{v}{D} \tan(\psi)$$

L'angle de braquage de la roue orientable est limité.

Le modèle cinématique exprimant le mouvement est donné en fonction de certains paramètres comme indiqué dans l'équation suivante :

$$\dot{\xi} = (\dot{x}, \dot{y}, \dot{\vartheta})^T = f(D, \rho, \psi, v)$$

$$\dot{x} = v \cdot \cos(\vartheta)$$

$$\dot{y} = v \cdot \sin(\vartheta)$$

$$\dot{\vartheta} = \frac{v}{D} \tan(\psi)$$

$$\dot{\psi} = \eta$$

Où η représente la vitesse d'orientation imposée à la roue et $u = (v, \eta)^T$ est le vecteur de commande cinématique.

4.3. La stratégie de poursuite

Dans l'approche que nous avons utilisée, une trajectoire est représentée par un ensemble de points de passage reliant le point de départ au point d'arrivée. Le chemin à suivre peut être une trajectoire d'évitement d'obstacle issue d'un planificateur, ou un nombre de points de passage qui peuvent être des postes de travail. Dans notre cas, nous avons considéré le premier cas où la trajectoire est un chemin d'évitement d'obstacles stockée en mémoire sous la forme de deux

vecteurs d'abscisses et d'ordonnées des points formant la trajectoire. Dans ce cas le robot doit aboutir à son but sans en avoir besoin de passer sur les points intermédiaires avec précision.

Pour conserver l'aspect simpliste du système de contrôle, et utiliser le contrôleur flou conçu dans le chapitre précédent, notre robot doit calculer l'angle d'orientation θ_d qui va le mener directement de sa position courante vers le prochain point sur la trajectoire. La figure 4.5 illustre ce principe.

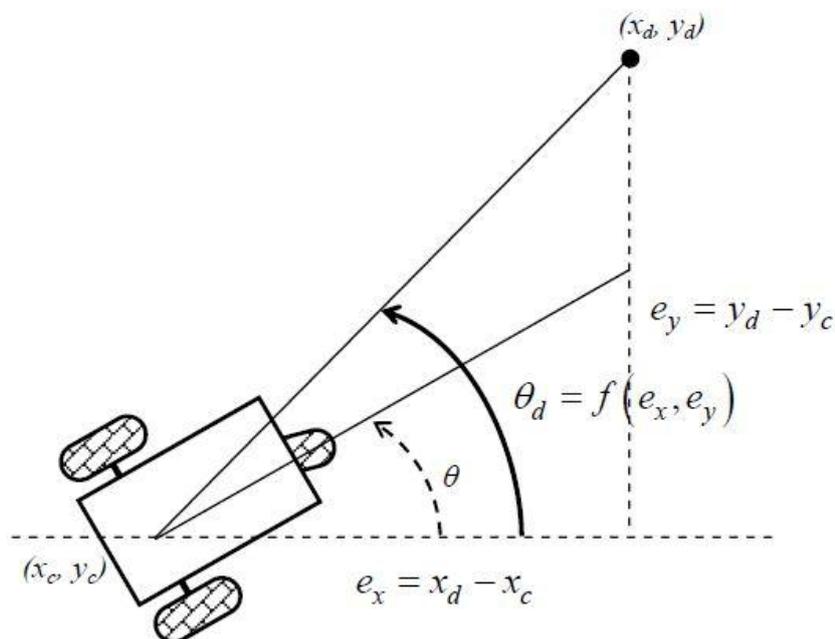


Figure 4.5. Principe de la poursuite

Le robot dans sa position courante de coordonnées (x_c, y_c) , calculée par des moyens odométriques, va calculer les composantes de l'erreur en position, c'est-à-dire les distances (e_x, e_y) , qui vont servir par la suite au calcul de l'orientation désirée.

Sur le chemin à parcourir par le robot, on va supposer des zones de tolérance autour des points de passage. Pendant son déplacement, si le robot entre dans la zone de tolérance du point auquel il se dirige, il commence à s'orienter vers le prochain point. Ce fait va donner un aspect souple au déplacement du robot, et va

éviter les arrêts et les changements d'orientation sur site, ces rotations sur places sont coûteuses en terme de consommation énergétique. Le robot doit arriver au point final avec une tolérance très réduite. Sur la figure 4.6 est illustré un exemple de trajectoire à suivre, les cercles autour des points représentent les zones de tolérance. Les flèches décrivent le déplacement du robot le long de la trajectoire.

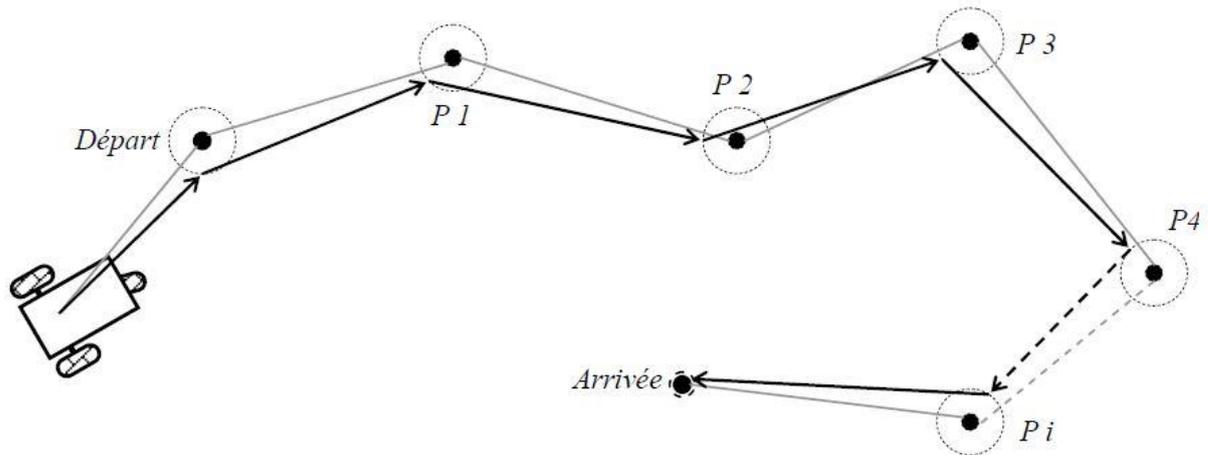


Figure 4.6. Principe de la poursuite

4.4. Le contrôleur conçu

En odométrie les capteurs fournissent au robot des mesures qui vont servir à estimer sa position courante en fonction d'une position initiale connue et des déplacements effectués. Les entrées effectives du contrôleur sont les coordonnées du point désiré, à partir desquelles on calcule les composantes de l'erreur en position que va utiliser le module de calcul de l'orientation désirée pour donner la valeur de θ_d , cette valeur comparée avec l'orientation courante du robot fournit l'erreur qui va à son tour servir avec sa dérivée d'entrées au contrôleur flou.

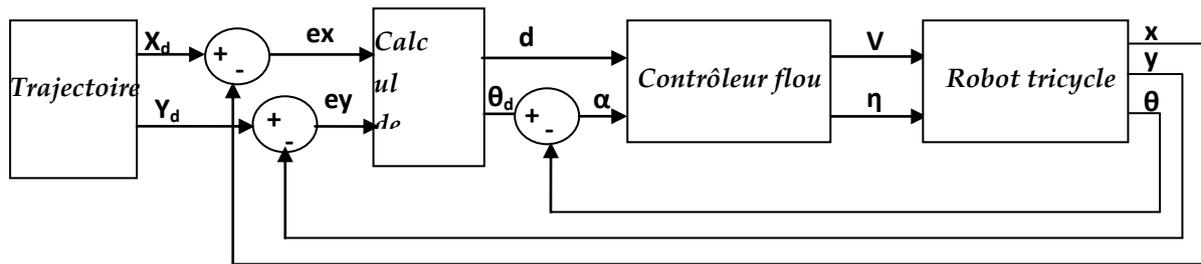


Figure 4.7. Structure du contrôleur conçu

$$ex = x_d - x$$

$$ey = y_d - y$$

$$d = \sqrt{(ex)^2 + (ey)^2}$$

$$\theta_d = \text{arctg}(ex, ey) \quad \alpha = \theta_d - \theta$$

La position et l'orientation du robot sont obtenues par intégration de l'équation suivante :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v \cdot \cos(\vartheta) \\ v \cdot \sin(\vartheta) \\ \frac{v}{D} \tan(\psi) \end{pmatrix}$$

$$\begin{cases} x(i+1) = x(i) + \dot{x} \cdot Te \\ y(i+1) = y(i) + \dot{y} \cdot Te \\ \theta(i+1) = \theta(i) + \dot{\theta} \cdot Te \end{cases}$$

Tel que : Te est la période d'échantillonnage.

4.5. Résultats de simulation

1^{er} essai : Cible

$$\text{Cible } \begin{cases} x = 20 \\ y = 40 \end{cases} \quad \text{Valeurs initiales } \begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ \theta = 0 \end{cases}$$

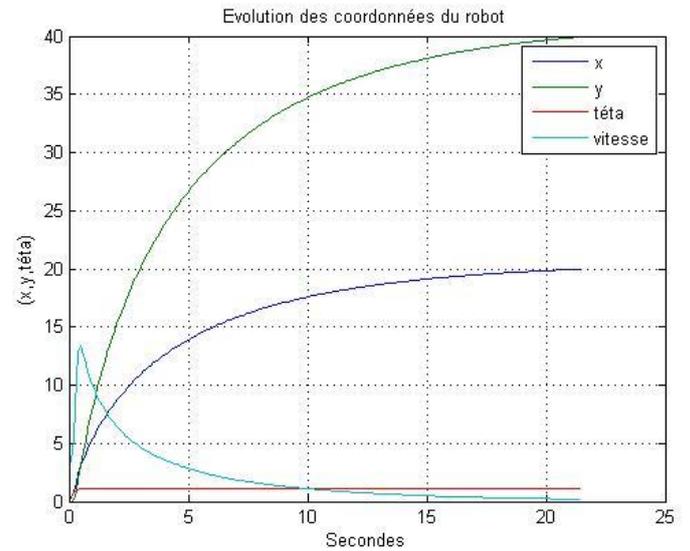
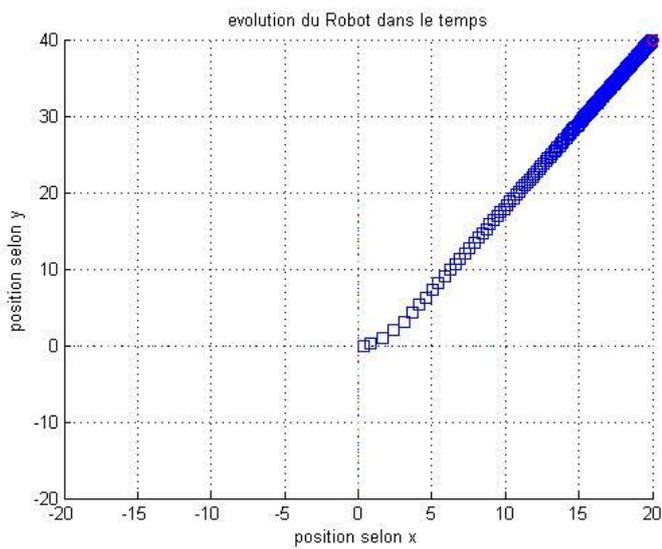


Figure 4.8. 1^{er} essai de navigation du robot vers une cible

2^{ème} essai : Cible avec données initiales

$$\text{Cible } \begin{cases} x = 80 \\ y = -35 \end{cases} \quad \text{Valeurs initiales } \begin{cases} x = -20 \\ y = 30 \\ \theta = 90 \end{cases}$$

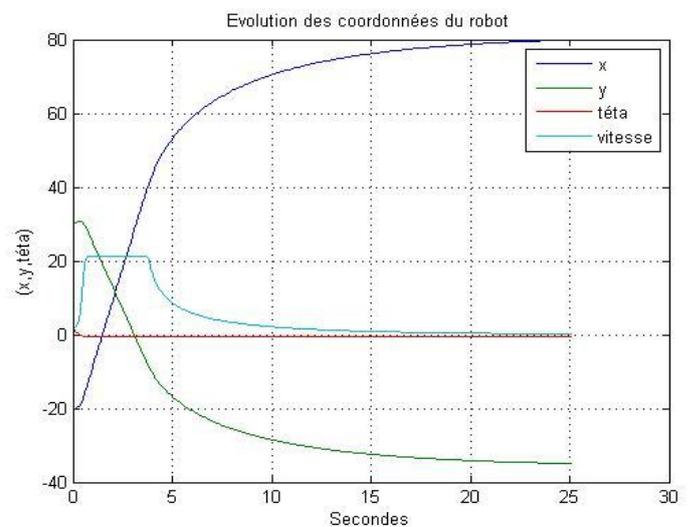
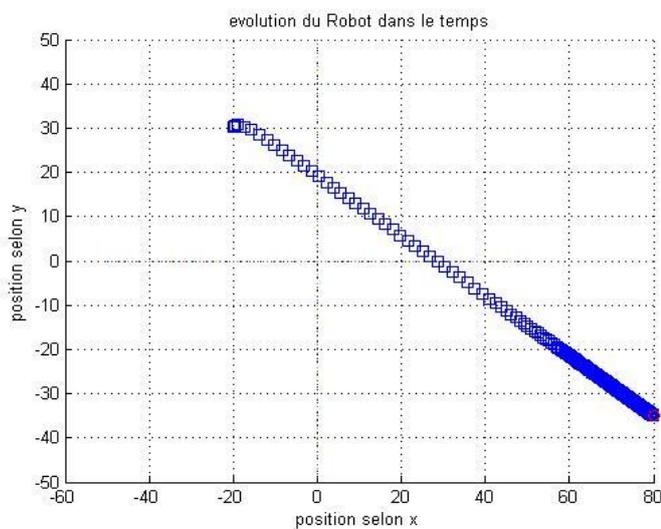


Figure 4.9. 2^{ème} essai de navigation du robot vers une cible

3ème essai : Trajectoire quelconque.

$$\begin{cases} x = [10 & 18 & 23 & -10 & 45 & 86 & 96 & 123] \\ y = [-35 & -40 & -10 & 30 & 50 & 55 & 80 & 88] \end{cases}$$

Valeurs initiales $\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ \theta = 0 \end{cases}$

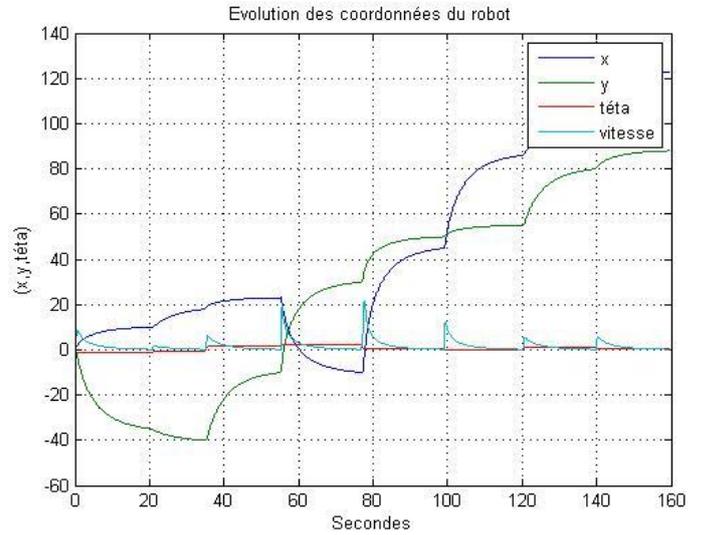
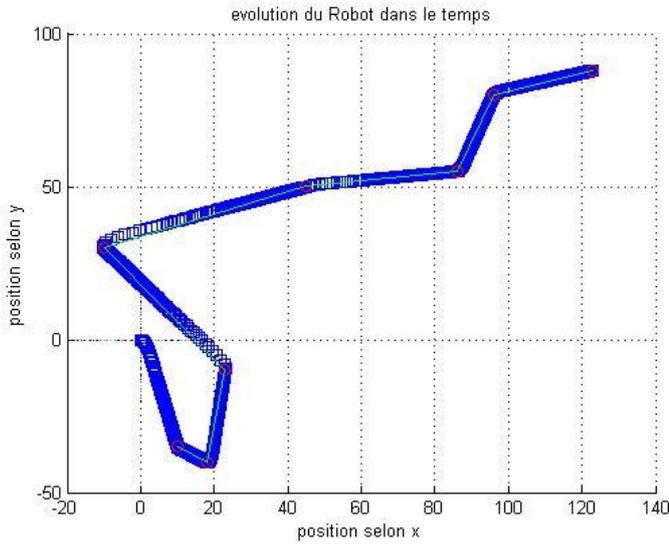


Figure 4.10. 3^{ème} essai de suivi de trajectoire du robot.

4ème essai : Trajectoire quelconque.

$$\begin{cases} x = [-15 & -25 & 12 & 19 & 25 & 25 & 20 & 15 & -6 & -10 & 2 & 40 & 100] \\ y = [10 & 12 & 30 & 40 & 35 & 20 & -5 & -8 & -1 & 13 & 31 & 55 & 80] \end{cases}$$

Valeurs initiales $\begin{cases} x = 0 \\ y = 0 \\ \theta = 0 \end{cases}$

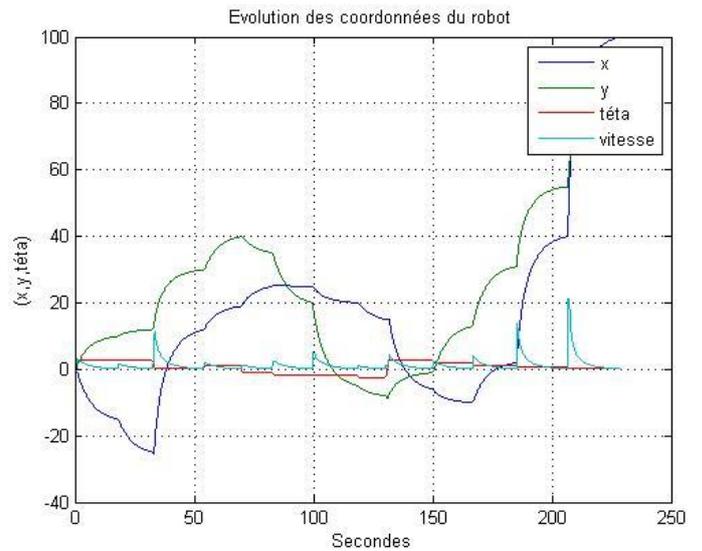
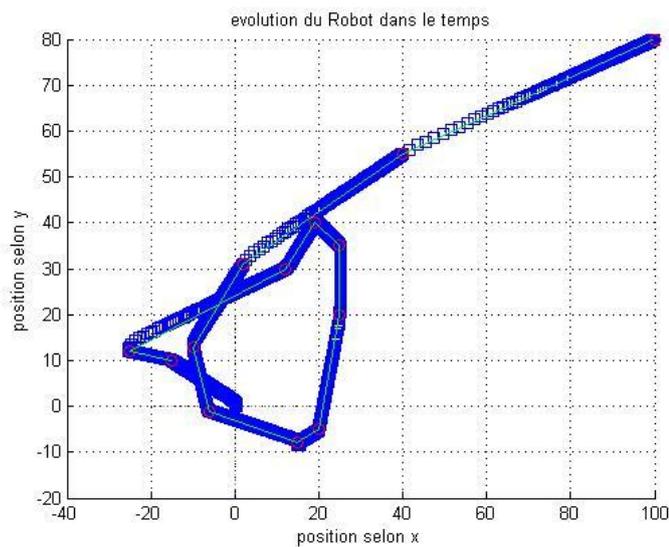


Figure 4.11. 4^{ème} essai de suivi de trajectoire du robot.

4.6. Conclusion

La poursuite d'une trajectoire est une tâche importante que doit exécuter un robot mobile avec le minimum d'erreurs. Elle constitue la base de toute mission du robot. Pour les robots à commande différentielle, le maintien du robot sur son chemin revient à régler les vitesses des roues motrices de façon à donner au robot l'orientation désirée.

Une trajectoire est un ensemble de points à parcourir par le robot pour atteindre son but. La stratégie adoptée assure la souplesse des mouvements et simplifie la tâche de suivre une trajectoire.

Les systèmes à base de la logique floue ont un grand degré d'autonomie et une capacité de déterminer la conclusion (action) en temps réel plus proche du mode de raisonnement humain. Les résultats obtenus après l'implémentation de ce contrôleur flou ont été très satisfaisants, car le robot peut se déplacer d'une situation initiale vers une situation finale ou suivre une trajectoire quelconque en passant par des points spécifiés.

Conclusion générale

La logique floue est une technique qui permet une modélisation graduelle et nuancée des connaissances d'un expert ce qui mène à un mode de raisonnement très proche de celui d'un opérateur humain. Par conséquent, cette technique permet de prendre en compte toutes natures de connaissances qualitatives d'un expert dans toute application. Cette souplesse et simplicité de la logique floue ont fait de la logique floue l'un des domaines de recherche les plus actifs durant les dernières décennies. Les chercheurs travaillant sur l'application de la logique floue dans le contrôle de processus se sont concentrés sur l'élaboration de règles générales pour la conception de contrôleurs flous, et sur les critères d'analyse de stabilité, et les algorithmes d'optimisation des systèmes flous. L'inconvénient majeur de la logique floue réside dans la quantité importante de calculs qu'effectue un système flou pour aboutir à une décision. Ces calculs nécessitent un temps de traitement assez important. Ce qui rend difficile l'implantation des contrôleurs flous pour des applications temps réel.

Lors de la conception du contrôleur flou, le temps de traitement était le facteur le plus important. Pour cela, nous avons opté pour des fonctions d'appartenance triangulaires uniformément réparties sur des univers de discours normalisés. Les stratégies d'inférence et de défuzzification choisies ne nécessitent pas beaucoup de calculs.

Références

- [1] Roland Siegwart and Illah R. Nourbakhsh, Introduction to Autonomous Mobile Robots, the MIT press. ISBN: 0-262-19502-X.
- [2] David FILLIAT, Robotique Mobile, École Nationale Supérieure de Techniques Avancées ParisTech
- [3] SLIMANE Nouredine, *SYSTEME DE LOCALISATION POUR ROBOTS MOBILES*, Thèse de doctorat, UNIVERSITE DE BATNA 2005
- [4] Zidani Ghania, exécution de trajectoire pour robot mobile d'intérieur –Réseaux de neurones - , thèse de magister, de l'université de Batna 2009.
- [5] Bernard BAYLE, Robotique mobile, Télécom Physique Strasbourg, Université de Strasbourg
- [6] T. Takagi et M. Sugeno, fuzzy identification and its application to modeling and control, IEEE transactions on systems. Man and Cybernetics. Pages: 116 – 132, février 1985.
- [7] Véronique Lacrose, réduction de la complexité des contrôleurs flous : application à la commande multi-variable. Thèse de doctorat, de l'institut national des sciences appliquées de Toulouse 1997.
- [8] Bernadette et Bouchon Meunier, la logique floue et ses applications, Adison Wesley, ISBN 2-87908-073-8, 1995.
- [9] F. Chevrie, F. Guély, Cahier technique n° 191, La logique floue, SHNEIDER.
- [10] Hansruedi Bühler, "réglage par logique floue", *Presses Polytechniques et Université Romandes*, 1994.
- [11] Lakhmissi Cherroun¹, Mohamed Boumehraz². Designing of Goal Seeking and Obstacle Avoidance Behaviors for a Mobile Robot Using Fuzzy Techniques. J. Automation & Systems Engineering 6-4 (2012): 164-171