

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE FERHAT ABBAS-SETIF

## MÉMOIRE

Présenté à la Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département d'électronique

Pour l'obtention du diplôme de

## MAGISTER

Option: Contrôle

Par

**Mr: BEDAOUCHE Fatah**

### *Thème*

---

***Navigation visuelle et évitement d'obstacles utilisant  
la fonction du champ de potentiel de direction et la  
logique floue***

---

Soutenu le 24/02/2010 devant le jury:

F. KRIM	Prof à l'université de Sétif	Président
K.BENMAHAMMED	Prof à l'université de Sétif	Rapporteur
A. BERTIL	M.C à l'université de Sétif	Examineur
N.AMARDJIA	M.C à l'université de Sétif	Examineur
F.HAMIDA A/Hak	C.C à l'université de Sétif	Invité

## *Dédicaces*

*A ma grande mère regrettée*

*A mes chers Parents*

*A mes sœurs*

*A notre benjamin de la famille*

*Et à toute ma famille*

*Je dédie ce mémoire*

# *Remerciements*

Sur cette page qui sera probablement la plus consultée de ce mémoire, je tiens tout d'abord à remercier dieu puis monsieur A.HASSAM qui a combattu et qui m'a aidé pour me soutenir.

Je remercie davantage et chaleureusement les rapporteurs de mon mémoire, qui ont accepté de juger ce travail et d'y apporter leur caution. Je vous remercie vivement pour l'honneur que vous me faites en faisant partie du jury.

Je profite de cette occasion qui m'est offerte pour remercier tous mes amis qui m'ont beaucoup aidé durant cette période et qui me sont très chers ami(e)s (Salem, Salim, Fatah, Mohand ameziane, Nabila), je tiens à vous exprimer, ici, ma reconnaissance et ma gratitude pour votre aide, votre support, votre disponibilité, et tant d'autres que je ne peux tous les citer.

Je tiens aussi à remercier tous les membres travaillant à l'université A.Mira de Béjaia de leurs collaborations qui m'ont beaucoup aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Enfin, les derniers mots sont pour remercier toute ma famille pour leur aide et leurs encouragements constants et pour te remercier toi, mon père, pour ta présence, pour ton aide inestimable, ta patience et ton soutien permanent.

**Table des matières**

<b>Introduction</b>		1
<b>générale</b>		
<b>Chapitre I</b>	<b>Méthodes d'évitement d'obstacles</b>	4
<b>I.1</b>	Introduction	4
<b>I.2</b>	Méthodes d'évitement d'obstacles avec une trajectoire de référence	4
<b>I.2.1</b>	Trajectoire de navigation	4
<b>I.2.2</b>	Bande élastique	5
<b>I.3</b>	Méthodes d'évitement réactif d'obstacles sans trajectoire de référence	5
<b>I.3.1</b>	Domaine des angles de braquage	5
<b>I.3.2</b>	Fenêtre dynamique	6
<b>I.3.3</b>	Diagramme de proximité	6
<b>I.3.4</b>	Champ de potentiel	6
<b>I.3.4.1</b>	Les fonctions de potentiel	7
<b>I.3.4.2</b>	Des potentiels aux forces	8
<b>I.4</b>	Logique floue	10
<b>I.4.1</b>	Configuration interne d'un contrôleur flou	10
<b>I.4.2</b>	Fuzzification	10
<b>I.4.3</b>	Inférence	10
<b>I.4.4</b>	Défuzzification	10
<b>I.5</b>	Conclusion	10
<b>Chapitre II</b>	<b>Fonction du champ de potentiel</b>	11
<b>II.1</b>	Introduction	11
<b>II.2</b>	Historique	11
<b>II.3</b>	Comportement dynamique	12
<b>II.4</b>	Modèle de navigation humain	13
<b>II.4.1</b>	Fonction de la cible (attractive)	13
<b>II.4.2</b>	Fonction de l'obstacle (répulsive)	14
<b>II.4.3</b>	Modèle d'accélération	15
<b>II.5</b>	Modèle du champ de potentiel	16
<b>II.5.1</b>	Potentiel de la cible (attractif)	16
<b>II.5.2</b>	Potentiel de la cible (attractif)	16
<b>II.5.3</b>	Potentiel global	17

---

<b>II.6</b>	Conclusion.....	18
<b>Chapitre III</b>	<b>Simulation et résultats.....</b>	<b>19</b>
<b>Simulation 1</b>	<b>Fonction du champ de potentiel.....</b>	<b>19</b>
<b>III.1.1</b>	Introduction.....	19
<b>III.1.2</b>	L'extension aux tailles de l'obstacle.....	19
<b>III.1.3</b>	Accélération angulaire.....	20
<b>III.1.4</b>	Commande de vitesse linéaire.....	20
<b>III.1.5</b>	Paramètres du modèle.....	21
<b>III.1.6</b>	Modèle cinématique du robot mobile.....	22
<b>III.1.7</b>	Simulation.....	22
<b>III.1.8</b>	Résultats de simulation.....	24
<b>III.1.9</b>	Discussion.....	32
<b>Simulation 2</b>	<b>Logique floue.....</b>	<b>33</b>
<b>III.2.1</b>	Introduction.....	33
<b>III.2.2</b>	Contrôleur flou.....	33
<b>III.2.2.1</b>	Contrôleur flou aller vers cible.....	35
<b>III.2.2.2</b>	Contrôleur flou évitement d'obstacles.....	35
<b>III.2.3</b>	Simulation.....	36
<b>III.2.4</b>	Résultats de simulation.....	37
<b>III.2.5</b>	Discussion.....	41
<b>III.3</b>	Comparaison.....	41
<b>III.3.1</b>	Trajectoire.....	41
<b>III.3.2</b>	Taille de l'obstacle.....	42
<b>III.3.3</b>	Caractéristiques des deux méthodes.....	42
<b>III.3.4</b>	Avantages et inconvénients.....	42
<b>III.4</b>	Conclusion.....	43
<b>Conclusion générale</b>		<b>45</b>
<b>Bibliographie</b>		

### **Introduction générale**

#### ➤ **Historique**

Des milliers d'années après l'invention de la roue, vers 3000 ans avant Jésus Christ, l'homme a enfin trouvé le moyen de se déplacer plus rapidement et plus loin sans attendre que sa monture soit reposée. La machine à vapeur va révolutionner la vie des hommes. L'industrie va se développer très rapidement et les premiers véhicules entièrement contrôlés par l'homme, les trains par exemple, vont lui permettre d'aller encore plus vite et plus loin.

La dernière grande invention de l'homme pour se déplacer c'est le moteur à explosion. Sa relative facilité de mise en oeuvre a eu raison de son médiocre rendement et de sa nocivité. Il a rapidement équipé toutes sortes de véhicules: les voitures particulières, les autobus, les camions de transport, les engins de chantier, etc. Malgré de nombreuses améliorations pour rendre le pilotage de ces engins moins difficile et plus sûr comme la boîte de vitesse automatique, le régulateur de vitesse, les systèmes d'aide à la navigation, etc. le conducteur humain reste encore indispensable au guidage du véhicule.

La communauté scientifique et les industriels travaillent depuis longtemps à automatiser les véhicules.

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 [1], ...

#### ➤ **Navigation autonome**

La navigation est usuellement définie comme le guidage des véhicules d'un point à un autre. En robotique mobile, le sens du terme est élargi à l'ensemble des processus qui permettent au robot mobile de déterminer et d'exécuter les déplacements nécessaires pour atteindre une cible donnée.

La robotique mobile autonome vise plus spécifiquement à concevoir des systèmes capables de se déplacer de façon autonome. Les applications directes se situent notamment dans les domaines de l'automobile, de l'exploration planétaire ou de la robotique de service par exemple. De nombreuses

applications restent à découvrir, qui ne découlent pas directement des avancées de la robotique mais qui utilisent ses méthodes et ses développements [2].

### ➤ **Navigation visuelle**

Sous le vocable *navigation visuelle*, nous désignons toutes les fonctions qu'un système autonome doit exécuter pour planifier et exécuter ses déplacements dans un environnement quelconque, inconnu a priori, perçu par une ou plusieurs caméras embarquées [3].

Parmi les fonctions que le robot mobile doit savoir exécuter, citons:

- (1) l'acquisition d'une image et l'extraction d'une description 2D de la scène courante; il s'agit d'une fonction d'interprétation, qui identifie dans l'image, les entités de l'environnement utiles pour la navigation d'un robot terrestre: zones de terrain navigable, obstacles, chemins, amers...
- (2) la construction d'un modèle de l'environnement par fusion des descriptions acquises depuis les positions successives du robot mobile.
- (3) la planification d'une trajectoire requise par une tâche que doit exécuter le robot mobile, typiquement dans le contexte «*aller vers la cible tout en évitant les obstacles*»... cette trajectoire est générée à partir du modèle de l'environnement, acquis au préalable par le robot mobile, ou introduit par un opérateur dans la base de connaissance du système.
- (4) enfin, l'exécution de trajectoires par séquençage de mouvements élémentaires contrôlés à partir des images.

### ➤ **Plan de travail**

Le présent mémoire s'articule en trois chapitres. Le premier chapitre présente un panorama général des contributions les plus importantes proposées dans la littérature, dans le domaine de la navigation autonome pour un robot mobile. Nous détaillerons plus particulièrement et brièvement la méthode des champs de potentiel car elle représente l'idée générale de notre travail sous une autre forme.

Le deuxième chapitre est consacré à la représentation sous un autre formalisme la méthode des champs de potentiel citée en premier chapitre, plutôt dédiée aux véhicules autonomes. Dans cette partie, il s'agit d'introduire les caractéristiques humaines qui répondent aux objectifs de notre travail précisément pour l'évitement d'obstacles, en d'autre terme, avoir un modèle de navigation proche du modèle humain.

Le troisième et dernier chapitre expose la phase de simulation des deux techniques et les résultats obtenus. Ici, nous utilisons le modèle de navigation développé dans le deuxième chapitre avec

deux modifications apportées à ce modèle pour répondre aux objectifs fixés, et un contrôleur flou issu des connaissances humaines. Ce dernier a été très utilisé dans la robotique mobile grâce à la simplicité de sa mise en œuvre avec l'application des capteurs.

L'idée de son application réside sur sa comparaison avec la fonction du champ de potentiel développée en deuxième chapitre et définir les avantages et inconvénients de chacune d'elle. Le robot mobile est considéré comme étant un observateur.

Une conclusion générale avec perspectives clôture ce mémoire en faisant une récapitulation des principaux résultats obtenus dans cette thématique très difficile, de la navigation autonome du robot mobile à partir d'une fonction du champ de potentiel et la logique floue.

**I.1 Introduction**

L'évitement d'obstacles est un comportement de base présent dans quasiment tous les robots mobiles. Il est indispensable pour permettre au robot mobile de fonctionner dans un environnement inconnu et pour gérer les écarts entre le modèle interne et le modèle réel.

Ce chapitre traite la fonctionnalité d'évitement d'obstacles. Tout d'abord nous présentons un état de l'art des méthodes d'évitement d'obstacles qui sont efficaces à condition d'avoir une perception correcte de l'environnement. Étant donné la connaissance a priori de l'environnement et de la position de la cible, la navigation du robot mobile se rapporte à l'habileté de celui-ci de se déplacer en toute sécurité vers la cible utilisant sa connaissance et l'information sensorielle de l'environnement environnant. Ensuite nous proposons une méthode d'évitement d'obstacles pour des robots mobiles non holonomes. Cette méthode n'utilise pas une trajectoire de référence de façon à s'éloigner des obstacles et à satisfaire ses contraintes cinématiques.

La plupart des méthodes d'évitement d'obstacles sont des méthodes locales. En effet, les méthodes globales qui considèrent un modèle complet de l'environnement, se ramènent au problème de la planification de mouvement. Parmi les méthodes locales d'évitement d'obstacles, on peut distinguer deux catégories: les méthodes utilisant une trajectoire de référence et celles n'en utilisant pas. Le type de système et d'application oriente le choix vers une catégorie ou l'autre. Enfin un autre type de méthodes doit être mentionné, qui tient compte explicitement de la taille des obstacles pour réaliser un mouvement sans collision, ce qui définit une nouvelle problématique [2].

**I.2 Méthodes d'évitement d'obstacles avec une trajectoire de référence**

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

**I.2.1 Trajectoire de navigation**

Une méthode proposée par [C.Laugier 1999] repose sur l'enchaînement de trajectoires élémentaires (Sensor Based Maneuvers SMB), dans le contexte d'une voiture automatisée roulant sur une route [4]. Les SMB sont par exemple le suivi d'un couloir de route, le changement de file ou le parking parallèle. Les paramètres de chacune de ces modalités sont définis par les informations sensorielles. Un contrôleur, amélioré dans [F.Large 2000] par un réseau de neurones, permet d'enchaîner ces différentes modalités [5].

### **I.2.2 Bande élastique**

La méthode proposée par [S.Quinlan 1993] utilise une trajectoire initialement planifiée qui est représentée par une série de boules adjacentes (appelées «bulles») dans l'espace des configurations. Le rayon d'une boule centrée en une configuration est la distance de cette configuration à l'obstacle le plus proche. Ainsi une trajectoire est sans collision dès lors que les «bulles» qui la composent se recouvrent. Développée pour des systèmes sans contraintes cinématiques, cette technique considère la trajectoire comme une bande élastique, se modifiant sous l'action de forces répulsives générées par les obstacles, et de forces internes de contraction ou d'élasticité. Du fait de la représentation en bulles, la mise à jour de la trajectoire sous l'action des forces est très rapide [6].

Cette technique a été étendue à un robot mobile de type voiture par [M.Khatib 1997] [7]. La «forme» des «bulles» est ici donnée par la métrique des trajectoires de Reeds et Shepp (combinaisons d'arcs de cercle et de lignes droites) [P.Soueres 1996]. Le lissage de la courbe joignant les centres des «bulles» est réalisé en utilisant une courbe de Bézier [8].

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

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

### **I.3 Méthodes d'évitement d'obstacles sans trajectoire de référence**

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

#### **I.3.1 Domaine des angles de braquage**

Cette approche a été proposée par [W.Feiten 1994] pour un robot mobile de type unicycle. Il s'agit de calculer pour un ensemble de vitesses linéaires du domaine des angles de braquage (SAF) qui n'entraînent pas de collision avec les obstacles perçus. Cette méthode utilise une discrétisation en

grille du plan de travail autour du robot mobile. Elle exploite la possibilité de pré-calculer et de stocker dans des tables de recherche les SAF pour chaque cellule obstacle de la grille [9].

### **I.3.2 Fenêtre dynamique**

Cette technique proposée par [D.Fox 1997] travaille dans l'espace des commandes du robot mobile. La taille du domaine de recherche des vitesses accessibles (c'est à dire n'entraînant pas de collisions) est réduite par la prise en compte explicite de la dynamique (les capacités d'accélération) du système. Les commandes envoyées au robot mobile sont le résultat de la maximisation sur ce domaine de recherche d'une fonction de coût liée à la position de la cible. Cette méthode a été développée pour des robots mobiles se déplaçant à des vitesses élevées ( $1m/s$ ) dans des environnements intérieurs encombrés [10].

### **I.3.3 Diagramme de proximité**

Cette approche proposée par [J.Minguez 2000] repose sur un diagramme de proximité des obstacles, mis à jour au fur et à mesure du déplacement du robot mobile [11]. En fonction de l'allure de ce diagramme (nombre de passages sans obstacles, longueur des passages, etc.), un comportement adapté (exploration, avancement vers la cible, retour en arrière, etc.) est sélectionné. La direction de mouvement la plus prometteuse par rapport à la cible est alors choisie. Cette méthode a été appliquée à un véhicule de type unicycle grâce à une expression des obstacles dans l'espace des points accessibles en un mouvement élémentaire (un arc de cercle en l'occurrence), obtenue par une transformation dans l'espace dit «Ego-cinématique» [J.Minguez 2002] [12].

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

### **I.3.4 Champ de potentiel**

Le méthode des champs de potentiel pour la navigation en robotique, initialement proposée par [O.Khatib 1986] pour un bras manipulateur, consiste à construire une fonction de potentiel qui résume les objectifs de la navigation: éviter les obstacles (potentiel répulsif) et atteindre une configuration cible (potentiel attractif). À chaque position du robot mobile, une «force» résultante de l'action

conjuguée des obstacles et de la cible est calculée, qui correspond à une direction à suivre par le robot mobile [13].

Nous représentons le formalisme de la méthode des champs de potentiel classique dans le cas des robots mobiles. Tout d'abord, nous formulons le problème dans le cas où la scène ne comporte qu'un seul obstacle.

Soit un obstacle  $O$  que nous représentons par une fonction analytique.

Si  $X_g$  est le vecteur qui représente la position de la cible et  $X_r$  celle du robot mobile ( $X_r$  est appelé vecteur d'état du robot mobile), nous pouvons écrire pour le potentiel artificiel  $U(X_r)$  appliqué au robot mobile:

$$U(X_r) = U_g(X_r) + U_o(X_r) \dots \dots \dots (1)$$

où  $U_g(X_r)$  est le potentiel attractif généré par la cible en  $X_r$ ,  $U_o(X_r)$  le potentiel répulsif généré par l'obstacle en  $X_r$ .

**I.3.4.1 Les fonctions de potentiel**

La force attractive  $F_g$  permet au point de contrôle du robot mobile d'arriver à la cible et la force répulsive  $F_o$  permet d'éviter l'obstacle.

Le potentiel attractif est défini par:

$$U_g(X_r) = \frac{1}{2} k_g (X_r - X_g)^T (X_r - X_g) \dots \dots \dots (2)$$

$k_g$  est un facteur de gain positif, et  $U_g(X_r)$  est une fonction positive dont la dérivée de premier ordre est continue, et dont le seul minimum est de valeur nulle à  $X_r = X_g$ . Le potentiel  $U_o(X_r)$  doit être défini aussi de telle sorte que la fonction de potentiel artificiel  $U(X_r)$  soit non négative, continue, dérivable, et qu'elle atteigne son minimum de valeur nulle à  $X_r = X_g$ .

Afin d'éviter le déplacement du minima global de la fonction de potentiel attractif, cette fonction ne doit pas avoir une influence que dans une région délimitée autour de l'obstacle (définie par une distance  $d_o$ ). Cette fonction est donc définie sur deux intervalles de distances en assurant toujours

sa continuité de deuxième ordre. En suivant ce raisonnement, la distance  $d_o$  doit toujours être inférieure ou égale à la plus courte distance entre la cible et l'obstacle.

L'expression de ce potentiel dans [O.Khatib 1980] est [14]:

$$U_o(X_r) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_o \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_o} \right)^2 & \text{si } d < d_o \dots\dots\dots(3) \\ 0 & \text{si } d > d_o \end{cases}$$

où  $d_o$  représente la distance d'influence du potentiel et dépend généralement de la vitesse maximale du robot mobile et de sa capacité de l'accélération,  $d$  étant la plus courte distance de l'obstacle  $O$  au robot mobile, et  $k_o$  étant le gain de cette fonction. La distance de contournement (de valeur constante) est un des paramètres les plus importants dans l'exécution d'une tâche de navigation avec évitement d'obstacles et elle peut conduire à un échec. D'où l'amélioration de ce potentiel classique proposé par M.Khatib, décrit ci-dessous.

**I.3.4.2 Des potentiels aux forces**

En appliquant le gradient négatif sur  $U_g(X_r)$ , nous avons:

$$F_g = -\overrightarrow{grad}[U(X_r)] \dots\dots\dots(4)$$

d'où

$$F_g = -k_g (X_r - X_g) \dots\dots\dots(5)$$

ou la force  $F_g$  est calculée à partir de la connaissance du vecteur d'état  $X_r$ . Afin d'assurer la stabilisation de la force attractive au minima global, M.Khatib introduit une force additionnelle proportionnelle à la vitesse  $\dot{X}_r$ . Nous avons:

$$F_g = -k_g (X_r - X_g) - k_v \dot{X}_r \dots\dots\dots(6)$$

avec  $k_v$  étant le gain de cette vitesse.

De même, en appliquant le gradient négatif sur  $U_o(X_r)$ , nous avons:

$$F_o = -\overrightarrow{grad}[U(X_r)] \dots \dots \dots (7)$$

d'où

$$F_o(X_r) = \begin{cases} \frac{1}{2} k_o \left( \frac{1}{d} - \frac{1}{d_o} \right)^2 \frac{1}{d^2} \frac{\partial d}{\partial X_r} & \text{si } d < d_o \dots \dots \dots (8) \\ 0 & \text{si } d > d_o \end{cases}$$

où  $\frac{\partial d}{\partial X_r}$  représente le vecteur unitaire de la dérivée partielle de la distance  $d$  entre le robot mobile et

l'obstacle, et détermine aussi la direction de la force à appliquer.

En conséquence, le potentiel répulsif est la somme des potentiels répulsifs générés par chacun des obstacles perçus ( $n$ ), la force répulsive totale:

$$F_o(X_r) = \sum_{i=1}^n F_{o_i}(X_r) \dots \dots \dots (9)$$

La force résultante appliquée sur le robot mobile:

$$F = F_g + F_o \dots \dots \dots (10)$$

La force résultante  $F$  est transformée en commande du robot mobile selon la structure physique du robot mobile (contraintes cinématiques,...).

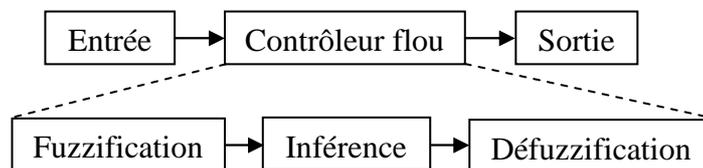
De nombreuses adaptations de cette technique ont été proposées. On peut par exemple citer [J.Borenstein 1991], qui calcule une direction de mouvement à partir d'informations proximétriques [15]. Cette méthode purement réactive se sujette à des minima locaux, et peut nécessiter une replanification globale. Par ailleurs, elle peut entraîner un mouvement oscillatoire du robot mobile dans certaines situations (des passages étroits par exemple).

**I.4 Logique floue**

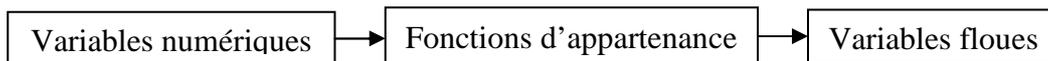
Selon le principe de Bühler, la logique floue est une branche des mathématiques, et à ce titre, toute une série de notions fondamentales sont développées. Ces notions permettent de justifier et de démontrer certains principes de base [16]. Dans ce qui suit, on ne retiendra que les éléments indispensables à la compréhension du principe du réglage par la logique floue. Ces éléments sont:

- ✓ Les variables floues
- ✓ Les règles d'inférence
- ✓ Les fonctions d'appartenance

**I.4.1 Configuration interne d'un contrôleur flou**



**I.4.2 Fuzzification**

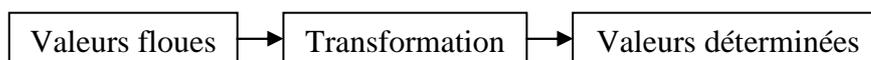


**I.4.3 Inférence**

Règles floues            Si ( $E_1$  est  $A_1$ ) et/ou ( $E_2$  est  $A_2$ ) Alors ..... S est B

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

**I.4.4 Défuzzification**



Méthode généralement utilisée est le centre de gravité.

**I.5 Conclusion**

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

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

**II.1 Introduction**

La navigation locale est un problème fondamental pour les robots mobiles fonctionnant dans les environnements réels: un robot mobile doit atteindre avec progrès l'endroit de la cible tout en évitant les obstacles inattendus. L'évitement d'obstacles a été l'objet d'une étude sans limite depuis quelques années, de ce fait, l'idée de la dynamique comportementale fait avancée l'étude en améliorant la méthode des champs de potentiel sous une autre forme tout en gardant le principe fondamental de la méthode.

Dans ce chapitre, nous proposons la méthode d'une vaste utilisation et même en cours de recherche utilisant un modèle biologique inspiré, on appelle ça la fonction du champ de potentiel.

**II.2 Historique**

En **1979**, **Gibson** a affirmé du fait que le «contrôle se situe pas dans le cerveau, mais dans le système d'environnement animal». Pour bien prouver cette exigence, nous devons montrer comment le comportement adaptatif apparaît des interactions d'un agent avec un environnement structuré guidé par l'information occurrente [17]. Ici nous montrons la modélisation de la dynamique comportementale de l'être humain marchant et de montrer comment les chemins locomoteurs apparaissent «en ligne» des lois simples pour la direction et l'évitement d'obstacles. Notre approche est inspirée par [G.Schöner et al 1995] systèmes de contrôle de **Dose** et **Engels** pour les robots mobiles [18].

Par *dynamique comportementale*, cela veut dire une description de l'évolution de temps du comportement constaté. Supposez que le comportement cible dirigé peut être décrit par quelques *variables comportementales*, qui définissent un *espace d'état* pour le système. Les cibles correspondent aux *attracteurs* dans l'espace de condition auxquelles la trajectoire converge, alors que les situations à éviter correspondent aux *repoussements* pour lesquels la trajectoire diverge.

Les êtres humains et d'autres animaux ont une habileté remarquable de combiner leurs actions avec les environnements complexes et en cours d'évolution. Cette habileté est particulièrement évidente dans des comportements principaux tels que la préhension et la locomotion. Avec peu d'effort conscient en marchant à travers des scènes encombrées, en évitant des obstacles, nous atteignons par habitude des cibles, et arrêtant efficacement les robots mobiles en toute sécurité. Le problème d'adapter le comportement aux environnements complexes a prouvé un enjeu en robotique. Les tendances récentes en robotique basées du comportement ont pris l'inspiration des solutions biologiques à de tels problèmes de contrôle, en particulier ceux des arthropodes, concernant l'architecture des deux systèmes d'action ([R.A.Brooks 1986]; [P.feiffer 1994]; [R.E.Ritzmann 2000]) et principes de contrôle sensoriel ([A.P.Duchon 1998]; [N.Franceschini 1992]; [M.V.Srinivasan et S.Venkatesh

1997]). Dans le présent chapitre, nous développons un modèle dynamique de locomotion vision guidée chez l'homme aux problèmes de la direction, évitement d'obstacles dans les robots mobiles [19.20.21.22.23.24].

Une approche courante au contrôle de robot mobile est de diviser la tâche en modules qui exécutent des tâches secondaires périphériques et centrales, caractérisés par [R.A.Brooks 1991] et [H.P.Moravec 1981] en tant que «sens, modèle, plan, acte» sous ce type de contrôle basé du modèle, l'information sensorielle est utilisée pour calculer un modèle interne assez raisonnable du tracé et mouvements des objets à 3D et surfaces dans la scène. Sur la base du modèle, un chemin d'action alors à travers la scène est explicitement projeté, avant son exécution dans l'environnement physique. Le procédé de planification de chemin peut calculer un itinéraire optimal sur une certaine variation principale, tel que le court chemin, moins d'énergie, ou minimum secousse [25.26]. Une approche alternative, provenant avec [J.J.Gibson 1958/1998, 1979], [D.N.Lee 1980], et [W.H.Warren 1988], a recherchée à réaliser le contrôle en ligne sur la base de l'information sensorielle occurrente, sans modèle explicite de l'environnement ou de planification de chemin ([Y.Aloimonos 1993]; [R.A.Brooks, 1991]; [A.P.Duchon et al 1998]. Sous ce contrôle basé d'information, le comportement adaptatif est régi par des tracés entre les variables informationnelles et les variables d'action, désignées sous le nom des *lois de contrôle*. Un objectif de cette approche est de déterminer comment les comportements apparemment prévus tels que la sélection d'itinéraire pourraient apparaître comme une conséquence de l'information de parcours est utilisée pour moduler l'action, confusion de la ligne entre le comportement purement réactif et le comportement planifié. Il reste à voir à quelle distance une telle approche peut être étendue à des problèmes plus complexes de navigation [27.28.29.30].

Une autre démarche dans ce développement a été l'introduction des principes dynamiques pour réaliser la stabilité et la flexibilité dans le comportement ([R.D.Beer 1995]; [G.Schöner et M.Dose 1992]; [G.Schöner et al 1995]; [W.H.Warren 1998b], établie lors de la recherche dans la coordination human motor ([J.A.S.Kelso 1995]; [P.N.Kugler et M.T.Turvey 1987]) [31.32.33.34.35].

### II.3 Comportement dynamique

L'*approche du comportement des systèmes dynamiques* étudie la formulation des comportements pour les agents autonomes. Plus particulièrement, le comportement émergent peut être caractérisé en termes de *variables comportementales* qui sont sélectionnées sur la base de leur rapport avec les objectifs [G.Schöner et al 1995]. L'état actuel du système, également comme états attentifs et évités, sont ainsi exprimable en tant que des ensembles de points dans l'espace des variables comportementales, et le comportement correspond aux trajectoires à travers cet espace. Dans le

langage des systèmes dynamiques, les points vers lesquels les trajectoires convergent s'appellent les *attracteurs* et les points pour lesquels les trajectoires divergent s'appellent les *repousseurs*.

Nous distinguons ainsi deux niveaux d'analyse: l'interaction agent-environnement (l'information et lois de contrôle), et le comportement émergent (comportement dynamique). Étant donné que le comportement est un produit complexe du système mutuellement accouplé, il ne peut pas être simplement dicté par l'agent. Le défi pour l'agent ou l'ingénieur devient ainsi celui d'identifier les lois de contrôle qui évoquent le comportement désiré dans l'ensemble de système, tel que l'information disponible est utilisée pour former la dynamique comportementale appropriée.

## II.4 Modèle de navigation humain

Inspiré par le travail de [G.Schöner et al 1995], Fajen et Warren ont conçu un modèle de navigation humain basé sur des expériences avec les hommes. Ces expériences ont été entreprises dans un environnement virtuel où les hommes ont vu un affichage et étaient physiquement libres pour se déplacer. Les hommes ont été ordonnés à marcher vers une cible à travers l'environnement virtuel; dans certains cas, ils ont dû éviter les obstacles le long du parcours. Un système de traçage a enregistré la position et l'orientation des hommes pendant qu'ils se déplaçaient. L'objectif de ces expériences, est bien l'estimation des paramètres qui vont être introduites dans le modèle [36.37.38].

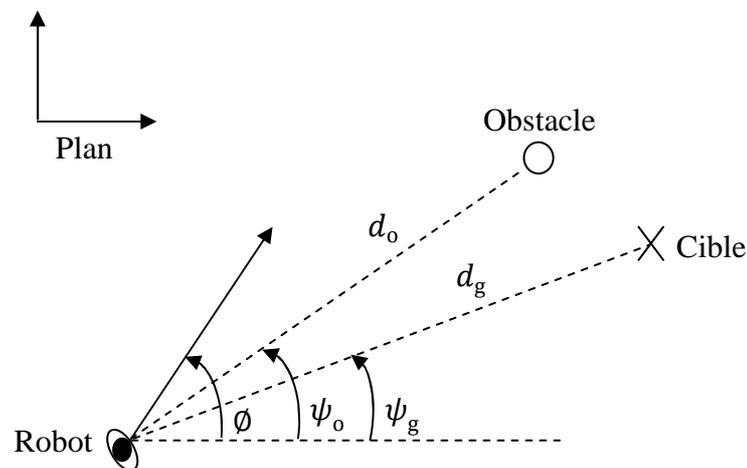


Fig.1 Définition des variables.

### II.4.1 Fonction de la cible (attractive)

Considérez un agent se déplaçant à travers un environnement simple avec une vitesse constante  $v$  et une direction de locomotion  $\phi$  (voir Fig.1). À partir de la position actuelle de l'agent, une cible se situe dans la direction  $\psi_g$  à une distance  $d_g$ . Pour s'orienter vers la cible, l'agent doit tourner sa

direction dans la direction de la cible, tel que  $\phi = \psi_g$  et  $\dot{\phi} = 0$ , ainsi, la condition de direction vers la cible proposée peut être exprimée par des valeurs particulières de  $\phi$  et  $\dot{\phi}$ . Puisque  $\phi$  et  $\dot{\phi}$  fournissent un ensemble de variables qui peuvent être utilisées pour exprimer l'état actuel du système, nous adoptons  $\phi$  et  $\dot{\phi}$  en tant que variables comportementales.

Ce comportement est modulé comme système angulaire de «masse-ressort». Pour obtenir une intuition, imaginez que la direction actuelle de l'agent est attirée à la direction de la cible par un ressort d'élasticité dont la rigidité est modulée par la distance de la cible. La fonction de la cible est ainsi une fonction d'erreur de direction  $(\phi - \psi_g)$  et de distance de la cible  $d_g$  (voir **Fig.2 (a)**):

$$f_g(\phi - \psi_g, d_g) = k_g (\phi - \psi_g) (e^{-c_1 d_g} + c_2) \dots \dots \dots (1)$$

Le terme de «rigidité» reflète la conclusion que la fonction augmente linéairement avec l'erreur de direction, et le paramètre  $k_g$  détermine la pente de cette fonction. En conclusion, l'attraction de la cible diminue exponentiellement avec la distance, où  $c_1$  détermine le taux d'affaiblissement et  $c_2$  une accélération angulaire minimum pour des cibles éloignés.

**II.4.2 Fonction de l'obstacle (répulsive)**

De même manière, avec la position actuelle de l'agent, un obstacle s'étend dans la direction  $\psi_o$  à une distance  $d_o$ , l'agent doit tourner loin de l'obstacle, tel que  $\phi \neq \psi_o$  quand  $\dot{\phi} = 0$ .

Ce comportement est modulé par le même système angulaire «masse-ressort». Imaginez que la direction est repoussée de la direction de l'obstacle par un autre ressort, la fonction est ainsi une fonction de l'erreur de direction  $(\phi - \psi_o)$  et de distance de l'obstacle  $d_o$  (voir **Fig.2 (b)**):

$$f_o(\phi - \psi_o, d_o) = k_o (\phi - \psi_o) (e^{-c_3 |\phi - \psi_o|} (e^{-c_4 d_o})) \dots \dots \dots (2)$$

Le terme de «rigidité» de l'obstacle reflète la conclusion que la fonction diminue exponentiellement à droite ou à gauche de l'erreur de direction; l'amplitude de cette fonction est déterminée par le paramètre  $k_o$  et son taux d'affaiblissement par  $c_3$ . La rigidité diminue de nouveau exponentiellement avec la distance de l'obstacle, où  $c_4$  est le taux d'affaiblissement.

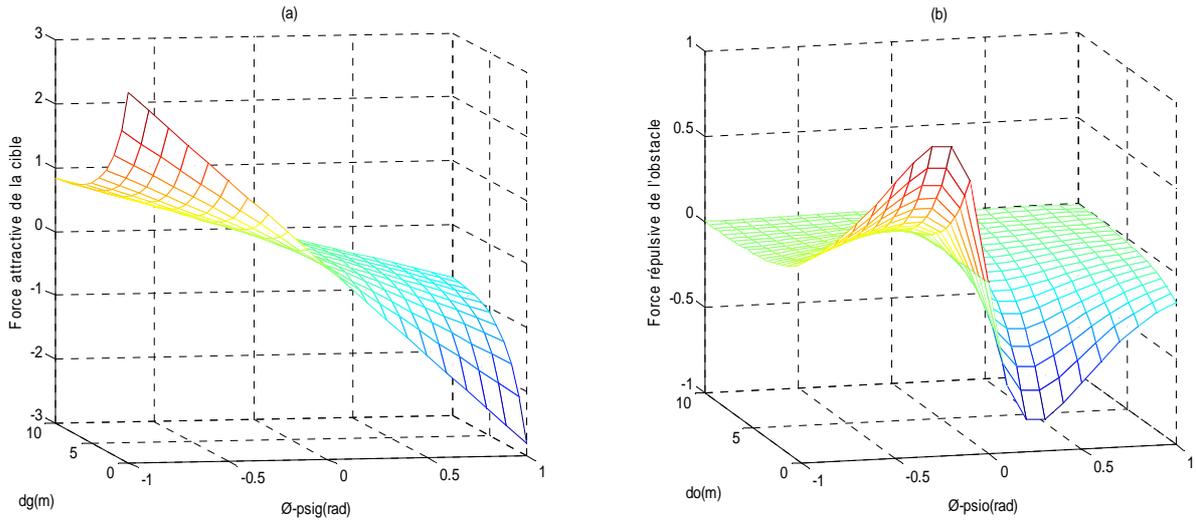


Fig.2 (a) Fonction de la cible et (b) Fonction de l'obstacle.

II.4.3 Modèle d'accélération

Nous aurons ensuite un modèle sous forme d'équation différentielle de deuxième ordre qui décrit comment les variables comportementales changent dans le temps, analogue à un système de «masse-ressort». Parlant généralement, le modèle se compose de trois composantes:

- ✓ la condition d'amortissement s'oppose à la rotation, et nous supposons que c'est une fonction monotoniquement croissante de  $\dot{\phi}$  et est indépendante de  $\phi$ .
- ✓ composante de la cible qui est supposée qu'elle détermine comment l'emplacement égocentrique d'une cible contribue à l'accélération angulaire  $\ddot{\phi}$ , et est supposée pour être une fonction de l'angle  $(\phi - \psi_g)$  et de distance du robot/cible  $d_g$ .
- ✓ composante d'obstacle qui est supposée qu'elle détermine la contribution de chaque obstacle dans la scène et est supposée pour être une fonction de l'angle  $(\phi - \psi_o)$  et probablement de distance du robot/obstacle  $d_o$ .

Prise ensemble, la forme générale du modèle est:

$$\ddot{\phi} = -f_d(\dot{\phi}) - f_g(\phi - \psi_g, d_g) + \sum_{i=1}^{\#obstacles} f_o(\phi - \psi_{o_i}, d_{o_i}) \dots \dots \dots (3)$$

où  $f_d(\dot{\phi}) = b\dot{\phi}$  est la fonction d' « amortissement », le terme d'amortissement  $b$  résiste à la rotation,  $f_g$  est la fonction de la cible,  $f_o$  est la fonction de l'obstacle, et  $i$  est l'indice de chaque obstacle dans la scène.

**II.5 Modèle du champ de potentiel**

Le modèle de navigation humain peut être exprimé selon le champ de potentiel où la cible et les obstacles suscitent des fonctions de potentiel sur la direction de l'agent. Le robot mobile est considéré comme une particule dont les mouvements sont immergés dans un champ de potentiel créée par la cible et les obstacles présents dans l'environnement.

**II.5.1 Potentiel de la cible (attractif)**

La composante de la cible peut être exprimée comme une fonction de potentiel en prenant l'intégrale négative par rapport au  $\phi$ . Le potentiel de la cible est:

$$\Phi_g[\psi_g, d_g](\phi) = \frac{1}{2} k_g (\phi - \psi_g)^2 (e^{-c_1 d_g} + c_2) \dots \dots \dots (4)$$

Le potentiel est une courbe parabolique en fonction de  $\phi$  qui est centré sur la direction vers la cible  $\psi_g$  (voir **Fig.3 (a)**).

**II.5.2 Potentiel de l'obstacle (répulsif)**

La composante de l'obstacle peut être exprimée comme une fonction de potentiel en prenant l'intégrale négative par rapport au  $\phi$ . Le potentiel de l'obstacle est:

$$\Phi_o[\psi_o, d_o](\phi) = k_o \frac{c_3 |\phi - \psi_o| + 1}{c_3^2} (e^{-c_3 |\phi - \psi_o|} (e^{-c_4 d_o})) \dots \dots \dots (5)$$

Le potentiel est une bosse en fonction de  $\phi$  qui est centré sur la direction de l'obstacle  $\psi_o$  (voir **Fig.3 (b)**).

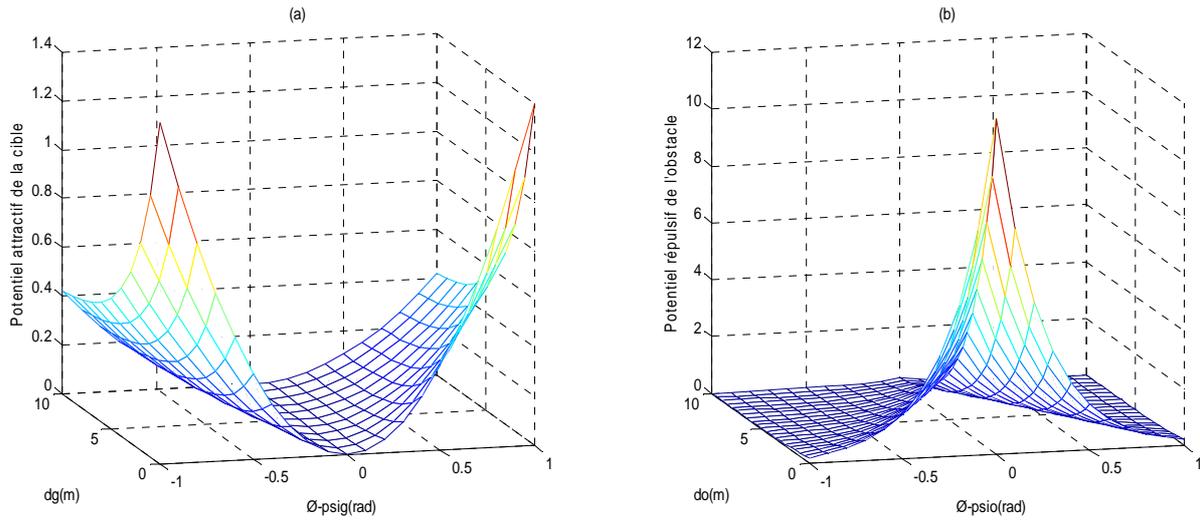


Fig.3 (a) Potentiel de la cible et (b) Potentiel de l'obstacle.

II.5.3 Potentiel global

Le potentiel global peut être exprimé par:

$$\Phi(\phi) = \Phi_g(\phi) + \sum_{i=1}^{\#obstacles} \Phi_{o_i}(\phi) \dots \dots \dots (6)$$

où chaque obstacle  $i$  crée un potentiel indépendant  $\Phi_{o_i}$ .

L'agent est alors commandé selon:

$$\ddot{\phi} = -b\dot{\phi} + \frac{d\Phi}{d\phi} \dots \dots \dots (7)$$

Ce qui est équivalent à l'équation (3).

En conclusion, l'accélération angulaire qui oriente le robot mobile vers la cible tout en évitant les obstacles est donnée par l'équation suivante:

$$\ddot{\phi} = -b\dot{\phi} - k_g(\phi - \psi_g) \left( e^{-c_1 d_g} + c_2 \right) + \sum_{i=1}^{\#obstacles} k_{o_i}(\phi - \psi_{o_i}) \left( e^{-c_3 |\phi - \psi_{o_i}|} \right) \left( e^{-c_4 d_{o_i}} \right) \dots \dots \dots (8)$$

Cette équation est la fonction du champ de potentiel.

**II.6 Conclusion**

La grande simplicité de la fonction du champ de potentiel ne doit cependant pas masquer son défaut majeur. Le potentiel total qui influence le robot mobile résulte de la somme d'un potentiel attractif et de potentiels répulsifs, de signes opposés. Cette fonction peut donc présenter un certain nombre de minima locaux, dans lesquels le robot mobile sera piégé, et cessera d'accomplir le progrès vers la cible. Cette situation de blocage correspond à un cas trivial.

## ➤ Simulation 1: Fonction du champ de potentiel

### III.1.1 Introduction

Notre méthode est basée sur le modèle de **Fajen** et **Warren** de la navigation humaine. Ce modèle prend la direction relative et la distance relative à la cible et aux obstacles et calcule une accélération angulaire pour orienter le robot mobile vers la cible et loin des obstacles. Il y a beaucoup d'avantages dans le cadre général de ce modèle puisqu'il contrôle l'accélération angulaire, il est directement applicable pour l'orientation de véhicules non holonomes: les chemins résultants sont lisses et ont une courbure continue. Les chemins ont également un "aspect naturel", car on prévoirait à partir d'un modèle basé sur la navigation humaine. La méthode est complètement réactive, simple et rapide à calculer.

Cependant le modèle de **Fajen** et **Warren** traite le robot mobile et les obstacles comme étant des points immergés dans un champ de potentiel. De ce fait, nous avons considéré le robot mobile comme étant un observateur qui interagit avec l'environnement. Ceci suggère deux modifications:

- ✓ modifier le terme de l'obstacle de manière que chaque obstacle génère un potentiel répulsif proportionnel à sa taille.
- ✓ l'ajout d'une commande de vitesse pour garantir que le robot mobile ne se heurtera pas un obstacle.

À titre d'exemple nous étudierons ici le déplacement d'un robot mobile dans un espace à deux dimensions, remplissant les contraintes d'évitement d'obstacles, d'atteinte d'une cible de coordonnées cartésiennes connues, et de contrôle de la vitesse de déplacement.

### III.1.2 Extension aux tailles de l'obstacle

Premièrement, les obstacles devraient générer un potentiel approprié à leurs tailles ainsi le robot mobile prend un chemin plus large autour de l'obstacle. Pour garantir que le robot mobile ne se heurtera pas cet obstacle, ce potentiel doit s'approcher de l'infini pendant que le robot mobile se procure de plus en plus près de l'obstacle. Pour atteindre ces objectifs, on a remplacé le terme  $e^{-c_4 d_o}$  par  $\tan(\theta + c_5) - \tan(c_5)$  dans le potentiel de l'obstacle qui devient:

$$\Phi_o[\psi_o, \theta](\phi) = k_o \frac{c_3 |\phi - \psi_o| + 1}{c_3^2} \left( e^{-c_3 |\phi - \psi_o|} \right) (\tan(\theta + c_5) - \tan(c_5)) \dots \dots \dots (1)$$

où  $\theta$  est la largeur angulaire de l'obstacle.

avec

$$\theta = 2 \tan^{-1} \left( \frac{r_o}{d_o} \right) \dots \dots \dots (2)$$

$$c_5 = \frac{\pi}{2} - 2 \tan^{-1} \left( \frac{r_o}{r_o + r_r} \right) \dots \dots \dots (3)$$

$r_o$  est le rayon de l'obstacle.

$r_r$  est le rayon du robot mobile.

### III.1.3 Accélération angulaire

Maintenant, l'accélération angulaire est calculée selon l'équation suivante:

$$\ddot{\phi} = -b \dot{\phi} - k_g (\phi - \psi_g) \left( e^{-c_1 d_g} + c_2 \right) + \sum_{i=1}^{\#obstacles} k_{o_i} (\phi - \psi_{o_i}) \left( e^{-c_3 |\phi - \psi_{o_i}|} \right) (\tan(\theta_i + c_5) - \tan(c_5)) \dots \dots \dots (4)$$

avec

$\psi_g$  est l'angle de la cible par rapport au robot mobile.

$d_g$  est la distance de la cible par rapport au robot mobile.

$\psi_{o_i}$  est l'angle de l'obstacle  $i$  par rapport au robot mobile.

$d_{o_i}$  est la distance de l'obstacle  $i$  par rapport au robot mobile.

### III.1.4 Commande de vitesse linéaire

Pour tenir le robot mobile d'essayer d'entrer par une ouverture qui est trop étroite, nous introduisant la commande de vitesse linéaire. Considérons que la vitesse a été tenue constante dans le modèle original, maintenant nous l'ajustant pour diminuer exponentiellement en fonction de l'intensité du potentiel de l'obstacle:

$$v = \max \{ v_{\max} e^{-k_v \Phi_o} - \varepsilon, 0 \} \dots \dots \dots (5)$$

où  $\varepsilon$  est une petite constante positive de sorte que la vitesse devienne nulle pour des valeurs suffisamment grandes de  $\Phi_o$ .

En l'absence des obstacles, le potentiel de l'obstacle est nul, et par conséquent la vitesse est égale à  $v_{max}$ . Quand les obstacles sont proches et/ou étroitement alignés près de la direction, le potentiel de l'obstacle est plus grand, auquel provoque la diminution de la vitesse. L'ajout de la commande de vitesse permet également l'évitement de collisions.

### III.1.5 Paramètres du modèle

Paramètre	Valeur	Effet de la valeur du paramètre sur le chemin
$b$	5.5	Contrôle des oscillations suivant le minima local vers la cible
$k_g$	2.0	Régler le taux d'attraction de la cible. L'augmentation aura comme conséquence les chemins qui s'orientent plus agressivement vers la cible.
$c_1$	0.4	Utiliser pour l'équilibrage de l'attraction d'une cible éloignée avec des obstacles proches.
$c_2$	0.4	S'assure qu'une cible très éloignée a toujours l'effet.
$k_o$	9.0	Contrôle la répulsion de l'obstacle. L'augmentation aura comme conséquence les chemins qui évitent plus sévèrement les obstacles. La diminution permettra au robot mobile de s'approcher plus près des obstacles avant l'évitement.
$c_3$	4.0	Contrôle le comportement du «domaine des angles de braquage». L'augmentation aura comme conséquence les chemins qui essaient de se passer entre les obstacles. La diminution aura comme conséquence les chemins qui passent autour des groupes d'obstacles. Contrôle en outre la permission de prise d'un chemin autour d'un obstacle.
$c_4$	0.0	Seulement utilisé en estimant la distance aux obstacles. L'augmentation de ce paramètre diminuera l'effet des obstacles éloignés de sorte que les chemins puissent être plus agressifs pour des obstacles étroits.
$c_5$	1.16	Augmenter le potentiel de l'obstacle à l'infini alors que le robot mobile approche un obstacle jusqu'à éviter les collisions. Ce paramètre est calculé à base de la largeur angulaire de l'obstacle de grandeur minimale.
$k_v$	0.5	Evaluer à quelle vitesse de translation est diminué. Devrait être ajusté pour arrêter le robot mobile avant une collision.
$k_\omega$	100	Gain positif

**Tableau 1** Paramètres du modèle et leurs effets sur la trajectoire.

**III.1.6 Modèle cinématique du robot mobile**

Le robot mobile utiliser dans la simulation est non holonome de type tricycle. Voici ses contraintes cinématiques [39]:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= v \cos(\theta) \\ \dot{z} &= v \sin(\theta) \dots\dots\dots (6) \\ \dot{\theta} &= \omega \end{aligned}$$

Considérons la force résultante  $f = (f_x, f_z)^T$  appliquée sur la roue directrice du robot mobile qui est la résultante des forces attractive et répulsives. La loi de commande proposée pour obtenir la vitesse angulaire est la suivante [40]:

$$\omega = -k_\omega (f_x \sin(\theta) - f_z \cos(\theta)) \dots\dots\dots (7)$$

où  $f_x$  et  $f_z$  les composantes de la force résultante  $f$ .

**III.1.7 Simulation**

Dans le chapitre II, nous avons proposé que le comportement dynamique résulte de l’application des lois de contrôle sur un agent physique qui agit l’un sur l’autre avec un environnement physique. Le modèle actuel fournit une description de la dynamique comportementale, mais il nous permet également d’effectuer quelques inférences au sujet des lois de contrôle. Puisque un agent physique est un système physique de 2<sup>ème</sup> ordre, le modèle du comportement constaté est forcément moins de 2<sup>ème</sup> ordre. Cependant, d’après [G.Schöner et al (1995)], il est avantageux que la loi de contrôle soit du 1<sup>er</sup> ordre, de sorte que la stabilité de ses solutions puisse être assurée. Ainsi, nous pouvons décomposer le modèle en un système physique de 2<sup>ème</sup> ordre et loi de contrôle du 1<sup>er</sup> ordre.

Dans la loi de contrôle, la pulsation  $\dot{\phi}$  est une fonction des composantes de la cible et de l’obstacle et détend rapidement par un attracteur pour la direction désirée, fourni des informations sur les angles actuels de la cible et de l’obstacle. Le système physique détermine alors l’accélération angulaire  $\ddot{\phi}$  basée sur la différence entre la direction actuelle désirée, et un taux d’amortissement fixe. Les simulations préliminaires ont prouvées que ce système produit des ajustements comparables aux

caractéristiques humaines (avec différentes valeurs de paramètre), et provoquent ainsi le comportement dynamique décrit par le modèle actuel.

Le modèle complet est donné par l'équation (4). Notez que  $\psi_g$ ,  $d_g$ ,  $\psi_o$ , et  $d_o$  change avec le changement de la position du robot mobile. Toutefois, ces variables peuvent être exprimées à titre d'une fonction de position  $(x, z)$  du robot mobile.

$$\begin{aligned} \psi_g &= \cos^{-1}\left(\frac{(Z_g - z)}{d_g}\right) \\ d_g &= \left[ (X_g - x)^2 + (Z_g - z)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (8) \\ \psi_o &= \cos^{-1}\left(\frac{(Z_o - z)}{d_o}\right) \\ d_o &= \left[ (X_o - x)^2 + (Z_o - z)^2 \right]^{1/2} \end{aligned}$$

où  $(X_g, Z_g)$  et  $(X_o, Z_o)$  sont les coordonnées de la cible et de l'obstacle respectivement. Écrit comme un système d'équations différentielles du 1<sup>er</sup> ordre, le modèle est donné par:

$$\begin{aligned} \dot{y}_1 &= \dot{\phi} \\ \dot{y}_2 = \ddot{y}_1 &= \ddot{\phi} = -b\dot{\phi} - k_g(\phi - \psi_g) \left( e^{-c_1 d_g} + c_2 \right) + \sum_{i=1}^{\#obstacles} k_{o_i} (\phi - \psi_{o_i}) \left( e^{-c_3(\phi - \psi_{o_i})} \right) (\tan(\theta_i + c_5) - \tan(c_5)) \\ \dot{y}_3 &= \dot{x} = v \cos(\theta) \\ \dot{y}_4 &= \dot{z} = v \sin(\theta) \\ \dot{y}_5 &= \dot{\theta} = \omega \end{aligned} \dots\dots\dots (9)$$

où  $v$  et  $\omega$  sont les vitesses linéaire et angulaire respectivement du robot mobile.

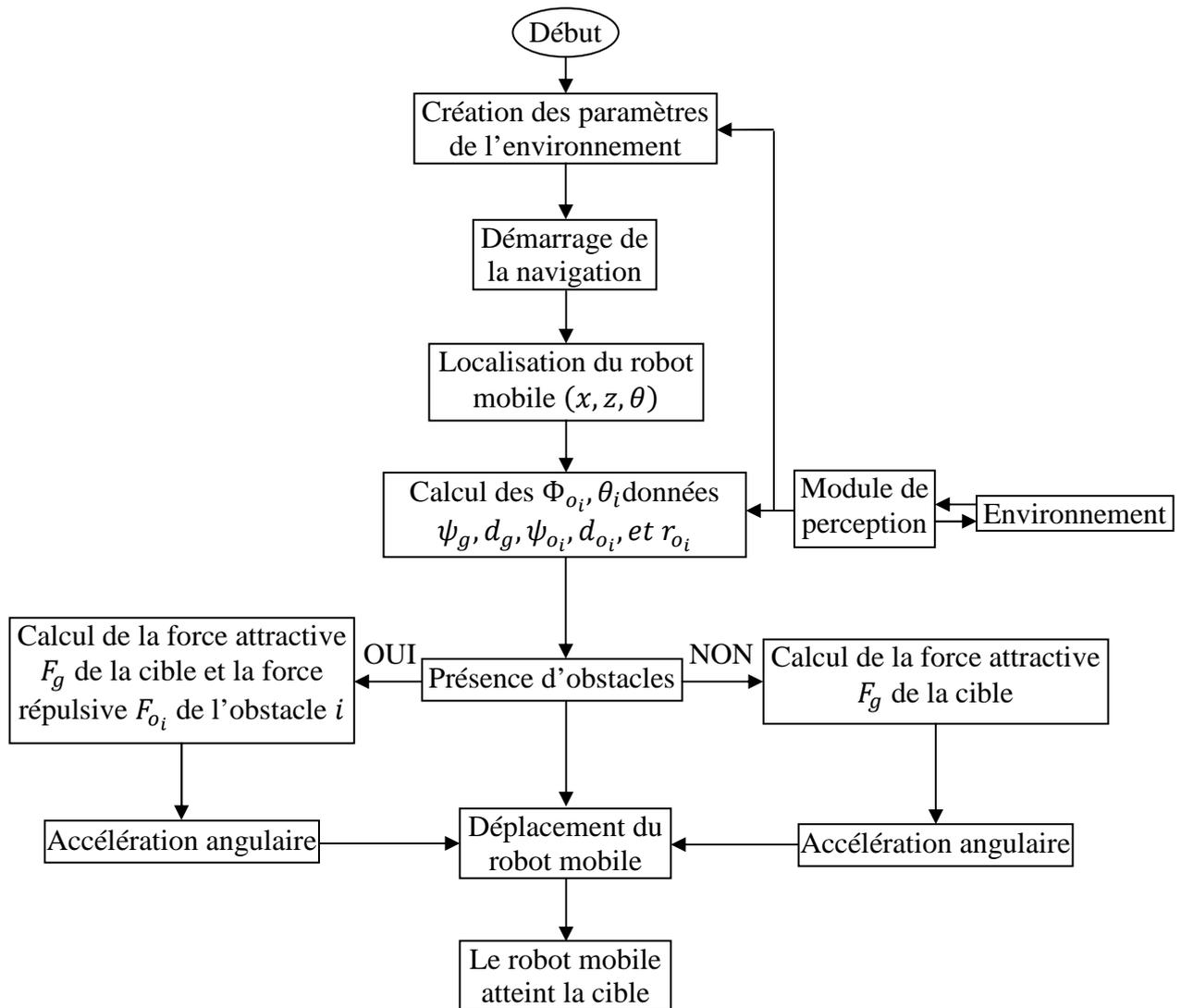
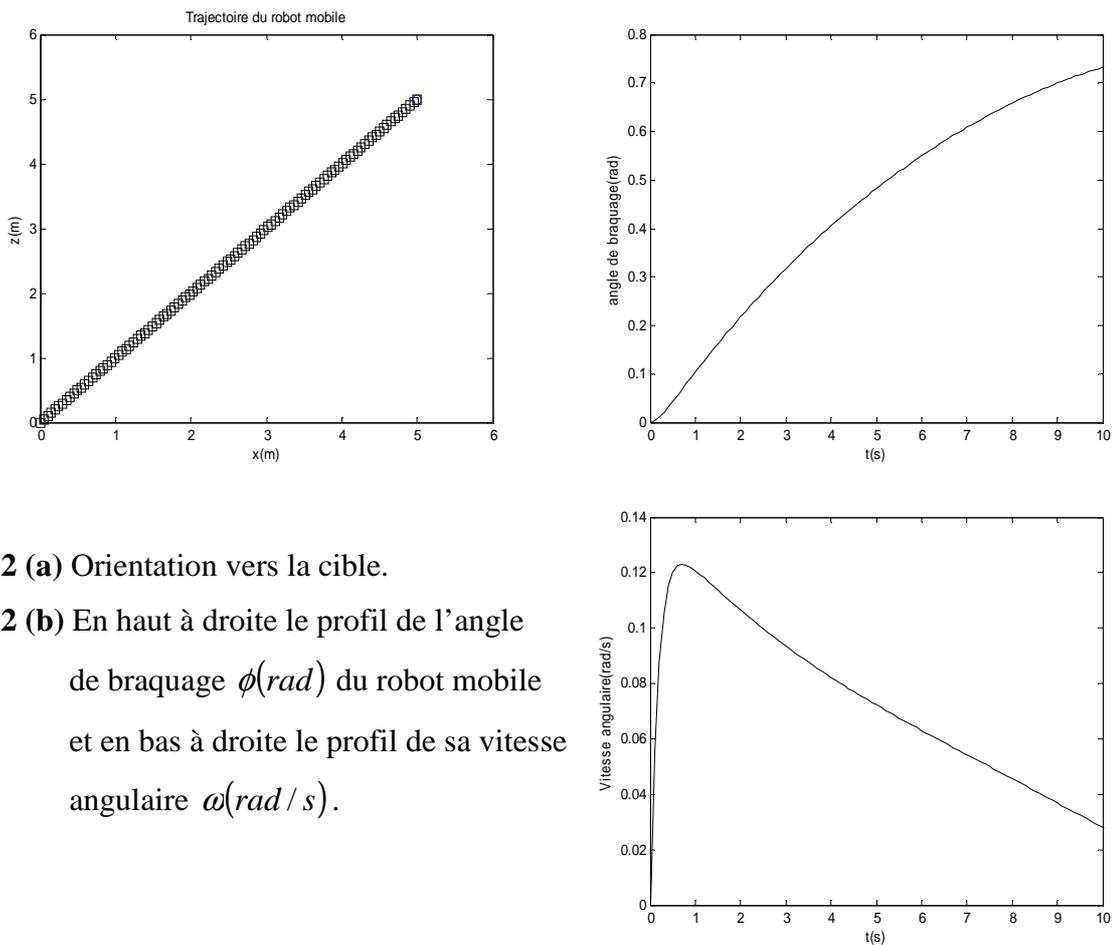


Fig.1 Organigramme du système de contrôle.

### III.1.8 Résultats de simulation

Dans cette phase, nous présenterons les résultats de simulation de notre système en utilisant MATLAB qui est un environnement de travail complet, puissant et performant. Les résultats obtenus en simulation montrent l'efficacité du modèle proposée.

➤ Aller vers cible



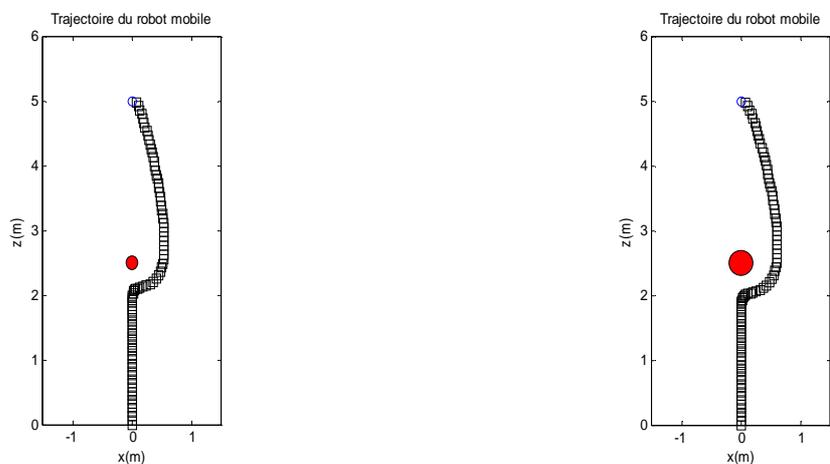
**Fig.2 (a)** Orientation vers la cible.

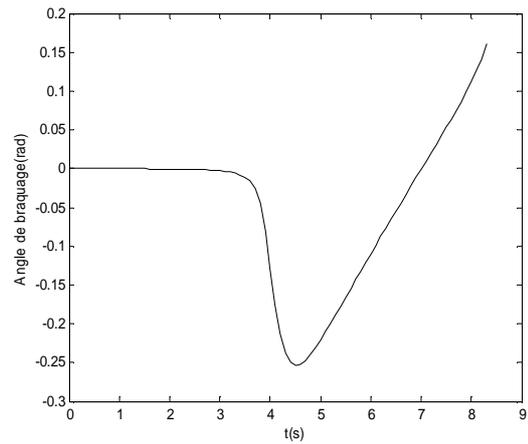
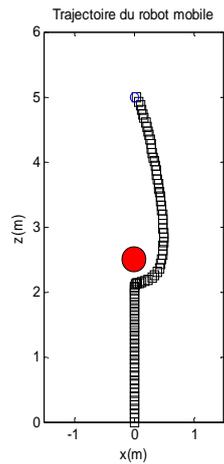
**Fig.2 (b)** En haut à droite le profil de l'angle de braquage  $\phi(rad)$  du robot mobile et en bas à droite le profil de sa vitesse angulaire  $\omega(rad/s)$ .

➤ Évitement d'obstacles

❖ Avec extension aux tailles des obstacles

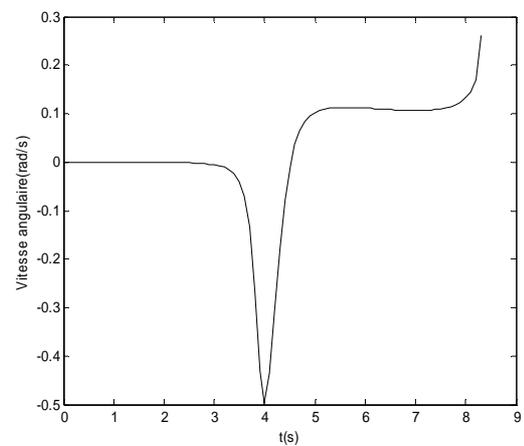
• Évitement d'un obstacle



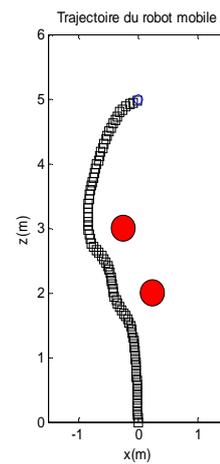
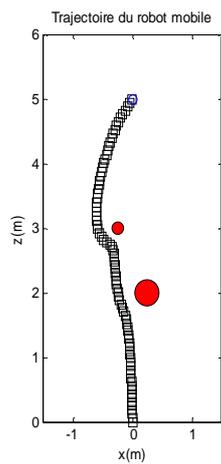


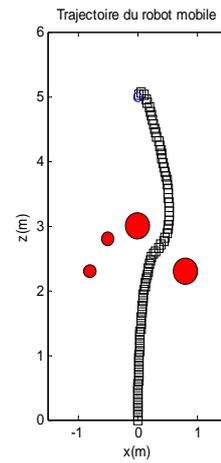
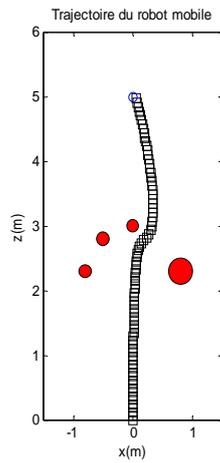
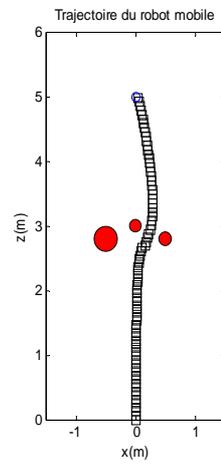
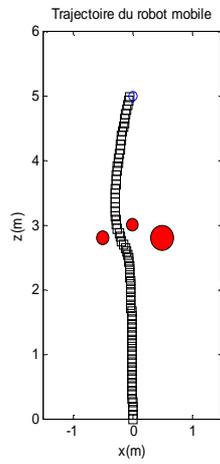
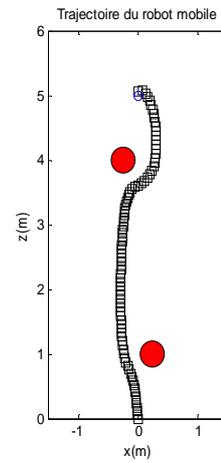
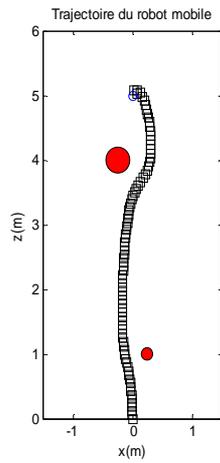
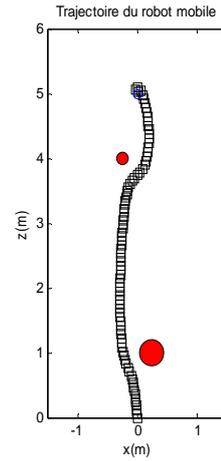
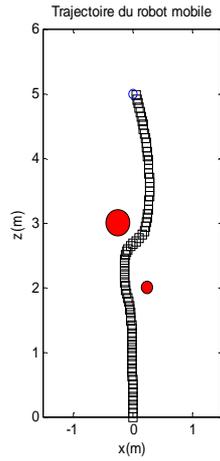
**Fig.3 (a)** Épreuves simples pour illustrer les chemins pris par notre modèle, le robot mobile est programmé pour ralentir et s'arrêter au point cible.

**Fig.3 (b)** En haut à droite le profil de l'angle de braquage  $\phi(rad)$  du robot mobile et en bas à droite le profil de sa vitesse angulaire  $\omega(rad/s)$ .



- Évitement de plus d'un obstacle





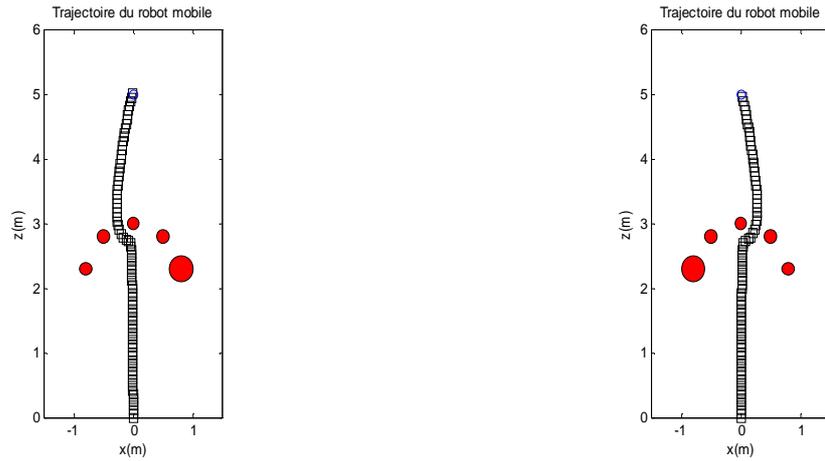


Fig.4 Résultats de simulation pour différentes configurations des obstacles et différentes tailles.

- Évitement d'un faisceau d'obstacles

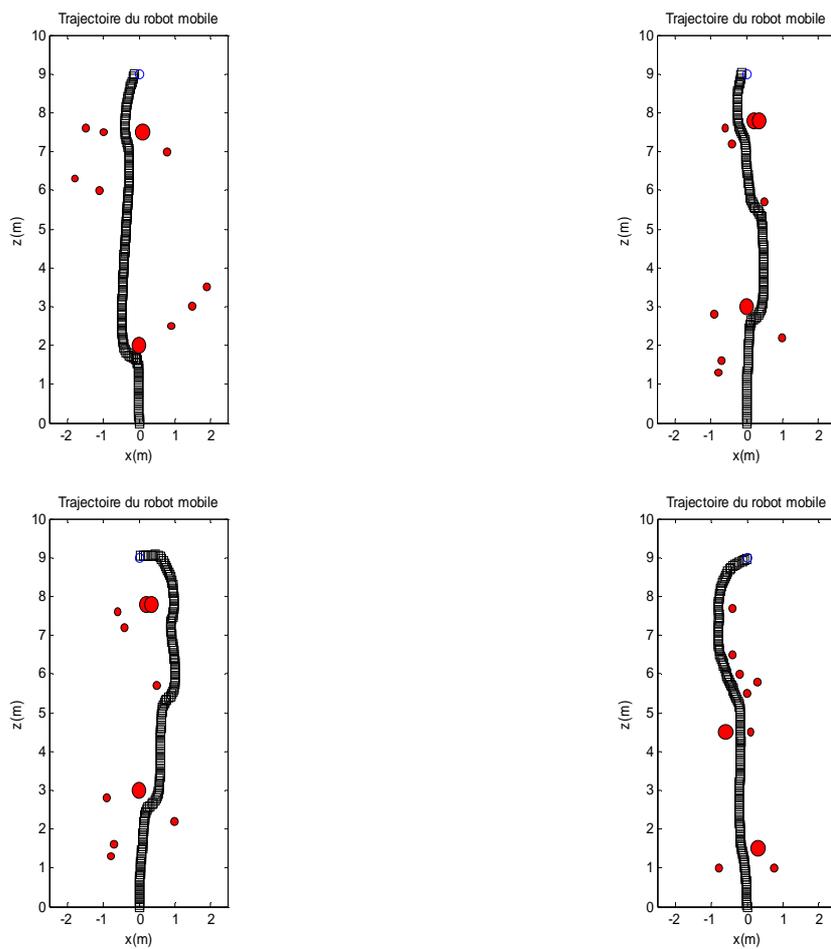


Fig.5 Résultats de simulation pour l'évitement d'un faisceau d'obstacles.

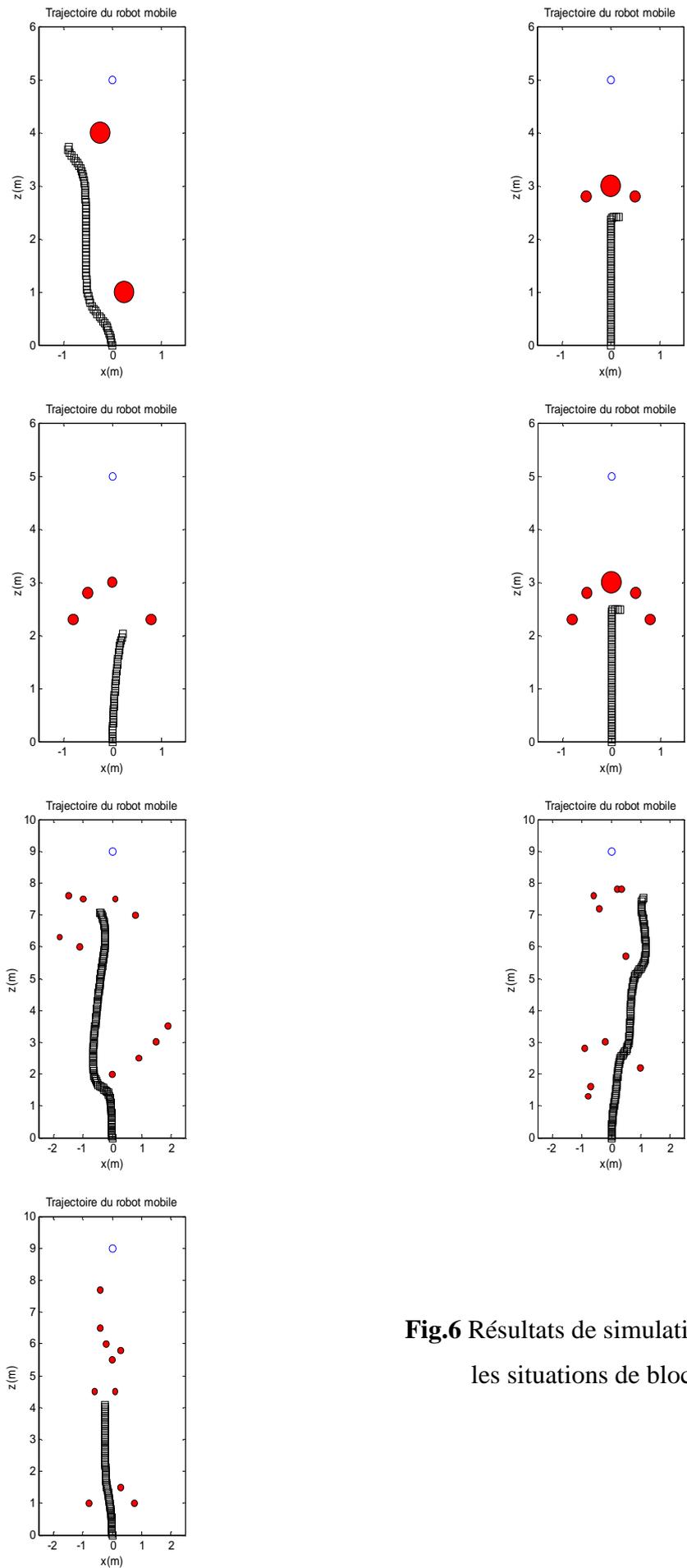
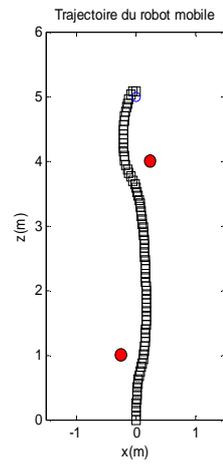
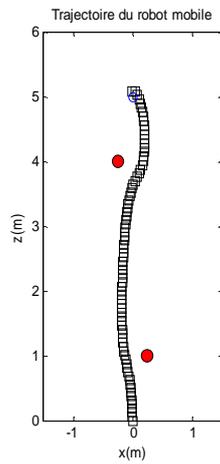
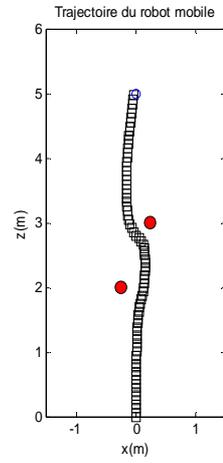
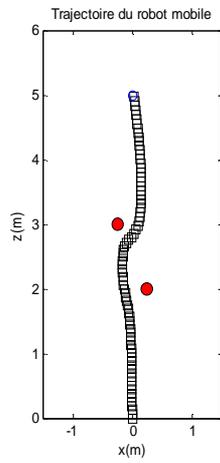
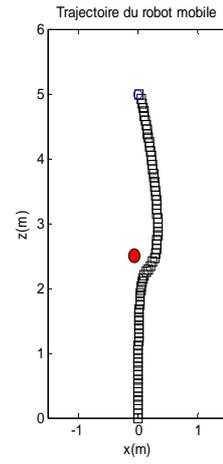
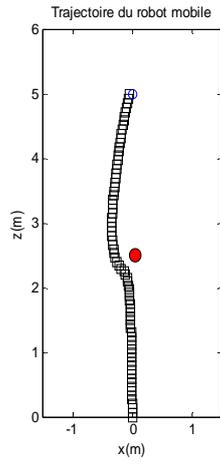
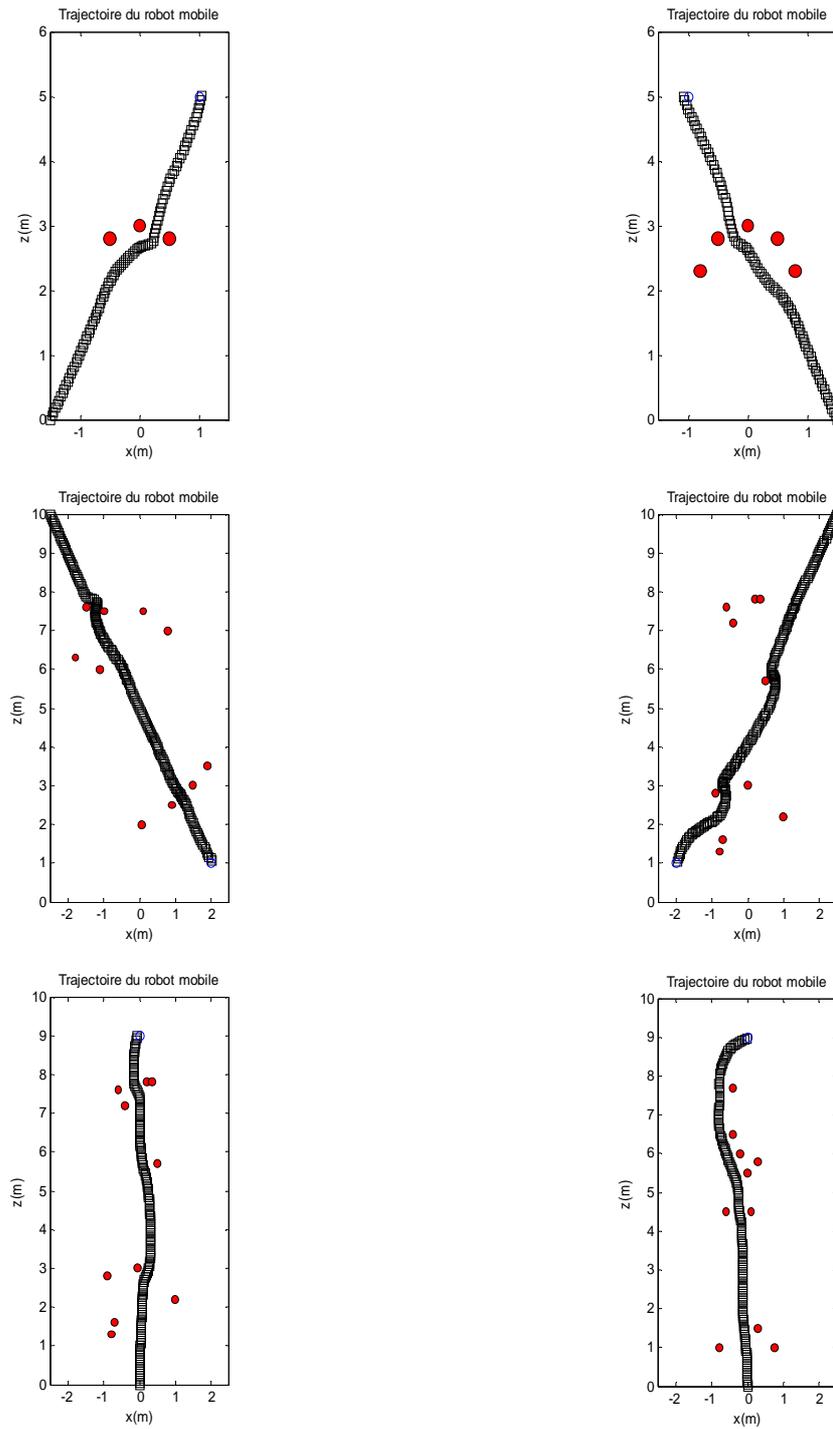


Fig.6 Résultats de simulation pour illustrer les situations de blocage.

❖ Sans extension aux tailles des obstacles





**Fig.7** Résultats de simulation pour différentes configurations des obstacles de même taille.

### III.1.9 Discussion

Nous avons entrepris avec différentes configurations des obstacles et cible pour tester notre modèle, il y avait un certain nombre d'épreuves avec la complexité variable pour prouver que le modèle fonctionne pour différentes tailles et nombre d'obstacles.

**Fig.2 (a)** montre le teste d'orientation du robot mobile vers la cible, **Fig.2 (b)** nous informe sur le profil de l'angle de braquage qui augmente et celui de la vitesse angulaire qui as subi une brusque augmentation puis décroît de plus en plus que le robot mobile s'approche de la cible.

**Fig.3 (a)** montre quelques épreuves conçues pour tester le comportement de base d'évitement d'obstacles. Noter que les chemins sont tous lisses et efficaces, elle illustre l'effet de la taille de l'obstacle et celle du robot mobile sur la trajectoire de ce dernier. Un obstacle plus large crée un plus grand potentiel, orientant le robot mobile plus loin de cet obstacle. **Fig.3 (b)** illustre aussi pour le cas d'évitement d'un obstacle le profil de l'angle de braquage et celui de la vitesse angulaire qui ont provoqué une chute brusque juste à l'instant de manœuvre puis remontent.

**Fig.4** montre des expositions qui examinent le comportement du robot mobile évitant plus d'un obstacle avec différentes tailles, le robot mobile choisit un chemin à travers un espace entre deux obstacles quand les obstacles sont également espacés l'un de l'autre, le potentiel résultant des obstacles provoque le robot mobile de se diriger complètement autour de ceux-ci. Dans **Fig.5**, on a préféré de voir comment le robot mobile réagit dans un faisceau d'obstacles en jouant sur leurs tailles.

Il y a, cependant, des situations comme dans **Fig.6**, dans lesquelles le robot mobile suit un minima local correspondant à un espace qui est trop étroit pour que le robot mobile passe, car celui-ci approche cet espace, l'intensité du potentiel de l'obstacle augmente, entraînant le robot mobile de se ralentir et s'arrêter avant qu'une collision se produise. Dans certains cas le robot mobile peut retourner jusqu'à ce qu'il atteigne des autres minima locaux dans le potentiel qui peut le mener hors de cette situation.

La **Fig.7** présente les résultats obtenus et qui sont satisfaisants pour les mêmes configurations et tailles des obstacles en attribuant de différentes positions au robot mobile et à la cible dans le but de comparer ces résultats avec ceux de la 2<sup>ème</sup> simulation qu'on entamera dans la suite de ce chapitre.

## ➤ Simulation 2: Logique floue

### III.2.1 Introduction

Parmi les récents développements de 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 particulièrement en robotique mobile qui en découle et de consulter l'abondante littérature sur le sujet pour s'en convaincre. Le développement de techniques de navigation du robot mobile autonome dans un environnement réel, constitue l'une des principales préoccupations de la recherche en robotique mobile. En effet, la navigation autonome d'un robot mobile nécessite une structure de contrôle visant à doter ce dernier d'un mécanisme de raisonnement lui permettant de se déplacer de manière autonome dans un environnement inconnu ou partiellement connu. [41.42].

Les stratégies réactives sont basées sur des informations relatives aux interactions entre le robot mobile et l'environnement inconnu, ces informations doivent être évaluées. Dans ce cas, une modélisation structurelle de l'environnement n'est pas nécessaire.

Ce travail traite du problème de la commande de mouvements d'un robot mobile en lui permettant le déplacement d'une position initiale vers une quelconque destination désirée tout en évitant les obstacles rencontrés. On propose, ici, d'étudier la navigation d'un robot mobile non holonome de type tricycle (voir section III.1.6) évoluant dans un environnement structuré et parsemé d'obstacles. Pour se faire, nous avons développé une architecture de contrôle intelligente, capable de procurer une autonomie suffisante au robot mobile afin de lui permettre de se déplacer en toute sécurité, en évitant les obstacles statiques. Il s'agit d'une architecture de contrôle réactive à base de deux comportements flous:

- ✓ aller vers cible, celui-ci permet au robot mobile de rejoindre la cible préalablement définie.
- ✓ évitement d'obstacles, permet au robot mobile de réagir aux éventuels obstacles rencontrés.

Cette application permet de déterminer en temps réel la vitesse angulaire à assigner au robot mobile pour lui permettre de naviguer dans un environnement inconnu [43].

### III.2.2 Contrôleur flou

Dans cette application, le contrôleur flou est appliqué à la navigation du robot mobile autonome dans un environnement inconnu avec obstacles [44.45]. Lorsque le robot mobile se déplace vers la cible en évitant un obstacle, une stratégie est nécessaire. Alors que le robot mobile est en mouvement, il est important de faire des compromis entre évitant les obstacles et progresser vers la position désirée.

Avec les obstacles présents dans l'environnement inconnu, le robot mobile réagit à la fois sur les informations des obstacles et la position relative de la cible [46].

Le contrôleur flou contient quatre entrées et une sortie, la structure de celui-ci est représentée dans la Fig.8.

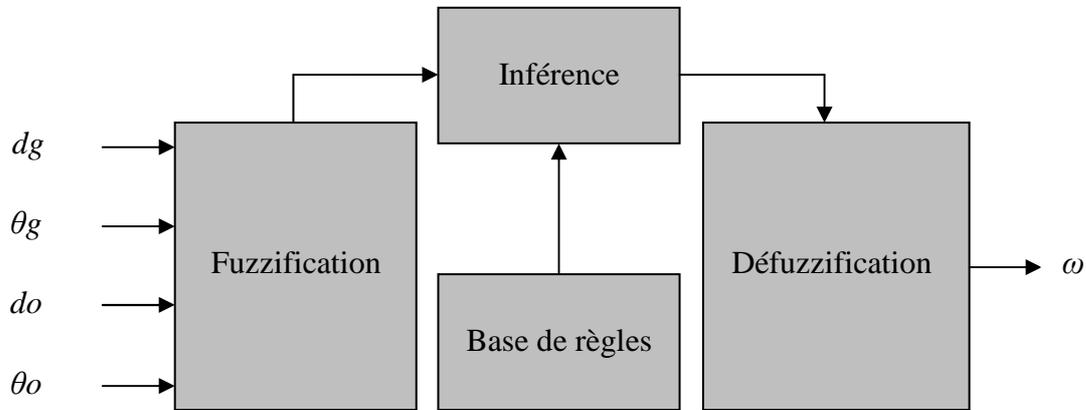


Fig.8 Diagramme bloc du système d'inférence flou.

Dans notre contrôleur, le fait d'augmenter le nombre d'ensembles flous pour la partition des variables n'affecte pas le temps de traitement, on propose un contrôleur flou avec deux à trois ensembles flous, ce qui va améliorer la résolution de notre contrôleur flou. Cela consiste à spécifier le domaine de variation des variables: l'univers de discours, qu'on divise en intervalles (sous ensembles flous ou valeurs linguistiques). Cette répartition, qui consiste à fixer le nombre de ces valeurs et les distribuer sur le domaine, est faite en se basant sur des connaissances du système et selon la précision désirée. Les fonctions d'appartenance sont explicitées dans les figures qui suivent. La surface de décision du contrôleur flou est donnée sur Fig.9.

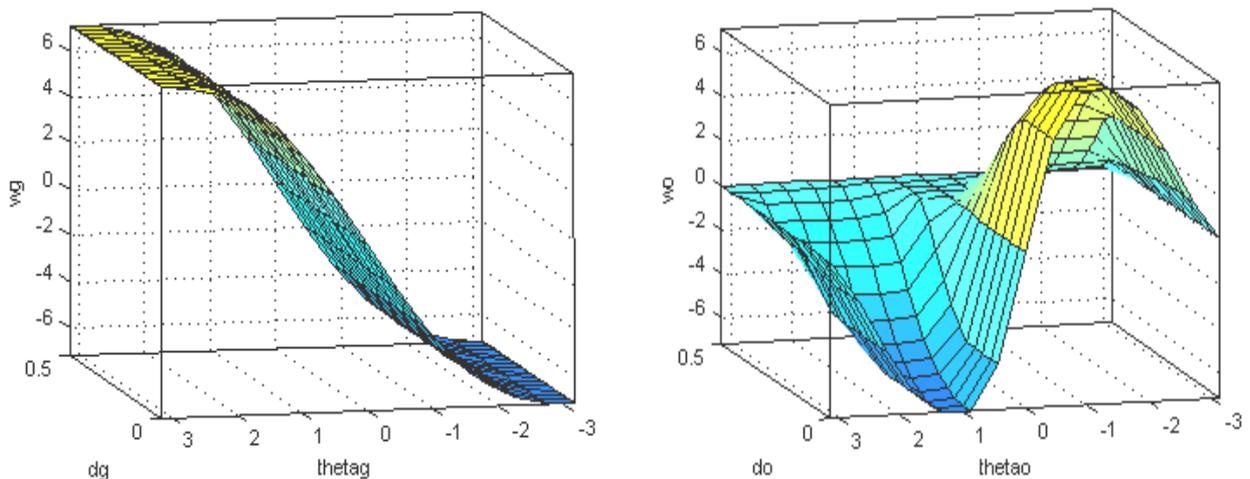


Fig.9 Surface de décision du contrôleur flou proposé.

### III.2.2.1 Contrôleur flou aller vers cible

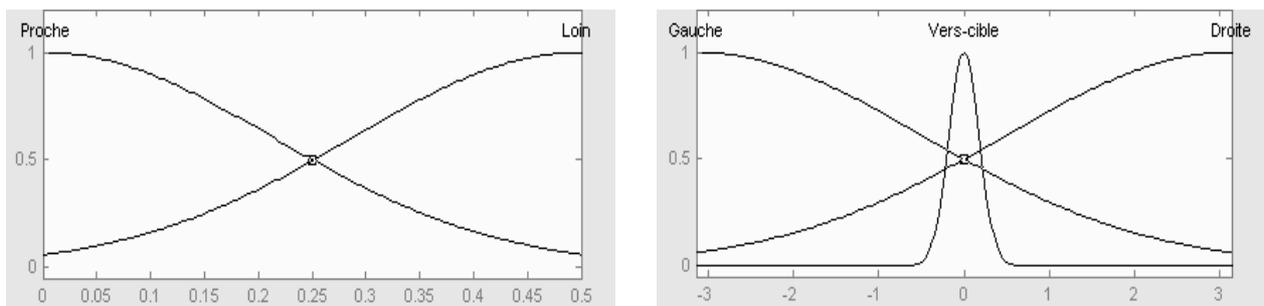
Ce contrôleur flou est conçu pour orienter le robot mobile vers sa position désirée. Il contient deux entrées et une sortie:

Entrée  $d_g$  est la distance de la cible par rapport au robot mobile.

Entrée  $\theta_g$  est l'angle de la cible par rapport au robot mobile.

Sortie  $\omega_g$  est la vitesse angulaire du robot mobile.

$d_g$  est exprimée par deux ensembles flous (Proche et Loin) dans un univers de discours  $d_g \in [0,0.5](m)$  (**Fig.10 (a)**),  $\theta_g$  par trois ensembles flous (Gauche, Vers-cible et Droite) dans un univers de discours  $\theta_g \in [-3.14,3.14](rad)$  (**Fig.10 (b)**),  $\omega_g$  par trois ensembles flous (Tourne-gauche, Zéro et Tourne-droite) dans un univers de discours  $\omega_g \in [-20,20](rad/s)$  (**Fig.12**).



**Fig.10 (a)** À gauche fonction d'appartenance de  $d_g$  et **(b)** à droite celle de  $\theta_g$ .

Les règles floues du contrôleur sont les suivantes:

Si  $\theta_g$  est Droite alors  $\omega_g$  est Tourne-droite

Si  $\theta_g$  est Gauche alors  $\omega_g$  est Tourne-gauche

Si  $d_g$  est Loin et  $\theta_g$  est Vers-cible alors  $\omega_g$  est Zéro

### III.2.2.2 Contrôleur flou évitement d'obstacles

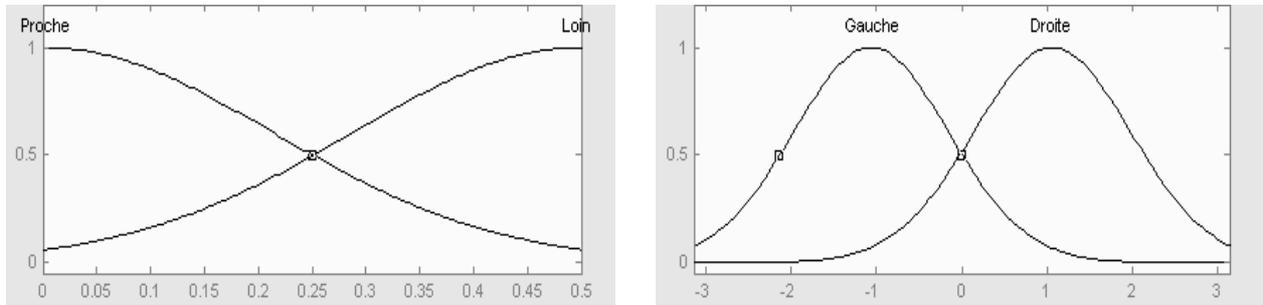
Ce contrôleur flou est conçu pour permettre au robot mobile d'éviter les collisions avec les obstacles. Celui-ci contient aussi deux entrées et une sortie:

Entrée  $d_o$  est la distance de l'obstacle par rapport au robot mobile.

Entrée  $\theta_o$  est l'angle de l'obstacle par rapport au robot mobile.

Sortie  $\omega_o$  est la vitesse angulaire du robot mobile.

$d_o$  est aussi exprimée par deux ensembles flous (Proche et Loin) dans un univers de discours  $d_o \in [0,0.5](m)$  (**Fig.11 (a)**),  $\theta_o$  par deux ensembles flous (Gauche et Droite) dans un univers de discours  $\theta_o \in [-3.14,3.14](rad)$  (**Fig.11 (b)**),  $\omega_o$  aussi par trois ensembles flous (Tourne-gauche, Zéro et Tourne-droite) dans un univers de discours  $\omega_o \in [-20,20](rad/s)$  (**Fig.12**).



**Fig.11 (a)** À gauche fonction d'appartenance de  $d_o$  et **(b)** à droite celle de  $\theta_o$ .

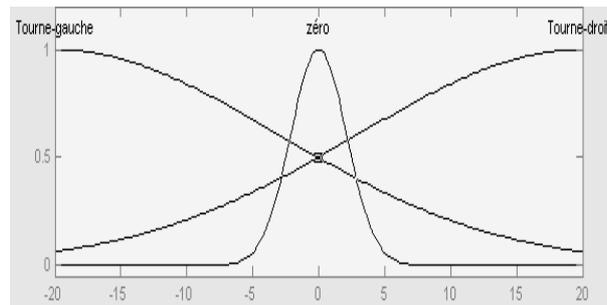
Les règles floues du contrôleur sont les suivantes:

Si  $d_o$  est Proche et  $\theta_o$  est Droite alors  $\omega_o$  est Tourne-gauche

Si  $d_o$  est Proche et  $\theta_o$  est Gauche alors  $\omega_o$  est Tourne-droite

Si  $d_o$  est Loin alors  $\omega_o$  est Zéro

La fonction d'appartenance de la sortie de chaque contrôleur flou est donnée sur **Fig.12**.



**Fig.12** Fonctions d'appartenance de  $\omega_g$  et  $\omega_o$ .

### III.2.3 Simulation

La simulation permet de mettre en exergue les performances de notre architecture de contrôle. Étant donné l'environnement de définition de variables (voir **Fig.1** du chapitre II). Nous donnerons également pour les mêmes configurations (voir **Fig.7**) de la 1<sup>ère</sup> simulation la trajectoire du robot

mobile vers la cible en évitant les obstacles éventuellement rencontrés. Encore une autre fois, ces variables peuvent être exprimées à titre d'une fonction de position  $(x, z)$  du robot mobile.

$$\theta_g = \tan^{-1}\left(\frac{(Z_g - z)}{(X_g - x)}\right) - \theta$$

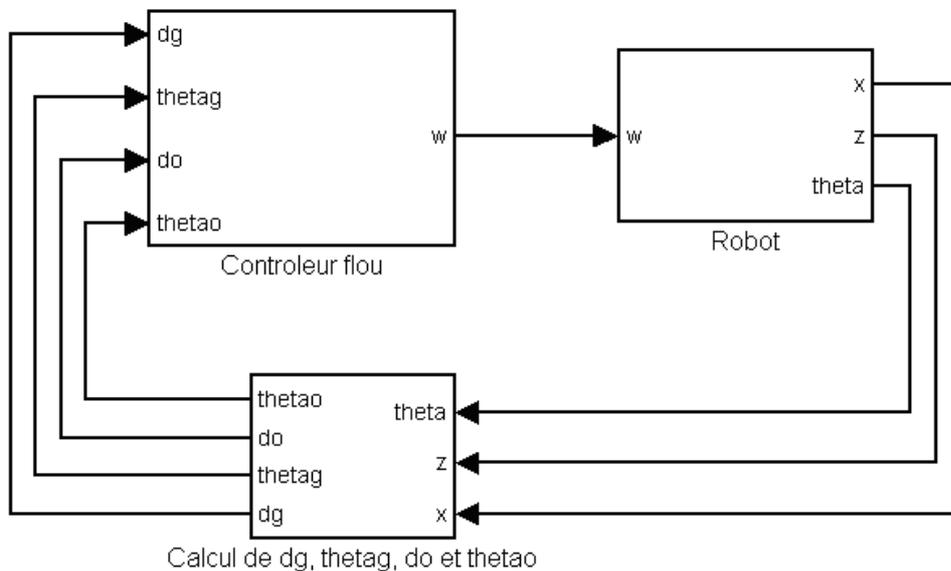
$$d_g = \left[ (X_g - x)^2 + (Z_g - z)^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots(10)$$

$$\theta_o = \tan^{-1}\left(\frac{(Z_o - z)}{(X_o - x)}\right) - \theta$$

$$d_o = \left[ (X_o - x)^2 + (Z_o - z)^2 \right]^{1/2}$$

Notons que le contrôleur flou utilisé est de type Mamdani. Sa méthode 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. L'agrégation des règles est réalisée par l'opérateur *max*. La défuzzification est réalisée par la méthode du centre de gravité.

Le schéma de simulation globale est donné sur **Fig.13**.

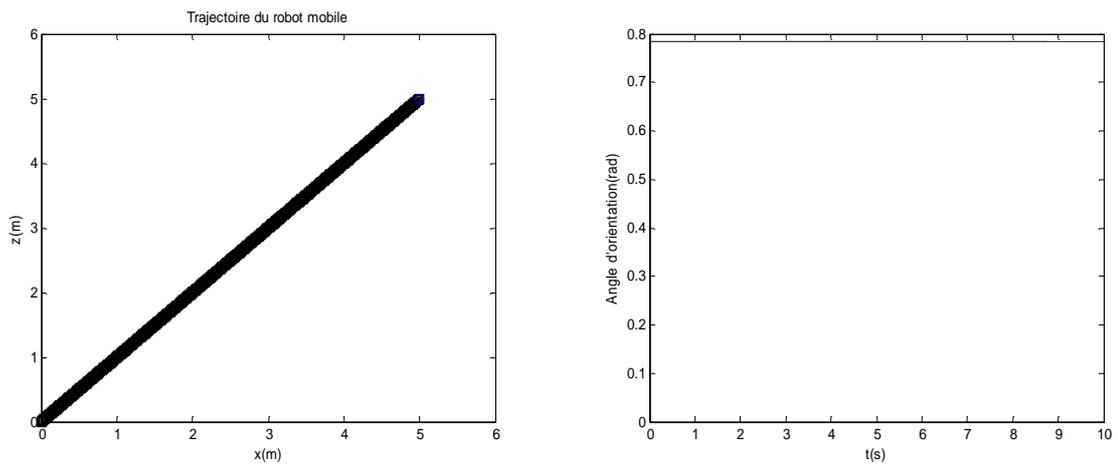


**Fig.13** Schéma de simulation du système de navigation du robot mobile.

**III.2.4 Résultats de simulation**

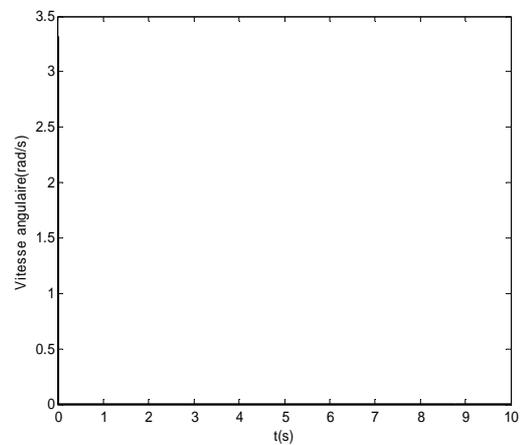
Dans cette phase, nous présenterons aussi les résultats de simulation de notre système en utilisant le même environnement MATLAB. Les résultats obtenus en simulation montrent l'efficacité des contrôleurs proposés.

➤ Aller vers cible



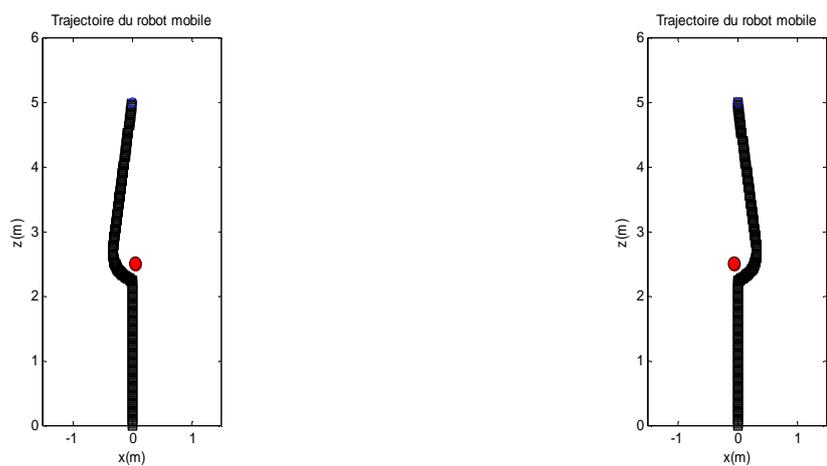
**Fig.14 (a)** Orientation vers la cible.

**Fig.14 (b)** En haut à droite le profil de l'angle d'orientation  $\theta(rad)$  du robot mobile et en bas à droite le profil de sa vitesse angulaire  $\omega(rad/s)$ .

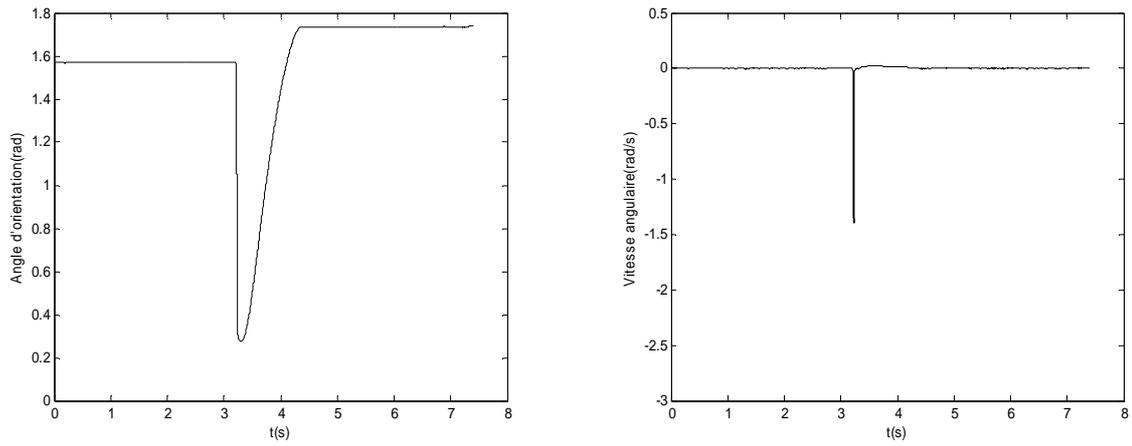


➤ Évitement d'obstacles

• Évitement d'un obstacle

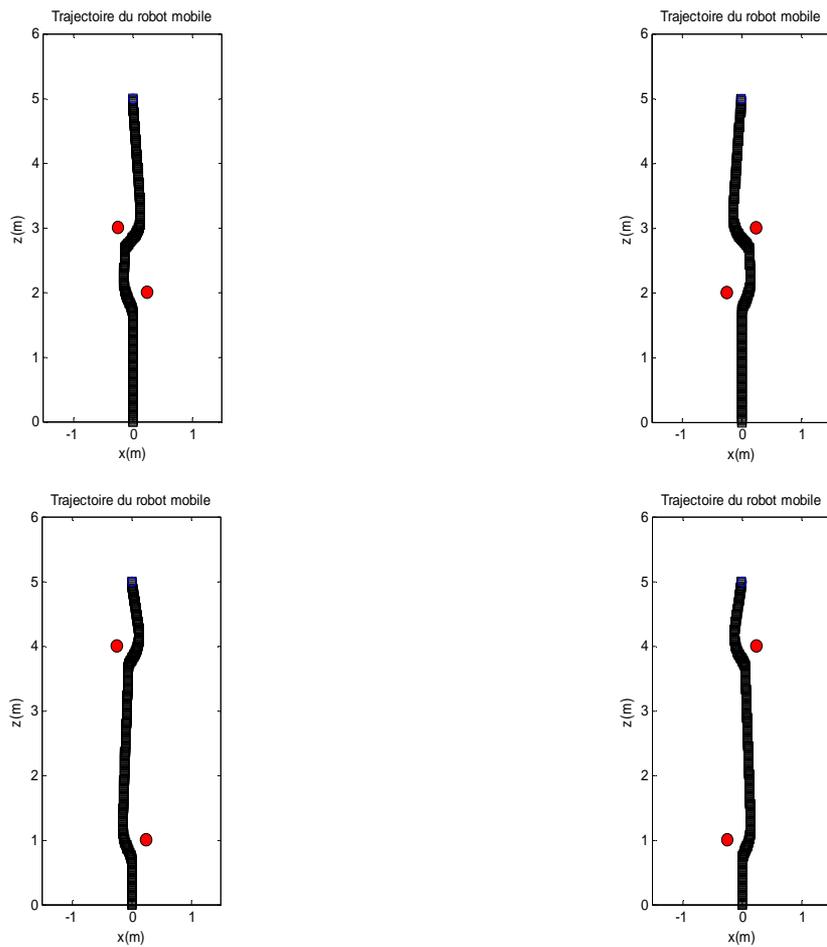


**Fig.15 (a)** Épreuves simples pour illustrer les chemins pris par notre contrôleur flou, le robot mobile est programmé pour ralentir et s'arrêter au point cible.



**Fig.15 (b)** À gauche le profil de l'angle d'orientation  $\theta(rad)$  du robot mobile et à droite le profil de sa vitesse angulaire  $\omega(rad / s)$ .

- Évitement de plus d'un obstacle



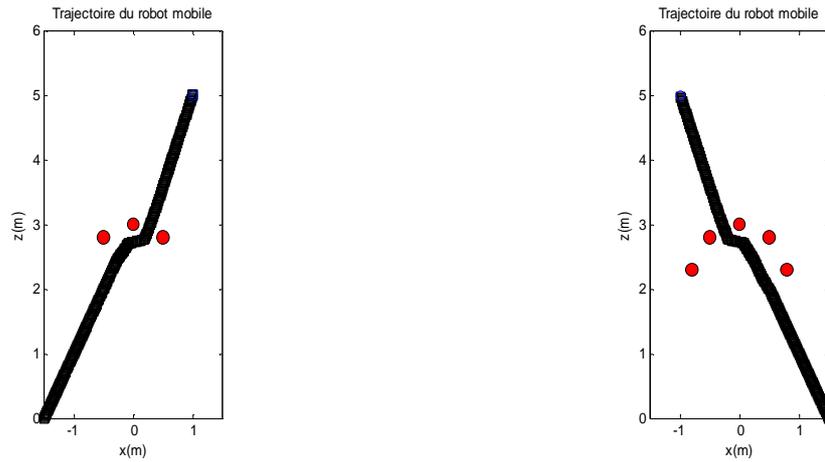


Fig.16 Résultats de simulation pour différentes configurations des obstacles.

- Évitement d'un faisceau d'obstacles

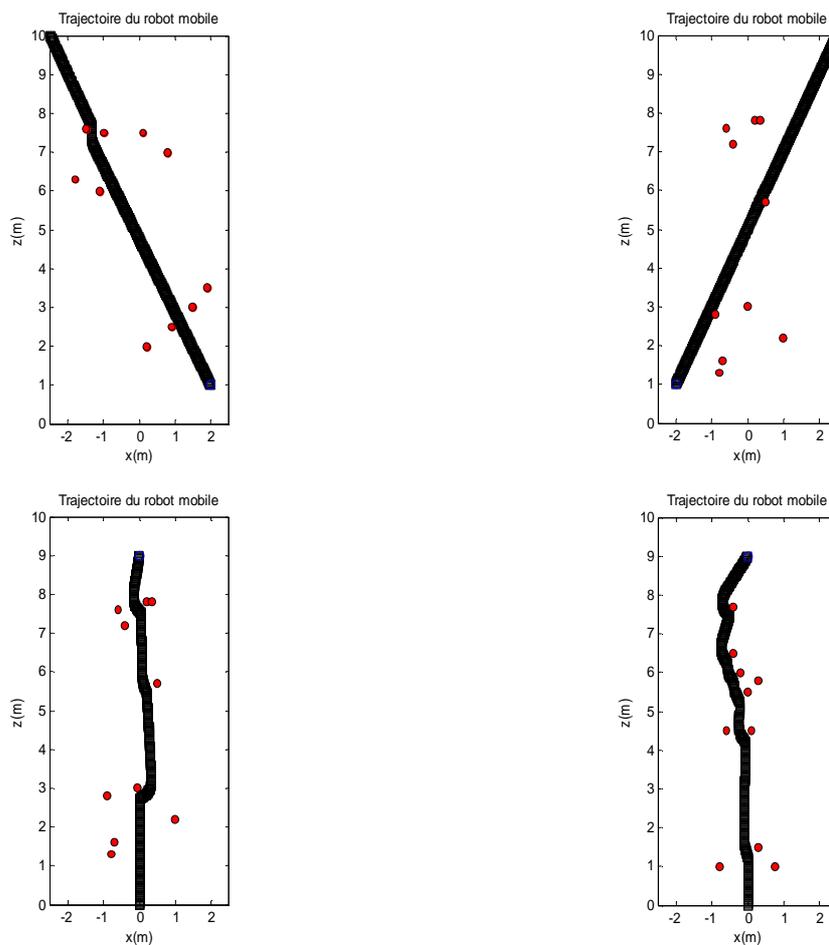


Fig.17 Résultats de simulation pour l'évitement d'un faisceau d'obstacles.

### III.2.5 Discussion

En se déplaçant vers la cible tout en évitant les obstacles, le robot mobile change d'orientation et de vitesse. Lorsque l'obstacle est très près, le robot mobile ralentit et rapidement change d'orientation.

D'après les résultats de simulation représentés dans **Fig.14 (a)**, le robot mobile tente toujours de rejoindre la cible en ligne droite, cela justifie les profils de la **Fig.14 (b)** qui montrent que l'angle d'orientation ainsi que la vitesse angulaire proche de zéro sont constant durant tout le déplacement du robot mobile vers sa cible.

En rencontrant des obstacles, il effectue les manœuvres nécessaires pour les éviter **Fig.15 (a)**, et les profils sur **Fig.15 (b)** justifie ces manœuvres en même instant que la chute brusque de l'angle d'orientation et la vitesse angulaire presque nulle qui ressemble à une impulsion puis remontent, cela veut dire que lorsque le robot mobile est plus près de l'obstacle il s'arrête pour manœuvrer en évitant cet obstacle puis continue son chemin.

Il arrive, selon la complexité de la scène, que le robot mobile doit effectuer plusieurs manœuvres, avant d'atteindre la cible **Fig.7**, **Fig.16** et **Fig.17**.

Le contrôleur flou semble très correct en simulation en assurant la stabilité du système, les résultats de simulation montrent l'efficacité et la validité du comportement de l'évitement d'obstacles dans un environnement inconnu et de la stratégie de contrôle.

## III.3 Comparaison

Dans ce chapitre, nous avons établi deux résultats importants. Le premier par une fonction du champ de potentiel, le deuxième par la logique floue. Les deux méthodes répondent aux contraintes cinématiques du robot mobile et qui ne nécessite pas la connaissance de la structure de l'environnement. Nous disposons donc, de deux méthodes réactives de l'évitement d'obstacles, qui exploitent différentes configurations de l'environnement, c'est-à-dire différentes positions de la cible, différentes positions des obstacles statiques, ainsi que différents moyens de générer la commande et mesurer les variables caractéristiques de la cible et les obstacles.

### III.3.1 Trajectoire

- a) **Comportement aller vers cible:** selon les deux figures **Fig.2 (a)** et **Fig.14 (a)**, le robot mobile se dirige en ligne droite vers la cible, peu importe le point de départ du robot mobile ou la position de la cible, les deux méthodes garantie au robot mobile d'atteindre sa cible et s'arrêter.

b) **Comportement évitement d'obstacles:** selon les deux figures **Fig.7** et **Fig.15 (a)** pour un seul obstacle, la trajectoire du robot mobile est plus lisse plus naturelle dans **Fig.7** que dans **Fig.15 (a)**, de même pour le reste de figures (**Fig.7, Fig.16 et Fig.17**). La fonction du champ de potentiel au moment d'évitement d'un obstacle permet au robot mobile d'effectuer plusieurs manœuvres en un court temps pour éviter l'obstacle ce qui donne à la trajectoire du robot mobile une courbure continue. Contrairement à la logique floue, le contrôleur flou stoppe le robot mobile lors de l'évitement d'un obstacle rencontré pour lui permettre d'effectuer une seule manœuvre à droite ou à gauche selon la position de celui-ci vis-à-vis l'obstacle.

### III.3.2 Tailles de l'obstacle

Le principal objectif de notre travail est le traitement en temps réel de la taille des obstacles. Cette particularité est introduite dans la fonction du champ de potentiel uniquement, simuler et tester pour différentes tailles et différentes configurations de l'environnement exemples **Fig.3 (a)**, **Fig.4** et **Fig.5**, la méthode a répondu à cet objective. Mais cet exploit est limité car la méthode présente un inconvénient majeur qu'on citera dans la section **III.3.4**.

### III.3.3 Caractéristiques des deux méthodes

Les méthodes sont réactives, aux caractéristiques de chacune des deux méthodes ainsi que les possibilités internes d'aller vers cible et d'évitement d'obstacles, se rajoutent les mesures externes liées aux variations de la configuration de la cible et celle des obstacles par rapport au robot mobile.

Tout simplement, la navigation du robot mobile dans la première méthode se fait par un simple calcul de l'angle de braquage par la fonction du champ de potentiel basée sur un modèle de navigation humain en générant l'accélération angulaire qui oriente le robot mobile vers la cible tout en évitant les obstacles, les mêmes tâches sont ordonnées au contrôleur flou utilisant une base de règles doté d'une intelligence remarquable basée sur des connaissances humaines.

### III.3.4 Avantages et inconvénients

Pour finaliser la comparaison des méthodes dans le tableau **2**, on donne un résumé des avantages et des inconvénients les plus significatifs de chacune des deux méthodes.

Méthodes	Avantages	Inconvénients
Fonction du champ de potentiel	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Méthode très rapide.</li> <li>- Trajectoire lisse et d'une courbure continue.</li> <li>- Traitement à distance de la taille de l'obstacle et celle du robot mobile lors de l'évitement d'obstacles.</li> <li>- Stoppe le robot mobile au point cible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Peut piéger le robot mobile lorsque la fonction contient un ou plusieurs minima locaux (voir <b>Fig.6</b>).</li> </ul>
Logique floue	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Méthode rapide.</li> <li>- Choisie le plus court chemin.</li> <li>- Stoppe le robot mobile au point cible.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Trajectoire moins lisse et d'une courbure de faible continuité.</li> </ul>

**Tableau 2** Avantages et inconvénients des méthodes.

### III.4 Conclusion

Dans la 1<sup>ère</sup> partie, nous avons décrit et analysé un modèle de navigation humaine, et l'adapté pour la navigation du robot mobile. L'original et les versions adaptées du modèle peuvent être décrites en termes de fonctions de potentiel définies sur la direction du robot mobile. Le potentiel de la cible est une cuvette parabolique portée sur la direction de la cible, et le potentiel pour chaque obstacle est une crête portée sur la direction de l'obstacle. Puisque le potentiel est formulé en termes de directions relatives à la cible et aux obstacles, la fonction de potentiel change pendant que le robot mobile se déplace. Dans ce sens, notre fonction de potentiel fournit une loi de commande pour la direction du robot mobile en localisant un chemin vers la cible.

Le modèle original de la navigation humaine est complètement réactif et simple à calculer, directement applicable à la direction des véhicules non holonomes, et produit des chemins lisses, naturels et d'une courbure continue. La connaissance de la distance de l'obstacle est exigée, et les collisions avec des obstacles sont possibles. La modification du modèle original utilise la largeur angulaire plutôt que la distance des obstacles, et la commande de vitesse linéaire basée sur le potentiel de l'obstacle assure l'évitement de collisions. L'ensemble, ces deux modifications prouvent les imperfections du modèle original, tout en préservant toujours ses avantages. Nous avons mis en

application notre modèle sur un robot mobile de type tricycle et avons entrepris des simulations avec des obstacles multiples de tailles variables.

Puisque la largeur angulaire des obstacles, non leur distance, est utilisée, notre méthode est un peu classique, un grand obstacle éloigné peut avoir la même largeur angulaire qu'un petit obstacle plus proche. En dépit de cette limitation, notre méthode a été démontrée pour être efficace pour la navigation en temps réel et évitement d'obstacles.

Dans la 2<sup>ème</sup> partie, La logique floue traite la stratégie de contrôle des mouvements du même robot mobile. Le contrôleur flou exploite les quatre variables interactives entre le robot mobile et l'environnement inconnu pour générer la vitesse angulaire qui amène le robot mobile vers sa cible et qu'elle lui permet d'éviter les obstacles qui occupent cet environnement.

Le contrôleur flou est réactif, lorsque le robot mobile se déplace en ligne droite vers la cible et un obstacle est rencontré, une stratégie d'évitement d'obstacles est vite réagit, durant un lape temps d'arrêt, le robot mobile exécute une immédiate manœuvrabilité ordonnée par le contrôleur flou autour de cet obstacle. Ici, on a proposé une stratégie de navigation floue réactive dans un environnement inconnu.

Enfin, Le contrôleur flou réactif est puissant en raison du court temps de réaction et la prise de décision rapide de la stratégie d'évitement d'obstacles.

## **Conclusion générale**

L'objectif de notre travail est d'accroître l'autonomie de déplacement d'un robot mobile. Cette autonomie a pour but de lui permettre de rejoindre un point quelconque de son environnement inconnu tout en évitant les obstacles imprévus. Ce problème peut être décomposé en deux niveaux distincts:

- le niveau géométrique et la logique floue dont le rôle est de gérer les contraintes imposées par le robot mobile et la présence des différents obstacles afin de rejoindre la cible.
- le niveau de la prise en compte de la taille du robot mobile et celles des obstacles ainsi que la vitesse linéaire.

Nous nous sommes intéressés à ces deux aspects du problème.

Rejoindre un point cible de l'environnement inconnu signifie que le robot mobile est en mesure:

- ✓ de connaître avec suffisamment de précision sa position courante.
- ✓ de détecter la présence d'obstacles éventuels le séparant de la cible (le robot mobile doit pouvoir se déplacer dans un environnement inconnu non spécialement préparé pour lui).
- ✓ de trouver un passage entre ces obstacles.

Le problème de navigation, pour un robot mobile autonome non holonome, est un des plus récents problèmes de la robotique mobile; ce qui a influencé sur la disponibilité de la documentation traitant ce problème. Par conséquent, la phase de recherche bibliographique de notre travail, nous a requis beaucoup d'effort et de temps.

Plusieurs recherches ont été faites pour résoudre ce problème, certaines sont basées sur une approche géométrique ou réactive locale alors que d'autres sont basées sur la connaissance humaine citée dans le chapitre I dans un souci de simulation du raisonnement humain et de comparaison avec la première approche.

Nous revenons sur notre travail qui expose le problème de la navigation autonome des robots mobiles dans un environnement inconnu, que nous pouvons résumer par la navigation pour robots mobiles non holonomes à proximité des obstacles.

Dans ce mémoire, nous avons essayé d'apporter une solution à ce problème pour le cas d'un robot mobile autonome non holonome de type tricycle, évoluant dans un environnement inconnu.

Le fil conducteur de ce document est l'idée que ces spécificités posent des problèmes singuliers pour la résolution des fonctionnalités de la navigation. Notre contribution porte sur le développement d'une méthode permettant de résoudre certaines de ces fonctionnalités comme l'évitement d'obstacles, respect des contraintes cinématiques du robot mobile et arrêt au point désiré, ces fonctionnalités constituaient une problématique à part entière de la navigation autonome.

Nous avons présenté dans le chapitre **II** une méthode d'évitement réactif d'obstacles pour robot mobile non holonome. Le principe de cette méthode qui est la fonction du champ de potentiel est de calculer l'accélération angulaire de façon à ce que la trajectoire s'éloigne des obstacles et respecte les contraintes cinématiques du robot mobile qui atteint la cible en s'arrêtant. Un algorithme est proposé permettant de réduire la complexité du calcul des informations interactives entre le robot mobile, la cible et les obstacles. On a aussi montré comment cette méthode peut être considérée comme une méthode d'optimisation de trajectoire, suivant d'autres critères que la distance aux obstacles. Cependant, pour des environnements quelconques, les résultats ne sont pas toujours bons à cause de la présence des minima locaux dans la fonction et que le robot mobile demeure figé.

Dans le chapitre **III**, nous avons proposé deux extensions à la méthode présentée dans le chapitre **II**, la première extension est la prise en compte de la taille du robot mobile et celles des obstacles, second extension est la commande de vitesse linéaire qui provoque l'arrêt du robot mobile pour s'éviter d'entrer en collision avec l'obstacle. On a aussi proposé une autre méthode basée sur la connaissance humaine, c'est un outil puissant et assez simple à simuler. En revanche, il présente quelques inconvénients, entre autres: la nécessité d'évaluer et d'affiner les contrôleurs (les fonctions d'appartenance d'entrée et de sortie, les tables d'inférence), ce qui risque de prendre beaucoup de temps. En effet, fortement confronté à ce problème car on a défini deux contrôleurs, qui eux aussi sont d'une stratégie réactive respectant les contraintes cinématiques du robot mobile en lui permettant de s'arrêter au point désiré.

Finalement et dans le même chapitre **III**, nous avons fait la simulation de ces deux méthodes. Durant l'observation les méthodes semblent donner des résultats très satisfaisants surtout avec la première, la fonction du champ de potentiel de direction. On a cependant montré quelques lacunes (tailles et vitesse linéaire) en proposant des solutions pour les résoudre.

### **Perspectives**

Les perspectives de notre travail sont d'abord d'élargir son domaine d'application. Le prolongement de notre travail peut prendre de nombreuses directions et rejoindre d'autres thèmes scientifiques autour de la robotique mobile. En effet, on a prévu un certain nombre d'applications intéressantes présentées ci-dessous:

- ✓ la navigation et l'évitement d'obstacles basés sur la logique floue type 2.
- ✓ utilisation des systèmes multi agents pour l'exécution de tâches d'un robot mobile.
- ✓ optimisation de la performance d'un robot mobile utilisant les essaims de particules (PSO).

- [1] David BONNAFOUS, “*Exécution Réactive de Trajectoires pour Robots Mobiles Non Holonomes*”. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, Système Automatique, France, 22 décembre 2003.
- [2] Olivier LEFEBRE, “*Navigation Autonome sans Collision pour Robots Mobiles Non Holonomes*”. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 12 juillet 2006.
- [3] Juan Gabriel AVIÑA CERVANTES, “*Navigation Visuelle d'un Robot Mobile dans un Environnement d'Extérieur Semi-Structuré*”. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 15 février 2005.
- [4] C.Laugier, Th.Fraichard, Ph.Garnier, I.E.Paromtchik, A.Scheuer, “*Sensor-Based Control Architecture for a Car-Like Vehicle*”. *Autonomous Robots*, vol. 6, n° 2, 1999.
- [5] F.Large, S.Sekhavat, C.Laugier, E.Gauthier, “*Towards Robust Sensor-Based Maneuvers for a Car-Like Vehicle*”. International Conference on Robotics and Automation. San Francisco, CA, USA, IEEE, avril 2000.
- [6] S.Quinlan, O.Khatib. “*Elastic Bands, Connecting Path Planning and Control*”. International Conference on Robotics and Automation. Atlanta, GA, USA, IEEE, mai 1993.
- [7] M.Khatib, H.Jaouni, R.Chatila, J.P.Laumond, “*Dynamic Path Modification for Car-Like Non Holonomic Mobile Robots*”. International Conference on Robotics and Automation. Albuquerque, NM, USA, IEEE, avril 1997.
- [8] P.Soueres, J.P.Laumond, “*Shortest Paths Synthesis for a Car-Like Robot*”. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol. 41, n° 5, pages 672–688, May 1996.
- [9] W.Feiten, R.Bauer, G.Lawitzky, “*Robust Obstacle Avoidance in Unknown and Cramped Environments*”. International Conference on Robotics and Automation [IEE 1994].
- [10] D.Fox, W.Burgard, S.Thrun, “*The Dynamic Window Approach to Collision Avoidance*”. *IEEE Robotics and Automation Magazine*, vol. 4, n° 1, pages 23–33, March 1997.
- [11] J.Minguez L.Montano, “*Nearness Diagram Navigation (ND): A New Real-Time Collision Avoidance Approach*”. International Conference on Intelligent Robots and Systems. Takamatsu, Japan, IEEE/RSJ, novembre 2000.
- [12] J.Minguez, L.Montano, J.Santos-Victor, “*Reactive Navigation for Non Holonomic Robots Using the Ego-Kinematic Space*”. International Conference on Robotics and Automation. Washington, DC, USA, IEEE, mai 2002.
- [13] O.Khatib, “*Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots*”. *The International Journal of Robotics Research*, vol. 5, n° 1, pages 90–98, January 1986.

- [14] O.Khatib, “*Commande Dynamique dans l’Espace Opérationnel des Robots Manipulateurs en Présence d’Obstacles*”. Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure de l’Aéronautique et de l’Espace, Toulouse, France, 1980.
- [15] J.Borenstein, Y.Koren, “*The Vector Field Histogram-Fast Obstacle Avoidance for Mobile Robots*”. In IEEE journal of Robotics and Automation, vol. 7, n° 3, pages 278-288, June 1991.
- [16] H.Bühler, “*Réglage par Logique Floue*”. Presses Polytechnique et Universitaires Romande, CH-1015 Lausanne, 204 pages, 1994.
- [17] J.J.Gibson, “*The Ecological Approach to Visual Perception*”. Houghton Mifflin, Boston, 1979
- [18] G.Schöner, M.Dose, C.Engels, “*Dynamics of Behavior: Theory and Applications for Autonomous Robot Architectures*”. Robotics and Autonomous Systems, vol. 16, pages 213–245, 1995.
- [19] R.A.Brooks, “*A Robust Layered Control System for a Mobile Robot*”. IEEE Journal of Robotics and Automation, RA-2:12–23, 1986.
- [20] F.Pfeiffer, J.Eltze, H.J.Weidemann, “*The TUM Walking Machine*”. In Intelligent Automation and Soft Computing. M.Jamshidi, C.Nguyen, R.Lumia, and J.Yuh (Eds.), TSI Press: Albuquerque, NM, 1994.
- [21] R.E.Ritzmann, R.D.Quinn, J.T.Watson, S.N.Zill, “*Insect Walking and Biorobotics: A Relationship with Mutual Benefits*”. Bioscience, 50:23–33. 2000.
- [22] A.P.Duchon, W.H.Warren, L.P.Kaelbling, “*Ecological Robotics. Adaptive Behavior*”, vol. 6, pages 473–507, 1998.
- [23] N.Franceschini, J.M.Pichon, C.Blanes, “*From Insect Vision to Robot Vision*”. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, B, 337:283–294, 1992.
- [24] M.V.Srinivasan, S.Venkatesh, “*From Living Eyes to Seeing Machines*”. Oxford University Press: Oxford, (Ed.) 1997.
- [25] R.A.Brooks, “*Intelligence without Representation*”. Artificial Intelligence, vol. 47, pages 139–160, 1991.
- [26] H.P.Moravec, “*Obstacle Avoidance and Navigation in the Real World by a Seeing Robot Rover*”. In Proceedings of the 7th International Joint Conference on Artificial Intelligence, William Kaufmann, Los Altos, CA, pages 785–790, 1981.
- [27] J.J.Gibson, “*Visually Controlled Locomotion and Visual Orientation in Animals*”. British Journal of Psychology, vol. 49, pages 182–194. Reprinted in Ecological Psychology, vol 10, pages 161–176, 1958/1998.
- [28] D.N.Lee, “*Visuo-Motor Coordination in Space-Time*”. In Tutorials in Motor Behavior. G.E.Stelmach and J.Requin (Eds), North-Holland, Amsterdam, pages 281–295, 1980.

- [29] W.H. Warren, “*Action Modes and Laws of Control for the Visual Guidance of Action*”. In *Movement Behavior: The Motor-Action Controversy*. O.Meijer and K. Roth (Eds.), North Holland, Amsterdam, pages 339–380, 1988.
- [30] Y.Aloimonos, “*Active Perception*”. Erlbaum, Hillsdale,NJ, (Ed.) 1993.
- [31] R.D.Beer, “*A Dynamical Systems Perspective on Agent-Environment Interaction*”. *Artificial Intelligence*, vol. 72, pages 173–215, 1995.
- [32] G.Schöner, M.Dose, “*A Dynamical Systems Approach to Task-Level System Integration used to Plan and Control Autonomous Vehicle Motion*”. *Robotics and Autonomous Systems*, vol. 10, pages 253–267, 1992.
- [33] W.H.Warren, “*Visually Controlled Locomotion: 40 Years Later*”. *Ecological Psychology*, vol. 10, pages 177–219, 1998b.
- [34] J.A.S.Kelso, “*Dynamic Patterns: The Self-Organization of Brain and Behavior*”. MIT Press, Cambridge: MA, 1995.
- [35] P.N.Kugler, M.T.Turvey, “*Information, Natural Law, and the Self-Assembly of Rhythmic Movement*”. Erlbaum, Hillsdale, NJ, 1987.
- [36] B.R.Fajen, W.H.Warren, “*Behavioral Dynamics of Steering, Obstacle Avoidance, and Route Selection*”. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and performance* 29 (2), pages 343–362, 2003.
- [37] B.R.Fajen,W.H.Warren, S.Termizer, L.P. Kaelbling, “*A Dynamical Model of Visually-Guided Steering, Obstacle Avoidance, and Route Selection*”. *International Journal of Computer Vision* 54 (1–2) 13–34, 2003.
- [38] W.H.Warren, B.R.Fajen, “*From Optic Flow to Laws of Control*”. in: L.M.Vaina, S.A. Beardsley, S.Rushton (Eds.), *Optic Flow and Beyond*, Kluwer, pages 307–333, 2004.
- [39] K.J.Kyriakopoulos, P.Kakambouras, N.J.Krikelis, “*Potential Field for Non Holonomic Vehicles*”. *Control System and Intelligent Automation Laboratory*, pages 461–465, 1995.
- [40] M.Khatib, “*Contrôle de Mouvement d’un Robot Mobile par Retour Sensoriel*”.Phd thesis, LAAS CNRS, Toulouse, France, Décembre 1996.
- [41] E.Tunstel, “*Behaviour Hierarchy for Autonomous Mobile Robots: Fuzzy-Behaviour Modulation and Evolution*”. *Intl J. of Intelligent automation and soft computing*, 1997.
- [42] Benmakhlouf Abdeslam, “*Contrôleur Flou pour la Navigation d’un Robot Mobile d’Intérieur*”. Université de Batna, 11 décembre 2006.
- [43] R.Ouiguini, S.Ait-Chaalal, A.Boudjema, “*Une Architecture de Contrôle Intelligent Basée sur les Comportements Flous pour un Robot Mobile Non Holonome*”. *Laboratoire de robotique et d’intelligence artificielle (CDTA), Université de Houari Boumedienne (USTHB)*.

- [44] W.L.Xu, S.K.Tso, Y.H.Fung, “*Fuzzy Reactive Control of a Mobile Robot Incorporating a Real/Virtual Target Switching Strategy*”. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 23, pages 171-186, 1998.
- [45] Ranajit Chatterjee, Fumitoshi Matsuno, “*Use of Single Side Reflex for Autonomous Navigation of Mobile Robots in Unknown Environments*”. *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 35, pages 77-96, 2001.
- [46] Dragan Saletic, Uros Popovic, “*Fuzzy Expert System for Automatic Movement Control of a Platform on a Ground with Obstacles*”, *Proceedings of the YuINFO 2006*, pages 1-6, Kopaonik, Serbia and Montenegro, 2006.
- [47] L.A.Zadeh, “*Fuzzy Sets*”. *Information and Control*, n° 8, pages 338-353, 1965.
- [48] E.Mamdani, “*Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant*”. *Proc. IEEE*, 121 (12), pages 1585-1588, 1974.
- [49] M.Sugeno, K.Marakami, “*An Approximation Study and Fuzzy Parking Control Using a Model Car*”. In *Industrial Application of Fuzzy Control* Amsterda: North-Holand, pages 125-138, 1985
- [50] M.Sugeno, G.T.Kang, “*Structure Identification of Fuzzy Model*”. *Fuzzy Sets and Systems*, 28, pages 15-33, 1988.
- [51] T.Takagi, M.Sugeno, “*Fuzzy Identification of Systems and its Application to Modeling and Control*”. *IEEE Transaction on Systems, Man and Cybernetics*, 15, pages 116-132, 1987.
- [52] L.Gacôgne, “*Logique Floue et Applications*”. Institut d’informatique d’entreprise d’Evry, France, novembre 2003.
- [53] Pierre Borne, Jean Rozinoer, Jean-Yves Dieulot, Laurent Dubois, “*Introduction à la Commande Floue*”. Édition Technip, Paris, 1998.
- [54] Ridha Ben Abdennour, Pierre Borne, Mekki Ksouri, Faouzi M’Sahli, “*Identification et Commande Numérique des Procédés Industriels*”. Éditions Technip, Paris, 2001.
- [55] O.Brock, O.Khatib, “*High-speed Navigation Using the Global Dynamic Window Approach*”. In *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pages 341–346, 1999.
- [56] [6] G.Dudek, M.Jenkin, “*Computational Principles of Mobile Robotics*”. Cambridge University Press, 2000.
- [57] [12] J.Guldner, V.I.Utkin, “*Tracking the Gradient of Artificial Potential Fields: Sliding Mode Control for Mobile Robots*”. *International Journal of Control* 63 (3), pages 417–432, 1996.
- [58] [13] M.Khatib, R.Chatila, “*An Extended Potential Field Approach for Mobile Robot Sensor-Based Motions*”, in: *Intelligent Autonomous Systems*, pages 490–496, 1995.

- [59] F.Lamiroux, D.Bonnafous, “*Reactive Trajectory Deformation for Non Holonomic Systems: Application to Mobile Robots*”. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 3099–3104, 2002.
- [60] J.C.Latombe, “*Robot Motion Planning*”, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [61] E.Rimon, D.Koditschek, “*Exact Robot Navigation Using Artificial Potential Functions*”, IEEE Transactions on Robotics and Automation 8 (5), pages 501–518, 1992.
- [62] S.Sekhvat, M.Chyba, “*Non Holonomic Deformation of a Potential Field for Motion Planning*”, In IEEE International Conference on Robotics and Automation, 9, pages 817–82, 1992.
- [63] R.Simmons, “*The Curvature-Velocity Method for Local Obstacle Avoidance*”. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 4, pages 2275–2282, 1996.
- [64] H.G.Tanner, S.Loizou, K.J.Kyriakopoulos, “*Non Holonomic Stabilization with Collision Avoidance for Mobile Robots*”. In IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pages 1220–1225, 2001.
- [65] I.Ulrich, J.Borenstein, “*VFH+: Reliable Obstacle Avoidance for Fast Mobile Robots*”. In IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 1572–1577, 1998.
- [66] I.Ulrich, J.Borenstein, “*VFH\*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification*”, in IEEE International Conference on Robotics and Automation, pages 2505–2511, 2000.

## Résumé:

Les humains ont une capacité remarquable de s'orienter en utilisant seulement la vision, mais les robots mobiles n'ont pas encore cette capacité. On propose une nouvelle approche à la navigation locale vision guidée, basée sur un modèle de navigation humaine. Cette approche utilise les directions relatives de la cible et des obstacles, la distance de la cible, et la largeur angulaire des obstacles, pour le calcul du potentiel approprié à la direction du robot mobile. Le potentiel calculé contrôle l'accélération angulaire du robot mobile, l'orientant vers la cible et loin des obstacles. Puisque la direction est commandée directement, cette approche convient bien à la navigation locale pour les robots mobiles non holonomes. Les chemins résultants sont lisses et ont une courbure continue. Cette approche est désignée pour être utilisée avec une simple caméra de vision sans information de profondeur mais peut également être utilisée avec d'autres types de détecteurs. Nous voulons implémenter et tester cette méthode sur un robot mobile non holonome et présenter nos résultats expérimentaux.

## Abstract:

Humans have a remarkable ability to navigate using only vision, but the mobile robots have not yet this capability. We propose a new approach to vision-guided local navigation, based upon a model of human navigation. This approach uses the relative headings to the goal and to obstacles, the distance to the goal, and the angular width of obstacles, to compute a potential field over the robot heading. This potential field controls the angular acceleration of the robot, steering it towards the goal and away from obstacles. Because the steering is controlled directly, this approach is well suited to local navigation for nonholonomic robots. The resulting paths are smooth and have continuous curvature. This approach is designed to be used with single-camera vision without depth information but can also be used with other kinds of sensors. We have implemented and tested our method on a differential-drive robot and present our experimental results.

## ملخص:

البشر ملحوظ القدرة على التنقل الرؤية، ولكن الروبوتات المتنقلة لم تتم لديها بعد هذه القدرة. نقترح نهج جديد في الرؤية - الاسترشاد الملاحة المحلية، استنادا الى نموذج الإنسان للملاحة. ويستخدم هذا النهج الزوايا النسبية الى هدف والى العقبات، المسافة الى الهدف، ومساحة الزاوية للعقبات، لحساب الحقل المناسب لإتجاه الروبوت المتنقل. الحقل المناسب يتحكم في التسارع الزاوي الروبوت المتنقل، و توجيهه من اجل تحقيق هدف بعيدا عن العقبات. بمأن الإتجاه متحكم فيها بصورة مباشرة، هذا النهج مناسب تماما للملاحة المحلية الروبوتات nonholonomic. مسارات الناتجة هي سلسلة ومستمرة انحاء. هذا النهج مصمم للاستخدام مع الكاميرا وحيدة دون رؤية متعمقه ولكن المعلومات يمكن أن تستخدم أيضا مع انواع اخرى من اجهزة الاستشعار. أردنا نفذ واختبار هذا نهج في الروبوت nonholonomic و إعطاء نتائج التجارب.