

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE DE BATNA

MEMOIRE

Présenté à la  
FACULTE DE LA TECHNOLOGIE  
DEPARTEMENT D'ELECTRONIQUE

Pour l'obtention du diplôme de

MAGISTER  
ELECTRONIQUE

Option: Robotique

Par  
AOUADJ Bilal

*Thème*

---

***CLASSEMENT D'AGENTS SUIVANT LEURS  
DYNAMIQUE : APPLICATION A UN  
ENVIRONNEMENT A DEUX AGENTS***

---

*Soutenu le : 17/01/2012*

*Devant le jury constitué de :*

Pr. BENOUDJIT Nabil	Prof de Batna	Président
Dr. LOUCHENE Ahmed	M.C. Université de Batna	Rapporteur
Dr. TAIBI Mahmoud	M.C. Université de Annaba	Examineur
Dr. SAIDI Lamir	M.C. Université de Batna	Examineur
Dr. KHIEREDDINE Mohamed	M.C. Université de Batna	Examineur

***CLASSEMENT D'AGENTS SUIVANT  
LEURS DYNAMIQUE : APPLICATION A UN  
ENVIRONNEMENT A DEUX AGENTS***

## *Remerciements*

*Tout d'abord, je Remercie le bon Dieu le tout puissant pour la bonne santé, la volonté et la patience qu'il m'a donné pour accomplir ce travail*

*Je tiens à remercier vivement monsieur LOUCHENE Ahmed pour son esprit scientifique et compréhensif qui m'a beaucoup aidé avec ses idées, ses conseils.*

*Je dédie ce travail à :*

*Ma mère,*

*Mon père,*

*Mon frère et Mes sœurs*

*À Toute la famille*

*Et à Tous mes amis*

# Table des matières

Dédicace .....	i
Remerciements .....	ii
Table des matières .....	iii
Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur les Robots mobiles</b>	
I.1 Introduction .....	5
I.2 Généralités sur la robotique mobile .....	5
I.2.1 Définition d'un robot mobile .....	6
I.2.2 Composants matériels d'un robot mobile .....	6
I.2.2.1 Types de plate forme mobile.....	7
I.2.2.2 Capteurs .....	8
I.2.2.3 Actionneurs .....	9
I.2.3 Composants décisionnels d'un robot mobile.....	9
I.2.3.1 Vision.....	10
I.2.3.2 Localisation.....	10
I.2.3.3 Représentation de l'environnement.....	11
I.2.3.4. Planification .....	12
I.2.3.5 Navigation.....	13
I.3 Problèmes en robotique mobile.....	18
I.4 Autonomie d'un robot.....	19
I.5 Contraintes de l'environnement dynamique et incertain.....	20
I.6 L'apport des systèmes multi-agents (SMA) à la robotique mobile.....	21
I.6.1 Généralités sur les SMA .....	21
I.6.1.1 Agents .....	21
I.6.1.2 Les systèmes multi-agents .....	22

I.6.2 Les premières applications des SMA.....	23
I.6.3 Modèles d'agent.....	24
I.6.3.1 Agents réactifs.....	24
I.6.3.2 Agents Cognitifs .....	25
I.6.3.3 Agents Hybrides.....	26
I.6.4 Communication.....	26
I.7 Conclusion.....	27

## Chapitre II : Système de Perception et Localisation

II.1 Introduction.....	29
II.2 Les systèmes de perception.....	29
II.2.1 Les capteurs proprioceptifs .....	30
II.2.1.1 Les capteurs de déplacement .....	30
II.2.1.2 Les capteurs d'attitude .....	31
II.2.2 Les capteurs extéroceptifs .....	33
II.2.2.1 Les capteurs télémétriques.....	33
II.2.2.2 Les systèmes de vision.....	36
II.3 Les méthodes de localisation .....	38
II.3.1 Localisation a l'estime.....	39
II.3.2 Localisation absolue .....	40
II.3.2.1 Repères artificiels .....	41
II.3.2.2 Repères naturels.....	42
II.4 Conclusion .....	43

## Chapitre III : Estimation de la dynamique des obstacles

III.1 Introduction .....	45
III.2 Conception du classificateur flou .....	46

III.2.1 Le milieu d'évolution du Robot mobile .....	47
III.2.2 Le télémètre de système de perception .....	48
III.2.3 Le modèle de mesure pour le système de classification .....	48
III.2.4 Le système de classification en logique flou.....	49
III.2.4.1 les différentes entrées et sorties du classificateur.....	49
III.2.4.2 La stratégie de fuzzification .....	51
III.2.4.3 Etablissement des règles d'inférence .....	56
III.2.4.4 Choix de la stratégie de defuzzification .....	60
III.2.4.5 Interprétations des figures .....	63
III.2.4.6 Exemple de simulation .....	64
III.3 Conclusion .....	71
Conclusion générale .....	73
Références bibliographiques .....	75

# Introduction générale

## *Introduction générale*

Les robots mobiles sont largement utilisés dans les environnements industriels pour le transport de produits par exemple. Le plus souvent ces tâches sont répétitives et suivent un chemin bien défini, parfois même bien matérialisé comme des lignes sur le sol ou des amers artificiels.

Depuis 1970 le monde scientifique et industriel porte des efforts sans cesse croissants sur l'étude et la réalisation d'engins mobiles. Ces derniers sont capables d'effectuer des déplacements sans aucune liaison mécanique avec un point fixe de l'espace dans lequel ils évoluent d'où le nom de robots mobiles. Nous pouvons considérer que « robot mobile » est synonyme de « véhicule » puisque ce dernier est composé de la structure matérielle et mécanique qui permet au robot d'effectuer un déplacement. Cet intérêt nouveau porté à la robotique mobile s'explique par les applications qu'elle peut apporter dans de nombreux domaines. Comme les robots manipulateurs les robots mobiles sont destinés à remplacer ou à soulager l'homme des tâches fatigantes dangereuses inaccessibles ou encore vitales.

Les tâches monotones ou fatigantes qui peuvent être assurées par des robots mobiles se rencontrent dans différents secteurs. Dans l'industrie (métallurgie, automobile, électrique, agroalimentaire, etc), il s'agit surtout d'applications de transport ou de distribution que ce soit dans les usines, les mines, les hôpitaux ou les ateliers. On peut prendre l'exemple du convoyage dans un milieu souvent encombré et bruyant qui consiste au stockage ou à l'expédition de pièces à l'unité ou palettisées, l'alimentation en pièces de machine-outil, ou le nettoyage automatique du sol. Un exemple concret consiste à développer un prototype de système de transport capable en milieu hospitalier de charger et de transporter des plateaux, des médicaments ou des déchets, Le robot mobile doit se déplacer le long des couloirs, utiliser les ascenseurs puis aller jusqu'au but fixé pour par exemple déposer des médicaments.

Il y a actuellement une forte tendance à élargir les milieux où évoluent les robots à des environnements de bureaux ou à des environnements domestiques (robots de service). Les types d'applications possibles sont innombrables. Cela peut être des tâches de nettoyage et d'entretien ou encore une assistance à une personne handicapée dans des

tâches d'exploration et de préhension. Un robot peut également servir de guide pour la visite d'un musée. On parle alors, de façon générale, de robotique d'intérieur.

Les technologies récentes de la robotique mobile avancée ont déjà apporté d'énormes contributions dans beaucoup de secteurs industriels et publics tels que les systèmes de surveillances, système de contrôle et les véhicules autonomes et semi autonomes.

Pour un robot mobile, le but essentiel est de définir une stratégie qui lui permette de rejoindre la destination finale c'est-à-dire la cible. Faire naviguer le robot en s'approchant de la cible et en évitant tout obstacle dans un environnement contraint est parmi les problèmes les plus complexes et la majorité des spécialistes de la robotique mobile ont orienté leurs recherches vers cet axe. La nature de l'environnement détermine l'approche de navigation utilisée ainsi pour un environnement connu ou partiellement connu on opte pour les approches classiques dont l'implémentation est plus facile et simple. Par contre dans un environnement réel non structuré le contrôleur du robot doit être capable d'opérer sous des conditions d'imprécision et d'incertitudes et de répondre d'une manière réactive à des événements imprévus au moment de leur perception dans ce cas les approches de navigation avancées sont des trajectoires générées par le robot.

Toutes ces applications réelles ou potentielles montrent bien l'intérêt que présente la mobilité en robotique. En effet depuis que les robots mobiles ont commencé à proliférer dans plusieurs domaines on assiste à des exigences de plus en plus grandes au niveau de leurs performances. Ces exigences demandent d'une part une simplicité d'utilisation et d'autre part des capacités de traitement plus importantes. En conséquence les progrès dans la compréhension des différents aspects de la robotique mobile sont une condition préalable pour atteindre les performances technologiques attendues. De plus il s'agit d'un énorme champ d'activité où coopèrent des disciplines scientifiques aussi variées et étendues que l'informatique l'électronique l'automatique la vision le traitement du signal la mécanique et les mathématiques.

On comprend alors l'intérêt évident des robots mobiles autonomes, pourvus de moyens de locomotion tous terrains de capteurs performants et de calculateurs puissants pour le traitement des informations issues des capteurs et de la commande automatique.

Un tel cadre d'utilisation requiert que le système robotisé dispose d'un niveau

minimum d'autonomie et de facilités de navigation. Pour ce faire, le système doit généralement accomplir trois tâches de base qui sont la localisation, la planification et la navigation.

Ces dernières années, plusieurs équipes de recherche dans le domaine de la robotique mobile intègrent les architectures de systèmes multi-agents dans la navigation, les stratégies de positionnement et les tâches que peut accomplir un groupe d'agents. En plus, l'approche réactive des Systèmes Multi-Agents est une alternative viable pour affronter la complexité de navigation autonome d'un ensemble de robots dans un environnement dynamique, car elle s'intéresse à l'implémentation de systèmes autonomes de façon simple et distribuée.

Le présent mémoire s'articule autour de trois chapitres :

Le chapitre I résume toutes les notions de base nécessaires à la compréhension du domaine de la robotique mobile, ainsi qu'un panorama de techniques classiques et récentes appliquées dans la planification et la navigation d'un robot mobile autonome et les concepts sur les systèmes multi-robots.

Le Chapitre 2 introduit, tout d'abord, les notions des systèmes de perception.

Le Chapitre 3 présente le logiciel de simulation ainsi que les différents résultats de simulation de navigation pour le système multi-robots.

Enfin, nous concluons ce mémoire par une synthèse des résultats obtenus ainsi que par la proposition des multiples perspectives dans le sujet.

# Chapitre I

**Généralités sur les Robots mobiles**

## **Généralités sur les Robots mobiles**

### **I.1 Introduction**

Actuellement, il ya un intérêt croissant vers les systèmes multi-robots mobiles en raison de leur utilisation aux diverses tâches telles que les missions spatiales, les opérations dans des environnements dangereux, et les applications militaires.

Nous donnons dans ce chapitre un aperçu sur les notions de base de la robotique mobile. Certains points seront mentionnés plus en détail que d'autres, car ils sont plus étroitement liés à notre travail de recherche.

La robotique est la branche de l'intelligence artificielle concernée par l'étude de systèmes automatiques capables d'une interaction directe avec le monde physique. On distingue deux groupes de robots : les robots fixes et les robots mobiles. Les robots fixes sont utilisés dans l'industrie pour réaliser des tâches dangereuses (soudure du châssis ou peinture de la carrosserie dans une usine automobile), les robots mobiles pour transporter des charges (depuis les chaînes de fabrication jusqu'aux zones de stockage) ou encore pour transporter le courrier dans les bureaux, ou pour intervenir dans des milieux hostiles.[1]

### **I.2 Généralités sur la robotique mobile**

Depuis les années 1960, la robotique mobile a connu un essor considérable. Les progrès techniques ont permis la construction de robots de plus en plus perfectionnés : de nombreux périphériques, une puissance de calcul accrue et des moyens de communication performants. La mobilité autonome des robots est devenue un sujet de recherche développé par tous les pays industrialisés. Qu'il s'agisse de robots mobiles à pattes, à roues ou même sous-marins et aériens, les applications sont vastes et multiples: robots de services, surveillance, construction, nettoyage, manipulation de charges, automobile intelligente, robots d'intervention, robots d'exploration planétaire ou de fonds marins, satellites, robots militaires, etc. Le marché potentiel de la robotique est considérable, même s'il faut pour cela résoudre des problèmes plus importants et plus fondamentaux que prévus initialement dans la quête vers la machine intelligente [2].

### I.2.1 Définition d'un robot mobile

Un robot mobile est un système mécanique, électronique et informatique agissant physiquement sur son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné. Cette machine est polyvalente et capable de s'adapter à certaines variations de ses conditions de fonctionnement. Elle est dotée de fonctions de perception, de décision et d'action. Ainsi, le robot devrait être capable d'effectuer des tâches diverses, de plusieurs manières, et accomplir correctement sa tâche, même s'il rencontre de nouvelles situations inattendues. [w1]



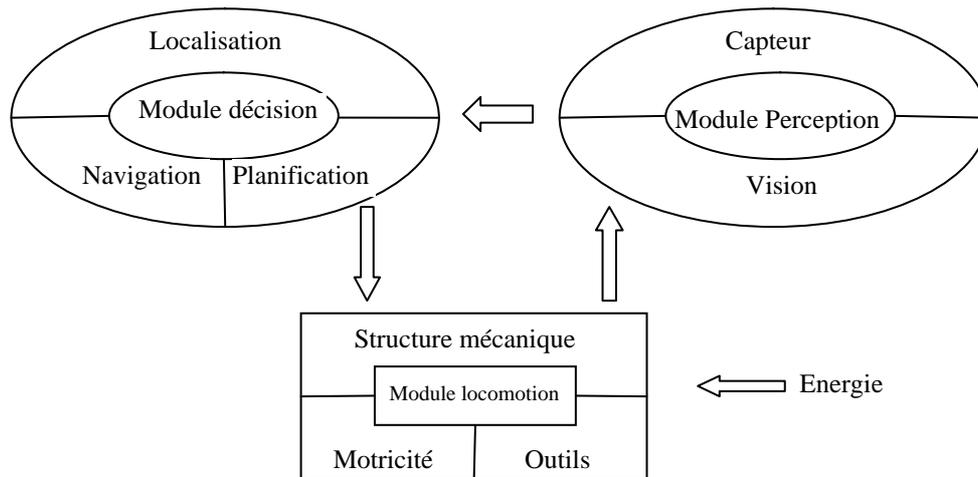
**Figure I.1** : Le robot mobile « Séjourner » utilisé pour la mission pathfinder de la NASA

L'appellation *Robot* mobile regroupe tous les types de robots qui ont la capacité de déplacement qui est la caractéristique commune entre eux, la différence réside dans la manière, qui dépend du domaine d'utilisation de robot, par laquelle le robot va atteindre cette faculté de mouvement. La mobilité par les roues est la structure mécanique la plus communément appliquée. Cette technique assure selon l'agencement et les dimensions des roues un déplacement dans toutes les directions avec une accélération et une vitesse importante.

### I.2.2 Composants matériels d'un robot mobile

À la base, un robot mobile est constitué de composants matériels et logiciels. Parmi les composants matériels, on trouve une plateforme mobile à laquelle sont rattachées tous les autres composants comme les capteurs, les actionneurs et une source d'énergie (batteries).

D'autres organes tels que des bras manipulateurs peuvent lui être ajoutés pour une application particulière [3].



**Figure I.2 :** Architecture modulaire d'un robot mobile.

### I.2.2.1 Types de plates formes mobiles

On peut classer les robots mobiles à roue dans des sous-classes selon le type de la plate forme mobile utilisé : [4]

#### *a- Plates forme uni-cycle (circulaire)*

C'est l'une des configurations les plus utilisées pour les robots mobiles d'intérieur par ce qu'elle nécessite un sol très plan et non accidenté.

#### *b- Plates formes holonome*

Les plates formes holonome ont une structure mécanique complexe qui leur permet de se déplacer dans toutes les directions sans manœuvre. Le corps du robot lui-même n'effectue pas de rotation mais uniquement des translations. Ce système permet un contrôle très simple et relativement rapide car les changements de direction ne concernent que les roues et peuvent donc se faire très vite. Par contre ces plates formes sont relativement limitées en capacité de franchissement et requièrent un sol très plan (utilisation interne).

#### *c- Plateformes non-holonomes*

Les véhicules dit non-holonomes sont ceux que l'on rencontre le plus souvent dans la vie courante : voiture particulière, bus, camion, etc. Ces véhicules ont une structure mécanique relativement simple : des roues motrices, des roues directrices et des roues porteuses. Une roue peut avoir une, deux ou les trois fonctions. Mais tous ces véhicules ont une caractéristique commune : la direction de la vitesse d'avance (ou

vitesse linéaire) est imposée par la direction des roues directrices. Pour fixer les idées prenons un exemple : pour qu'une voiture particulière aille de sa position initiale à un mètre sur sa droite elle est obligée de faire une manœuvre : une marche avant puis une marche arrière.

#### ***d- Robot à pattes***

Des plates-formes à deux, quatre ou six pattes peuvent également être utilisées. Les plates-formes à six pattes sont relativement pratiques car le robot est en équilibre permanent, ce qui facilite le contrôle. Les plates-formes à deux ou quatre pattes sont plus complexes à commander et le simple contrôle de la stabilité et d'une allure de marche correcte reste aujourd'hui difficile, ce qui les rend en général relativement lentes. L'odométrie de ce type de plates-formes est de plus généralement de très faible qualité. Ces différents facteurs font que ces plates-formes sont rarement utilisées quand l'application visée a un besoin précis de positionnement et de navigation. De telles plates-formes commencent cependant à apparaître à relativement grande échelle (par exemple le robot Aibo de Sony) et peuvent être utilisées en conjonction avec certaines méthodes de navigation précises.

#### ***e- Robot omnidirectionnel***

Un robot omnidirectionnel est un robot qui peut se déplacer librement dans toutes les directions. Il est en général constitué de trois roues décentrées orientables placées en triangle équilatéral.

L'énorme avantage du robot omnidirectionnel est qu'il est holonome puisqu'il peut se déplacer dans toutes les directions. Mais ceci se fait au dépend d'une complexité mécanique bien plus grande [4].

### **I.2.2.2 Capteurs en robotique**

Les capteurs ont pour fonction d'acquérir des données provenant de l'environnement. Les capteurs typiquement installés sur un robot mobile sont des sonars à ultrasons, un capteur laser de proximité, des encodeurs de roues (odomètres), une ou deux caméras optiques, une boussole et des microphones. Les types d'informations perçues ainsi que leur précision varient beaucoup d'un capteur à l'autre.[3].

Ils y a deux classes de capteurs : **les capteurs proprioceptifs** (renseignant le

robot sur lui-même : encodeurs, centrale inertielle) et les **capteurs extéroceptifs** (renseignant le robot sur son environnement : caméras, télémètres Laser, radars hyperfréquences, prosimètres à ultrasons). Certains capteurs modernes sont capables de prétraiter leurs données pour fournir des informations de plus haut niveau (segmentation d'une image vidéo, suivi automatique de cible, filtrage du bruit) [5].

### I.2.2.3 Actionneurs

Pour bouger à l'intérieur de son environnement et interagir avec celui-ci, un robot est équipé d'actionneurs. Par exemple, un robot est muni d'un ou de plusieurs moteurs pouvant faire tourner ses roues afin d'effectuer des déplacements. Généralement, les roues du robot sont contrôlées par deux commandes motrices, soit une vitesse d'avancement et un taux de rotation. Habituellement, ces commandes s'expriment en mètres par seconde (m/s) et en degrés de rotation par seconde (deg/s)[3].

Le type de locomotion définit deux types de contraintes [5]:

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

### I.2.3 Composants décisionnels d'un robot mobile

Afin de faire fonctionner un robot mobile, plusieurs modules logiciels sont mis à contribution. Ces modules peuvent servir à interpréter les données perçues par les capteurs afin d'y extraire des informations, ou à traiter des commandes de haut niveau pour générer d'autres commandes à un niveau inférieur. Les modules les plus fréquemment utilisés sont les modules de vision, localisation, de navigation, de planification et de séquençement d'activités du robot. Ces aspects de ces modules logiciels seront donnés avec plus de détails dans les sections suivantes.

### I.2.3.1 Vision

La vision fournit une grande quantité de données en provenance de l'environnement et permet d'entreprendre une interaction intelligente avec les environnements dynamiques (Évitement d'obstacles mobiles, rendez-vous avec autres agents mobiles. . .). De ce fait, il n'est pas surprenant de trouver une grande quantité de recherches sur le développement de capteurs qui essaient d'imiter le système visuel humain. De plus, les capteurs visuels utilisés par les robots intelligents doivent avoir les mêmes sensibilités et réponses à la lumière que notre système de vision. En robotique, au cours des deux dernières décennies, les innovations technologiques concernant la fabrication de caméras et l'évolution des ordinateurs ont permis d'intégrer des systèmes complexes de vision dans les systèmes embarqués, que ce soit sur des robots mobiles pour la navigation autonome ou sur des véhicules pour l'aide à la conduite. La vision artificielle revêt une importance toute particulière car elle permet de fournir à la machine les capacités nécessaires pour réagir avec son environnement ; elle fournit les représentations à partir desquelles le robot prend des décisions [6], [7].

### I.2.3.2 Localisation

Un robot mobile doit toujours connaître sa situation pour se déplacer d'un point à un autre, soit en identifiant des repères, on parle de localisation absolue, soit tout simplement en mesurant les distances parcourues et les directions empruntés depuis sa position initiale. Les méthodes de localisation se regroupes en deux catégories, soit : [8], [9]

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

#### *a-Localisation relative*

Cette méthode est basée sur l'intégration des déplacements élémentaires du robot mobile, on l'appelle aussi localisation relative car les coordonnées du robot sont calculées en fonction de la position précédente et du déplacement en cours. Les erreurs dues à cette méthode peuvent être importantes car cumulatives avec la distances et fonction du type de trajectoires. On distingue deux méthodes principales

de localisation relatives :

Odométrie directe : elle est très utilisée pour localiser les robots mobiles, elle présente l'avantage d'être simple d'emploi et d'un faible coût. Son principe repose sur la mesure de la vitesse angulaire de rotation des roues motrices. Le déplacement du robot est obtenu par l'intégration des déplacements élémentaires entre deux instants et ainsi de proche en proche on obtient une estimation de la position à partir d'une référence initiale. Ceci suppose de parfaites conditions d'évolution.

Odométrie indirecte : odométrie indirecte s'effectue par des moyens inertiels qui mesurent soit la vitesse soit l'accélération puis par intégration, on en déduit les déplacements élémentaires. Ces moyens permettent une localisation précise pour certains engins parcourant de longues distances. Il existe d'autres méthodes de localisation relative, mais toutes présentent des dérives assez importantes qui ne peuvent être compensées que par des informations supplémentaires issues d'un autre mode de localisation.

### ***b-Localisation absolue***

Ce mode de localisation fournit la position et l'orientation du robot mobile par rapport à l'environnement. Ces mesures sont fournies par des capteurs dits extéroceptifs ou externes car ils ne s'intéressent pas aux mouvements internes du robot, comme c'est le cas pour l'odométrie [9].

### **I.2.3.3 Représentation de l'environnement**

La localisation a besoin, sous une forme ou une autre, d'une représentation informatique de l'environnement. Il existe deux types principaux de cartes : les grilles d'occupation et les graphes. Dans le premier cas, l'environnement est quadrillé en cases.

Durant l'exploration, à l'aide des sonars ou d'un télémètre laser, chacune de ces zones se voit attribuer une probabilité d'être occupée par un obstacle. Le résultat est une image probabiliste des murs et des espaces libres. Cette représentation donne lieu à une localisation sous forme de coordonnées qui désignent une case du quadrillage. L'un des inconvénients des grilles d'occupation vient de la grande quantité de données qu'il faut manipuler. L'exploitation de ces représentations est coûteuse en temps de calcul [10].

Les cartes topologiques ne s'intéressent qu'aux points clefs du milieu. Elles ont la forme d'un graphe où les sommets figurent des endroits spécifiques (intersections de couloirs, changement de classe de perception...) et les arcs l'existence d'un chemin entre deux sommets. C'est une vue plus abstraite de l'environnement que celle proposée par les grilles d'occupation. Elle vise à ne conserver que l'information utile. Si le quadrillage est précis, il manque de discernement. Un long couloir uniforme ne nécessite pas à priori une accumulation de données sous formes de milliers de probabilités. Notons que ces deux types de cartes ne sont pas exclusifs [11].

D'autres formes de représentation existent, dont les représentations implicites. Ici, il n'y a pas de cartes mais apprentissage d'un comportement adapté au milieu.

#### I.2.3.4. Planification

Une fois que le robot dispose d'une représentation de l'environnement et d'une estimée de sa position, il convient de s'en servir pour générer les tâches qui lui permettront d'atteindre son objectif. Pour cela plusieurs méthodes sont possibles. Le choix d'une méthode de planification est guidé par deux questions :

1. Quel type d'espace utilisé : l'espace de travail ou l'espace des configurations?
2. Quel type de méthodes : des méthodes exactes ou des méthodes approchées?

Les méthodes exactes sont basées sur une exploitation complète de la description de l'environnement. Par opposition, les méthodes approchées réalisent tout d'abord une discrétisation de l'environnement sous forme de grilles régulières ou irrégulières. L'espace libre ainsi représenté est un sous-ensemble de l'espace libre réel. Alors que les méthodes exactes sont susceptibles d'être complètes, les méthodes approchées ne le sont jamais [12].

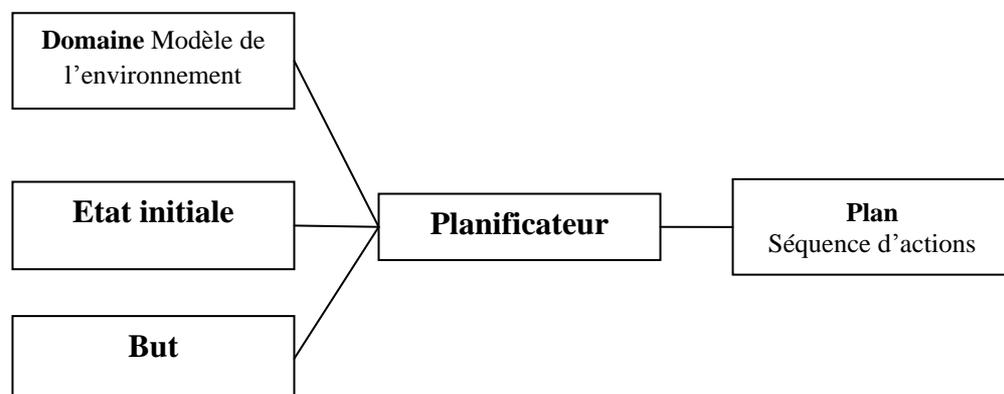


Figure I.3: Modèle de planification de tâches.

### I.2.3.5 Navigation

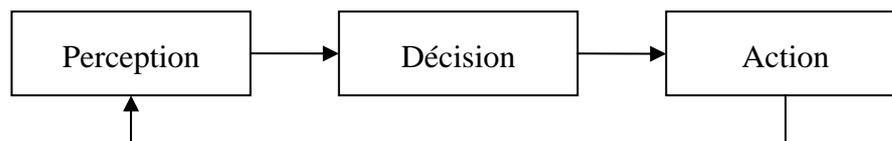
La navigation autonome d'un robot mobile est tout simplement la capacité d'aller d'une position initiale à une position finale de manière autonome.

Réaliser une tâche telle que se déplacer vers le point de coordonnées  $(x, y)$ , aussi simple puisse-t-elle paraître à un humain, requiert la mise en œuvre de fonctionnalités potentiellement complexes de perception/décision/action (figure I.4). Le rôle de ces fonctionnalités est le suivant : [13]

**Perception** : Il s'agit essentiellement de détecter les obstacles et d'effectuer éventuellement une modélisation de l'environnement pour fournir et mettre en forme les informations nécessaires à la décision sur le déplacement à réaliser ;

**Décision** : L'environnement étant perçu, et éventuellement modélisé, il faut décider le type de mouvement à exécuter en générant des consignes de vitesses appropriées à envoyer au robot (pour un mouvement réactif par exemple) ou en choisissant une trajectoire à exécuter ;

**Action** : Il s'agit alors de veiller à réaliser le mouvement ou la trajectoire décidé, suivre les consignes de vitesses reçues en appliquant par exemple le type de commande adapté.



**Figure I.4** : Le cycle perception/décision/action que doit réaliser un robot autonome pour réaliser une navigation.

#### *a-Approches de navigation*

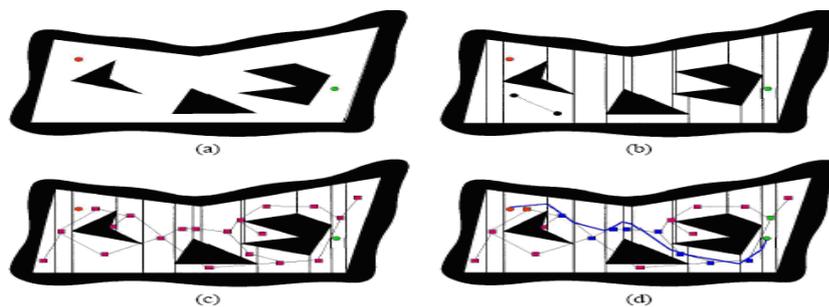
Les méthodes de navigation dans la robotique mobile sont deux classes : approches classiques et approches avancées. La nature de l'environnement détermine l'approche de la navigation utilisée. Pour un environnement connu ou partiellement connu, on opte pour des approches classiques par contre si l'environnement est inconnu alors les approches non classiques sont sollicitées. Dans ce cas il n'y a pas

moyen de faire au préalable une planification de trajectoire pour le robot.

### *a-1 Approches classiques*

Elles sont utilisées dans les applications où l'environnement est totalement ou partiellement connu c'est-à-dire un environnement statique et non complexe. Il y a deux types de méthodes dans cette approche, des méthodes basées sur la configuration de l'espace et des méthodes dites de champs potentiels [14].

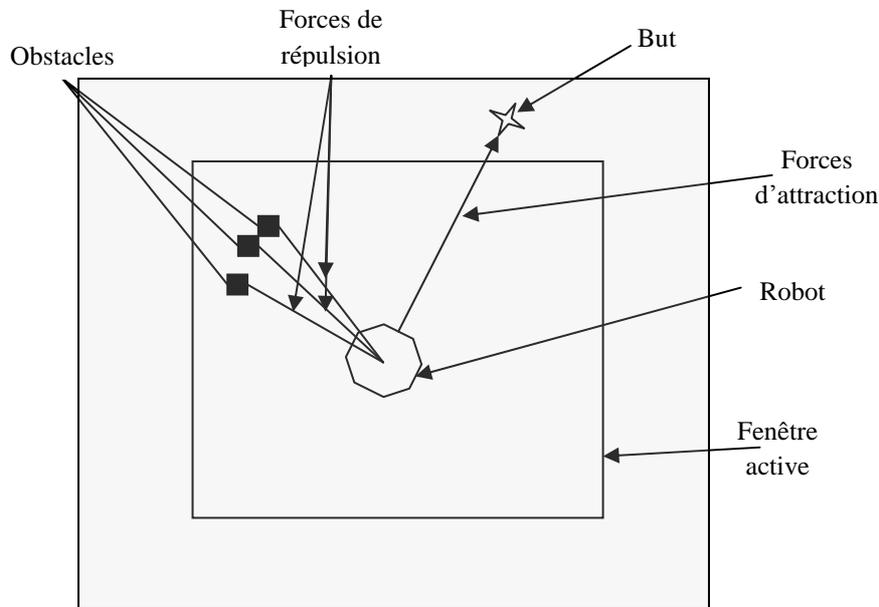
∅ *Méthodes basées sur la configuration de l'espace* : C'est une des techniques basées sur la décomposition en cellules utilisant une représentation discrète de l'environnement du robot. Une décomposition exacte donne un ensemble de polygones subdivisant l'espace des configurations libres (Figure I.5 (a) et (b)). A partir de cette représentation, on crée un graphe reliant les différentes composantes adjacentes de l'environnement (Figure I.5 (c)). Ensuite, on identifie les cellules dans lesquelles se trouvent la configuration initiale et la configuration but. Le problème de planification consiste alors en un problème de recherche dans un graphe. Pour cela, on choisit un algorithme de parcours (A\*, depth-first, breadth-first) permettant d'optimiser la distance parcourue, ou tout autre critère. Pour finir, il faut relier par un chemin sans collisions les cellules du graphe solution. On peut, par exemple, utiliser le point milieu de la frontière de deux cellules adjacentes, comme cela est représenté à la Figure I.5 (d) [14].



**Figure I.5:** Décomposition exacte de l'espace libre en trapèzes et constitution d'un graphe.

∅ *Méthode du potentiel* : La méthode du potentiel a été initialement introduite par O. KHATIB [13] pour des robots manipulateurs et mobiles. Elle diffère sensiblement des méthodes précédentes, car elle ne résulte pas d'un raisonnement purement géométrique. Le principe de la méthode est le

suivant. Le robot mobile est plongé dans un champ de potentiel qui résulte de la superposition d'un potentiel attractif, lié à la configuration à atteindre, et d'une somme de potentiels répulsifs, liés aux obstacles. La figure I.6 présente une carte des potentiels engendrés par un but et trois obstacles [14].



**Figure I.6 :** Combinaison de potentiels attractif et répulsif.

### *a-2 Approches Avancées*

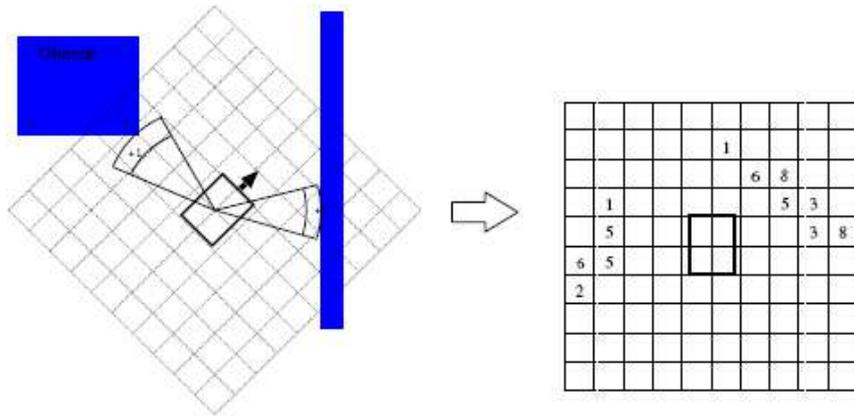
Les approches avancées offrent des outils plus performants dans la navigation ce qui permet d'obtenir un robot « réactif », capable d'apporter une réponse immédiate à toute nouvelle modification de l'environnement du moment que ce dernier est complètement inconnu. Parmi les approches avancées utilisées en navigation on trouve la logique floue, les algorithmes évolutionnaires et les réseaux de neurones.

### ***b- Méthode d'évitement d'obstacles***

L'évitement d'obstacles est un comportement de base présent dans quasiment tous les robots mobiles. Il est indispensable pour permettre au robot de fonctionner dans un environnement dynamique et pour gérer les écarts entre le modèle interne et le monde réel. Les méthodes présentées sont efficaces à condition d'avoir une perception correcte de l'environnement.

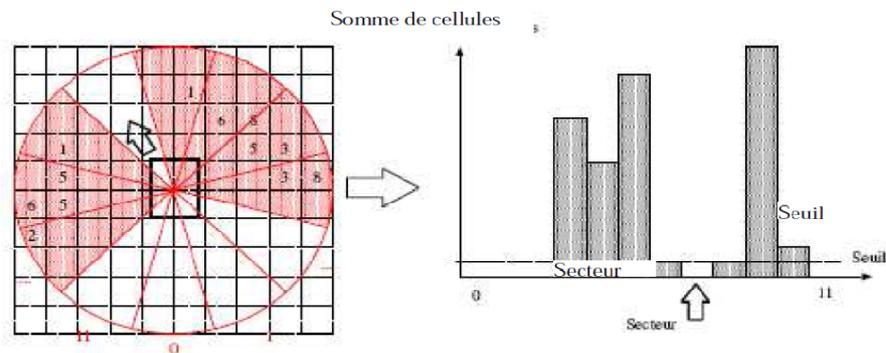
### b-1 La méthode Vector Field Histogram

La modélisation consiste dans un premier temps à représenter l'environnement par une grille d'occupation centrée sur le robot, où chaque cellule contient une valeur entière correspondant à la probabilité d'y trouver un obstacle "valeur de certitude" [4].



**Figure I.7:** Représentation du monde sous forme de grille d'occupation centrée sur le robot.

Ensuite, l'environnement est discrétisé en secteurs angulaires pour lesquels la somme des valeurs des cellules est calculée. Un seuil permettant de tolérer un certain bruit est ensuite utilisé pour déterminer les directions possibles pour le robot [15].

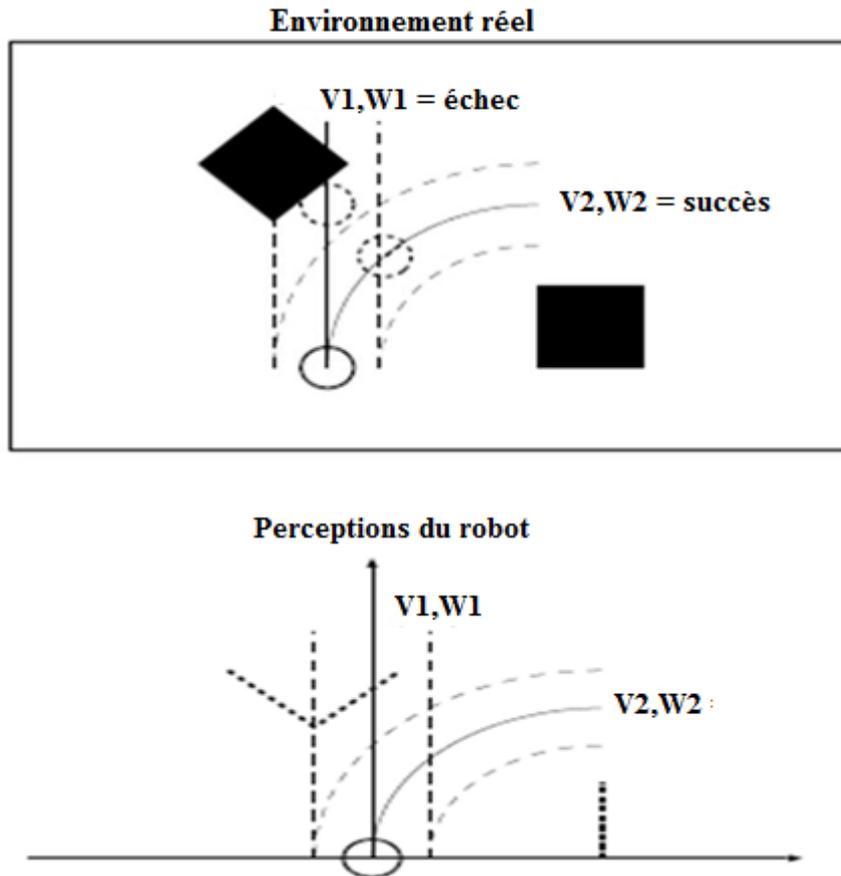


**Figure I.8 :** Décomposition de la grille sous forme des secteurs.

### b-2 Méthode de la fenêtre dynamique

La méthode de la fenêtre dynamique permet, à partir de la perception locale de l'environnement, de sélectionner un couple  $(v, w)$  de vitesses de translation et de rotation du robot qui répond à différentes contraintes, dont celle d'éviter les obstacles. Un tel couple de vitesses, lorsqu'il est appliqué au robot, produit une trajectoire circulaire, pour laquelle la satisfaction des différentes contraintes peut être évaluée. A

l'issue de l'évaluation de toutes les contraintes pour tous les couples de vitesses possibles, la méthode de la fenêtre dynamique permet de sélectionner le couple le plus pertinent (qui répond le mieux aux contraintes) [15].



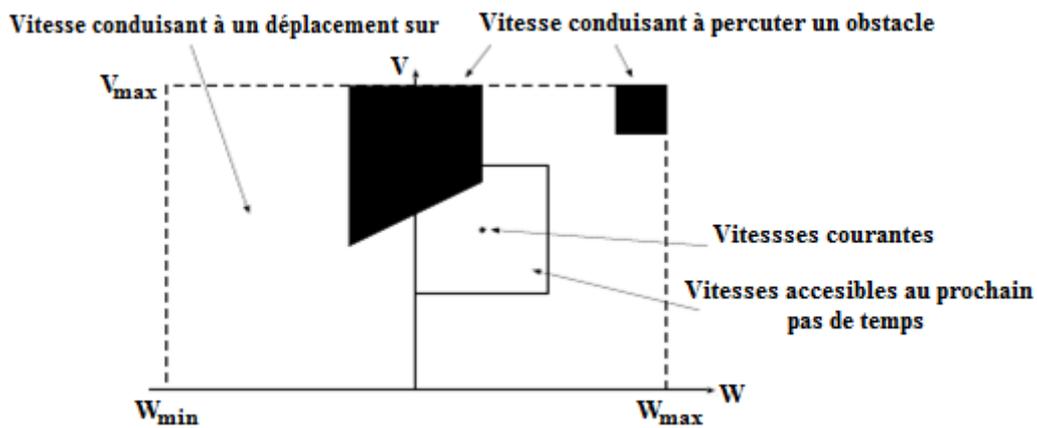
**Figure I.9 :** Contrainte d'évitement d'obstacles pour la méthode de la fenêtre dynamique.

La contrainte d'évitement d'obstacles est une contrainte dure au sens où elle est binaire (succès / échec), le respect ou le non respect de cette contrainte est reporté dans un graphe des vitesses qui indique, pour chaque couple de vitesses possible (donc chaque trajectoire), si le robot va ou ne va pas rencontrer un obstacle [15].

Compte tenu de la dynamique du robot c'est-à-dire sa capacité à accélérer et à décélérer, les vitesses admissibles ne sont pas toutes atteignables dans l'intervalle de temps imparti. Pour exprimer cette contrainte, une fenêtre dynamique est alors générée dans l'espace des vitesses, autour de la vitesse actuelle du robot. Cela réduit ainsi l'espace dans lequel sera recherchée la prochaine commande [5]. C'est cette fenêtre qui donne son nom à la méthode car elle permet de prendre en compte la dynamique du robot. Il reste alors à choisir, au sein de cette fenêtre, un couple de

vitesse qui ne conduisent pas à percuter un obstacle pour garantir un déplacement sûr du robot.

Compte tenu de la dynamique du robot c'est-à-dire sa capacité à accélérer et à décélérer, les vitesses admissibles ne sont pas toutes atteignables dans l'intervalle de temps imparti. Pour exprimer cette contrainte, une fenêtre dynamique est alors générée dans l'espace des vitesses, autour de la vitesse actuelle du robot. Cela réduit ainsi l'espace dans lequel sera recherchée la prochaine commande [5]. C'est cette fenêtre qui donne son nom à la méthode car elle permet de prendre en compte la dynamique du robot. Il reste alors à choisir, au sein de cette fenêtre, un couple de vitesses qui ne conduisent pas à percuter un obstacle pour garantir un déplacement sûr du robot.



**Figure I.10** : Choix d'une vitesse dans la fenêtre des vitesses admissibles sans collision.

### I.3 Problèmes en robotique mobile

On distingue sans trop d'ambiguïté un certain nombre de problèmes en robotique mobile. Bien évidemment, l'aspect matériel, qui consiste à choisir et dimensionner aussi bien la structure mécanique du système que sa motorisation, son alimentation et l'architecture informatique de son système de contrôle-commande apparaît comme le premier point à traiter. Le choix de la structure est souvent effectué parmi un panel de solutions connues et pour lesquelles on a déjà résolu les problèmes de modélisation, planification et commande. Le choix des actionneurs et de leur alimentation est généralement assez traditionnel. De la même façon, les architectures de commande des robots mobiles ne sont pas différentes de celles des systèmes

automatiques ou robotiques plus classiques. On y distingue cependant, dans le cas général, deux niveaux de spécialisation, propres aux systèmes autonomes : une couche décisionnelle, qui a en charge de la planification et la gestion (séquentielle, temporelle) des événements et une couche fonctionnelle, chargée de la génération en temps réel des commandes des actionneurs. Bien évidemment, l'architecture du robot dépend fortement de l'offre et des choix technologiques du moment. Les problèmes spécifiques à la robotique mobile n'apparaissent finalement que lorsque l'on dispose d'une structure mobile dont on sait actionner les roues. Tous les efforts du roboticien vont alors consister à mettre en place les outils permettant de faire évoluer le robot dans son environnement de manière satisfaisante, qu'il s'agisse de suivre un chemin connu ou au contraire d'aller d'un point à un autre en réagissant à une modification de l'environnement ou à la présence d'un obstacle [8].

#### **I.4 Autonomie d'un robot**

L'autonomie est la capacité à résister à des perturbations externes en utilisant les ressources internes. L'autonomie d'un robot est une faculté relative et non absolue, elle est liée aux capacités du robot, aux caractéristiques de l'environnement dans lequel il est plongé, à leurs variations, et enfin aux tâches qu'il doit effectuer. Le concept d'autonomie est complexe lorsqu'on considère l'interaction d'un robot avec son environnement [16].

Selon STEELS [17], un système est autonome s'il développe les lois et les stratégies qui lui permettent de contrôler son comportement. En fait, l'autonomie est une capacité relative et on peut considérer qu'il existe une progression insensible du niveau le plus bas au plus élevé. Elle représente la capacité à choisir une stratégie, en terme de sous-buts pour arriver à un but fixé. La limite basse de l'autonomie est constituée par un système automatique qui s'autorégule en fonction de lois préétablies c'est-à-dire qui ne génère pas les lois que les activités de régulation cherchent à satisfaire.

L'autonomie désigne littéralement la capacité d'une entité à « *se gouverner par ses propres lois* » [17]. Cela signifie entre autres le choix de ses buts. Dans la littérature robotique, on peut distinguer trois points de vue : [17]

- L'autonomie au sens fort qui nous ramène à des questions de volonté et de but

propre;

- L'autonomie au sens faible désigne la capacité de maintenir sa structure au sein d'un milieu complexe à travers des mécanismes tels que l'auto-organisation, l'évolution, l'adaptation et l'apprentissage;
- L'automatisme ou absence de contrôle extérieur est le sens implicite que l'on attribue généralement au mot autonomie.

S'adapter consiste pour un robot à modifier son comportement pour faire face à des changements internes ou externes afin de maintenir certaines propriétés. L'adaptation se rapporte toujours à quelque chose : adaptation d'un groupe à la panne d'un individu, adaptation à la présence de passants dans l'environnement, etc. Les bases de l'autonomie sont concrètement les propriétés qu'un robot doit exhiber pour être autonome, par exemple :

- Navigation et localisation pour accéder à tous les points de l'environnement;
- Surveillance, c'est-à-dire détection d'évènements anormaux;
- Efficacité dans son travail, en adoptant une stratégie de patrouille.

Un robot complètement autonome n'est pas forcément souhaitable. On peut vouloir en prendre le contrôle à certains moments ou intervenir indirectement à travers la modification de certains paramètres. Le terme d'autonomie ajustable désigne justement l'interruption temporaire de l'automatisme, du fait d'un superviseur ou de l'agent lui-même, afin d'accroître l'efficacité du système [18].

### **I.5 Contraintes de l'environnement dynamique et incertain**

La navigation dans un environnement incertain impose le développement des systèmes multi robots dynamiques. Ces systèmes sont constitués d'un ensemble d'entités robotiques, dont l'état peut changer en temps réel (par exemple un robot qui est en état de rapprochement vers une cible peut passer à l'état d'évitement d'obstacle). La navigation dans les environnements dynamiques impose plusieurs questions sur la représentation du monde. Différentes solutions sont proposées tel que : [19]

- Les représentations du monde locales et la modélisation géométrique des objets.

- L'échange de représentation de l'environnement [19] permet d'étendre la perception locale à une perception multi-locale.

En effet le robot doit agir dans un temps déterminé, en général assez bref. Adopter des choix rapides, réflexes est décrit dans l'architecture de subsomption proposée par R. BROOKS [20] pour la construction des robots réactifs, elle consiste à décomposer le contrôleur en modules verticaux chacun étant responsable d'un type de comportement très limité. Chaque niveau peut subsumer la décision de la couche recouverte. Actuellement la plupart des équipes de chercheurs travaillent sur une architecture hybride pour dépasser les inconvénients des robots seulement réactifs (exemple : Robocup). On ajoute sur une couche réactive (donc réflexe) une couche cognitive (planification et représentation).

## **I.6 L'apport des systèmes multi-agents (SMA) à la robotique mobile**

Ces dernières années, Les SMA se concentrent sur l'étude des comportements collectifs qui résultent de l'organisation et des interactions entre agents pour la résolution de problèmes. Les SMA permettent de modéliser le comportement d'un ensemble d'entités expertes, plus ou moins organisées selon des lois de type social. Ces entités ou agents, disposent d'une certaine autonomie, et sont immergées dans un environnement dans lequel et avec lequel elles interagissent. Les systèmes de robotique collective peuvent être simulés par des systèmes multi-agents. En effet ils semblent partager les mêmes principes [21]:

- Autonomie des agents,
- Poursuite d'un objectif local,
- Interaction avec l'environnement,
- Comportement individuel basé sur le cycle perception / raisonnement / action.

### **I.6.1 Généralités sur les SMA**

#### **I.6.1.1 Agents**

Il n'existe pas à l'heure actuelle, dans la littérature scientifique, de consensus sur la définition d'un agent tant les disciplines dans lesquelles il est fait référence sont nombreuses. Cependant, la définition proposée par JENNINGS [22] est largement

reprise au sein de la communauté des systèmes multi-agents. Cette définition est la suivante: « *Un agent est un système informatique, situé dans un environnement, et qui agit d'une façon autonome et flexible pour atteindre les objectifs pour lesquels il a été conçu.* », les auteurs définissent le concept d'agent selon les propriétés suivantes :

- L'autonomie : l'agent opère sans l'intervention directe d'un tiers (humain ou autres) et ne subit aucun contrôle sur les actions qu'il réalise, ni sur son état interne ;
- La réactivité : l'agent perçoit son environnement et répond d'une manière opportune aux changements qui se produisent dans celui-ci ;
- La pro-activité : l'agent doit être capable de montrer des comportements dirigés par des buts internes, en prenant des initiatives ;
- Capable de répondre à temps : l'agent doit être capable de percevoir son environnement et d'élaborer une réponse dans le temps requis;
- La sociabilité : les agents sont en interactions entre eux grâce à des langages de communication et des règles de sociabilité communes.

Selon RUSSELL [23] « *Un agent est une entité qui perçoit son environnement et agit sur celui-ci* »

### I.6.1.2 Les systèmes multi-agents

Quelque soit le domaine d'application ou le degré d'intelligence des agents, développer un système multi-agents requière la définition d'un certain nombre d'éléments qui entrent dans la composition d'un système multi-agents sont les suivants: [24]

- Un *environnement*  $E$ , c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique ;
- Un ensemble d'*objets*  $O$ . Ces objets sont situés, pour tout objet, il est possible d'associer une position dans  $E$ . Ces objets sont passifs, ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble  $A$  d'*agents* qui sont des objets particuliers ( $A \subseteq O$ ), lesquels représentent les entités actives du système ;
- Un ensemble de *relations*  $R$  qui unissent des objets (et donc des agents) entre

eux ;

- Un ensemble d'*opérations* Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O ;
- Des *opérateurs* chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, appelée : les lois de l'univers.

Bien que presque toutes les caractéristiques ci-dessus des agents puissent être considérées en tant que partage de quelque chose avec le comportement intelligent. D'un point de vue, il est clair que, si dans la conception d'un système multi-agents, nous utilisons des méthodes et des techniques spécifiques à l'intelligence artificielle, alors ces agents peuvent être considérés comme étant intelligents, évidemment dans le sens de l'intelligence artificielle. Pour concevoir un système multi-agents, il ne suffit pas de placer plusieurs agents dans un même environnement, il faut en plus que ces agents interagissent. L'analyse et le développement d'un système multi-agents nécessitent la prise en compte de multiples dimensions [24].

### **I.6.2 Les premières applications des SMA**

Parmi les premières applications développées à l'aide de la technologie multi-agent, on retrouve une application dans le contrôle du trafic aérien et une autre dans la surveillance de véhicules motorisés. Pour le contrôle de trafic aérien, CAMMARATA a étudié des stratégies de coopération pour pouvoir résoudre les conflits entre les plans d'un groupe d'agents. Ces stratégies ont pu être ensuite appliquées dans le cadre d'un système de contrôle du trafic aérien. Dans ce système, chaque agent (représentant un avion) cherche à bâtir un plan de vol qui devrait le garder à une distance sécuritaire de chaque autre agent. Dans le cas où des agents se retrouveraient dans une situation conflictuelle, ils doivent alors choisir parmi eux, un agent apte à élaborer un nouveau plan de vol sans engendrer de nouveaux conflits. Pour faire ce choix, CAMMARATA et ses collègues ont opté pour deux stratégies qu'ils ont comparé entre elles. La première consiste à choisir l'agent le mieux informé ou l'agent le moins contraint pour jouer le rôle de planificateur central et élaborer un nouveau plan de vol qui résoudrait le conflit. La deuxième a consisté à faire le partage suivant: il revient à l'agent le mieux informé d'élaborer un nouveau plan de vol et à l'agent le moins contraint de l'exécuter [25].

La surveillance de véhicules motorisés tournait, quant à elle, autour du système DVMT "*Distributed Vehicle Monitoring Task*" [26] ce système avait comme tâche principale d'identifier quel type de véhicule circulait dans la zone où étaient placés ses senseurs. À partir de ces interprétations, il devait tenter d'établir une description des mouvements des véhicules dans la région qu'il supervisait. Comme bien d'autres systèmes multi-agents de l'époque, le système DVMT utilisait un *blackboard* pour coordonner les efforts de ses différents agents. Rappelons qu'un *blackboard* est simplement une structure de données partagées entre divers agents. Ces derniers peuvent la consulter pour obtenir des informations sur l'état actuel du problème ou y écrire la partie de la solution qu'ils ont obtenue.

### **I.6.3 Modèles d'agent**

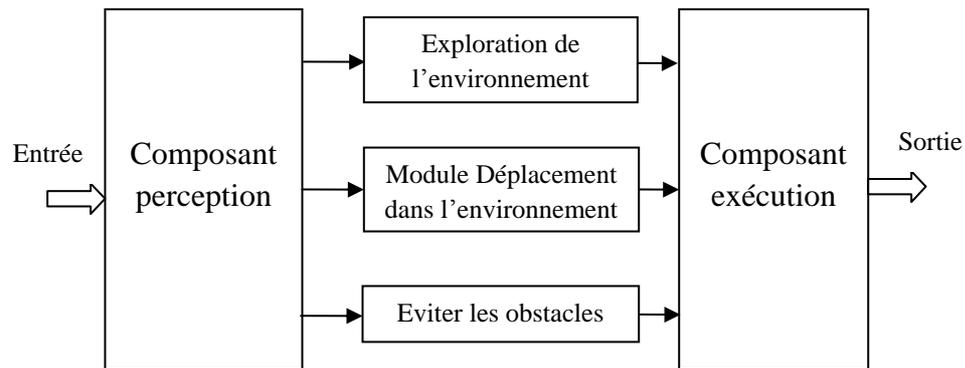
Tout comme la définition d'agent, il n'existe pas à l'heure actuelle de consensus pour définir ce qu'est un modèle d'agent, tant ces modèles sont nombreux au travers de la littérature. L'agent perçoit les modifications de son environnement et dispose de capacités d'actions sur celui-ci. Il s'agit alors de déterminer, parmi les actions possibles, la plus appropriée afin que l'agent puisse satisfaire ses objectifs. Trois principales architectures permettent d'apporter un élément de réponse à des problèmes de décisions: les architectures d'agents réactifs, les architectures d'agents cognitifs et les architectures d'agents hybrides.

#### **I.6.3.1 Agents réactifs**

Les agents réactifs répondent à la loi de stimulus/action. Leurs comportements sont régis par une série de règles qu'ils mettent en œuvre en réponse aux stimuli de l'environnement. Ces agents ne possèdent pas de représentation explicite de leur environnement. De plus, ils ne disposent pas de mémoire ni de buts explicites et utilisent un protocole et un langage de communication réduit. Les agents réactifs ne possèdent pas un comportement individuel intelligent, mais le comportement qui émerge de leurs interactions peut être "intelligent". La simulation constitue un domaine privilégié pour l'utilisation des systèmes d'agents réactifs [27].

Les premiers travaux réalisés selon cette approche s'apparentent à l'architecture de Subsumption [28] proposée par Rodney BROOKS. Une architecture de subsumption comporte plusieurs modules, chaque module étant responsable de la

réalisation d'une tâche simple. Selon cette architecture, un agent dispose d'un ensemble de comportements qui sont hiérarchisés en plusieurs couches en fonction de leur complexité. Chaque couche ayant une priorité différente. Les couches supérieures correspondent à des tâches plus abstraites qui sont détaillées à l'aide des tâches plus concrètes et plus simples, les couches supérieures ayant une priorité plus petite que les couches inférieures. Les couches inférieures correspondent aux tâches simples et elles ont une priorité plus grande. La figure suivante montre une telle architecture.



**Figure I.8** Architecture à base de comportement.

Le fonctionnement de l'agent est décrit par un ensemble de règles de comportement, "*behaviour rules*". Une règle comportementale est semblable à une règle de production et elle a deux parties : une condition C et une action A. La condition correspond à une perception de l'environnement, et l'action à une action possible d'un module de compétence.

### I.6.3.2 Agents Cognitifs

Les agents cognitifs disposent d'une représentation explicite de l'environnement et des autres agents. Ils peuvent tenir compte de leurs passés et disposent de buts explicites. Ces agents sont capables d'effectuer des opérations complexes et mettre en œuvre des modes de collaboration à des fins de résolutions de problèmes.

Les systèmes cognitifs comprennent un petit nombre d'agents, qui disposent d'une capacité de raisonnement sur une base de connaissances, d'une aptitude à traiter des informations diverses liées au domaine d'application, et d'informations relatives à la gestion des interactions avec les autres agents et l'environnement. L'architecture d'un agent cognitif est composée de mécanismes de prises de décisions. A partir de la représentation de son environnement, l'agent va mettre en œuvre ces mécanismes,

basés sur le raisonnement, afin de déterminer les actions à accomplir [25].

Chaque règle d'engagement est composée d'une condition de message, d'une condition d'état mentale et d'une action. Si le message reçu par l'agent remplit les conditions d'une règle d'engagement, alors la règle est déclenchée et l'agent est engagé dans l'action.

### I.6.3.3 Agents Hybrides

Un agent hybride est une architecture d'agent qui combine un système réactif à un système cognitif. Le système réactif assure la réalisation des activités de type réflexes en réponse aux stimuli de l'environnement. Ces activités ne nécessitent pas la mise en œuvre de raisonnements complexes. Et le système cognitif assure la réalisation d'activités basées sur la planification et la délibération, nécessitant la mise en œuvre de raisonnements complexes [25].

### I.6.4 Communication

La communication permet aux agents d'échanger des données, des informations et des connaissances afin qu'ils puissent se coordonner pour la réalisation de leurs activités. Ce mode d'interaction forme l'un des aspects fondamentaux dans la définition de la propriété de sociabilité. L'une des caractéristiques sociales d'un agent repose sur son aptitude à interagir avec d'autres agents. La communication par échanges de messages entre agents facilite la coordination de leurs actions et s'inscrit dans la définition de l'organisation sociale.

L'envoi, la réception et l'interprétation des messages nécessitent le recours à des langages de communication. Ces langages vont permettre de supporter la communication entre les agents. Il existe deux principaux langages de communication :

- KQML "*Knowledge Query Manipulation Language*" développé en 1993 par le consortium DARPA-KSE "*Knowledge Sharing Effort*".
- FIPA-ACL "*Agent Communication Language*" proposé en 1997 par la FIPA "*Foundation for Intelligent Physical Agents*".

Ces langages reposent sur la définition de performatives KQML ou actes de

communication *FIPA-ACL* dont l'énonciation constitue l'expression d'un acte (accomplissement d'une action). *KQML* et *FIPA-ACL* se distinguent au niveau de la sémantique des actes du langage utilisés. En effet, le langage *FIPA-ACL* fortement inspiré des travaux de *KQML* [24].

Dans la communication indirecte, au niveau des agents réactif, des signaux placés dans l'environnement sont détectés et interprétés par les agents (exemple : les phéromones pour les fourmis). Une des communications les plus simples est basée sur l'exemple du Petit Poucet. Elle consiste à déposer sur le terrain des marques qui pourront être captées ou ramassées par d'autres agents. Ces marques peuvent servir à définir un territoire qui a déjà été visité ou encore le chemin à suivre pour atteindre une zone pertinente de l'environnement [29].

Les communications directes peuvent servir à transmettre des informations sur la position, l'environnement proche ou encore l'état interne des agents. Par exemple, dans le modèle basé sur la satisfaction, l'un des éléments principaux de la communication est la transmission d'un vecteur qui représente la satisfaction de l'agent.

Lorsque le nombre d'agents devient trop important, le problème des communications se complexifie. En effet, faire communiquer entre plusieurs dizaines de robots pose un certain nombre de problèmes. En premier lieu, lorsque le canal de communication est unique, les messages ne doivent pas entrer en collision. Un protocole de communication doit être instauré afin de pouvoir adresser des messages individuels aux agents ou à l'ensemble du groupe [27].

## **I.7 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons résumé toutes les notions de base nécessaires à la compréhension du domaine de la robotique mobile, ainsi qu'un panorama de techniques appliquées dans la planification et la navigation d'un robot mobile autonome. Nous avons aussi abordé dans ce chapitre l'architecture d'un robot mobile et les différents composants matériels et logiciels le constituant.

# Chapitre II

**Systeme de Perception et Localisation**

## Système de Perception et Localisation

### II.1. Introduction

La décomposition du problème de la mobilité pour les robots mobiles autonomes amène à définir une architecture classique en robotique, organisée suivant un fonctionnement séquentiel « perception / décision / action ». La prise de décision nécessite donc un conditionnement le plus robuste possible des données sensorielles issues du système de perception. L'étape de décision peut revêtir plusieurs formes suivant la tâche considérée. C'est à partir de la connaissance de son environnement et des buts qu'il doit atteindre qu'un robot mobile pourra élaborer des lois de commande et pourra prendre des décisions d'action adéquates.

Nous commencerons donc par détailler les principaux systèmes de perception utilisés en robotique mobile en nous focalisant sur les systèmes de Télémètre Laser. Ensuite, nous présenterons un panorama non exhaustif des principales méthodes et travaux de localisation.

### II.2. Les systèmes de perception

La fonction perception consiste globalement à saisir un certain nombre d'informations sensorielles dans le but d'acquérir une connaissance et une compréhension du milieu d'évolution.

Plusieurs constats peuvent être faits sur cet organe essentiel de la chaîne fonctionnelle de la navigation. Le premier consiste à noter que le choix d'un système de perception est souvent dépendant du milieu d'évolution du robot mobile ainsi que des fonctionnalités mises en œuvre sur le robot pour qu'il puisse remplir sa mission.

Le second se révèle être générique et consiste à affirmer qu'un système de perception constitué d'un unique capteur sera rarement suffisant pour percevoir correctement l'environnement. Il en va de même pour l'être humain qui, pour appréhender son environnement, sollicite plusieurs organes perceptifs. Le système de perception d'un robot mobile intégrera le plus souvent plusieurs capteurs qui seront de types complémentaires pour un enrichissement des informations sensorielles, ou de types redondants pour répondre au problème de fonctionnement en mode dégradé. Dans ce cadre, des méthodes de fusion de données seront généralement employées pour

conditionner ces informations sensorielles.

Enfin le troisième constat qui pourra être dressé est celui du coût de l'intégration de capteurs sur le véhicule autonome. La précision désirée et une fréquence d'acquisition élevée seront autant de facteurs qui augmenteront le coût d'un capteur. Il s'agit donc là d'une contrainte qui pèsera inévitablement sur le choix d'un système de perception.

La classification des capteurs est généralement faite par rapport à deux familles :

- ü les capteurs proprioceptifs qui fournissent des informations propres au comportement interne du robot, c'est-à-dire sur son état à un instant donné,
- ü les capteurs extéroceptifs qui fournissent des informations sur le monde extérieur au robot.

### **II.2.1 Les capteurs proprioceptifs**

Les capteurs proprioceptifs fournissent, par intégration, des informations élémentaires sur les paramètres cinématiques du robot. Les informations sensorielles gérées dans ce cadre sont généralement des vitesses, des accélérations, des angles de giration, des angles d'attitude.

On peut regrouper les capteurs proprioceptifs en deux familles [30] :

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

#### **II.2.1.1. Les capteurs de déplacement**

##### ***a- Les odomètres***

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

Les odomètres sont généralement composés de codeurs incrémentaux qui permettent de mesurer les angles de rotation avec une précision qui dépend de la résolution du codeur. L'information de déplacement nécessitera la connaissance du diamètre des roues, de l'entraxe des roues, de la structure mécanique et cinématique du véhicule.

Ce capteur est fortement utilisé en robotique mobile puisqu'il présente l'avantage d'être simple à mettre en œuvre et surtout d'être peu coûteux.

### ***b- Les accéléromètres***

L'accéléromètre est un capteur qui mesure l'accélération linéaire en un point donné. En pratique, la mesure de l'accélération est effectuée à l'aide d'une masse d'épreuve  $M$ , de masse  $m$ , reliée à un boîtier du capteur. Le principe de ce capteur est de mesurer l'effort massique non gravitationnel qu'on doit appliquer à  $M$  pour le maintenir en place dans le boîtier lorsqu'une accélération est appliquée au boîtier. Le calcul du déplacement élémentaire du robot est obtenu par double intégration de ces informations. Cette double intégration conduit généralement à des accumulations importantes d'erreurs. Ce capteur est plus coûteux que des odomètres.

### ***c- Le radar Doppler***

Le radar Doppler fournit une estimation instantanée de la vitesse linéaire d'une plate-forme mobile par rapport à un objet de la scène en se basant sur l'effet Doppler-Fizeau. Le principe est de diriger un faisceau électromagnétique de fréquence  $F$  vers le sol. Le faisceau reçu après rediffusion sur le sol présente un décalage de fréquence  $F$  proportionnel à la vitesse  $V$  du déplacement relatif du véhicule par rapport au sol. L'intégration de la mesure de vitesse fournira une estimation du déplacement du mobile. Ce capteur est le plus souvent utilisé en milieu extérieur. Il présente le gros avantage d'être insensible aux glissements des roues ou des chenilles du mobile. En revanche, sa précision se dégrade rapidement avec la diminution de la vitesse. De plus il est généralement lourd à mettre en œuvre, tant du point de vue électronique que du point de vue du traitement des informations reçues.

## **II.2.1.2. Les capteurs d'attitude**

Les capteurs d'attitude permettent d'estimer les paramètres intrinsèques du robot que sont les angles de cap, de roulis et de tangage. Ces capteurs sont principalement de type inertiel. Ces capteurs ont pour point commun d'être généralement coûteux et

sensibles au bruit, d'où une intégration moins fréquente dans les systèmes embarqués que les odomètres.

#### ***a- Le gyroscope, gyromètre et gyrocompas***

Les gyroscopes permettent de mesurer une variation angulaire. Ils sont intéressants en robotique mobile parce qu'ils peuvent compenser les défauts des odomètres. Une erreur d'orientation odométrique peut entraîner une erreur de position cumulative qui peut être diminuée voire compensée par l'utilisation conjointe de gyroscopes [31]. Les gyroscopes très précis sont trop onéreux pour être utilisés en robotique mobile. Cependant, les gyroscopes à fibre optique, connus pour leur grande précision, ont vu leur prix chuter et sont donc devenus une solution attractive pour la navigation en robotique mobile.

Le gyromètre est un capteur qui permet de mesurer une vitesse angulaire. Il existe plusieurs types de gyromètres : les premiers à avoir fait leur apparition furent mécaniques, aujourd'hui, on utilise surtout des gyromètres laser ou des gyromètres optiques [32].

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

#### ***b- Le magnétomètre ou compas magnétique***

Le magnétomètre qui est aussi appelé compas magnétique mesure la direction du champ magnétique terrestre pour déduire l'orientation du robot.

Parmi toutes les technologies adoptées pour ce type de capteur, la mieux adaptée pour la robotique mobile est celle dite à vanne de flux. Elle a l'avantage de consommer peu d'énergie, de n'avoir aucune pièce mobile, d'être résistante aux chocs et aux vibrations et d'être peu coûteuse [46]. Toutefois, les mesures sont perturbées par l'environnement magnétique du robot (comme par exemple les lignes d'énergie ou les structures en acier). Ceci rend difficile l'utilisation de ce capteur en milieu intérieur. Néanmoins, ce capteur a par exemple été intégré avec succès dans un système de localisation basé sur le Filtrage de Kalman Étendu [33].

La caractéristique principale de ce capteur est sa précision moyenne qui, sur un

long trajet, est relativement bonne [30].

## **II.2.2 Les capteurs extéroceptifs**

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

### **II.2.2.1. Les capteurs télémétriques**

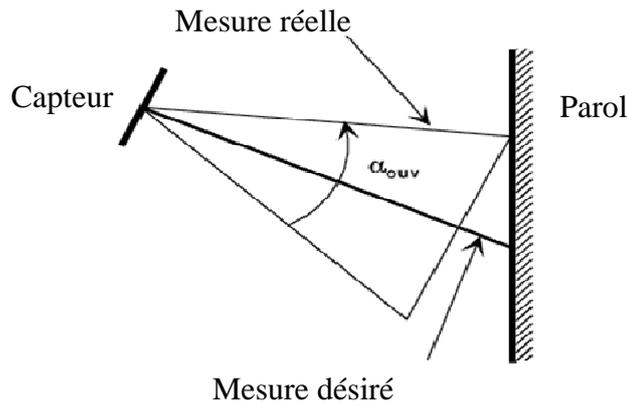
#### ***a- Les télémètres à ultrasons***

Les télémètres à ultrasons utilisent l'air comme milieu de propagation. La méthode de mesure consiste à exciter une céramique piézo-électrique à l'aide de quelques impulsions de fréquence égale à la fréquence de la pastille. Connaissant la vitesse de propagation de l'onde acoustique dans un milieu donné, la mesure du temps de vol de l'onde permet d'obtenir la distance d'un objet par rapport au capteur.

Les télémètres ultrasonores les plus couramment utilisés sont les télémètres Polaroid qui émettent une onde ultrasonore à 44 kHz et qui permettent de mesurer des distances comprises entre trente centimètres et dix mètres.

Les avantages majeurs de ces télémètres sont leur faible prix de revient et leur simplicité d'implantation. En revanche de nombreux inconvénients induisent leur utilisation de moins en moins fréquente en robotique mobile :

- ü Une très faible directivité qui est liée au cône d'émission de l'onde dont l'angle d'ouverture est importante. Ceci implique une erreur généralement important qui entache la mesure Figure II-1.



**Figure II.1** Cône d'émission d'un faisceau ultrasonore.

- ü Un angle d'incidence relativement faible qui n'excède généralement pas 30 à 40° suivant le matériau de la paroi.
- ü Une forte sensibilité aux conditions d'utilisation, telles que la température, l'humidité et les échos parasites. Ces paramètres influent directement sur la précision de mesure.
- ü Une forte influence aux problèmes de réflexions multiples. Ce phénomène se produit lorsque l'onde ultrasonore heurte plusieurs parois avant de revenir sur le capteur.

### *b- Télémètre laser*

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

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

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

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

- ü en télémètre : ils sont alors utilisés, tout comme les capteurs à ultrason, pour des mesures de distance.
- ü en goniomètre : ils sont utilisés pour des mesures d'angles [34].
- ü en source de lumière structurée : ils sont généralement utilisés pour la modélisation 3D de l'environnement. La source laser sera dans ce cas toujours associée à une caméra et fournira des informations sur la profondeur [35].

Les télémètres les plus utilisés à l'heure actuelle pour des applications de cartographie et de localisation sont les télémètres laser à balayage. Ils utilisent un faisceau laser mis en rotation afin de balayer un plan, en général horizontal.

Les télémètres les plus courant ont une bonne résolution angulaire car ils permettent d'obtenir une mesure de distance tout les demi degrés, sur une zone de 180 ou 360 degrés selon les modèles. La mesure est de plus relativement précise (avec un bruit de l'ordre de quelques centimètres) à une distance relativement grande (plusieurs dizaines de mètres). La fréquence d'acquisition est en général de l'ordre de la dizaine de Hertz, voire proche de la centaine pour certains modèles.

Ces télémètres sont très utilisés en environnement intérieur car il fournissent des données abondantes et précises sur la position des objets caractéristiques de l'environnement tels que les murs. Ils possèdent toutefois un certain nombre d'inconvénients. En premier lieu, leur zone de perception est restreinte à un plan et ne permet donc pas de détecter les obstacles situés hors de ce plan (un petit objet posé au sol par exemple). Ils ne peuvent pas non plus détecter les objets ne réfléchissant pas correctement la lumière du laser (en premier lieu les vitres, mais aussi certains objets très réfléchissants, tels que les objets chromés). Pour limiter ces inconvénients, il est possible de les utiliser en conjonction avec des capteurs à ultrason qui ont un cône de détection plus large et qui peuvent détecter les vitres.

### ***c- Télémètre à infrarouge***

Ces télémètres possèdent l'avantage d'avoir un cône de détection beaucoup plus restreint. Il utilise une lumière infrarouge au lieu d'une onde sonore pour la détection et peuvent être basés sur différentes techniques qui permettent de recueillir plus ou moins d'information.

Il est possible de mesurer simplement le retour ou le non-retour d'une impulsion codée, ce qui permet de détecter la présence ou l'absence d'un obstacle dans une certaine portion de l'espace.

Il est également possible de réaliser une triangulation sur le faisceau de retour de l'onde lumineuse, ce qui permet d'avoir une mesure de la distance de l'obstacle.

Les inconvénients de ces télémètres sont liés à leur portée, en général relativement restreinte, et à leur sensibilité aux fortes sources de lumières qui contiennent un fort rayonnement infrarouge. Un projecteur du type de ceux utilisés pour la télévision pointé sur le robot, par exemple, sature en général complètement le récepteur et empêche toute détection d'obstacle. Ils sont également très sensibles à la couleur et à la nature de la surface de l'obstacle (par exemple, ils détectent difficilement les vitres).

#### **II.2.2.2. Les systèmes de vision**

Les systèmes de vision en robotique sont basés sur l'utilisation d'une caméra CCD. L'arrivée des capteurs CCD (Charge Coupled Device), en 1975, a été déterminante dans l'évolution de la vision : la rapidité d'acquisition, la robustesse et la miniaturisation sont autant d'avantages qui ont facilité leur intégration. Les systèmes de vision sont très performants en termes de portée, précision et quantité d'informations exploitables. Ils sont de plus les seuls capables de restituer une image sensorielle de l'environnement la plus proche de celle perçue par l'être humain.

En revanche, l'inconvénient majeur de tels systèmes de perception se situe au niveau de la gestion du flux important de données exploitables : traiter une image demeure une opération délicate et surtout coûteuse en temps de calcul.

Utilisé seul, une caméra CCD ne peut fournir qu'une information 2D. Les techniques qui vont permettre d'obtenir des informations 3D à partir d'un tel capteur sont généralement liées à l'adjonction d'un autre capteur. Dans ce cadre nous pouvons identifier les techniques suivantes :

- ü la stéréovision
- ü les techniques de lumières structurées

#### ***a- Les systèmes de vision omnidirectionnelle***

Ces systèmes de perception associent une caméra CCD et un élément permettant d'obtenir une vue sur 360 degrés de l'environnement. A ce titre ils sont de plus en plus utilisés en robotique mobile au détriment de la vision monoculaire. Suivant l'élément ou les éléments ajoutés à une caméra CCD, on pourra distinguer quatre techniques pour obtenir une image omnidirectionnelle.

*Utilisation de miroirs convexes :* Cette méthode consiste à placer un miroir réfléchissant face à la caméra pour obtenir une image qui est la projection omnidirectionnelle 2D de l'environnement. Ces capteurs omnidirectionnels sont appelés capteurs catadioptriques. Ils présentent l'avantage de fournir une vue globale de l'environnement en une seule acquisition. Autre avantage : ils n'ont aucune partie mobile et donc consomment peu d'énergie (pas de mécanisme de rotation et d'orientation). Par contre, le redressement d'image pose problème. Rappelons que la catadioptrie est la théorie des systèmes optiques comportant une succession d'éléments réfléchissants et réfractants (dioptries : lentilles...). Dans les systèmes étudiés, il s'agit d'un miroir de révolution convexe associé à une caméra CCD. La classification que nous avons adoptée pour la présentation de ces systèmes reprend les grandes lignes de [36][37][38]. Nous verrons à travers cette description qu'un point important qui caractérise un système de vision omnidirectionnelle est la possibilité de gérer un unique point de vue (centre de projection). Précisons que cette contrainte est importante, car vérifiée, elle permet la reconstruction d'images perspectives géométriquement correctes par la fonction plénoptique calculée au centre de projection effectif [39].

Les miroirs utilisés pour la vision omnidirectionnelle sont de plusieurs types :

- ü miroir conique
- ü miroir sphérique
- ü miroir hyperboloïdal
- ü miroir parabolique

### ***b- Les capteurs à triangulation active***

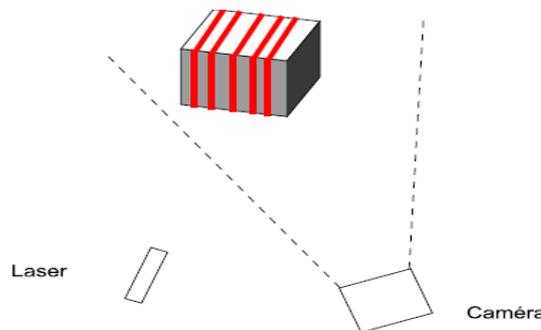
L'obtention de la 3D est gérée comme pour la stéréovision, mais on remplace une caméra par un laser qui sera chargé de projeter un motif de lumière structurée. Le principe est d'éclairer l'environnement avec une lumière cohérente et de l'observer avec une caméra sous un certain parallaxe. Connaissant la position de la source lumineuse et celle de la caméra, l'information peut être obtenue par triangulation.

Ces capteurs sont utilisés pour obtenir des images de profondeur, mais également pour l'évitement d'obstacles [40][41], pour la numérisation d'objet 3D . Plusieurs patrons de lumière structurée peuvent être utilisés :

Capteur à simple triangulation : les capteurs à simple triangulation acquièrent la distance d'un seul point lumineux à la fois. Une application célèbre est celle du véhicule d'exploration Pathfinder destiné à être envoyé sur la planète Mars [42].

Les capteurs par plan de lumière : la source de lumière projetée n'est plus un point, mais un plan de lumière. Un système de localisation basé sur ce principe a été développé dans [43].

Capteurs à plusieurs plans de lumière : il s'agit dans ce cas de projeter un motif tel que des lignes ou de petits disques sur la scène observée Figure II-2.



**Figure II.2** triangulation par plusieurs plan laser.

La technique de triangulation active est plus robuste que la stéréovision car elle permet de faire l'économie de l'étape de mise en correspondance. En revanche la précision n'est pas uniforme sur l'ensemble de l'image : plus un objet est éloigné, plus l'erreur de mesure est importante.

### **II.3. Les méthodes de localisation**

Nous avons précédemment positionné le problème de localisation comme

étant un préalable incontournable de celle de la génération de carte incrémentale de l'environnement. La suite logique de la synthèse faite sur les capteurs portera donc sur les différentes méthodes de localisation. Par analogie avec la classification des capteurs, nous pourrions distinguer deux types de méthodes de localisation :

Les méthodes de localisation relatives, basées sur l'utilisation des capteurs proprioceptifs,

Les méthodes de localisation absolues, basées sur l'utilisation de capteurs extéroceptifs,

Les méthodes dites « hybrides » qui sont basées sur l'utilisation conjointe des deux types de capteur.

### II.3.1 Localisation à l'estime

La navigation à l'estime, ou navigation relative, consiste à évaluer la position, l'orientation, et éventuellement la vitesse du robot mobile par intégration des informations fournies par des capteurs dits proprioceptifs. L'intégration se fait par rapport au point de départ du robot. Ces données peuvent être des informations de déplacement (odomètre), de vitesse (vélocimétrie) ou d'accélération (accéléromètre). Ces systèmes permettent d'obtenir un flux relativement important au niveau de l'obtention des estimations de position. Cette caractéristique intéressante a favorisé l'utilisation de ces systèmes de localisation en robotique mobile, ainsi que dans des secteurs de pointe tels que les domaines spatial et militaire : fusées, missiles, avions, sous-marins... Il n'y a que peu de méthodes basées sur l'utilisation unique de capteurs proprioceptifs. Ainsi dans la suite du paragraphe, nous ne fournissons qu'une explication succincte de ces techniques.

L'odométrie permet de déterminer la position et le cap  $(x,y, \theta)$  d'un véhicule par intégration de ses déplacements élémentaires, et ce, par rapport à un repère lié à sa configuration initiale. L'algorithme de localisation est basé sur le comptage des impulsions générées par des codeurs durant une période d'échantillonnage connue. Connaissant le rayon des roues et la distance entre chaque roue, il est possible d'exprimer de manière récursive la position et le cap du robot. Les avantages de l'odométrie résident dans sa simplicité de mise en œuvre et dans son faible coût : ces caractéristiques en font un système de localisation couramment utilisé en robotique mobile. En outre, l'odométrie permet d'obtenir une estimation de la position et du cap à

une cadence relativement élevée. L'inconvénient est une précision très médiocre sur des distances importantes, ce à cause des erreurs cumulatives. Une étude intéressante d'intégration poussée de l'odométrie a été réalisée par Borenstein dans [44]. Il y propose une méthode originale IPEC (Internal Position Error Correction), permettant d'obtenir une estimation odométrique fiable sans avoir recours à un système de localisation absolue ou à un système de navigation inertielle.

La vélocimétrie est une méthode qui consiste à mesurer directement la vitesse du véhicule et à l'intégrer pour obtenir le déplacement. La vitesse de rotation instantanée, dans la majorité des cas, est obtenue avec des gyromètres. La vitesse linéaire est quant à elle généralement obtenue par l'utilisation d'un radar Doppler dirigé vers le sol. Dans ce cadre nous pouvons citer ici les travaux de H. Makela [45] qui localise à l'estime un véhicule circulant sur des chemins forestiers à l'aide d'un radar Doppler.

Ce type de navigation utilise les accéléromètres, les gyroscopes et les compas magnétiques. La localisation relative d'un robot est déterminée à partir d'informations inertielles acquises au cours de son mouvement. Les méthodes de localisation inertielles utilisent les informations d'accélération suivant des axes prédéterminés ou alors l'effet gyroscopique par rapport à des axes de rotations prédéfinis. Le calcul de la position est effectué par double intégration de ces informations. Le robot VEGA du LIRMM utilise pour se localiser un odomètre et un système inertiel composé de six capteurs : un accéléromètre 3 axes, 4 gyromètres piézo-électriques et un gyromètre à fibre optique [32].

### II.3.2 Localisation absolue

La localisation absolue est une technique qui permet à un robot de se repérer directement dans son milieu d'évolution, que ce soit en environnement extérieur (mer, espace, terre), ou en environnement intérieur (ateliers, immeubles, centrales nucléaires...). Ces méthodes de localisation sont basées sur l'utilisation de capteurs extéroceptifs.

Pour répondre à la problématique qu'est la localisation d'un robot dans son environnement, deux types de stratégies sont utilisables :

la première consiste à utiliser des points de repère naturels, la deuxième à utiliser des points de repère artificiels.

Il est à noter que quelque soit le cas de figure, la localisation absolue nécessite

toujours une représentation de l'environnement. Le robot possède donc «une banque de données» regroupant les caractéristiques des références externes qui est appelée carte de l'environnement.

### **II.3.2.1. Repères artificiels**

Les repères artificiels sont des balises caractéristiques qui sont ajoutées au milieu d'évolution du robot et dont les positions sont connues. L'inconvénient de ce type de techniques réside essentiellement dans son manque de souplesse et dans sa lourdeur d'utilisation. En effet un domaine d'évolution vaste nécessitera un investissement lourd en équipement. En outre tout changement de configuration de l'environnement impliquera une remise en cause du réseau de balises. En revanche cette technique a le gros avantage d'être précise, robuste et surtout de satisfaire la contrainte temps réelle. Précisons à ce niveau que cette approche ne pourra répondre à la problématique de modélisation incrémentale et localisation simultanée.

Les balises artificielles peuvent être de deux types : Actives : elles émettent des signaux, Passives : elles ne peuvent pas émettre.

#### ***a- Balises actives et GPS***

Les balises actives sont généralement interactives avec le système de perception de l'engin mobile puisque ce sont elles qui émettent l'onde captée par l'équipement de mesure. Les deux principaux types d'organes de transmission utilisés sont les émetteurs de sources lumineuses (infrarouge par exemple) et les antennes émettrices hyperfréquences. Ces ondes peuvent être émises en continu ou être déclenchées par ordre provenant de l'équipement embarqué sur le mobile. Les systèmes à balises actives sont le moyen de navigation le plus communément utilisé pour les bateaux et les avions.

Le système GPS est finalement un système de localisation en environnement extérieur basé sur le repérage de balises actives que sont les satellites. Ce système, développé par le Département de la Défense des Etats-Unis, est composé de vingt-quatre satellites. En utilisant des méthodes avancées de trilatération, le récepteur terrestre peut calculer une position en mesurant le temps de vol des ondes renvoyées par les satellites. En théorie, trois satellites peuvent permettre de calculer la latitude, la longitude et l'altitude du récepteur.

Pour empêcher l'utilisation du GPS par des nations ennemies, le gouvernement américain a appliqué délibérément une dégradation sur les signaux satellites, de sorte

que la précision n'est que de cent mètres. Toutefois, ces effets pouvaient être éliminés en utilisant le DGPS (Differential Global Positioning System). Ce système utilise un deuxième récepteur terrestre fixe situé à proximité du premier (moins de dix kilomètres). La position de ce deuxième récepteur calculée à partir du GPS est comparée à sa position réelle sur le terrain pour générer un vecteur d'erreur permettant la correction de la position du premier récepteur. On obtenait ainsi une précision de quatre à six mètres [46]. Depuis mai 2000, le gouvernement américain a supprimé ce système de cryptage.

L'inconvénient du GPS se situe au niveau des signaux satellites qui peuvent ne pas parvenir au récepteur à cause du relief du terrain et de l'environnement (hauts bâtiments et ponts en villes, relief montagneux, etc.). En solution à cette contrainte, on peut citer les travaux de Cui pour localiser un véhicule dans un environnement urbain [47]. De nombreux systèmes de navigation basés sur l'utilisation du GPS seul ou en couplage avec d'autres capteurs ont été développés [48].

### ***b- Balises passives***

On appelle balises passives des repères artificiels n'échangeant pas de signaux avec le système de perception. Comme précédemment ce type de méthode est basé sur le repérage de balises artificielles placées à des positions connues dans le milieu d'évolution du robot. La différence se situe au niveau de l'identification de la balise qui doit être faite par le système de perception. Ainsi le problème de la mise en correspondance est généralement facilité par un codage au niveau du marquage de la balise. Ces systèmes ont l'avantage d'être moins lourds à installer que les systèmes précédents.

la précision obtenue sur la localisation et l'adéquation avec la contrainte temps réel font que cette technique est souvent intégrée pour des systèmes de convoyage industriels.

### **II.3.2.2. Repères naturels**

Cette technique consiste à utiliser les éléments caractéristiques de l'environnement pour estimer la position du robot. L'intérêt de ces méthodes est donc sa souplesse d'utilisation puisqu'elles ne nécessitent pas d'aménager le milieu d'évolution du robot. Pour la problématique localisation stricto sensu, une connaissance de l'environnement sera nécessaire. Il s'agira d'une représentation cartographique qui

intégrera la position des amers qui serviront à localiser le robot.

### ***Exemples de méthodes de localisation utilisant des amers naturels***

Nous pouvons regrouper les systèmes de navigation utilisant des amers naturels par rapport aux capteurs extéroceptifs utilisés. Les méthodes de localisation basées l'utilisation de télémètre consiste généralement, après segmentation, à effectuer une mise en correspondance par rapport aux parois de l'environnement. Les précurseurs par rapport à ce type d'approche sont Drumheller [49] et Crowley [50] qui utilisent des capteurs à ultrason. De nombreuses extensions ont été donné à ces travaux, comme par exemple [51] où une caractérisation des paramètres géométriques de balises naturelles de type parois ou arêtes permet de localiser de robot. Citons enfin les travaux de Kieffer [52] sur lesquels nous nous sommes appuyés dans ce mémoire, qui propose finalement une méthode de localisation à erreur bornée qui utilise des données ultrasonores. La mise en correspondance est ici faite au sens de l'inversion ensembliste.

La télémétrie laser, plus précise que celle à ultrasons, est très souvent utilisé et permet de rendre plus robuste la phase de mise en correspondance. Ainsi l'appariement de « segments laser » avec ceux répertoriés au sein d'une carte de l'environnement est géré dans [53] pour la localisation absolue d'un robot dans son environnement.

Enfin les systèmes de vision, qu'ils soient monoculaire, omnidirectionnels ou stéréoscopiques, par la densité et la pertinence des informations sensorielles qu'ils fournissent, sont eux aussi fréquemment utilisés pour la problématique qu'est la localisation absolue.

## **II.4 Conclusion**

Dans ce chapitre on a essayé de donner un bref aperçu sur les systèmes de perception en robotique mobile. Tout en donnant des exemples de quelques systèmes de perception qu'on rencontre le plus souvent sur des robots mobiles, et leur importance dans la localisation et la navigation.

# Chapitre III

**Estimation de la dynamique des obstacles**

## Estimation de la dynamique des obstacles

Il convient de préciser les types d'environnements que nous considérons ici. En effet, les robots sont amenés à se déplacer dans une grande variété d'environnements qui peuvent être regroupés en deux grandes catégories : les environnements statiques et les environnements dynamiques. Dans notre cas on s'est limité au cas des robots mobiles d'intérieur où leurs environnements d'évolution peuvent être considérés comme des environnements partiellement dynamiques.

En général, la structure des robots mobiles peut être décomposée en trois parties : système mécanique, système électronique et système logiciel. La tâche de navigation d'un robot mobile repose essentiellement sur le traitement de l'information issue de la perception, de la décision et de l'exécution. Dans ce chapitre on va développer la partie qui concerne l'interprétation de l'information délivrée par le système de perception pour déterminer la nature des obstacles rencontrés durant la navigation.

### III.1 Introduction

La classification est un domaine de recherche qui a été développé dans les années soixante. C'est l'une parmi les techniques les plus utilisées. Elle constitue le principe de base de plusieurs systèmes d'aide au diagnostic. Il s'agit d'affecter un ensemble d'objets (tissus, enregistrements, etc.) à un ensemble de classes selon la description de celles-ci. Cette description est effectuée grâce à des propriétés ou des conditions typiques propres aux classes. Les objets sont alors classifiés suivant qu'ils vérifient ou non ces conditions ou propriétés.

Les méthodes de classification peuvent être supervisées ou non supervisées. Les méthodes supervisées demandent à l'utilisateur une description des classes tandis que celles non supervisées sont indépendantes de l'utilisateur. Elles sont plutôt des méthodes de groupement statistique qui trient les objets selon leurs propriétés et forment des ensembles ayant des caractéristiques similaires.

Le présent travail s'intéresse à l'étude d'un classificateur supervisé basé sur les concepts de base de la logique floue. C'est un système de classification floue dont la base de connaissances est modélisée sous forme de règles floues du type « si-alors ». L'objectif principal est la conception d'un système déterminant la classe de l'obstacle

rencontré afin de permettre au robot de prendre la décision adéquate pour son évitement. Les classes réservées aux obstacles dépendent de leurs dynamiques telles qu'obstacles statiques, obstacles dynamiques ; dans ce dernier cas la nature de la dynamique doit être définie.

De nouvelles approches de classification ont été proposées pour essayer de surmonter ce problème, notamment la logique floue. Par ailleurs, d'autres méthodes, comme les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques, commencent à être largement utilisées.

L'approche de classification par la logique floue permet l'introduction du concept de degré d'appartenance, qui détermine les « forces » avec lesquelles un individu appartient aux différentes classes. Cela repose sur le fait que le concept flou ne cherche pas un point de rupture qui décide de l'appartenance d'un individu à une classe, mais qu'elle raisonne plutôt sur la base d'un intervalle de valeurs. L'idée qui soutient l'approche est la possibilité d'appartenance à la fois à plusieurs classes. Partant dans ce sens, ce sont exclus toutes les méthodes de classification « dure » contraignant les individus à être membre d'une et d'une seule classe.

Quoique la probabilité d'appartenance des objets aux classes ne soit pas évidemment une exclusivité des techniques de classification floue, il nous semble que les résultats obtenus des approches floues sont plus pertinents en ce sens qu'ils donnent une matrice des degrés d'appartenance de chaque individu à chaque classe, ce qui n'est pas tout à fait le cas dans les autres analyses « classiques » de classification.

### III.2 Conception du classificateur flou

La procédure générale de conception d'un classificateur flou comporte les étapes suivantes :

- Connaitre le milieu dont lequel évolue le robot.
- Choisir le télémètre adéquat utilisé par le système de perception.
- Choisir un modèle pour les différentes mesures pour le système de classification.
- Concevoir le système de classification en logique flou:
  - Û Déterminer les différentes entrées et sorties du classificateur.
  - Û Choix de la stratégie de fuzzification.
  - Û Etablissement des règles d'inférence.
  - Û Etablir un programme de simulation du classificateur.

Cette procédure de conception de classificateur flou présente l'avantage qu'elle facilite le travail dans la partie de décision du robot mobile qui évolue dans un environnement multi-agents.

On va expliquer avec un peu plus de précision les étapes précédentes :

### III.2.1 Le milieu d'évolution du Robot mobile

Dans le cas réel un environnement ne peut être que du type semi-statique, pour notre expérience on a choisi un milieu interne (fermé) qui est aussi semi-statique.

On trouve dans ce genre d'environnement des obstacles statiques et des obstacles dynamiques, ces derniers peuvent être d'autres robots mobiles qui évoluent dans le même environnement ou des opérateurs.

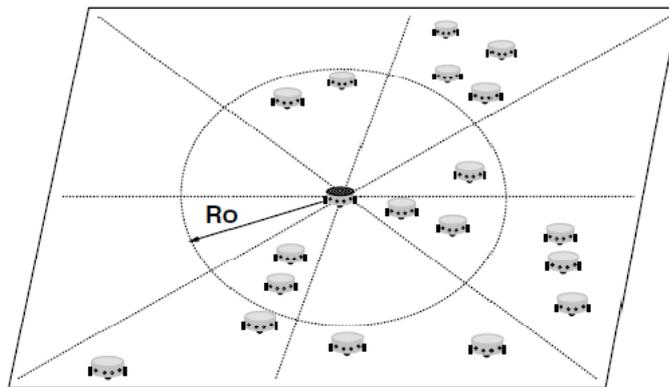


Figure III.1 Environnement multi-agents.

Dans le présent mémoire, notre étude se limite à un environnement présentant le robot mobile avec un seul obstacle (agent) et cela pour générer un model fondamental de classificateur.

Ce dernier nous permet par la suite d'utiliser un système multi-agent.

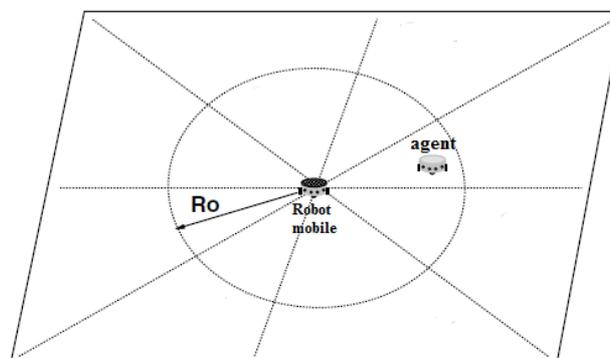


Figure III.2 environnement à un seul agent

### III.2.2 Le télémètre de système de perception

On propose pour cela un télémètre laser qui a des performances remarquables : la résolution angulaire très fine, la précision sur la mesure de distance par rapport à la portée, qui est importante et la distance de capture est largement suffisante pour les environnements d'intérieur qui est de l'ordre de quelques dizaines de mètres. Malgré leur prix faible, nous avons évité les télémètres à ultrasons parce qu'ils sont moins précis et présentent une zone morte assez importante.

Le télémètre pour lequel on a opté (laser) doit être monté sur le robot mobile (support gyro-axial) pour qu'il domine tout son environnement.

Les données recueillies par ce système de perception sont :

- la distance de l'obstacle détecté.
- son positionnement par rapport au robot mobile.

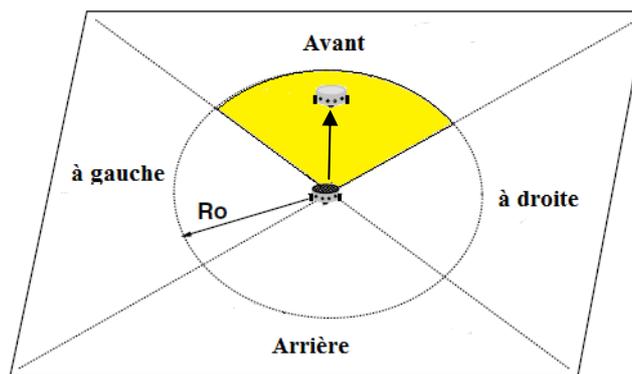


Figure III.3 les directions du robot mobile

### III.2.3 Le modèle de mesure pour le système de classification

En général on utilise ce modèle pour obtenir les règles de calcul des paramètres qu'on doit préparer pour le classificateur.

Le modèle utilisé est basé sur les paramètres recueillis par le télémètre : Distance de l'obstacle et sa position par rapport au robot mobile (avant, arrière, à droite, à gauche) ; ici pour faciliter notre étude on va choisir une des quatre directions, qui est l'avant.

Les autres directions vont être traitées de la même manière que la position avant car le paramètre de positionnement n'appartient pas aux paramètres de classification, il est utilisé séparément par le bloc de décision.

On illustre le déplacement d'un robot mobile par rapport à l'obstacle par le schéma ci-dessous :

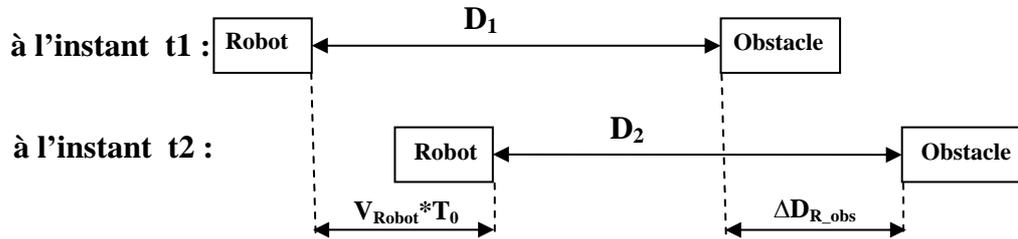


Figure III.4 le déplacement d'un robot mobile vis-à-vis d'un obstacle.

Les distances  $D_1$  et  $D_2$  sont mesurées à chaque instant par le système de perception du robot mobile.

$V_{Robot}$  est une vitesse constante, connue par le Robot mobile.

$T_0 = t_2 - t_1$  Temps d'échantillonnage.

$\Delta D = D_2 - D_1$  variation de la distance séparant le robot et l'obstacle.

$$D_2 - D_1 = \Delta D_{R\_obs} - V_{Robot} * T_0$$

$$\Delta D_{R\_obs} = (D_2 - D_1) + V_{Robot} * T_0 \quad \text{distance parcourue par l'obstacle.}$$

### III.2.4 Le système de classification en logique flou

#### III.2.4.1 Les différentes entrées et sorties du classificateur

Les paramètres de classification des obstacles suivant leur dynamique sont définis par le triplet de données :

- 1- vitesse du robot mobile.
- 2- distance entre le robot et l'obstacle.
- 3- distance du parcours de l'obstacle.

Sous forme d'un vecteur de réels de 3 éléments :

$$x = [\text{dist\_RM12} ; \text{vitesse1} ; \Delta D_{R\_obs}] \in \mathbb{R}^3$$

Les composantes du vecteur  $x$  sont des paramètres qui découlent de la distance délivrée par le système de perception, de la vitesse du robot et de la distance parcourue par l'obstacle.

La sortie  $C = \{C_1 ; C_2 ; \dots ; C_N\}$  est représentée par l'ensemble des classes des obstacles suivant les mesures des distances séparant du robot ( $\text{dist}_{RM12}$ ) et des distances parcourues par l'obstacle considéré ( $\Delta D_{R\_obs}$ ).

$N=19$  est le nombre de message de sortie du classificateur.

La distance		La direction et la vitesse	
0	Obstacle est proche	1	il s'éloigne avec une petite Vitesse
		2	il s'éloigne avec une Vitesse moyenne
0.5	Obstacle est presque voisin	3	il s'éloigne avec une grande Vitesse
		0	Statique
		-1	il s'approche avec une petite Vitesse
1	Obstacle est loin	-2	il s'approche avec une Vitesse moyenne
		-3	il s'approche avec une grande Vitesse

Tableau III.1 les messages de sortie du classificateur

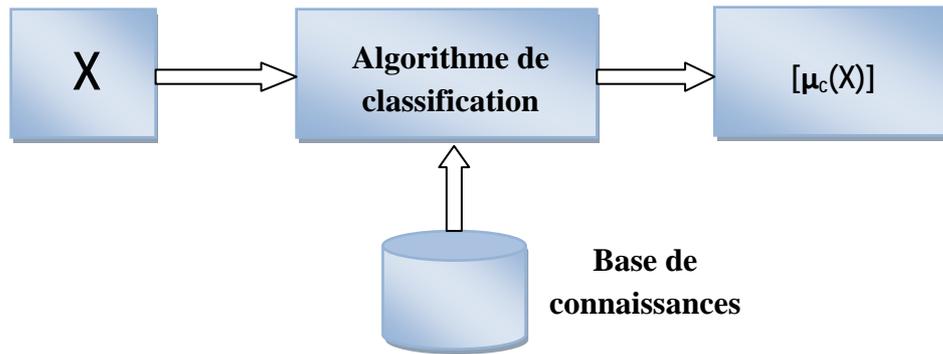
Un classificateur flou est toute application  $D$  telle que :

$$D : \mathbb{R}^3 \rightarrow [0,1]^M$$

Le résultat de la classification est alors donné par :

$$D(x) = [\mu_1(x) ; \dots ; \mu_M(x)]$$

où  $\mu_i(x)$  représente le degré d'appartenance de  $x$  à la classe  $C_i$  (figure III.5).



**Figure III.5** : Schéma synoptique d'un classificateur flou supervisé

### III.2.4.2 La stratégie de fuzzification

Cela consiste à spécifier le domaine de variation des variables : espaces normalisés, qu'on divise en intervalles (sous ensemble flous ou valeurs linguistique). Cette répartition, qui consiste à fixer le nombre de ces valeurs et les distribuer sur le domaine, est basée sur des connaissances du système et selon la précision désirée. Les fonctions d'appartenances sont explicitées par le choix des formes des fonctions d'appartenance et leur répartition.

Dans notre cas, nous avons choisi de travailler sur des espaces normalisés, nous utilisons les fonctions d'appartenance triangulaire pour les différentes entrées :

- Distance entre le robot et l'obstacle: dans l'intervalle  $[0,20](m)$  répartie en cinq (5) sous-ensembles flou. (Figure III.6)

Les fonctions d'appartenance sont définies par :

La fonction Z :

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } 0 \leq x \leq 2 \\ -0.5x + 2 & \text{si } 2 \leq x \leq 4 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction P :

$$\mu_P(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}x - 1 & \text{si } 2 \leq x \leq 4 \\ -\frac{1}{2}x + 3 & \text{si } 4 \leq x \leq 6 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction M :

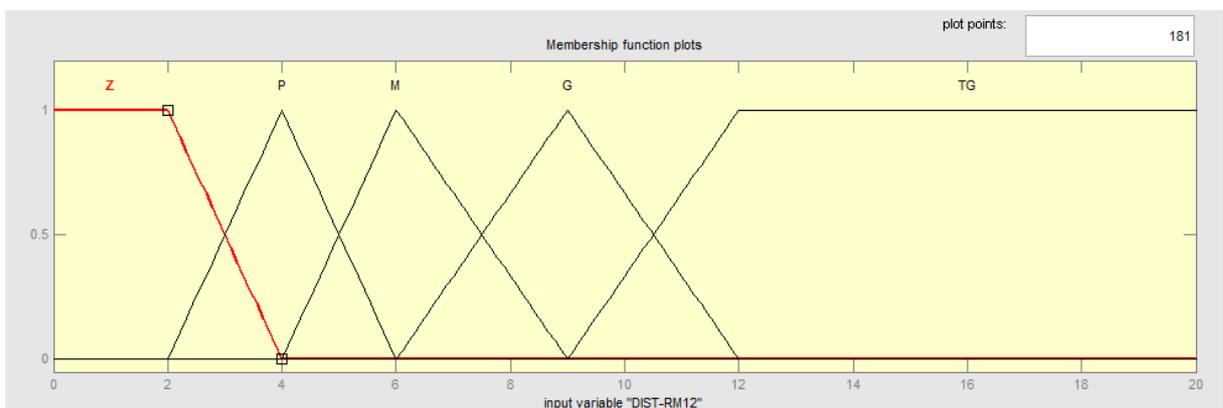
$$\mu_M(x) = \begin{cases} \frac{1}{2}x - 2 & \text{si } 4 \leq x \leq 6 \\ -\frac{1}{3}x + 3 & \text{si } 6 \leq x \leq 9 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction G :

$$\mu_G(x) = \begin{cases} \frac{1}{3}x - 2 & \text{si } 6 \leq x \leq 9 \\ -\frac{1}{3}x + 4 & \text{si } 9 \leq x \leq 12 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction TG :

$$\mu_{TG}(x) = \begin{cases} \frac{1}{3}x - 3 & \text{si } 9 \leq x \leq 12 \\ 1 & \text{si } 12 \leq x \leq 20 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$



**Figure III.6** fonction d'appartenance de distance entre le robot et l'obstacle (m)

- Vitesse du robot mobile (m/s): dans l'intervalle  $[-3, 3]$ (m/s) répartie en sept (7) sous-ensembles flou. (Figure III.7)

Les fonctions d'appartenance sont définies par :

La fonction Z :

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.33}x + 1 & \text{si } -0.33 \leq x \leq 0 \\ -\frac{1}{0.33}x + 1 & \text{si } 0 \leq x \leq 0.33 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction PP :

$$\mu_{PP}(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.33}x & \text{si } 0 \leq x \leq 0.33 \\ -x + 1.33 & \text{si } 0.33 \leq x \leq 1.33 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction PM :

$$\mu_{PM}(x) = \begin{cases} x - 0.33 & \text{si } 0.33 \leq x \leq 1.33 \\ -\frac{1}{0.66}x + \frac{2}{0.66} & \text{si } 1.33 \leq x \leq 2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction PG :

$$\mu_{PG}(x) = \begin{cases} \frac{1}{0.66}x - \frac{1.33}{0.66} & \text{si } 1.33 \leq x \leq 2 \\ 1 & \text{si } 2 \leq x \leq 3.33 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction NP :

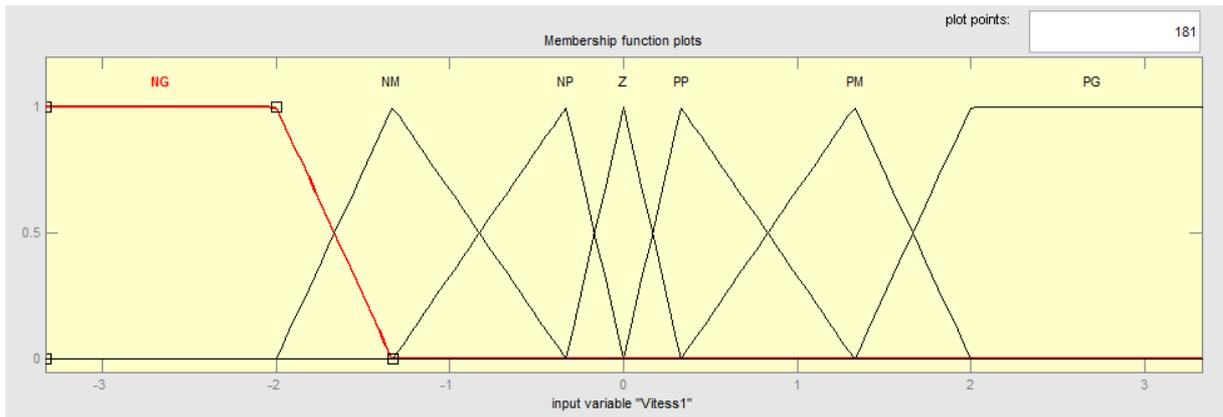
$$\mu_{NP}(x) = \begin{cases} -\frac{1}{0.33}x & \text{si } 0 \geq x \geq -0.33 \\ x + 1.33 & \text{si } -0.33 \geq x \geq -1.33 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction NM :

$$\mu_{NM}(x) = \begin{cases} -x - 0.33 & \text{si } -0.33 \geq x \geq -1.33 \\ \frac{1}{0.66}x + \frac{2}{0.66} & \text{si } -1.33 \geq x \geq -2 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction NG :

$$\mu_{NG}(x) = \begin{cases} -\frac{1}{0.66}x - \frac{1.33}{0.66} & \text{si } -1.33 \geq x \geq -2 \\ 1 & \text{si } -2 \geq x \geq -3.33 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$



**Figure III.7** fonction d'appartenance de vitesse du robot mobile (m/s)

- Distance du parcours de l'obstacle (m): dans l'intervalle  $[-1, 1]$ (m) répartie en sept (7) sous-ensembles flou. (Figure III.8)

Les fonctions d'appartenance sont définies par :

La fonction Z :

$$\mu_Z(x) = \begin{cases} 10x + 1 & \text{si } -0.1 \leq x \leq 0 \\ -10x + 1 & \text{si } 0 \leq x \leq 0.1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction PP :

$$\mu_{PP}(x) = \begin{cases} 10x & \text{si } 0 \leq x \leq 0.1 \\ -\frac{10}{3}x + \frac{4}{3} & \text{si } 0.1 \leq x \leq 0.4 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction PM :

$$\mu_{PM}(x) = \begin{cases} \frac{10}{3}x - \frac{1}{3} & \text{si } 0.1 \leq x \leq 0.4 \\ -5x + 3 & \text{si } 0.4 \leq x \leq 0.6 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction PG :

$$\mu_{PG}(x) = \begin{cases} 5x - 2 & \text{si } 0.4 \leq x \leq 0.6 \\ 1 & \text{si } 0.6 \leq x \leq 1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction NP :

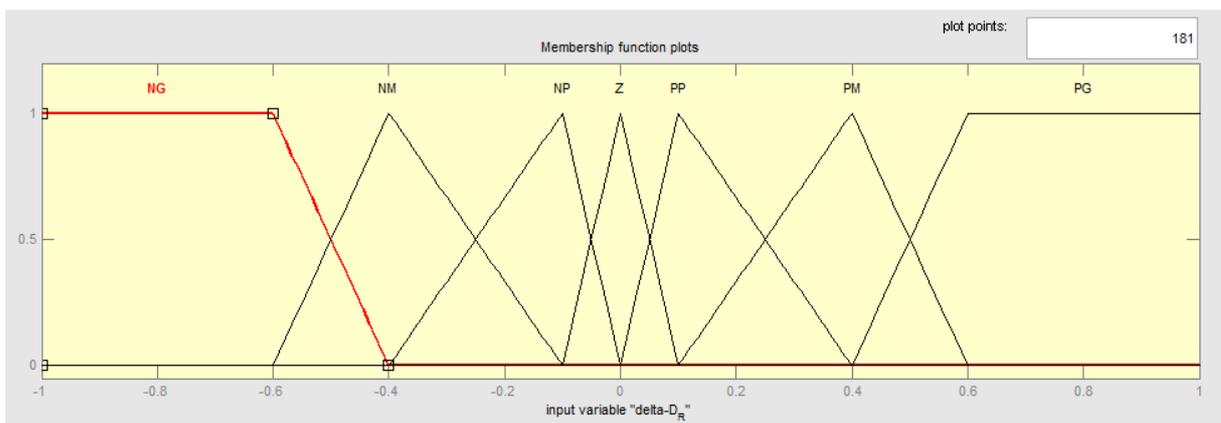
$$\mu_{NP}(x) = \begin{cases} -10x & \text{si } 0 \geq x \geq -0.1 \\ \frac{10}{3}x + \frac{4}{3} & \text{si } -0.1 \geq x \geq -0.4 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction NM :

$$\mu_{NM}(x) = \begin{cases} -\frac{10}{3}x - \frac{1}{3} & \text{si } -0.1 \geq x \geq -0.4 \\ 5x + 3 & \text{si } -0.4 \geq x \geq -0.6 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$

La fonction NG :

$$\mu_{NG}(x) = \begin{cases} -5x - 2 & \text{si } -0.4 \geq x \geq -0.6 \\ 1 & \text{si } -0.6 \geq x \geq -1 \\ 0 & \text{ailleurs} \end{cases}$$



**Figure III.8** fonction d'appartenance de distance du parcours de l'obstacle (m)

### **III.2.4.3 Etablissement des règles d'inférence**

Nous avons conçu une base de règles suivant deux hypothèses. La première hypothèse suppose que l'interprétation des données du système de perception se limite à la détermination de l'état de l'obstacle statique, s'éloigne ou s'approche du robot et avec quelle vitesse. Dans ce cas le classificateur nécessite le gradient de la distance séparant le robot de l'obstacle et sa variation à des intervalles de temps réguliers. La deuxième hypothèse se base sur la distance séparant le robot de l'obstacle et son gradient. Dans cette dernière, le classificateur peut même indiquer la situation dans laquelle se situe le robot.

Les tableaux suivants représentent les bases des règles du classificateur flou :

Les vitesses indiquées sur ces tableaux sont relatives par rapport à la vitesse du robot mobile.

les abréviations utilisées sur les tableaux expliquées dans le tableau suivant :

<b>Abréviation</b>	<b>Description</b>
S	Obstacle Statique.
EVp_p	Obstacle est proche et il s'éloigne avec une petite Vitesse.
EVp_pv	Obstacle est presque voisin et il s'éloigne avec une petite Vitesse.
EVp_l	Obstacle est loin et il s'éloigne avec une petite Vitesse.
EVm_p	Obstacle est proche et il s'éloigne avec une Vitesse moyenne.
EVm_pv	Obstacle est presque voisin et il s'éloigne avec une Vitesse moyenne.
EVm_l	Obstacle est loin et il s'éloigne avec une Vitesse moyenne.
EVg_p	Obstacle est proche et il s'éloigne avec une grande Vitesse.
EVg_pv	Obstacle est presque voisin et il s'éloigne avec une grande Vitesse.
EVg_l	Obstacle est loin et il s'éloigne avec une grande Vitesse.
RVp_p	Obstacle est proche et il s'approche avec une petite Vitesse.
RVp_pv	Obstacle est presque voisin et il s'approche avec une petite Vitesse.
RVp_l	Obstacle est loin et il s'approche avec une petite Vitesse.
RVm_p	Obstacle est proche et il s'approche une Vitesse moyenne.
RVm_pv	Obstacle est presque voisin et il s'approche une Vitesse moyenne.
RVm_l	Obstacle est loin et il s'approche une Vitesse moyenne.
RVg_p	Obstacle est proche et il s'approche avec une grande Vitesse.
RVg_pv	Obstacle est presque voisin et il s'approche avec une grande Vitesse.
RVg_l	Obstacle est loin et il s'approche avec une grande Vitesse.

Tableau III.2 La description des abréviations de classificateur

On trouve aussi dans ces tableaux des données déduites de l'expérience du manipulateur.

		Vitesse1 = Z				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		Z	P	M	G	TG
PG		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
PM		EVm_p	EVm_p	EVm_pv	EVm_l	EVm_l
PP		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
Z		S	S	S	S	S
NP		RVp_p	RVp_p	RVp_pv	RVp_l	RVp_l
NM		RVm_p	RVm_p	RVm_pv	RVm_l	RVm_l
NG		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l

Tableau III.3 situation de l'obstacle pour une vitesse nulle du robot mobile.

		Vitesse1 = PG				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		Z	P	M	G	TG
PG		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
PM		RVp_p	RVp_p	RVp_pv	RVp_l	RVp_l
PP		RVm_p	RVm_p	RVm_pv	RVm_l	RVm_l
Z		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l
NP		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l
NM		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l
NG		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l

Tableau III.4 situation de l'obstacle pour une vitesse grand du robot mobile.

		Vitesse1 = PM				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		Z	P	M	G	TG
PG		EVm_p	EVm_p	EVm_pv	EVm_g	EVm_g
PM		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_g	EVp_g
PP		RVp_p	RVp_p	RVp_pv	RVp_g	RVp_g
Z		RVm_p	RVm_p	RVm_pv	RVm_g	RVm_g
NP		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_g	RVg_g
NM		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_g	RVg_g
NG		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_g	RVg_g

Tableau III.5 situation de l'obstacle pour une vitesse moyenne du robot mobile.

		Vitesse1 = PP				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>M</b>	<b>G</b>	<b>TG</b>
<b>PG</b>		EVm_p	EVm_p	EVm_pv	EVm_l	EVm_l
<b>PM</b>		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
<b>PP</b>		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
<b>Z</b>		RVp_p	RVp_p	RVp_pv	RVp_l	RVp_l
<b>NP</b>		RVm_p	RVm_p	RVm_pv	RVm_l	RVm_l
<b>NM</b>		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l
<b>NG</b>		RVg_p	RVg_p	RVg_pv	RVg_l	RVg_l

Tableau III.6 situation de l'obstacle pour une vitesse petite du robot mobile.

		Vitesse1 = NG				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>M</b>	<b>G</b>	<b>TG</b>
<b>PG</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>PM</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>PP</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>Z</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>NP</b>		EVm_p	EVm_p	EVm_pv	EVm_l	EVm_l
<b>NM</b>		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
<b>NG</b>		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l

Tableau III.7 situation de l'obstacle pour une vitesse grand du robot mobile (le RM se déplace vers l'arrière).

		Vitesse1 = NM				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		<b>Z</b>	<b>P</b>	<b>M</b>	<b>G</b>	<b>TG</b>
<b>PG</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>PM</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>PP</b>		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
<b>Z</b>		EVm_p	EVm_p	EVm_pv	EVm_l	EVm_l
<b>NP</b>		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
<b>NM</b>		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
<b>NG</b>		RVp_p	RVp_p	RVp_pv	RVp_l	RVp_l

Tableau III.8 situation de l'obstacle pour une vitesse moyenne du robot mobile (le RM marche vers l'arrière).

		Vitesse1 = NP				
		Dist_RM_Obs				
$\Delta D_{R\_obs}$		Z	P	M	G	TG
PG		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
PM		EVg_p	EVg_p	EVg_pv	EVg_l	EVg_l
PP		EVm_p	EVm_p	EVm_pv	EVm_l	EVm_l
Z		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
NP		EVp_p	EVp_p	EVp_pv	EVp_l	EVp_l
NM		RVp_p	RVp_p	RVp_pv	RVp_l	RVp_l
NG		RVm_p	RVm_p	RVm_pv	RVm_l	RVm_l

Tableau III.9 situation de l'obstacle pour une vitesse petite du robot mobile (le RM marche vers l'arrière).

$Dist_{RM\_Obs}$  : la distance entre le robot mobile et l'obstacle.

$\Delta D_{R\_obs}$  : la distance de parcoure de l'obstacle.

$Vitesse1$  : vitesse du robot mobile.

### III.2.4.4 Choix de la stratégie de defuzzification

La méthode utilisée dans la défuzzification est celle de centre de gravité qui est la plus répandue. Les surfaces du classificateur est donnée sur les figures suivantes :

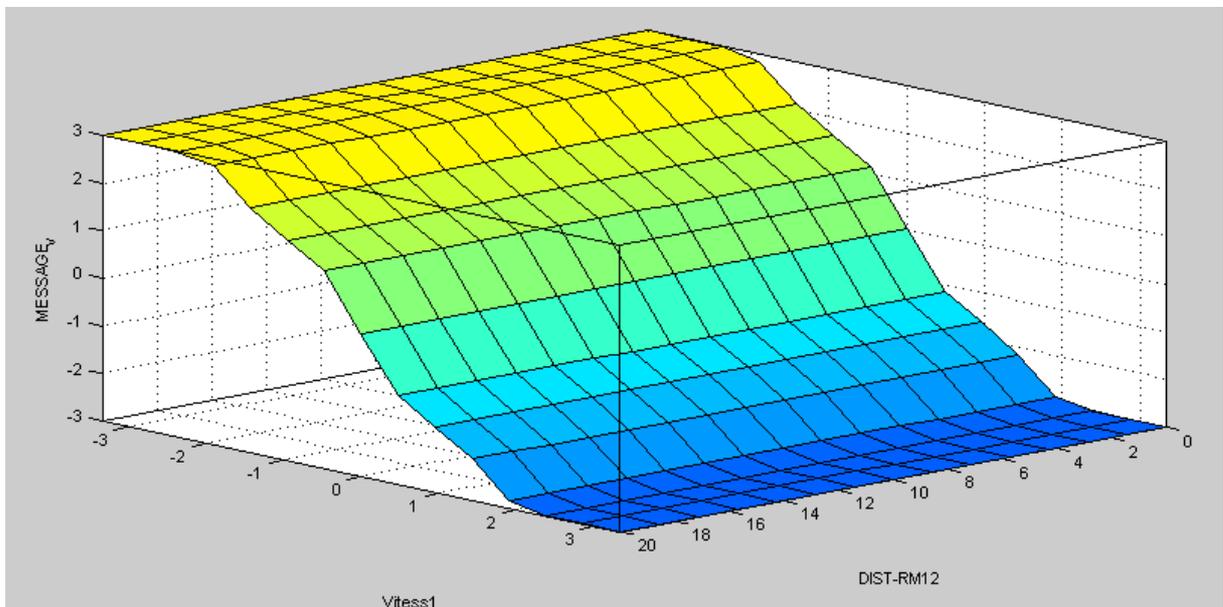
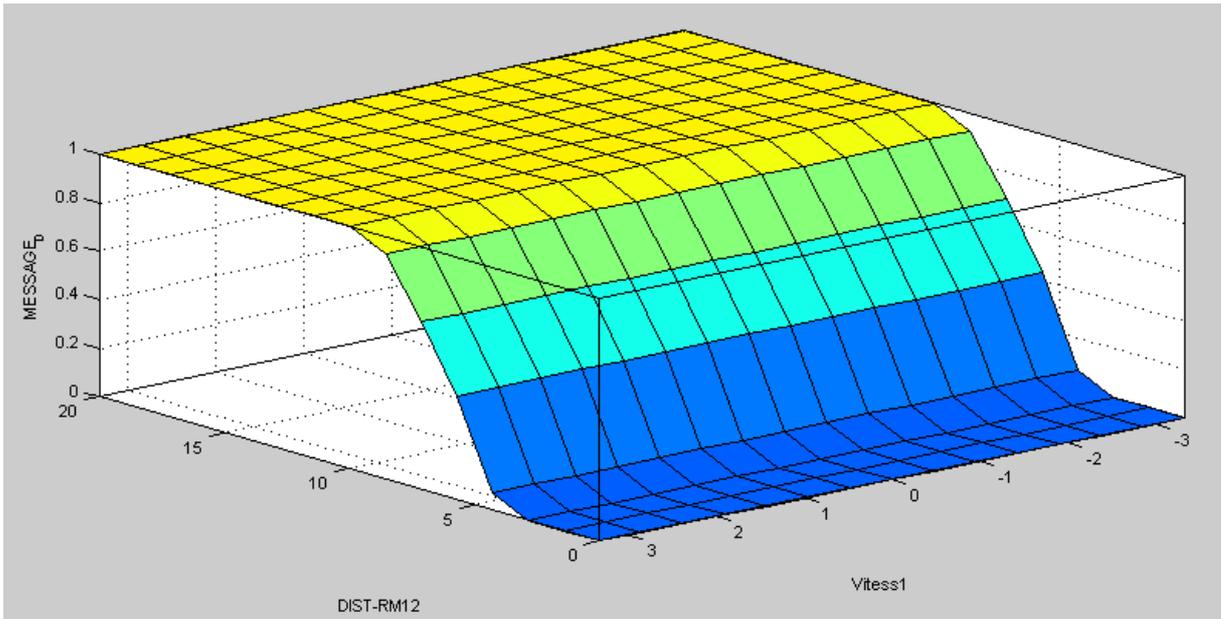
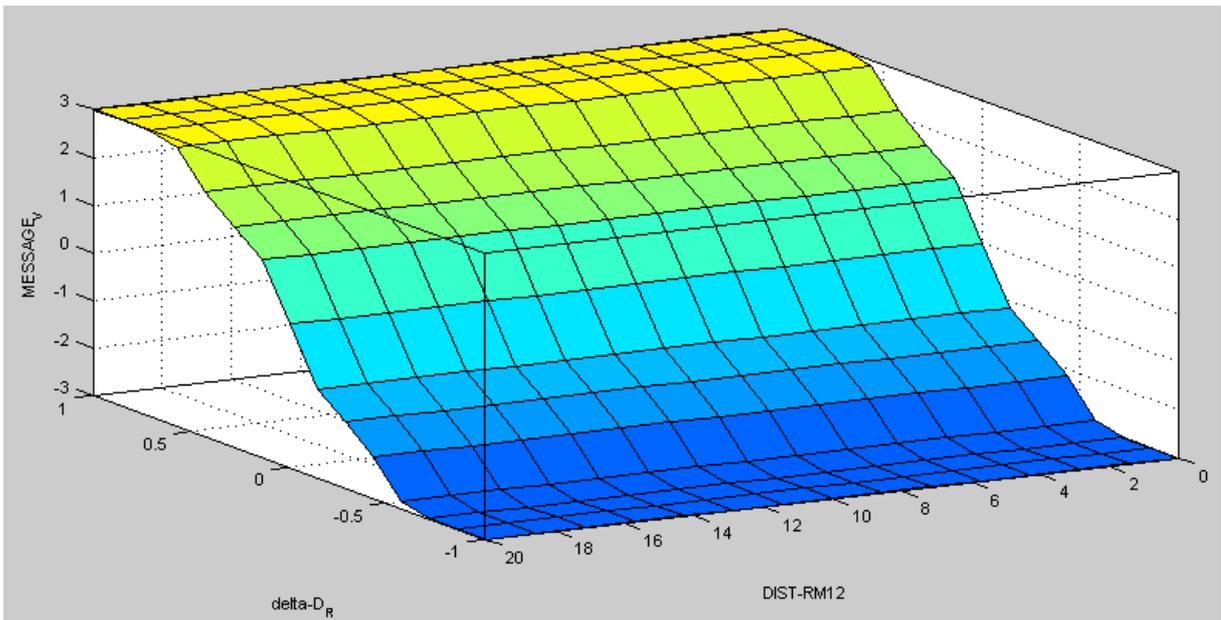


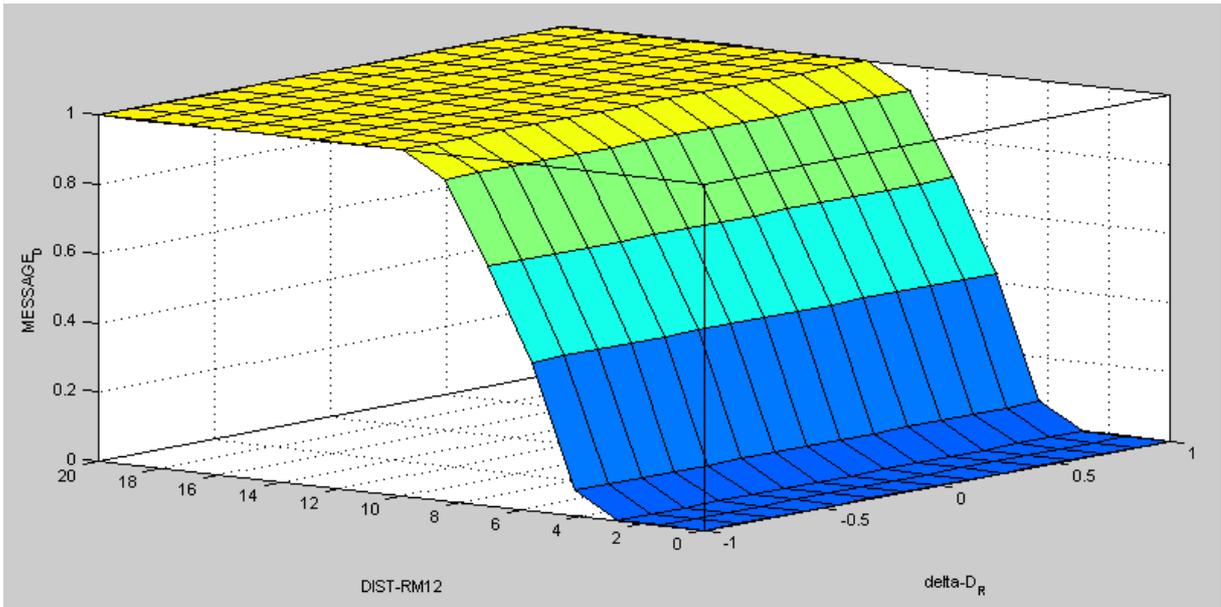
Figure III.9 dynamique de l'obstacle exprimée en vitesse d'éloignement ou de rapprochement en fonction de la vitesse du robot et de l'écart robot-obstacle



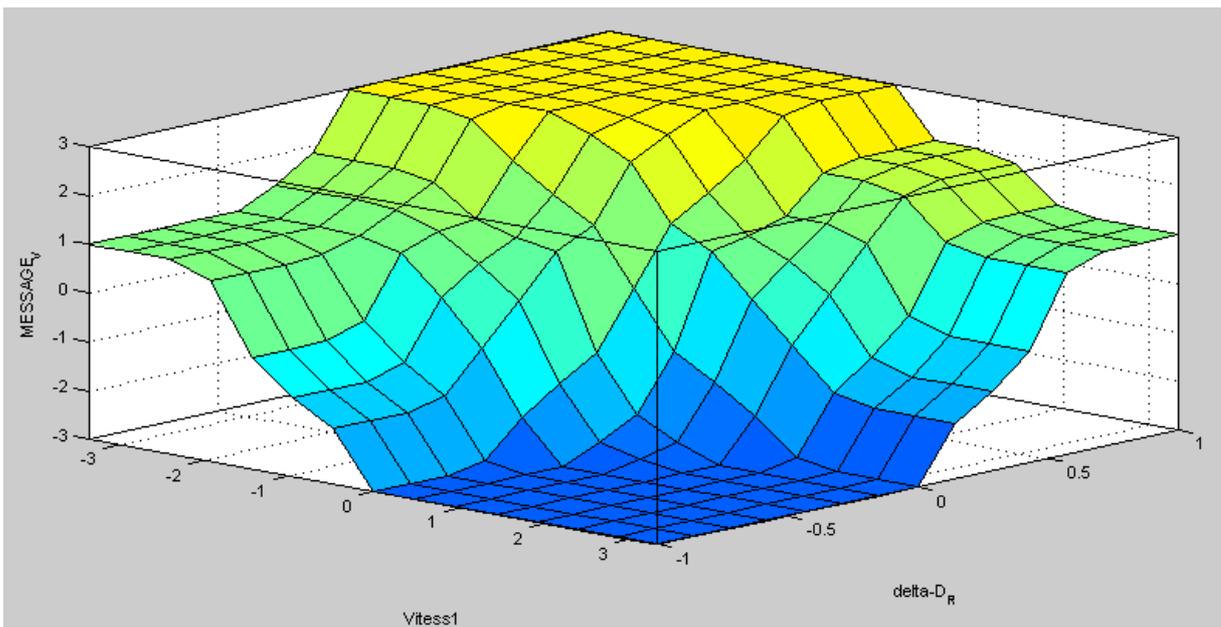
**Figure III.10** situation de l'obstacle loin, proche ou voisin en fonction de l'écart entre robot- obstacle et de la vitesse du Robot



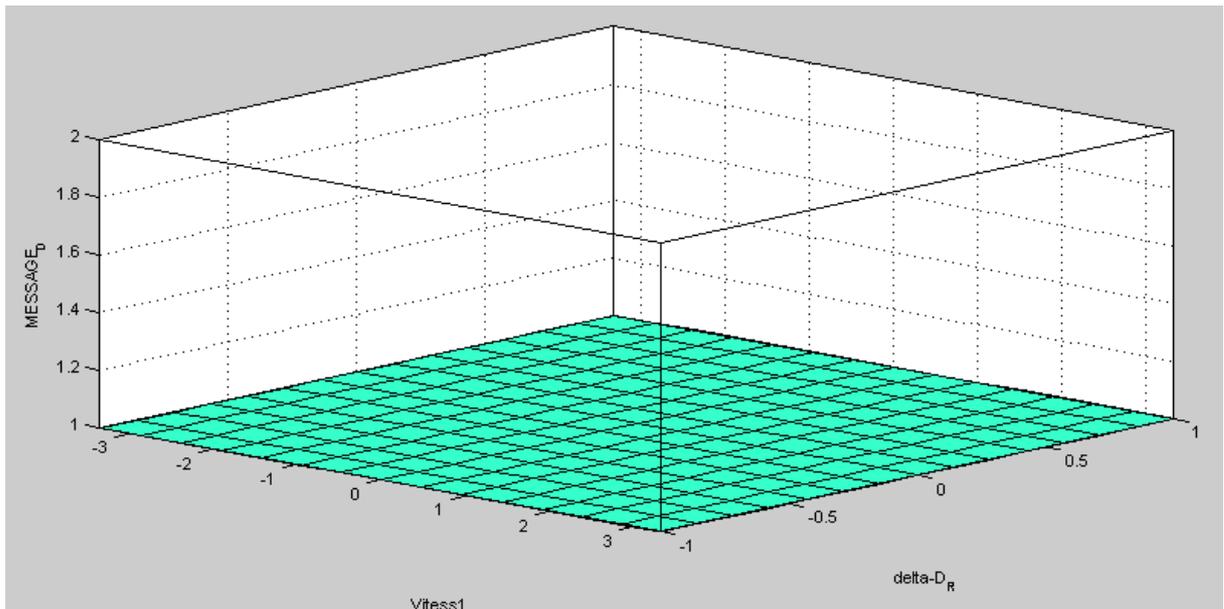
**Figure III.11** dynamique de l'obstacle exprimée en vitesse d'éloignement ou de rapprochement en fonction l'écart robot-obstacle et la distance de déplacement élémentaire de l'obstacle



**Figure III.12** situation de l'obstacle loin, proche ou voisin en fonction de l'écart entre robot- obstacle et du déplacement de l'obstacle



**Figure III.13** dynamique de l'obstacle exprimée en vitesse d'éloignement ou de rapprochement relativement à la vitesse du robot.



**Figure III.14** situation de l'obstacle loin, proche ou voisin en fonction de la vitesse du robot et de la distance élémentaire parcourue par l'obstacle

#### III.2.4.5 interprétations des résultats donnés par les figures III-9.....III-14

L'interprétation des figures de III.9 à III.14 est résumée par les points donnés ci-dessous :

*Figure III.9 :* On remarque sur cette figure la représentation numérique des messages de la dynamique de l'obstacle exprimée en vitesse d'éloignement ou de rapprochement en fonction de la vitesse du robot et de l'écart robot-obstacle qui n'a aucune influence sur la forme de la courbe.

*Figure III.10 :* On remarque sur cette figure la représentation numérique des messages de situation de l'obstacle (loin ,proche ou voisin) en fonction de l'écart robot-obstacle et de la vitesse du Robot qui n'a aucune influence sur la forme de la courbe.

*Figure III.11 :* On remarque sur cette figure la représentation numérique des messages de la dynamique de l'obstacle exprimée en vitesse d'éloignement ou de rapprochement en fonction l'écart robot-obstacle et la distance de déplacement élémentaire de l'obstacle qui n'a aucune influence sur la forme de la courbe.

*Figure III.12* : On remarque sur cette figure la représentation numérique des messages de situation de l'obstacle (loin, proche ou voisin) en fonction de l'écart robot-obstacle et du déplacement de l'obstacle qui n'a aucune influence sur la forme de la courbe.

*Figure III.13* : On remarque sur cette figure la représentation numérique des messages de la dynamique de l'obstacle exprimée en vitesse d'éloignement ou de rapprochement relativement à la vitesse du robot.

*Figure III.14* : On remarque sur cette figure la représentation numérique des messages de la situation de l'obstacle (loin, proche ou voisin) en fonction de la vitesse du robot et de la distance élémentaire parcourue par l'obstacle qui n'ont aucune influence sur ces messages.

#### **III.2.4.6 Exemple de simulation**

Le système de classification réalisé par simulation en y introduisant des données qu'on a collecté avant sous forme de base de données : qui contiennent (la vitesse du Rebot mobile, la distance entre le Rebot mobile et l'Obstacle, et la durée de l'échantillonnage). Ce système de classification génère des messages :

- La distance entre le Rebot mobile et Obstacle (loin, voisin proche).
- Le sens du déplacement (s'approche ou s'éloigne).
- La vitesse relative (petite, moyenne et grande vitesse).

On a un ensemble de bases de données qu'on a préparé avant par un programme qui simule le déplacement du Rebot mobile et Obstacle.

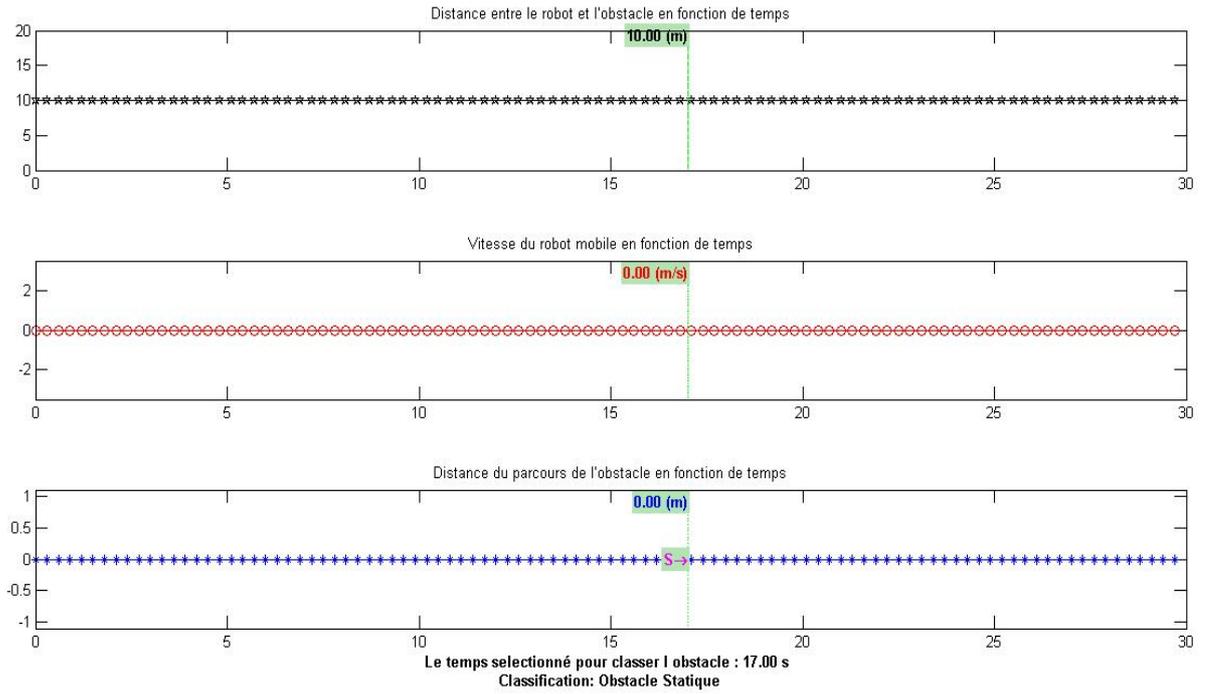


Figure III.15 cas d'un obstacle loin et statique à l'instant 17s

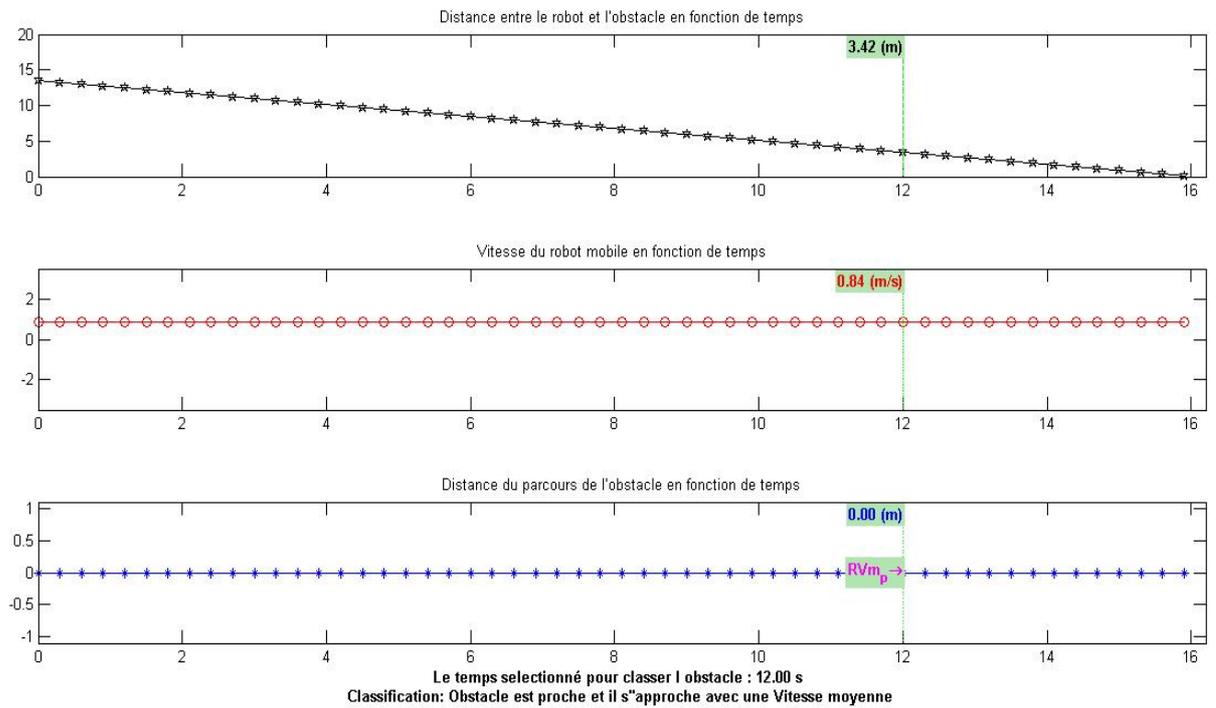


Figure III.16 cas d'un obstacle proche se rapprochant avec une vitesse moyenne à l'instant 12s

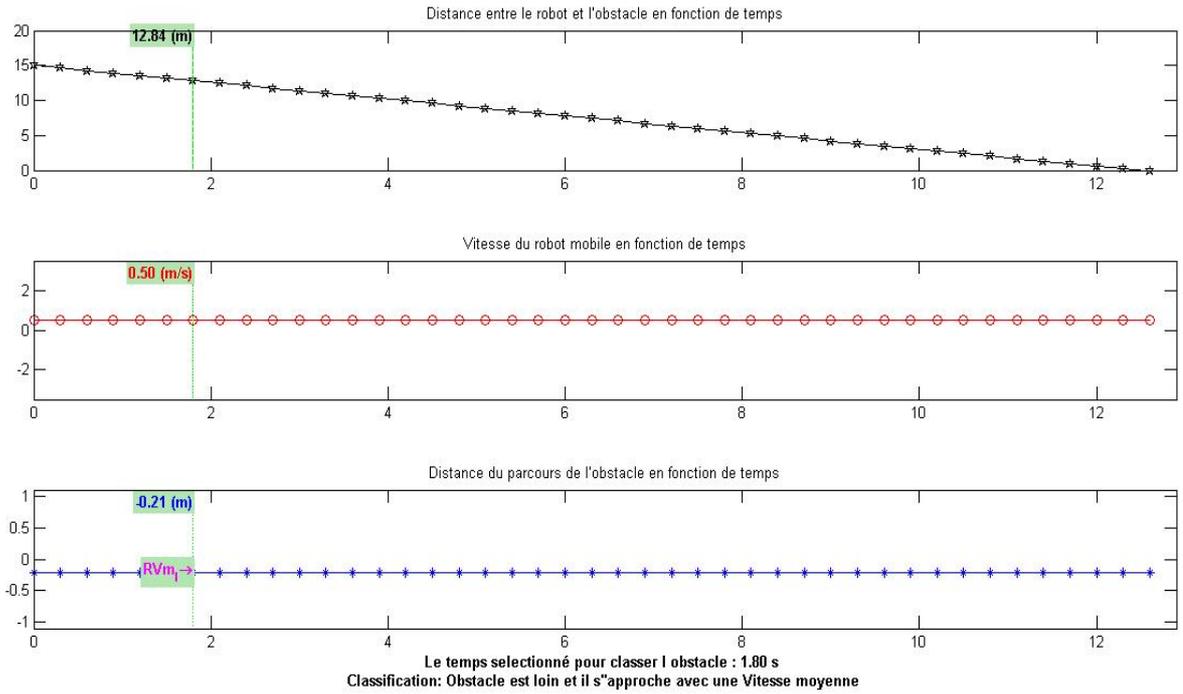


Figure III.17 cas d'un obstacle loin se rapprochant avec une vitesse moyenne à l'instant 1.8s

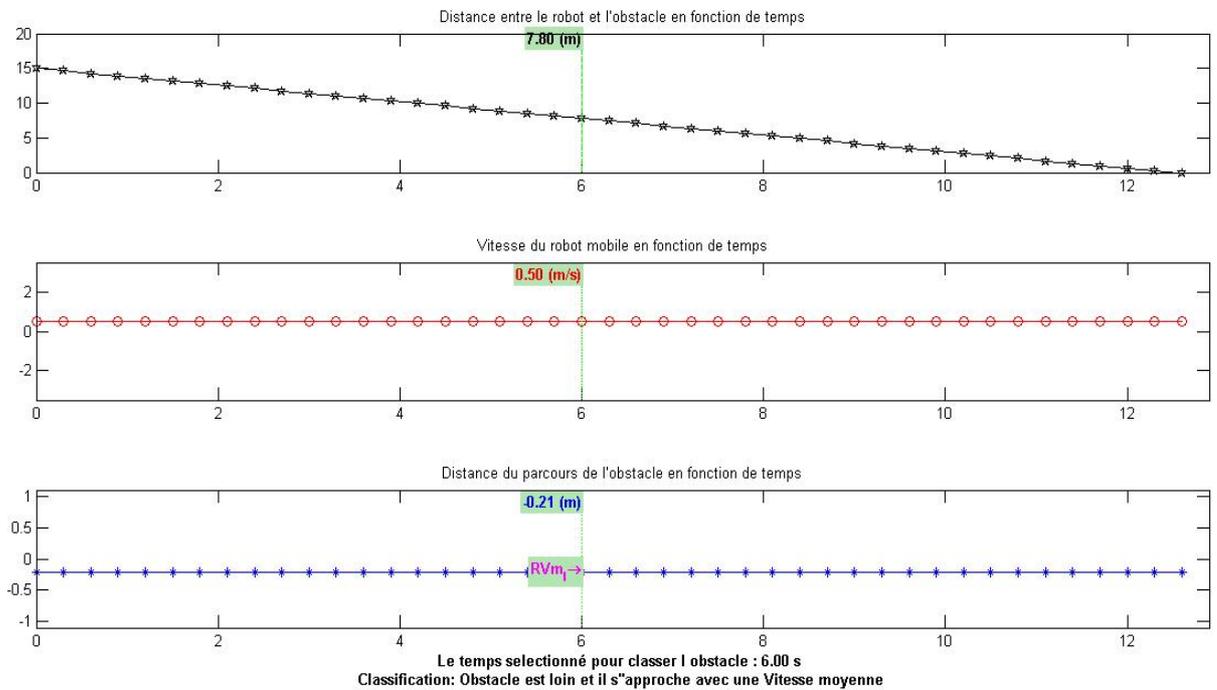


Figure III.18: cas d'un obstacle loin se rapprochant avec une vitesse moyenne à l'instant 6s

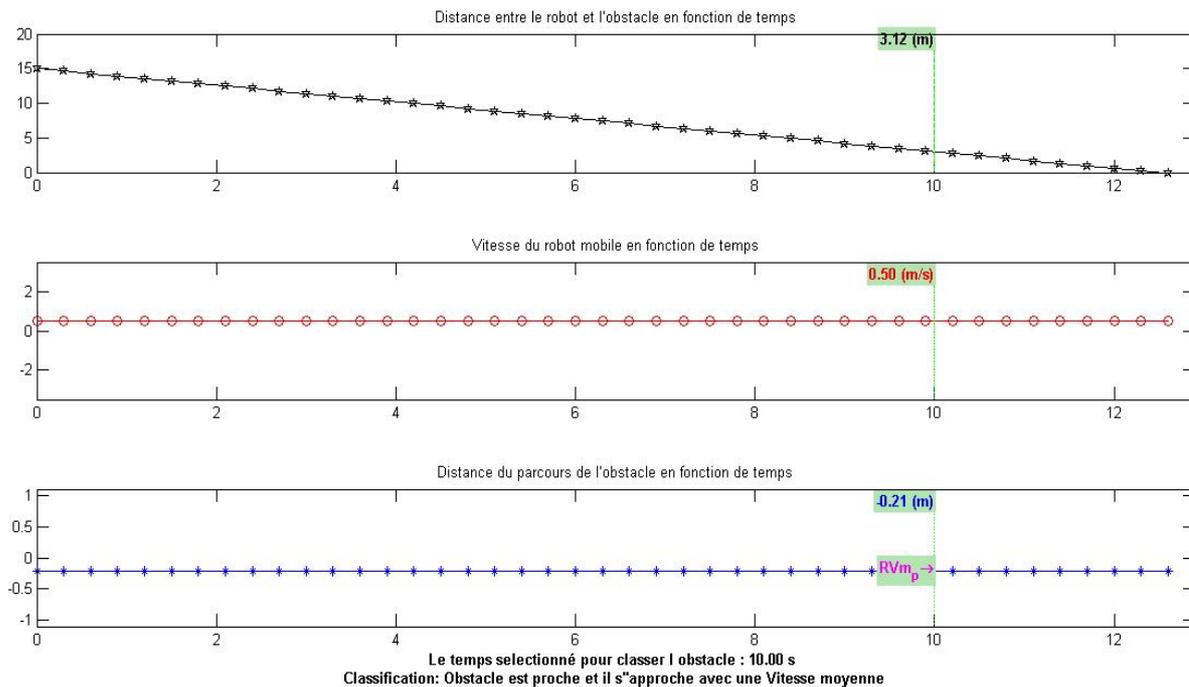


Figure III.19 cas d'un obstacle proche se rapprochant avec une vitesse moyenne à l'instant 10s

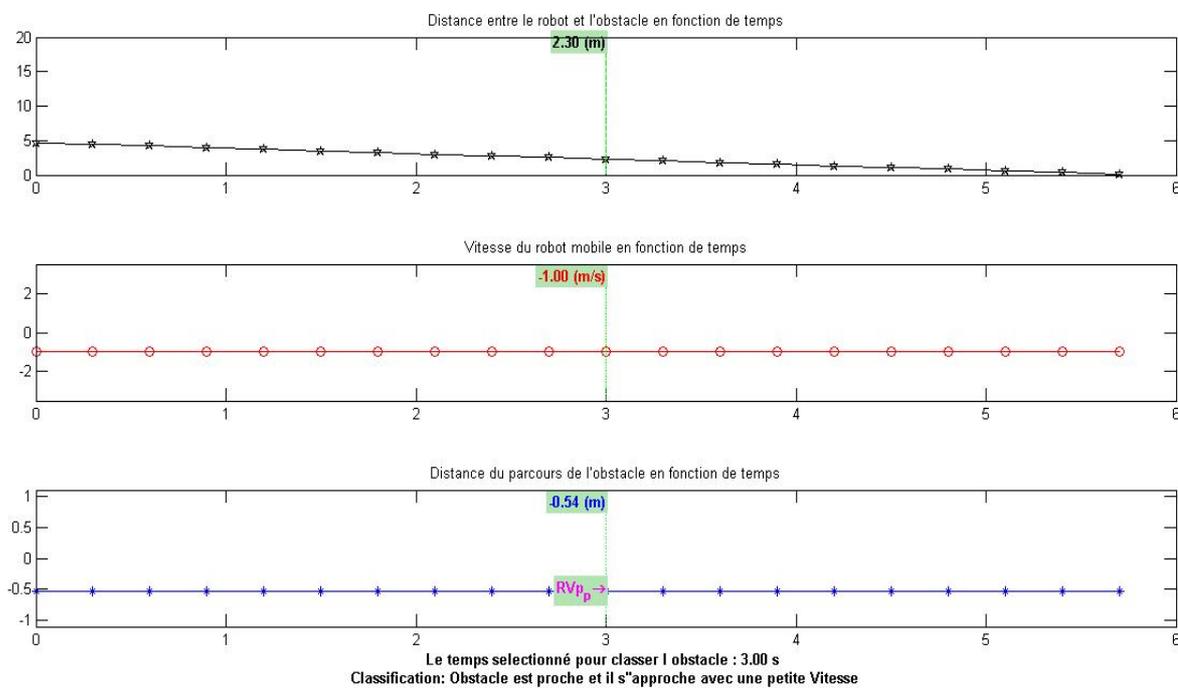


Figure III.20 cas d'un obstacle proche se rapprochant avec une petite vitesse à l'instant 3s

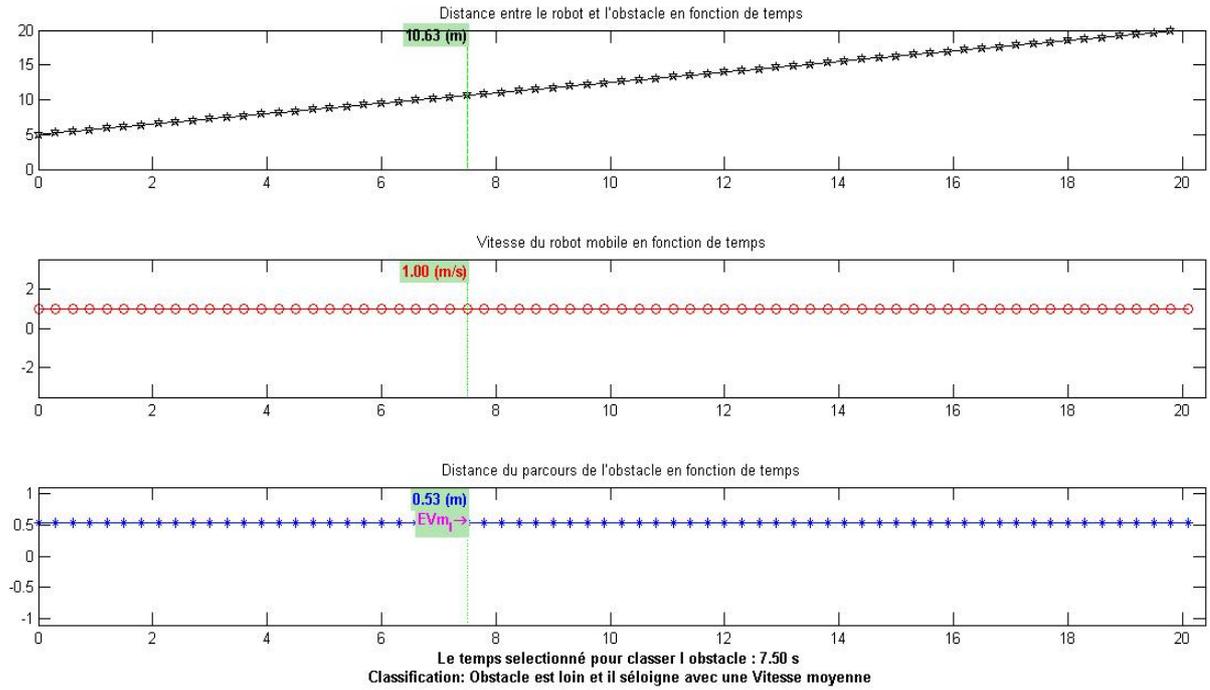


Figure III.21 cas d'un obstacle loin et s'éloignant avec une vitesse moyenne à l'instant 7.5s

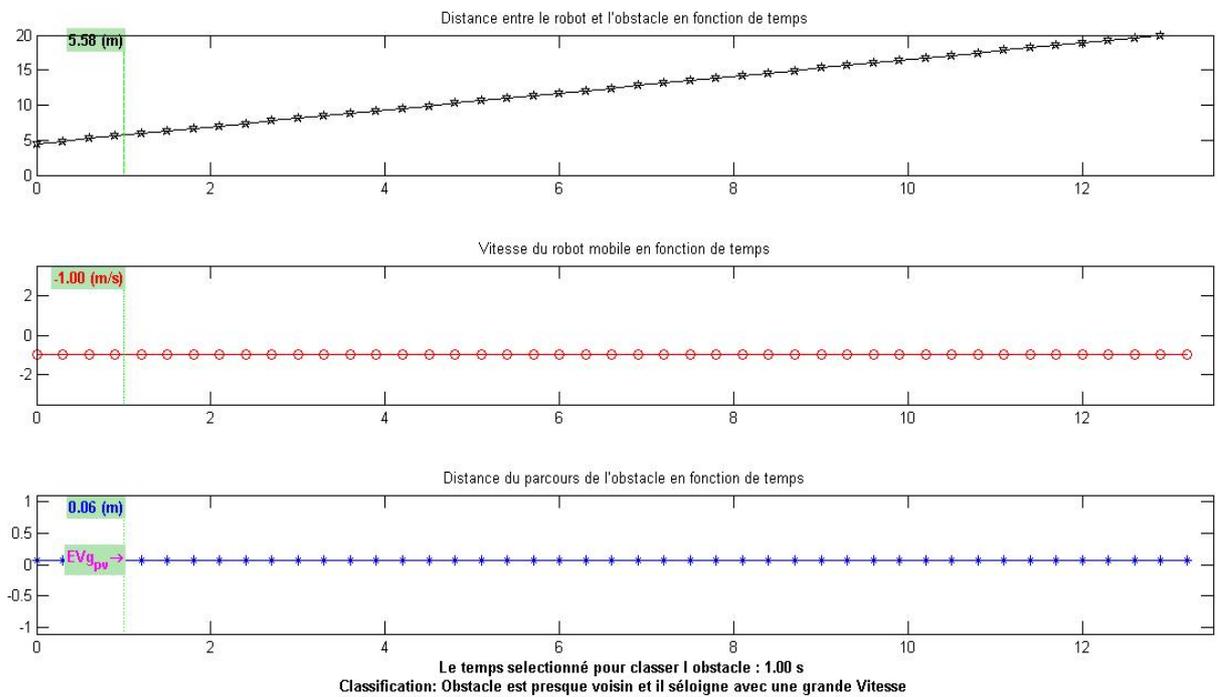


Figure III.22 cas d'un obstacle presque voisin et s'éloignant avec une grande vitesse à l'instant 1s

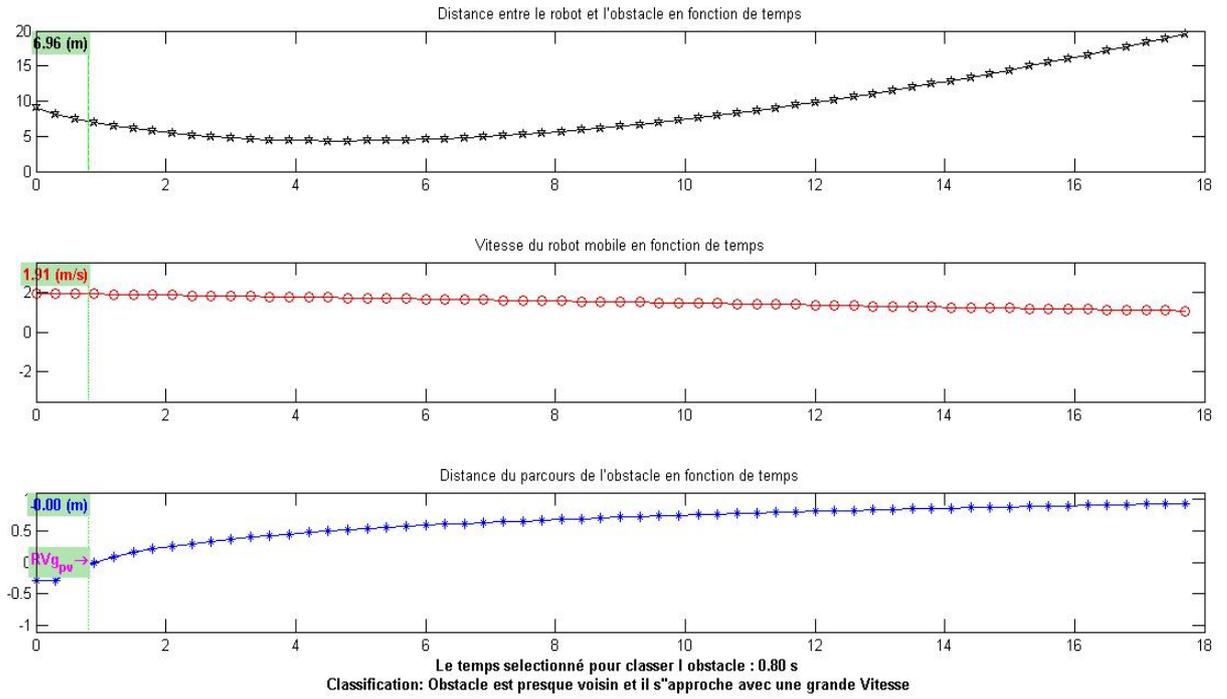


Figure III.23 cas d'un obstacle presque voisin se rapprochant avec une grande vitesse à l'instant 0.80 s

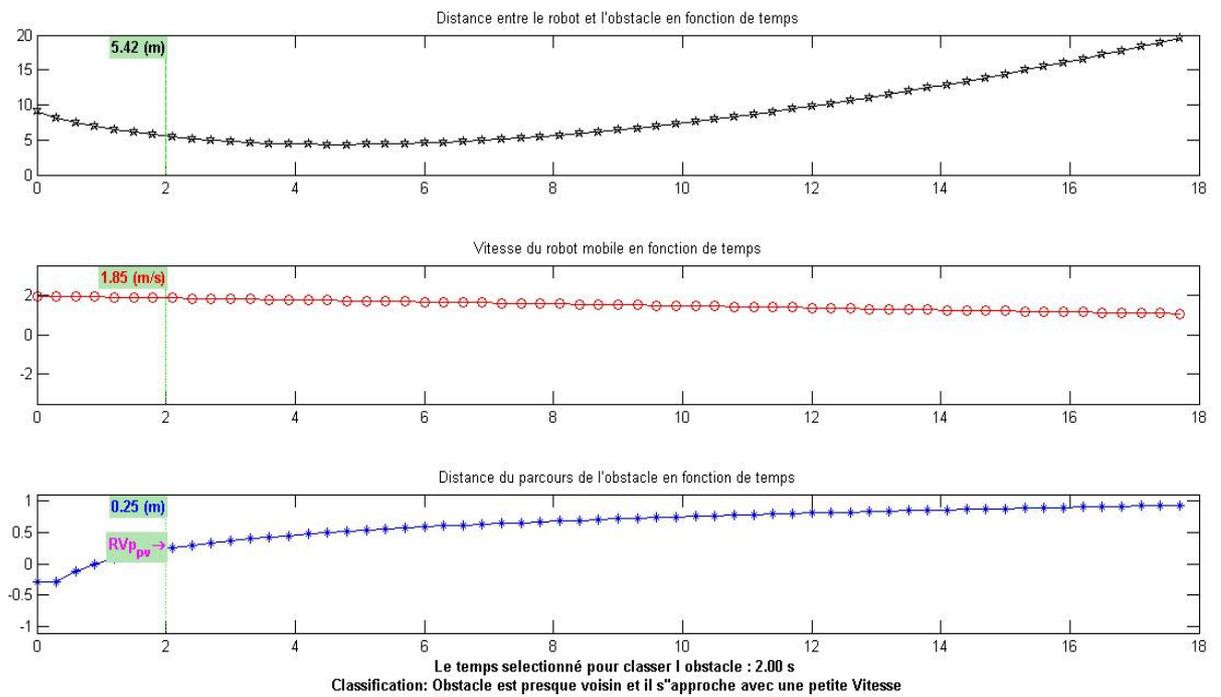


Figure III.24 cas d'un obstacle presque voisin et se rapprochant avec une petite vitesse à l'instant 2 s

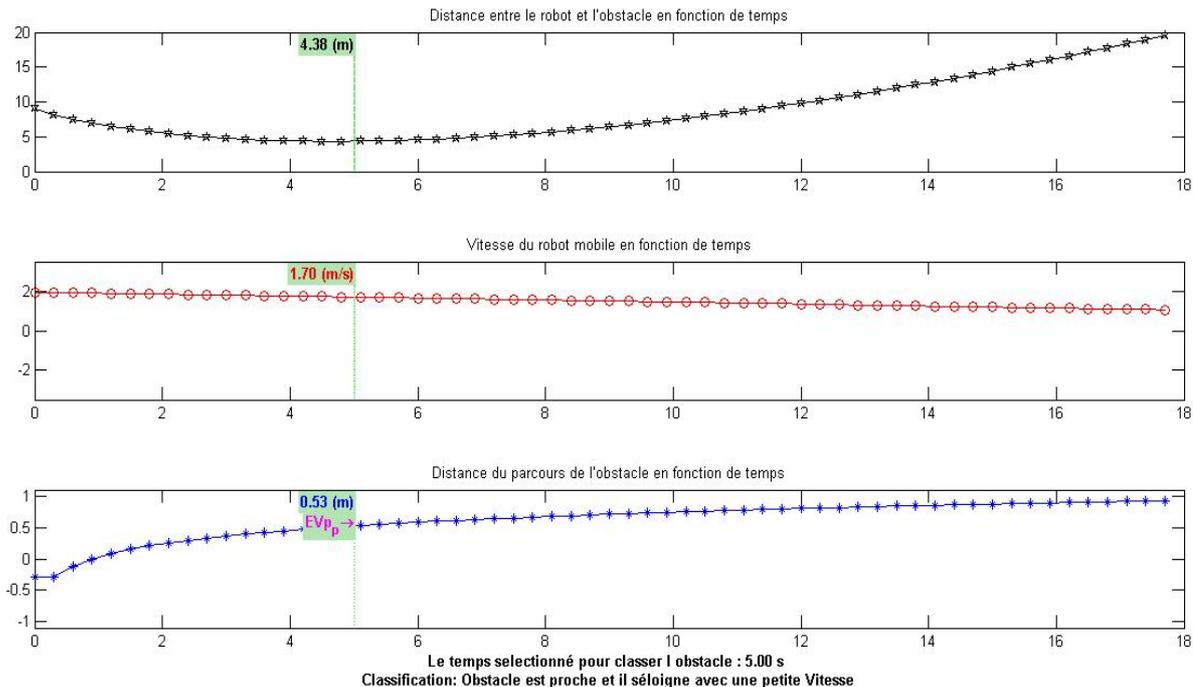


Figure III.25 cas d'un obstacle proche et s'éloignant avec une petite vitesse à l'instant 5.00 s

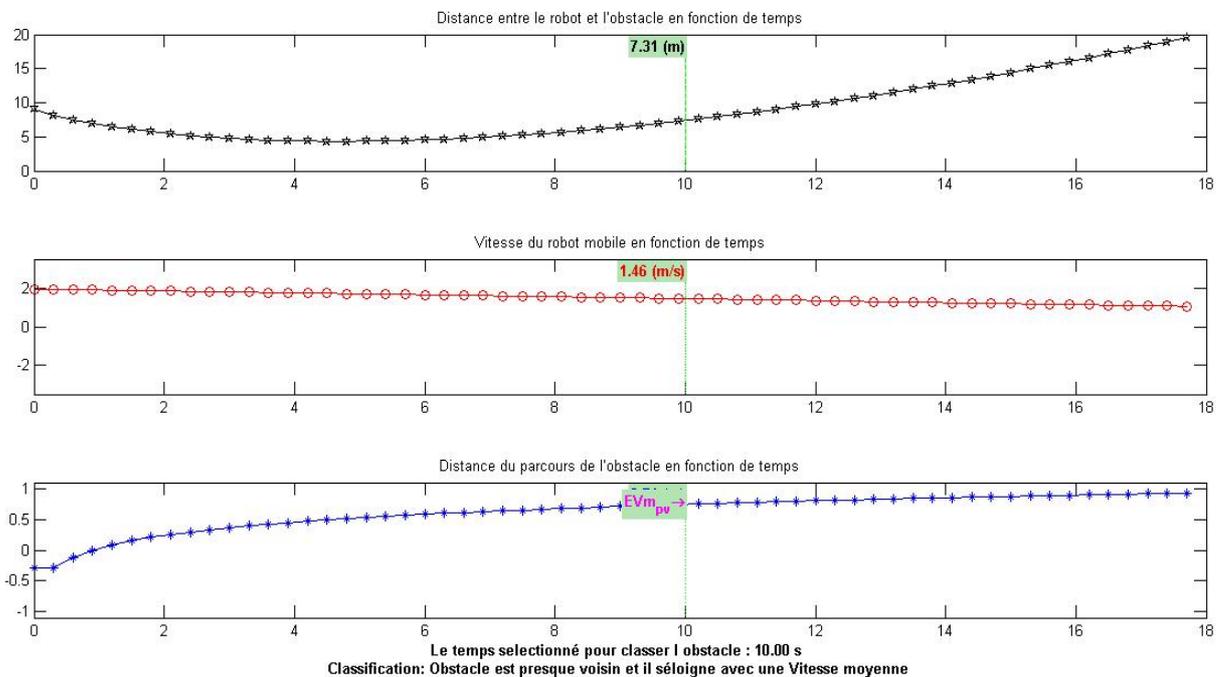
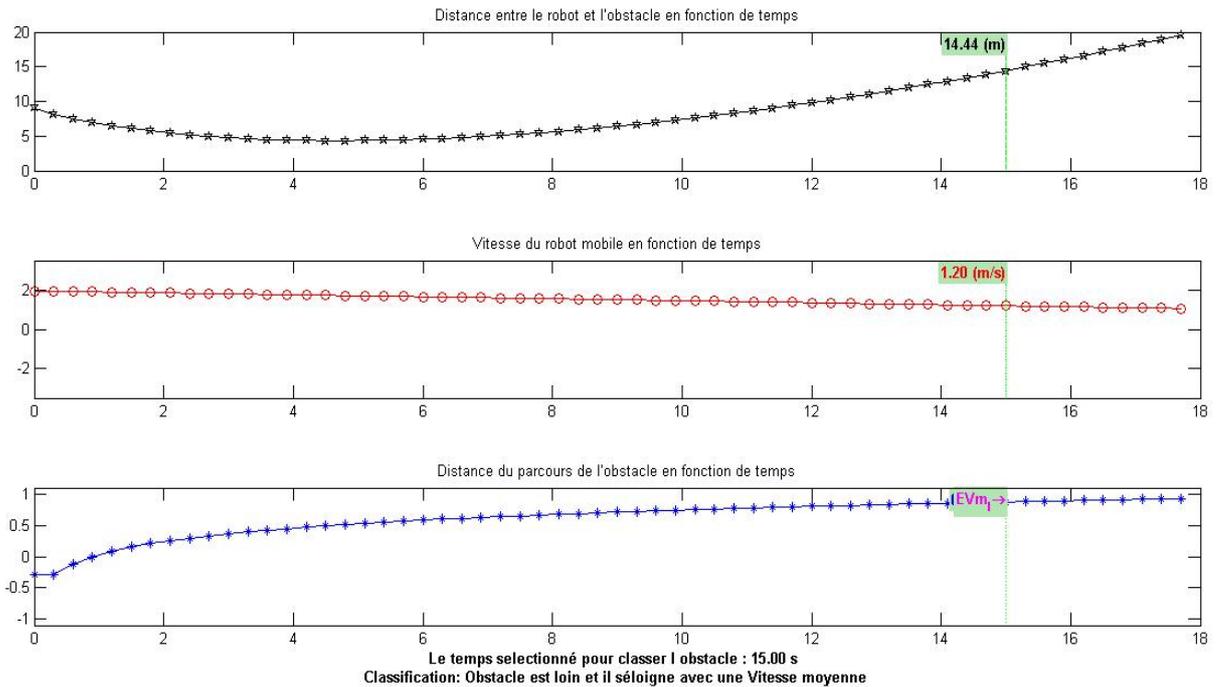


Figure III.26 cas d'un obstacle presque voisin et s'éloignant avec une vitesse moyenne à l'instant 10 s



**Figure III.27** cas d'un obstacle loin et s'éloignant avec une vitesse moyenne à l'instant 15 s

### III.3 Conclusion :

Le présent travail entre dans le cadre de développement des systèmes de décision des robots mobiles dans un environnement multi-agents. Il a été consacré notamment à l'étude des techniques de classification floues des signaux de système de perception.

Après avoir présenté l'utilité de la logique floue dans les problèmes de classification, des tests de simulation ont été montrés pour mettre en évidence la détection du comportement d'un obstacle. Enfin les résultats de simulation obtenus ont été présentés et des courbes de réponse sont données pour valider l'approche développée.

Les résultats obtenus ont été globalement satisfaisants. Toutefois, la conception du modèle flou a été laborieuse. L'intégration d'un algorithme de génération et de mise au point des fonctions d'appartenance pourrait améliorer considérablement les performances.

# Conclusion générale

## *Conclusion générale*

La tâche principale d'un robot mobile est sa mobilité, Son autonomie de déplacement d'une configuration initiale à une configuration finale, qui repose sur la fiabilité de son système de perception mais surtout sur sa capacité d'interprétation de l'information perçue. C'est ce qui a été réalisé dans ce mémoire.

Suite aux difficultés de modélisation d'environnements semi-dynamiques, nous avons utilisé la logique floue pour contourner ce problème et ainsi le robot peut prendre la décision adéquate pour éviter les obstacles.

Nous avons commencé avec l'objectif d'avoir une navigation autonome d'une paire de robots dans un environnement semi-dynamique ou l'un forme un obstacle pour l'autre. Nous avons conçu un classificateur flou qui permet de traduire les signaux perçus par le robot mobile en messages linguistique compréhensible par le bloc de décision.

Notre architecture a été simulée avec succès sur différentes configurations de l'agent et des robots ainsi que sur plusieurs environnements distincts. Le classificateur de robot mobile arrive toujours à classer l'obstacle. Ainsi ce classificateur flou peut être intégré dans des systèmes de robot mobile (systèmes multi-agents) afin de proposer le classement le plus fiable et le plus approprié.

Nous avons montré a travers ce travail, l'évidence des besoins et des exigences à respecter pour concevoir une architecture de classification.

# Références bibliographiques

# Bibliographie

- [1] F. GAMARCHI. Petits robots mobiles, étude et construction. ETSF, N° ISBN 2 10 004708 6, 2001.
- [2] J-Y. TIGLI. Vers une Architecture de contrôle pour Robot Mobile orientée Comportement. Thèse de doctorat, Université de Nice-Sophia, Antipolis, 1996.
- [3] E. BEAUDRY. Planification de tâches pour un robot mobile autonome. Faculté des sciences, université de Sherbrooke, Canada, 2006.
- [4] S. LENS. Locomotion d'un robot mobile. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liege, 2008.
- [5] F. LARGE. Navigation autonome d'un robot mobile en environnement dynamique et incertain. Thèse de doctorat, Institut National de recherche en informatique et en automatique, Université de Savoie, 2003.
- [6] R. SIEGWART, R. NOURBAKHSI. Introduction to autonomous mobile robots. The MIT Press, 2004. 155
- [7] J. G. AVINA. Navigation visuelle d'un robot mobile dans un environnement d'extérieur semi-structuré. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [8] B. BAYLE. Robotique mobile : note de cours. Ecole Nationale Supérieure de Physique de Strasbourg, 2009.
- [9] C. DURIEU. Algorithmes de localisation d'un robot mobiles dans un milieu balisé par mesure de distance ou d'angle de gisement. Thèse de Doctorat, Université de Paris sud, 1989.
- [10] K. NAGATANI, H. CHOSET et S. THRUN. Towards exact localization without explicit localization with the generalized Voronoi graph. In 154 Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, 342-348, 1998.
- [11] S. THRUN, A. BUCKEN. Integrating Grid-based and topological maps for mobile robot navigation. In Proceedings of the Thirteenth National Conference on Artificial Intelligence, pages 944-950, 1996.
- [12] P. REIGNIER. Pilotage réactif d'un robot mobile étude du lien entre la perception et l'action. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Grenoble, 1994.

[13] T. PEYNOT. Sélection et contrôle de modes de déplacement pour un robot mobile autonome en environnements naturels. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, LAAS/CNRS, Toulouse, Juillet 2006.

[14] J.C. LATOMBE. Motion Planning: A Journey of Robots, Molecules, Digital Actors, and Other Artifacts. The International Journal of Robotics Research, vol. 18, no. 11, 1999.

[15] D. FILLIAT. Robotique Mobile. École Nationale Supérieure de Techniques Avancées, France, 2005.

[16] A. DALGALARRONDO. A propos de l'autonomie des robots. Réf. document : CTA / 02 350 108 / RIEX / 807, Centre technique d'Arcueil, 2003.

[17] L. STEELS. When are robots intelligent autonomous agents?. Artificial Intelligence Laboratory , Vrije Universiteit Brusel Pleinlan2, Belgium, 1995.

[18] F. SEMPE. Auto-organisation d'une collectivité de robots : Application à l'activité de patrouille en présence de perturbations. Thèse de Doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris 6, 2004.

[19] P. SELLEM. Navigation coopérative par échange de représentations de l'environnement. Journées Francophones d'Intelligence Artificielle Distribuée et Systèmes Multi-Agents, France, octobre 2000.

[20] R. BROOKS. A robust layered control system for a mobile robot. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1986.

[21] C. GIOVANNANGELI, P. GAUSSIÉ. Navigation sensori-motrice visuelle sans carte. Laboratoire ETIS, UMR 8051, Equipe Neurocybernétique, Cergy-Pontois, France, 2003.

[22] N. R. JENNINGS, M. WOOLDRIDGE. Intelligent Agents : Theory and Practice. In Knowledge Engineering Review, United Kingdom, 10 (2). pp. 115-152, 1995. 152

[23] S. RUSSELL. Rationality and Intelligence. In Proc. Fourteenth International Joint Conference on Artificial Intelligence, Montreal, Canada, 1995.

[24] O. LABARTHE. Modélisation et simulation orientées agents de chaînes logistiques dans un contexte de Personnalisation de masse : modèles et cadre méthodologique. Thèse de Doctorat de l'université Paul CÉZANNE Faculté des Sciences et Techniques, 2006.

[25] B. CHAIB-DRAA, I. JARRAS. Aperçu sur les systèmes Multi-agents. Scientific Series, Montréal, Canada, 2002.

[26] R. LESSER, D. CORKILL. Use of Meta-Level Control for Coordination in a Distributed Problem-Solving Network. Department of Computer and Information Science, University of Massachusetts In IJCAI-83, 1983.

[27] H. TEGGAR. Navigation coopérative d'un système multi-robots dans un environnement dynamique et incertain. Thèse de magister, Université de Mascara, Algérie, Juin 2009.

[28] R. BROOKS. Robotics and Autonomous Systems. MIT Artificial Intelligence Laboratory, Cambridge, USA, 1990.

[29] P. LUCIDARME. Apprentissage Et Adaptation Pour Des Ensembles De Robots Réactifs Coopérants. 2003.

[30] G. Frappier – "*Système inertiels de navigation pour robots mobiles*" Séminaire "Les robots mobiles", EC2, Paris, 1990.

[31]. J. Boreinstein, L. Feng – "*Gyrodometry : a new method for combining data from gyros and odometry in mobile robots*" – Proc. of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, Minneapolis, Minnesota - April 1996.

[32] J. Vaganay – "*Conception d'un système multisensoriel de localisation dynamique 3D pour robot mobile*" – Thèse de doctorat, LIRMM, Montpellier, juillet 1993.

[33] P. Arnould – "*Etude de la localisation d'un robot mobile par fusion de données*" – Thèse de doctorat de l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Nancy, septembre 1993.

[34] J. Hollingum – "*Caterpillar make the earth move : automatically*" – Industrial Robot, Vol. 18, N°2, pp 15-18, 1991.

[35] K. Kemmotsu, T. Kanade – "*Uncertainty in object pose determination with three light-stripe range measurements*" – Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Atlanta (USA), pp. 128-134, May 1993.

[36] J-P. Perez – "*Optique- fondement et application*" – Collection Enseignement de la Physique, Ed. Masson, 1996.

[37] M. May – "*Introduction à l'optique - cours et problèmes résolus*" – Ed. Dunod, 1997.

[38] S. Baker and S. Nayar – "*A theory of catadioptric image formation*" – Proceeding of the 6<sup>th</sup> International Conference on Computer Vision, Bombay, India, pages 35-42, January 1998.

[39] E. Adelson and J. Bergen – "*The plenoptic function and element of early vision*" – In LANDY and MOVSHON, editors, Computational Models of Visual Processing, Chap I, MIT Press, 1991.

[40] A. Ohya, E. Shoji et S. Yuta – "*3-D range sensor using fiber grating for recognition of autonomous mobile robots passage space*" – International Conference on Intelligent Robots and Systems, 1994.

[41] D. Fofi – "*Détection d'obstacles par perception visuelle pour un robot mobile*" – Rapport de DEA, Ecole Nationale Supérieure de l'Electronique et de ses Applications, Université de Cergy-Pontoise, Août 1997.

[42] L. Matthies, E. Gat, R. Harrison, B. Wilcox, R. Volpe et T. Litwin – "*Mars microrover navigation : performance evaluation and enhancement*" – Autonomous Robot Journal, special issue on autonomous vehicle for planetary exploration, vol. 2, n. 4, 1995.

[43] I.S. Joung et H.S. Cho – "*Self localization for mobile robots by matching of two consecutive environmental range data*" – Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, pp. 1603-1608, Séoul, Corée, 21-26 mai 2001

[44] J. Borenstein – "*Internal correction of dead-reckoning errors with a dual-drive compliant linkage mobile robot*" – Journal of Robotic systems , Vol. 12, n°4, 1995, p. 257-273.

[45] H. Makela, K. Koskinen – "*Navigation of outdoor mobile robots using dead reckoning and visually detected landmarks*" – 5th Int. Conf. on Advanced Robotics ICAR'91, Pisa, Italy, June 1991, pp 1051-1056.

[46] J. Borestein, H.R. Everett, L. Feng et D. Wehe – "*Mobile robot positionning - Sensors and techniques*" – Journal of Robotic Systems, vol. 14, n. 4, p. 231-249, 1997.

[47] Y.J. Cui et S.S. Ge – "*Autonomous Vehicle Positioning with GPS in Urban Canyon Environments*" Proceedings of the 2001 IEEE International Conference on Robotics & Automation, Séoul, Corée, 21-26 mai 2001

[48] S. Kotani, K. Kaneko, T. Shinoda and H. Mori – "*Mobile Robot Navigation Based on Vision and DGPS Information*" – Proc. Of International Conf. on Robotics and Automation (ICRA'98), Belgium, pp. 2524-2530, May 1998.

[49] M. Drumheller – "*Mobile robot localization using sonar*" – IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 9, n°2, 1987, p. 325-332.

[50] J. Crowley – "*World modelling and position estimation for a mobile robot using ultrasonic ranging*" – Proc. of IEEE Conference on Robotics and Automation, Scottsdale, , p. 674-680, May 1989.

[51] A. Sabatini, O. DI Benedetto – "*Towards a robust methodology for mobile robot localisation using sonar*" – Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, San Diego, May 1994, p. 3142-3147. Références bibliographiques Page 152

[52] M. Kieffer – "*Estimation ensembliste par analyse par intervalles : Application à la localisation d'un véhicule*" – Thèse de doctorat, Université de Paris Sud Orsay, 1999.

[53] G. Weiss, C. Wetzler et E. Von Puttkamer – "*Keeping track of position and orientation of moving indoor systems by correlation of range finder scans*" – IEEE int. conf. on intelligent robots and systems IROS'94, septembre 94, Munich, Allemagne, pp. 595-601

[W1] [http://www.memoireonline.com/01/09/1842/m\\_Elaboration-ontroleuradaptatif-robot-mobile-base-sur-les-reseaux-immunitaires-artificiels3.html](http://www.memoireonline.com/01/09/1842/m_Elaboration-ontroleuradaptatif-robot-mobile-base-sur-les-reseaux-immunitaires-artificiels3.html)