

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure de la Recherche Scientifique



Université El-Hadj Lakhdar – BATNA –  
Faculté de Technologie

Département d'électronique



## Mémoire

*Présenté pour obtenir le diplôme de magister Electronique*

Option :

**Robotique**

Par :

Bouali Abdelmalek

Ingénieur d'état en électronique option : contrôle

**Thème**

# **Planification de trajectoire pour un robot mobile**

Soutenu le : 30 /06/2012

**Devant le jury :**

MELAAB Djamel.	MC.A	Président	U. Batna
AOUGHELLANET Said.	MC.A	Rapporteur	U. Batna
KHIREDDINE M <sup>ed</sup> Salah	MC.A	Examineur	U. Batna
MESSAI. Abderraouf.	MC.A	Examineur	U. Constantine

# Remerciements

Je remercie ALLAH qui est toujours présent avec moi dans le meilleur et dans le pire.

Je tiens en premier à exprimer ma profonde et sincère gratitude envers le Dr.

**S. AOUAGHELLANET** Dr. Chargé de Cours à l'université de Batna d'avoir proposé, dirigé et suivi ce travail.

Comme, j'exprime aussi ma gratitude à **Mr .D.MELAAB** Maître de conférences à l'université de Batna pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence du jury.

Mes vifs remerciements vont également au **Dr. A.MESSAI** Maître de conférences à l'université de Constantine et au **Mr .M.S KHIRDDINE** Dr. Chargé de Cours à l'université de Batna d'avoir acceptés d'examiner ce travail. Je remercie également **Mr .Y.ABDESSMED** Dr. Chargé de Cours à l'université de Batna, pour l'aide qu'il m'a apportée

Je n'oublierai jamais l'aide très précieuse et très généreuse du **Dr. L. SAIDI** Maître de conférences à l'université de Batna et du **Mr .L.GUEZLANE**.

Je tiens à remercier tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

# **Dédicace**

**A tous ce que j'aime .....**

## Liste des abréviations

**A\*** : C'est un algorithme de recherche de chemin dans un graphe

**CCM** : Continuous Conduction Mode

**DCM** : Discontinuous Conduction Mode

**CVM** : Curvature-Velocity Method

**DARPA** : Defense Advanced Research Projects Agency

**DSP** : Digital signal processor

**DW** : Dynamic Window

**EGNOS** : European Geostationary Navigation Overlay System

**GPS** : Global Positioning System

**ICS** : Etats de Collisions Inévitables

**LCM** : Lane Curvature Method

**MEMS** : Microelectromechanical Systems

**ND** : Nearness Diagram Navigation

**PWM** : Pulse-Width Modulation

**RRT** : Rapidly-exploring Random Trees

**RTK** : Real Time kinematics

**SIG** : Système d'Informations Géographiques

**SLAM** : simultaneous localization and mapping

**SMPS** :switched-mode Power Supply

**VFH** : Vector Field Histogram

**VO** : Velocity Obstacles

## TABLE DE MATIERE

**Remerciement et dédicaces**  
**Liste des abréviations**  
**INTRODUCTION GENERALE**

### **Chapitre 01 : Introduction à la Robotique Mobile**

1-Introduction	1
1. Robot mobile autonome	1
2. Les différents types de terrain	3
III. Modélisation	6
1. Classification des types de roues	6
2. Principales structures cinématiques	7
3. Roulement avec ou sans glissement	10
IV. Détection d'obstacles et localisation	11
1. Détection d'obstacles et cartographie	12
2. Fusion de données multi capteurs et cartographie	13
3. Localisation	15
4. Localisation et cartographie simultanées	19
V. Les verrous scientifiques	20
Conclusion	21

### **Chapitre 02 : Approches de Navigation en Environnement Dynamique.**

2.1 Introduction	23
2.2 Approches délibératives	24
2.2.1 Définition du problème	24
2.2.2-Méthodes par graphes	26
Echantillonnage par grilles régulières	29
Méthodes de replanification	34
2.2.3 Méthodes par arbres	34
2.2.4 Complexité des approches délibératives	37
2.3 Approches réactives	38
2.3.1 Approches par champs de potentiel	38
2.3.2 Histogramme de champs de vecteurs	39

2.3.3	Navigation par diagrammes de proximité	41
2.3.4	Méthode de navigation courbure-vélocité	42
2.3.5	Fenêtre dynamique	43
2.3.6	Représentation des obstacles dans l'espace des vitesses	45
2.3.7	Navigation basée sur les états de collisions inévitables	46
2.3.8	Planification de mouvement partiel	48
2.3.9	Défaut de convergence vers le but	48
2.5	Conclusion	49

### **Chapitre 03 : Conception et réalisation de la plateforme mobile.**

3.1.	Introduction	51
3.2.	Le cahier de charge	51
3.3	La réalisation pratique	51
3.3.1	Disposition des éléments	52
3.4	Description de la base	52
3.4.1	Roues-libres	53
3.4.2	Capteur de position	55
3.4.3	Le système roue motrice - axe - poulie	55
3.4.4	Moteurs	57
3.4.4.1	Le principe de fonctionnement d'un moteur série universel	58
3.5.	Le boîtier des circuits	59
3.5.1	Capteur ultrason	61
3.6.	Etage de puissance	62
3.6.1-	Schéma synoptique de l'étage de puissance	63
3.6.2-	Choix des batteries	63
3.6.3	Principe de fonctionnement l'hacheur parallèle	64
3.6.4	Analyse du fonctionnement à courant de source ininterrompu :	64
3.6.5	Analyse du fonctionnement à courant de source interrompu :	68
3.7	L'isolation galvanique :	72
3.7.1	Les optocoupleurs :	72
3.7.1.2	Principe :	72
3.8.	La conclusion	73

### **Chapitre 04 : Etude et réalisation d'une carte de commande analogique pour appliquer**

## la méthode de champs de potentiel

4.1. Introduction	74
4. 2. Le schéma synoptique de la carte de commande analogique	74
4.3. Le principe de fonctionnement de la carte	74
4.4. Le module émetteur ultrason	75
4.4.1. Le générateur de signal carre	75
4.4.2. Multivibrateur astable	75
4.4.3. Principe de fonctionnement.	76
❖ Calcul de la période.	76
❖ Détermination des valeurs des composants	77
❖ Transistor 2N1711	78
4.5. Le module récepteur ultrason	78
4.5.1. Amplification	78
4.5.1.2. Montage inverseur	78
4.6. Le module redressement	79
4.6.1. Redressement simple alternance	79
❖ Calcul du signal dû au redressement	80
4.6.2. Détecteur de Crête	80
4.7. Montage suiveur	81
4.8. Le module générateur PWM	81
4.8.1. Générateur de signal dent de scie.	82
4.8.1.1. Fonctionnement du générateur de signal triangulaire	82
4.8.2. Comparateur	83
4.8.3. Génération de PWM	84
4.9. Le principe d'évitement d'obstacle par la carte analogique	84
4.10. Déférente situation de la navigation de la plateforme mobile	91
4.11. Les résultats obtenus	92
4.12. La conclusion	97
CONCLUSION GENERALE	
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	
ANNEXES	

# **INTRODUCTION GENERALE**

Depuis fort longtemps, l'homme rêve de créer des machines intelligentes capables d'effectuer des tâches à sa place.

Ainsi, les humains auraient plus de temps à consacrer pour leur loisir, ou prendraient moins de temps et de risques pour effectuer des tâches dangereuses.

Les récents développements de la microélectronique, notamment les MEMS et les réseaux de capteurs, semblent mener le domaine de la robotique mobile vers des horizons fort prometteurs. En effet, de plus en plus de compagnies privées ou même des particuliers sont demandeurs d'appareils mobiles autonomes, que ce soit en sécurité, entretien ou même en loisir.

Le développement de la robotique mobile est synonyme de développement des techniques de commande; on cherche à intégrer des techniques de plus en plus performantes sur des structures de plus en plus compactes. Les méthodes de navigation sont variées, et les théories se multiplient et s'approfondissent.

Parmi les techniques de navigation, citons celle des champs de potentiels artificiels. Cette méthode introduite dans les années soixante-dix s'inspire de la théorie des champs électriques et gravitationnels. Elle permet avec une grande simplicité de réaliser la navigation d'un robot dans diverses conditions, notamment sans connaissance à priori de l'environnement.

Dans ce mémoire on entreprend d'approfondir le développement des champs de potentiels. On applique la méthode développée à un robot mobile afin d'en illustrer les améliorations et les limitations.

Le premier chapitre est une introduction générale à la robotique mobile à roues, il présente les aspects de perception et de contrôle des robots autonomes, ainsi que les thématiques de recherche associées.

Dans le deuxième chapitre, on expose un état de l'art non exhaustif des approches de détermination de mouvement en environnement dynamique.

Dans le troisième chapitre, on présente la conception de la plateforme expérimentale (Aurès robot) réalisée qui se compose de la structure mécanique dotée de capteurs et d'un étage de puissance.

Dans le dernier chapitre du rapport on conçoit un système de commande pour la plateforme et on traite des résultats théoriques et pratiques des essais effectués.

La conclusion vient présenter une brève synthèse du travail réalisé en récapitulant les principaux fondements théoriques derrière la méthode et en proposant des perspectives qui seraient susceptibles d'aboutir à de nouvelles améliorations.

# **Chapitre 1**

## **Introduction à la Robotique Mobile**

## 1-Introduction

L'objectif de ce chapitre, dans le contexte de la robotique mobile, est de sensibiliser le lecteur sur les travaux qu'il reste à mener pour aboutir à la réalisation d'un robot mobile totalement autonome. Après une présentation des différents types de robots mobiles, et des contraintes de terrain sur lesquels ils sont conçus pour évoluer, nous aborderons les contraintes principales liées à leur cinématique, et les solutions développées pour y remédier. Enfin nous étudions les outils permettant aux robots de percevoir leur environnement et de s'y repérer. Etape primordiale nécessaire à l'autonomie totale des robots mobiles.

Cet état de l'art offre une vision non exhaustive des thématiques de recherche associées au domaine de la robotique mobile, et présente l'ensemble des verrous scientifiques qu'il reste à lever pour aboutir au développement d'un robot autonome. Parmi ceux-ci, nous nous focalisons alors sur celui de la navigation d'un robot mobile.

### 1. Robot mobile autonome

Pour commencer, il nous faut expliciter la notion de robot mobile. En robotique, on distingue les robots en deux principaux types : les robots manipulateurs et les robots mobiles. Les robots manipulateurs ont une base fixe contrairement aux robots mobiles qui peuvent se déplacer. Ainsi pour étudier les déplacements de ces robots, nous pouvons soit utiliser un repère allocentrique (absolu), soit un repère égoцентриque (fixé sur le robot).

Bien souvent, quand on parle de robotique mobile, on sous entend robots mobiles aux roues. Ce sont en effet les systèmes les plus étudiés, parce qu'ils sont plus simples à réaliser que les autres types de robots mobiles, ce qui permet d'en venir plus rapidement à l'étude de leur navigation. Ce type de robots est notamment très souvent utilisé pour l'étude des systèmes autonomes. Vient ensuite la robotique mobile à pattes, avec notamment la robotique humanoïde, mais également des robots avec un nombre de pattes plus élevés qui offrent de bonnes propriétés pour la locomotion en milieu difficile (milieux forestiers et agricoles). La stabilité des mouvements de ce type de robots est en particulier un thème de recherche important [1]. Enfin il existe également de nombreux autres types de robots mobiles (robots marins [2], sous marins [3], drones volants, micro et nanorobots). Généralement l'étude de ce type de robots se fait dans

des thématiques spécifiques avec des problèmes particuliers à l'application visée.

Il existe 2 principaux modes de fonctionnement pour un robot mobile : télé-opéré et autonome. En mode télé-opéré, une personne pilote le robot à distance, elle donne ses ordres via une interface de commande (joystick, clavier/souris...), et ceux-ci sont envoyés au robot via un lien de communication (internet, satellite ...). D'ailleurs, suivant le niveau de téléopération, le terme « robotique » est plus ou moins justifié. Le robot doit donc obéir aux ordres de l'opérateur qui perçoit l'environnement autour du robot, par différents moyens (retour d'image, retour haptique...), de manière à donner des ordres adaptés au robot. Dans ce domaine, les efforts de recherche sont beaucoup portés sur les problèmes liés au réseau de télécommunication (retards dans le réseau de communication, problèmes de commande, pertes de données) et sur l'amélioration de la perception de l'environnement par l'opérateur (interfaces haptiques, retours d'efforts).

A l'inverse, en mode autonome le robot doit prendre ses propres décisions. Cela signifie qu'il doit être capable à la fois de percevoir correctement son environnement, mais également de savoir comment réagir en conséquence, suivant le niveau d'autonomie. C'est à lui de planifier son parcours et de déterminer avec quels mouvements il va atteindre son objectif. Les recherches dans ce domaine portent principalement d'une part sur la localisation du véhicule autonome et la cartographie de son environnement, d'autre part sur le contrôle de tels véhicules (structure de contrôle, stratégies de commande, planification).

Cette notion d'autonomie prise en exemple ci-dessus, que nous pourrions qualifier de décisionnelle, ne doit pas être confondue avec celle d'autonomie énergétique (capacité du robot à gérer efficacement son énergie, à la préserver, voire à se ravitailler), même si ces deux notions sont étroitement liées : idéalement une des préoccupations principales d'un robot mobile totalement autonome (du point de vue décisionnel), serait en effet de pouvoir gérer de lui-même ses réserves d'énergie.

Voyons maintenant les différents types d'environnement dans lesquels les robots mobiles sont amenés à se mouvoir.

## 2. Les différents types de terrain

Nous rencontrons principalement 3 types d'espaces de navigation : les terrains plats, les terrains accidentés et les espaces 3D. Les terrains plats sont généralement utilisés pour modéliser les milieux urbains et les intérieurs de bâtiments. Le robot évolue sur un plan 2D considéré sans pentes, et tout objet qui sort de cet espace 2D est considéré comme un obstacle (Figure 1- *Robucab* [4]). Cette représentation est la plus simple à étudier et la plus répandue pour les robots mobiles aux roues. En première approche, elle permet de se concentrer sur les problèmes de contrôle et de navigation autonome du robot.



Figure 1- *Robucab* [15]

Les terrains accidentés (ou 2D **1/2** ) correspondent généralement aux milieux en extérieurs, comme des forêts, des champs en robotique agricole, ou encore des terrains rocheux (Figure 2). La différence avec les terrains plats est la présence des pentes, de bosses et de creux sur le terrain d'évolution du robot. Cela interdit d'utiliser une métrique standard 2D et cela complique pour beaucoup la détection d'obstacles et la modélisation des déplacements du robot. De plus il devient également important de vérifier que le robot ne bascule pas quand il escalade une pente ou enjambe un obstacle. Le système de locomotion du robot doit dans ce cas être adapté à la topologie du terrain.



**Figure 2-** Le robot martien Sojourner [5]

Enfin les espaces d'évolution 3D sont par exemple utilisés pour modéliser la navigation des drones volants (Figure 4) et des robots sous-marins (Figure 3). Les problèmes rencontrés sont spécifiques à l'application visée.

Chaque type de terrain correspond à des problématiques bien spécifiques. Le type de robot étudié dans ce mémoire est celui destiné à circuler en environnement urbain, la modélisation terrain plat sera utilisée. Cela signifie que l'on considère que tous les mouvements sont contenus dans un plan de navigation, parallèle au sol.

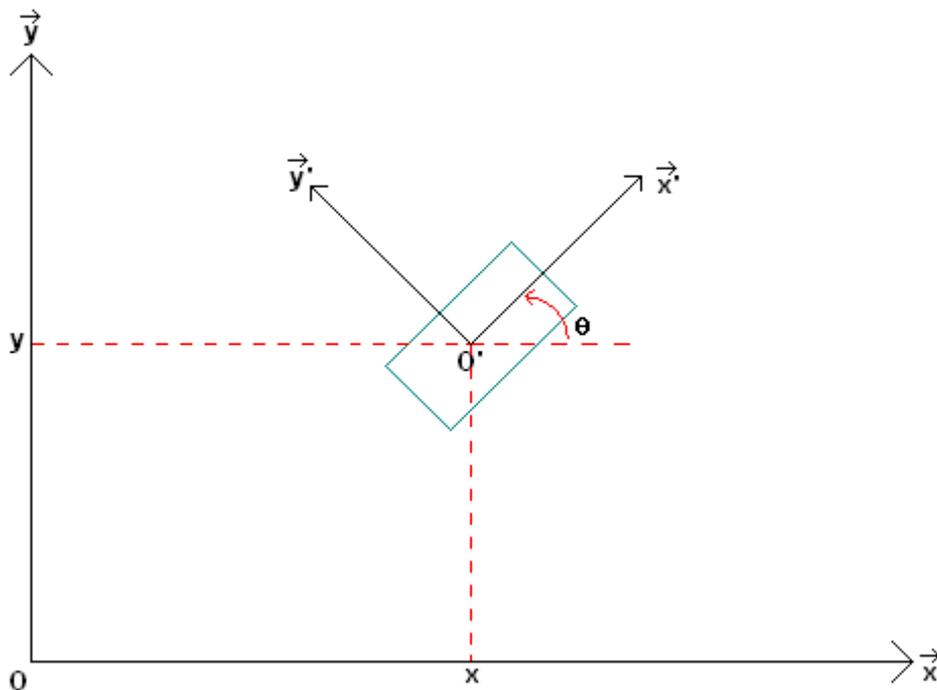


**Figure 3-** Le robot sous marin TAIPAN[21] **Figure 4-** Drone de surveillance RESSAC de l'ONERA[7]

Pour la modélisation terrain plat, nous définissons un repère absolu (fixé dans l'environnement)  $R = (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$  donc l'axe  $\vec{z}$  est perpendiculaire au sol. Nous définissons un repère mobile lié au robot  $\hat{R} = (O', \vec{x}', \vec{y}', \vec{z})$  dit égocentrique. Le point  $O'$  est le point de contrôle du robot. Généralement, sur un robot type voiture, le point de contrôle est fixé au centre de l'essieu non directeur. Ce repère égocentrique se déplace avec le robot. Pour réaliser une navigation, l'état du robot est totalement défini par le vecteur :

$$X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \\ s \end{bmatrix}$$

dans lequel  $\theta$  désigne l'orientation du robot dans le plan  $(0, x, y)$  et  $s$  sa vitesse curviligne (Figure 5).



**Figure 5-** Modélisation du robot dans le repère absolu

La section suivante présente différents aspects de la modélisation sur un sol plat : la classification des différents types de roues, les configurations holonomes et non holonomes, et la gestion des glissements dans le modèle.

### III. Modélisation

#### 1. Classification des types de roues

La mobilité d'un robot mobile dépend grandement du type de roues utilisé. Dans [6], Campion a présenté une classification des différents types de roues et configurations rencontrées en robotique mobile. Les différents types de roues que l'on rencontre sont :

- la roue fixe : cette roue n'autorise qu'un déplacement dans la direction de son plan médian, l'orientation n'est pas modifiable,
- la roue centrée orientable : elle possède un axe d'orientation en plus de l'axe de rotation, et cet axe d'orientation passe par le centre de la roue,
- la roue décentrée orientable ou roue folle : son axe d'orientation ne passe pas par le centre de la roue (c'est le cas par exemple des roues des chaises des bureaux)

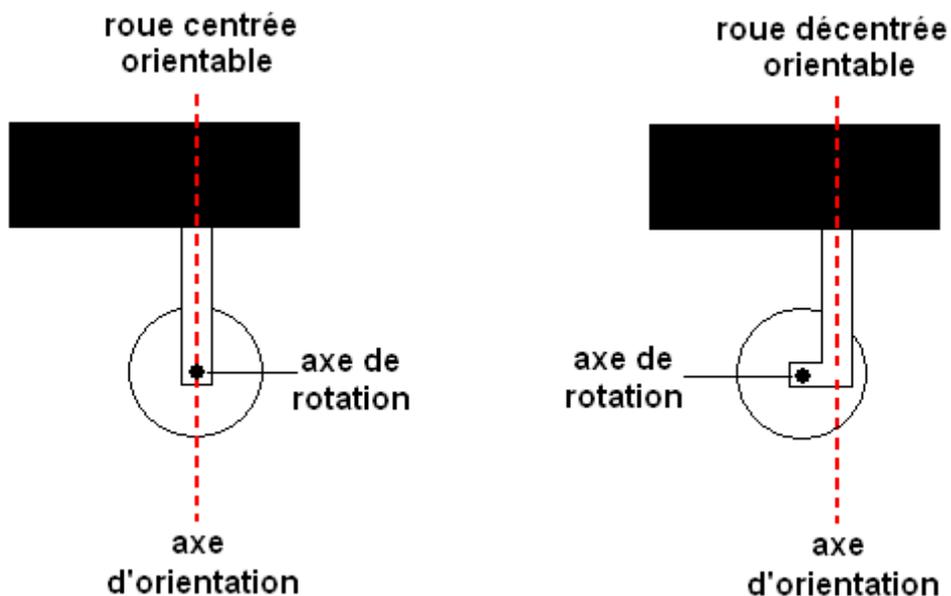


Figure 6- Roue centrée et roue décentrée

En plus de ces roues classiques (Figure 6), d'autres roues ont été développées pour accroître la mobilité du robot. Elles permettent d'augmenter les capacités de déplacement dans toutes les directions du plan (Figure 7). Cependant, elles ne sont commandables que dans certaines de ces directions. Dans cette catégorie nous trouvons notamment :

- les roues suédoises : ces roues autorisent les glissements latéraux grâce à un système de galets remplaçant la bande de roulement classique, montés en inclinaison par rapport au plan de la roue. La combinaison de la rotation de la roue avec la rotation libre du galet en contact avec le sol permet le déplacement sans glissement sur le sol dans toutes les directions. Cependant le couple moteur que l'on peut transmettre à ces roues est très limité, ce qui réduit son utilisation en pratique.
- les roues tronco-sphériques (ou orthogonal wheels) [8] : cette structure utilisant deux roues libres en quadrature présente l'avantage de pouvoir transmettre un couple intéressant par rapport aux roues suédoises, mais elle souffre de petits problèmes de sauts au moment de la transition d'une roue support à l'autre.

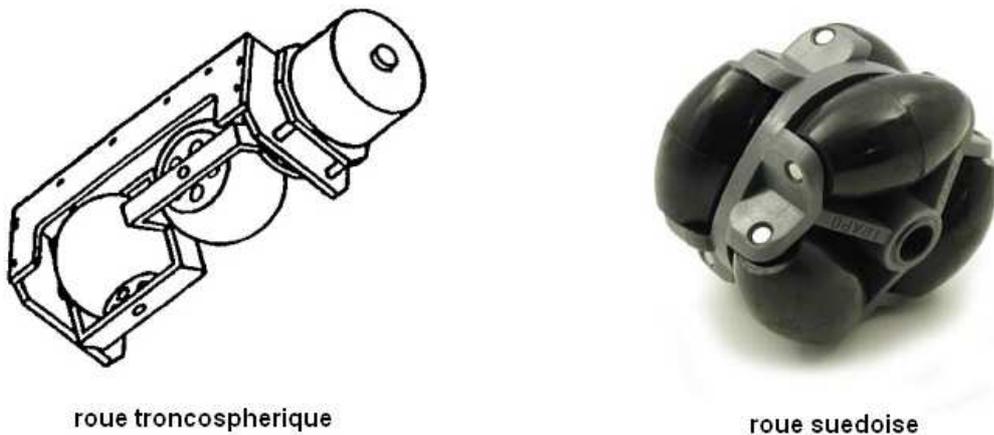


Figure 7- Roue troncsphérique et roue suédoise

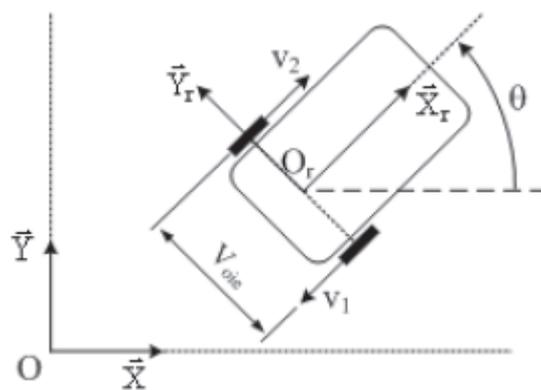
## 2. Principales structures cinématiques

En associant les différents types de roues selon une structure mécanique donnée, le robot mobile disposera de plus ou moins de mobilité. Le nombre, le type et la disposition des roues engendrera ou non la contrainte de non holonomie du robot. Si on néglige les phénomènes dynamiques tel que l'inertie, un robot holonome est un robot capable à chaque instant de se déplacer dans n'importe quelle direction du plan, sans avoir à effectuer une reconfiguration de ses roues.

Tout système évoluant dans un plan 2D possède 3 degrés de liberté : une translation selon l'axe x, une translation selon l'axe y et une rotation autour d'un axe z normal à  $(\tilde{x}, \tilde{y})$  Cependant



- les roues différentielles (Figure 9) : cette structure également classique est constituée de deux roues motrices placées sur le même axe, et d’au moins un appui supplémentaire (généralement une ou deux roues folles). L’avantage de cette structure est qu’elle permet au véhicule de tourner sur place. Suivant si les vitesses de rotation des deux roues motrices sont de signe opposées ou pas. Ainsi le robot peut pivoter rapidement, ce qui donne des capacités de déplacement intéressantes. Cependant, le déplacement latéral n’étant pas directement réalisable, cette structure n’est pas non plus holonome.



**Figure 9-** Modèle roues différentielles

En utilisant des roues telles que les roues suédoises ou tronco-sphériques sur des plateformes mobiles, des robots ayant la capacité de se mouvoir dans toutes les directions ont été créés. Ces robots, à 3 degrés de mobilité dits omnidirectionnels, permettent de s’affranchir de la contrainte de non holonomie. Leurs structures spécifiques leur permettent de se déplacer instantanément (à la dynamique près) dans toutes les directions en ayant n’importe quelle orientation, rendant possible le suivi de trajectoires de forme quelconque (Figure 10).

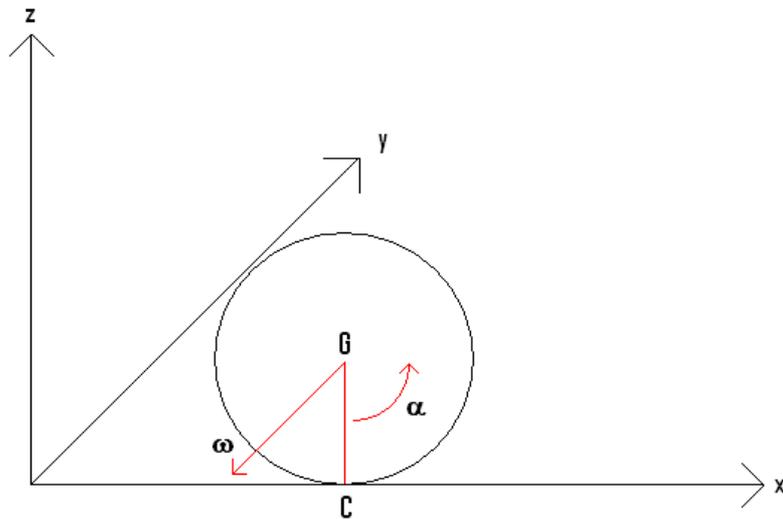


**Figure 10-** Le robot omnidirectionnel ROMNI [9]

### 3. Roulement avec ou sans glissement

La locomotion se fait grâce au frottement entre la roue du véhicule et le sol, et l'efficacité du mouvement dépend notamment du type de sol. Pour que l'hypothèse du roulement sans glissement soit validée, il faudrait théoriquement que le contact sol/roue ne se fasse qu'en un point, que le sol soit parfaitement plat, et que le rayon de la roue soit parfaitement constant sur toute sa périphérie.

Soient C le point de contact entre la roue et le sol, G le centre de rotation de la roue et  $\dot{\alpha}$  sa vitesse de rotation (Figure 11).



**Figure 11-** Roulement sur le sol

Mathématiquement, cette contrainte revient à dire que la vitesse de C par rapport au sol est nulle, ce qui peut s'écrire grâce à la loi de composition des vitesses :

$$\begin{aligned} \vec{V}_G + \vec{CG} \wedge \vec{\omega} &= \vec{0} \\ \dot{x}\vec{x} + R\vec{z} \wedge (-\dot{\alpha}\vec{y}) &= \vec{0} \\ \dot{x}\vec{x} + \dot{\alpha}R\vec{z} &= \vec{0} \\ \dot{x} &= -\dot{\alpha}R \end{aligned}$$

On en déduit que, pour vérifier la contrainte de roulement sans glissement, le mouvement doit rester dans le plan de la roue avec la vitesse curviligne  $\dot{\alpha}R$ .

En réalité, le contact sur le sol se fait sur une surface avec le pneu de la roue. Les glissements sur le sol sont une source d'erreur importante pour certaines méthodes de localisation. Cela est notamment le cas pour l'odométrie classique, qui s'appuie sur cette hypothèse pour déterminer la position relative d'un robot par rapport à son point de départ, à partir de la mesure du nombre de tours parcourus par chaque roue. On sait que dans ce cas l'intégration des dérives dues aux glissements, entraîne sur un parcours complet d'importantes erreurs de localisation.

Dans certaines applications robotiques, la précision du déplacement est un facteur important, il est alors nécessaire de prendre en compte les glissements dans la modélisation du robot. Il existe deux principales approches pour les intégrer : soit on passe à un modèle dynamique du robot, soit on reste sur un modèle cinématique classique (roulement sans glissement) dans lequel on introduit les effets du glissement sous forme de paramètres supplémentaires. La modélisation dynamique des phénomènes de glissements est plus complète mais elle requiert d'une part la mesure ou l'estimation, en temps réel, d'un grand nombre de paramètres tels que les coefficients de frictions, et d'autre part de paramètres supplémentaires inhérents à l'état des pneumatiques [10] [11]. Ces nombreux paramètres ne sont pas triviaux à obtenir en ligne, ce qui limite l'utilisation de tels modèles en pratique. Les modèles cinématiques, modifiés pour intégrer les glissements, s'avèrent plus simples à mettre en oeuvre de part le nombre réduit de paramètres à estimer (on ne modélise plus les phénomènes complets de glissement, mais juste leur effet sur la cinématique du véhicule), et ils permettent tout de même de prendre en compte avec une très bonne précision les phénomènes de glissement. Par exemple, dans [12], Lenain développe un modèle cinématique étendu qui lui permet d'améliorer la précision du suivi de trajectoire par un véhicule agricole sur un terrain particulièrement glissant.

#### ***IV. Détection d'obstacles et localisation***

La perception de son environnement d'évolution est la base de tout système autonome. Sans une bonne perception et interprétation de ce qui l'entoure, un robot ne peut pas prendre de décision correcte. Cette partie vise à décrire les différents moyens mis à disposition au robot pour localiser les obstacles qui l'entourent. Ensuite les différentes méthodes de localisation du robot lui-même sont abordées. L'idée est de permettre au final de créer un modèle, plus ou moins simplifié, des interactions entre le robot et son environnement. Cette étape est nécessaire et primordiale pour la navigation d'un robot mobile autonome.

Pour cela, un robot est équipé de capteurs proprioceptifs qui fournissent des informations sur le robot lui-même, et extéroceptifs qui fournissent des informations sur ce qu'il y a autour de lui (son environnement).

## 1. Détection d'obstacles et cartographie

Les capteurs permettant de fournir des informations sur l'environnement extérieur peuvent être classés en deux catégories, passives et actives [13]. Dans le premier cas, on se contente de recueillir et d'analyser une énergie fournie par l'environnement, typiquement la lumière. Dans le second cas, c'est au capteur de générer une énergie, et de récupérer cette énergie après interaction sur le milieu extérieur. C'est le principe de base des télémètres (capteurs de mesures de distances), qui sont largement utilisés pour tracer des cartes en ligne de l'environnement dans lequel évolue le robot. Les télémètres laser à balayage sont fréquemment utilisés pour la navigation de robots avec de très bonnes performances notamment en intérieur.

Le principe de ces télémètres repose sur le calcul du temps aller-retour mis par une impulsion lumineuse pour revenir sur le capteur. Une onde infrarouge de faible puissance est émise par la diode laser, et au même moment un chronomètre informatique est lancé. L'onde se réfléchit sur le premier objet rencontré en chemin, et revient sur le détecteur du capteur. Le temps mis par l'onde pour faire l'aller-retour permet de déterminer la distance de l'objet. Un miroir tournant motorisé permet de balayer toute une gamme d'angles devant le télémètre. Dans le plan de balayage qui est parallèle au sol. La précision de ces appareils et leur robustesse aux variations de température en font des outils très intéressants pour les applications en robotique mobile de faible/moyenne vitesse.

Les capteurs ultrasonores utilisent des ondes sonores de fréquence non perceptible par l'oreille humaine, généralement dans la fourchette 20-200 khz. De la même manière que les télémètres laser, ils sont basés sur le principe de la mesure du temps aller-retour lors de la réflexion sur un obstacle. C'est la méthode employée par certains animaux pour percevoir leur environnement, comme les chauves-souris ou les dauphins : l'écholocalisation. Un avantage de ces capteurs est que contrairement aux télémètres, l'onde qu'ils émettent n'étant pas focalisée, ils perçoivent beaucoup plus facilement des éléments filiformes comme des pieds de chaises ou des grillages. Par contre leur portée est faible, et ils sont moins adaptés aux milieux de propagation non isotropes comme l'air.

Un des inconvénients des capteurs ultrasonores par rapport aux télémètres lasers est la divergence importante du faisceau ultrasonore, qui s'apparente plus à un cône qu'à un faisceau. Généralement l'ouverture de l'angle est de plusieurs dizaines de degrés, ce qui rend la localisation des obstacles imprécise. Ces capteurs sont donc plutôt utilisés pour des mesures à courte distance (de quelques centimètres à quelques mètres). Ils sont relativement sensibles aux variations de température, et la fréquence de mesure dépend de la distance maximale de détection (plus cette distance est grande, moins la fréquence d'acquisition des mesures est élevée). L'avantage de ces capteurs est qu'ils sont moins onéreux qu'un télémètre laser, et ils sont souvent utilisés dans des applications en intérieur avec des espaces de navigation assez restreints.

Les capteurs passifs se servent directement de l'énergie émise par l'environnement. C'est typiquement le cas des systèmes de vision par caméra en stéréo vision. La reconnaissance de primitives entre deux images permet d'évaluer la position/orientation d'un objet, et ainsi d'évaluer la profondeur. L'utilisation simultanée de deux caméras est cependant nécessaire pour y parvenir. Plus de deux caméras peuvent également être utilisées, de manière à améliorer la robustesse de la méthode.

La vision omnidirectionnelle s'avère également très intéressante dans le cadre d'applications en robotique mobile, dans le sens où elle permet de surveiller en même temps tout ce qui se passe autour du robot. La caméra est placée face à un miroir parabolique ou hyperbolique. L'image est complètement distordue ce qui complique la mesure de distances, mais l'aspect vision panoramique offre des avantages pour l'évitement d'obstacles dynamiques en environnement structuré. Les verticales deviennent des radiales, et les horizontales des arcs de cercle. L'utilisation de systèmes à base de vision est fortement développée, et pas seulement dans le domaine de la robotique. Mais globalement, ce type de système reste fortement tributaire de la qualité de l'énergie recueillie : influence de la luminosité ou encore du contraste.

## **2. Fusion de données multi capteurs et cartographie**

La localisation d'un robot mobile s'effectue par la mise en correspondance de différentes sources extéroceptives et proprioceptives. Généralement il s'agira de confronter les mesures de déplacements prises par odométrie avec une méthode de localisation absolue : soit reconnaissance et calcul de distance par rapport à des balises de position connue, soit mise en correspondance avec une carte construite en ligne et/ou présente dans une base de

données, soit encore localisation externe du robot par des capteurs dans l'environnement (GPS). Le principe le plus simple pour effectuer cette mise en correspondance, consiste à utiliser les mesures de localisation absolue pour recalculer périodiquement l'état du robot, obtenu par intégration des déplacements mesurés par l'odomètre. Cette méthode, bien que simple à utiliser, présente le problème de ne pas utiliser conjointement les différents moyens de mesure, mais successivement. Ainsi on ne tient pas compte des incertitudes liées tant à l'odométrie qu'à la méthode de localisation absolue.

Cependant nous savons que quelque soit la technologie utilisée pour la prise d'informations, aucune mesure n'est parfaite, il existe toujours une part d'incertitude sur celle-ci. Ces incertitudes peuvent provenir soit du principe de mesure lui même, soit des imperfections technologiques. Typiquement pour une mesure de distance avec un télémètre laser, on trouve des erreurs systématiques d'une quinzaine de millimètres en moyenne (erreur constante intrinsèque au télémètre utilisé), et une erreur statistique de 5 mm environ. Lorsque plusieurs méthodes de mesure sont utilisées conjointement, le principe utilisé pour mettre en concordance les informations consiste à effectuer une moyenne pondérée des différentes mesures par la confiance que l'on accorde à chacune (inversement à leur variance donc). Soit deux mesures  $z_1$  et  $z_2$  d'une même variable  $x$ , obtenues par des capteurs différents, avec des variances associées  $\sigma_1^2$  et  $\sigma_2^2$ , alors la loi de Bayes nous donne la valeur estimée de  $x$ :

$$\hat{x} = \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} z_1 + \frac{\sigma_1^2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} z_2$$

et la variance associée à l'estimée :

$$\sigma = \frac{1}{\frac{1}{\sigma_1^2} + \frac{1}{\sigma_2^2}}$$

La variance associée à cette estimation est plus faible que les variances de chacune des mesures prises séparément (ce qui est logique, cela traduit simplement le fait que plus on recoupe les informations provenant de sources différentes, plus on diminue les incertitudes). Cette méthode est intéressante si l'on dispose de ressources limitées pour le calcul, mais l'estimation peut être largement améliorée en utilisant les informations sur les mesures passées, et en filtrant avec un filtre de Kalman.

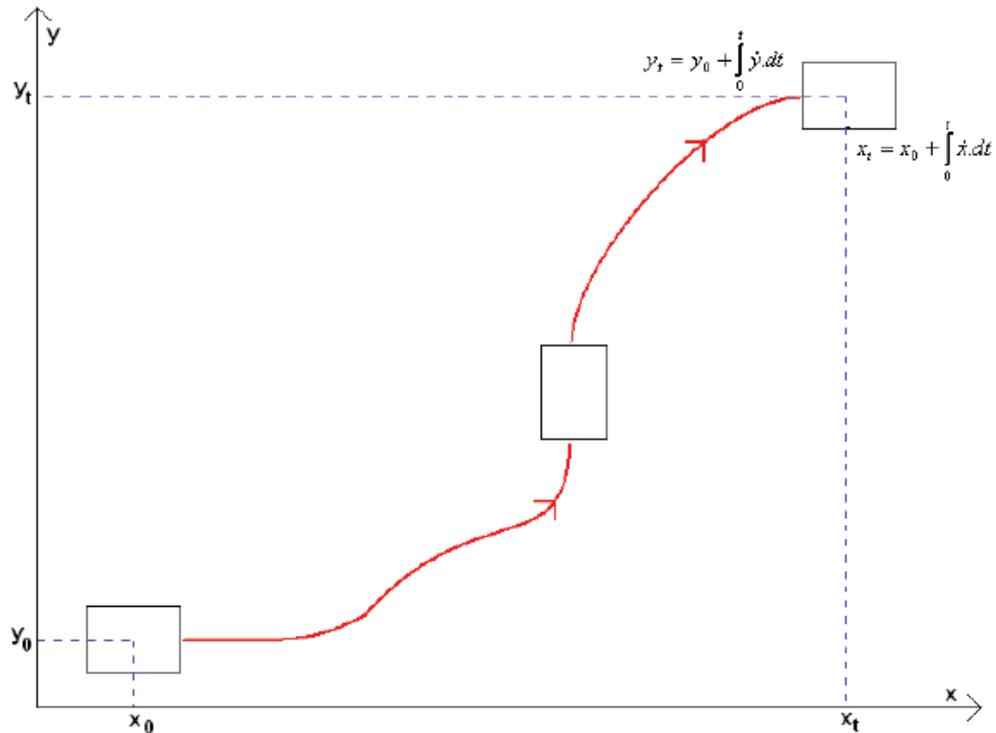
Pour des obstacles statiques, nous obtenons des mesures récurrentes selon une certaine fréquence d'acquisition. Pour des mesures récursives, la précision peut être améliorée en

utilisant un filtre de Kalman. Ce type de filtrage, très utilisé notamment en automatique, est un filtre statistique qui permet de réduire les incertitudes au fur et à mesure de l'acquisition de nouvelles mesures. Cette méthode est particulièrement utilisée en robotique pour la localisation du robot relativement aux obstacles [14]. L'algorithme utilise les connaissances sur la dynamique du robot et du système de mesure et sur les incertitudes associées à chaque mesure. Le calcul s'effectue en deux phases : une phase de prédiction de la mesure et de sa variance, suivie d'une phase de mise à jour de celle-ci par l'acquisition de nouvelles mesures. L'historique des mesures n'a pas besoin d'être gardé en mémoire, et le processus est récursif.

Pour pouvoir planifier les déplacements du robot, il est nécessaire d'établir une modélisation de l'environnement à partir des mesures des positions relatives des obstacles par rapport au robot. Concrètement il s'agit d'établir une cartographie locale des espaces où le robot pourra circuler, ou non, en considérant la position absolue du robot comme connue. Il existe 2 grands types de représentation pour l'environnement local : les cartes géométriques et les grilles d'occupation. Les premières peuvent être obtenues par traitement des données issues de mesures télémétriques, et en effectuant une reconnaissance des formes simples (murs, coins). A partir d'une connaissance des déplacements du robot et en comparant la carte courante avec des cartes mises en mémoire au fur et à mesure que le robot se déplace, la robustesse de la carte peut être améliorée [15]. Les grilles d'occupation sont des cartes discrétisées, généralement sous forme de grille d'un certain nombre de lignes et de colonnes. A chaque case de la grille est soit associée une valeur booléenne pour dire si la case est accessible par le robot ou non (occupée par un obstacle ou libre), soit une probabilité d'occupation (loi de Bayes).

### 3. Localisation

Les outils permettant la localisation d'un robot dans son environnement peuvent être classés en deux catégories : ceux par localisation à l'estime et ceux par localisation absolue [13]. Le principe de la première catégorie consiste à intégrer des informations sur les vitesses ou les accélérations fournies par des capteurs proprioceptifs (odomètres, centrales inertielles). L'avantage de ces méthodes est qu'elles sont indépendantes de l'environnement, par contre leur souci est leur manque de précision dû à la dérive temporelle. En effet les erreurs s'intégrant elles aussi au fur et à mesure du temps. Il est nécessaire d'apporter régulièrement des recalages (Figure 12).



**Figure 12-** Localisation à l'estime

Parmi les méthodes de localisation à l'estime, le système le plus simple et le plus couramment utilisé pour la mesure de déplacement du robot est l'odométrie. L'hypothèse de roulement sans glissement que nous avons vu précédemment, nous permet de relier directement les déplacements du robot à la vitesse de rotation des roues. Par intégration des déplacements à chaque instant, on en déduit la position relative du robot par rapport à son point de départ. L'odométrie est une méthode de localisation très courante, simple, mais également très rapidement imprécise. En effet à cause du glissement des roues sur le sol, les erreurs s'accumulent au fur et à mesure que le robot avance, ce qui implique d'importantes erreurs sur les longs parcours s'il n'y a pas de recalage régulier. Cette méthode est de ce fait fortement tributaire de la qualité du sol sur lequel le robot se déplace.

Les incertitudes sur le diamètre exact des roues, sur les paramètres géométriques du robot, sur la résolution des codeurs, génèrent des erreurs de type systématique, qui vont s'accumuler très rapidement en odométrie. Cependant, ces erreurs peuvent être identifiées et évaluées pour faire un recalibrage du système et ainsi améliorer sa précision. Les erreurs non systématiques comme les glissements ou les irrégularités du sol, génèrent moins rapidement des erreurs, mais ne peuvent par contre pas être recalibrées puisqu'on ne peut pas les prévoir.

Pour l'exploration martienne, où le terrain est fortement accidenté, l'utilisation de système d'odométrie classique est impossible. Pour cette application, Cheng a proposé une technique d'odométrie alternative, dite odométrie visuelle, basée sur la reconnaissance de points singuliers dans l'image vidéo du sol fournie par une caméra montée sur le robot [5] (les points de Harris). Connaissant le positionnement de la caméra par rapport au robot, le déplacement de ces points dans l'image permet d'évaluer les vitesses de déplacement du robot, et par intégration, de retrouver sa localisation relative par rapport à sa position initiale.

Le second type de méthode pour la localisation est la localisation absolue. Ces méthodes utilisent des éléments repérables par le robot dans l'environnement de navigation, de position connue, pour permettre au robot de se repérer relativement à ceux-ci. Ces éléments sont appelés des balises ou amers et sont dits soit réels, s'ils ont été placés spécialement pour permettre la localisation, soit virtuels s'il s'agit d'éléments présents naturellement.

Les balises réelles sont dites passives si elles ont pour but de réfléchir un signal émis par un appareil de mesure du robot (laser ou infrarouge). Il existe deux méthodes pour utiliser ces balises pour la localisation du robot : la méthode télémétrique (calcul de la distance robot/balise), qui nécessite la présence de deux balises pour calculer la position du robot dans le plan ; et la méthode par triangulation, qui consiste à mesurer les angles entre chaque balise et le robot, et qui elle nécessite l'utilisation de 3 balises.

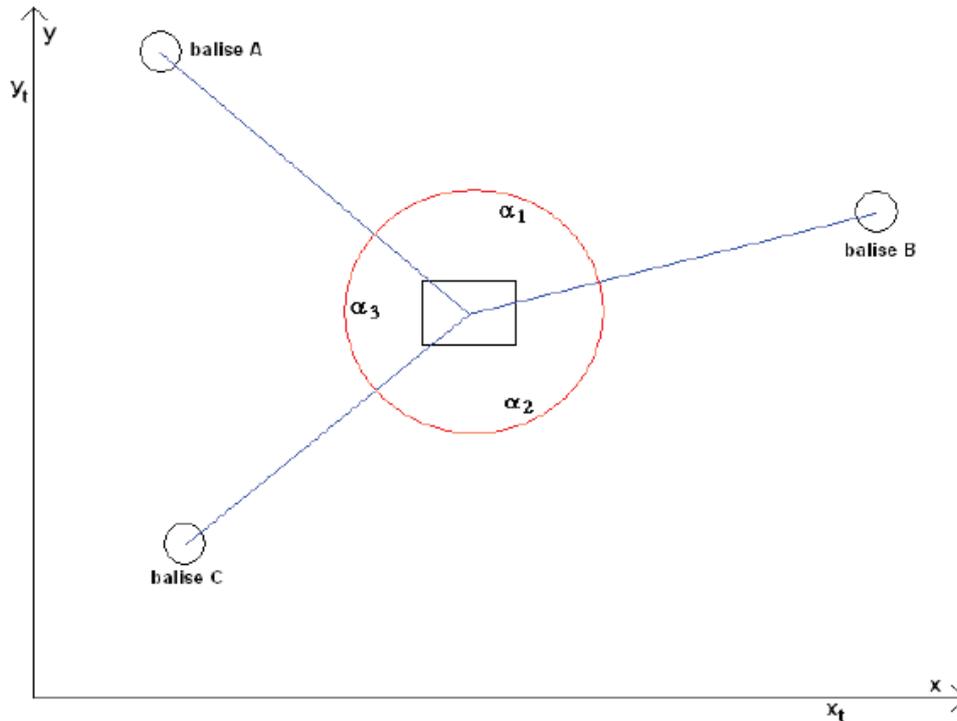


Figure 13- Localisation absolue (méthode par triangulation)

Les balises réelles sont dites actives si elles émettent un signal captable par le robot. En milieu extérieur, le système GPS (global positioning system) peut être utilisé pour obtenir des positions d'une précision de l'ordre du mètre. A la base développé par l'armée américaine dans les années 80 (lancement du premier satellite GPS en 1978), il fut ouvert aux civils en 1995. Jusqu'en 2000 les mesures étaient volontairement entachées d'une erreur d'une centaine de mètres, l'armée américaine craignant que ce système soit un avantage pour leurs ennemis. Malgré le retrait de cette erreur volontaire, la précision du système restait de l'ordre du mètre, à cause des incertitudes sur l'orbite et l'horloge des satellites, ainsi que les retards engendrés par la traversée des couches atmosphériques.

Pour améliorer cette précision, nous pouvons utiliser les GPS différentiels : avec un second récepteur GPS sur une base fixe et de position connue. Il devient possible de mesurer l'erreur et d'en déduire la correction à apporter pour la zone environnante, pour que ce système fonctionne, il faut que la base mobile reste à une certaine portée de la base fixe. Cette distance varie suivant la gamme de fréquence utilisée pour l'envoi des corrections, et peut atteindre quelques dizaines de kilomètres pour les besoins de la navigation maritime.

Des satellites géostationnaires permettent également de corriger certaines erreurs de position. Ils envoient des corrections sur les orbites et les horloges des satellites GPS. Ainsi pour l'Europe c'est le système EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay System) qui se charge d'envoyer ces corrections. La précision atteinte est de l'ordre de 3m. Le système de GPS RTK (real time kinematics) permet d'améliorer la précision à quelques centimètres, en utilisant la différence de phase de l'onde porteuse du signal, sa longueur d'onde étant d'une vingtaine de centimètres. En contrepartie la portée de la station de référence avec cette méthode n'est plus que de quelques kilomètres. Pour augmenter cette portée on a recours au RTK réseau, qui va utiliser la redondance d'informations pour communiquer les corrections à l'appareil, via un serveur de calcul à distance.

Les systèmes de localisation GPS sont très intéressants en rase campagne ou en banlieue. Cependant ils s'avèrent beaucoup moins efficaces en pleine ville ou en forêt. En effet pour fonctionner correctement un GPS a besoin de recevoir les informations de 4 satellites au moins. La présence d'obstacles tels que les ponts et grands bâtiments en ville empêche parfois cette réception. Ainsi il n'est pas rare de perdre la localisation GPS pendant quelques minutes. C'est pour cela que beaucoup de recherches dans le domaine de la localisation sont aujourd'hui portées sur les méthodes alternatives au GPS en milieu urbain.

La vision peut être un moyen pour compléter la localisation par GPS. Ainsi Cappelle [16] utilise un modèle 3D de la place Stanislas à Nancy qui est confronté aux images obtenues par les caméras embarquées sur le robot pour déterminer précisément sa position. Yang propose d'utiliser les caméras du robot pour mettre au point un système d'odométrie visuelle [5].

#### **4. Localisation et cartographie simultanées**

En robotique mobile, le SLAM (simultaneous localization and mapping) consiste, pour un robot évoluant en milieu inconnu, à tracer une carte de l'environnement et localiser simultanément le robot dans celle-ci. La carte est construite de manière incrémentale au fur et à mesure que le robot évolue dans le terrain. En croisant les données perçues avec les informations géographiques dont il dispose en mémoire, le véhicule est capable de se localiser par rapport à des cartes préexistantes. L'idée du SLAM est donc de traiter conjointement les problèmes connexes que sont la navigation et la localisation d'un robot autonome.

La méthode alternative, moins gourmande en temps de calcul, consiste à utiliser la « mémoire visuelle » du véhicule, en repérant des éléments caractéristiques, pour se localiser par rapport à ceux-ci. Ces éléments sont extraits sous forme de primitives visuelles, que le robot cherchera à retrouver dans les images qu'il perçoit pour suivre un chemin précis [17] [18].

## V. Les verrous scientifiques

Il existe de nombreuses thématiques de recherche dans ce milieu de la robotique mobile autonome, ce qui montre qu'aujourd'hui encore le problème spécifique des robots mobiles autonomes est entier. Le Groupement De Recherche en Robotique, regroupant la communauté des chercheurs français dans le domaine de la robotique, a dégagé 4 grands axes de travail autour desquels s'articulent les colloques du Groupe de Travail :

- techniques de localisation et cartographie : cet axe regroupe tous les développements autour de la perception et de la localisation du robot. On y retrouve notamment les méthodes SLAM (Localisation et Cartographie Simultanées). Plus récemment l'utilisation de bases de données sous forme de cartes 2D ou 3D, mais également sous forme SIG (Système d'Informations Géographiques) a ouvert de nouvelles perspectives dans ce domaine. De manière générale la fusion de données est également un thème important, tant la nécessité de coupler diverses sources de mesures apparaît nécessaire pour améliorer la précision et garantir l'intégrité des informations,
- contrôle et commande des véhicules : cet axe regroupe les thématiques liées à la planification de chemin, la génération de trajectoires, et la commande des robots de manière générale. Une prise en compte de plus en plus poussée des contraintes et de la dynamique des robots est nécessaire, pour adapter au mieux les robots à leur environnement. La bonne gestion des obstacles et la prise en compte des incertitudes de mesures sont également des points clés de cette thématique,
- la communication inter-véhicules : on retrouve ici tous les travaux liés à la coopération entre robots, ainsi que le contrôle de flottilles de véhicules,
- l'interprétation de scènes : les recherches dans ce domaine visent à pousser plus loin la perception de son environnement par le robot, que la simple reconnaissance des objets. En effet dans certaines applications il est nécessaire que le robot appréhende plus finement son environnement que par une simple détection et localisation des obstacles.

Les travaux concernent notamment la perception multi-capteurs et la représentation dynamique des scènes.

## **Conclusion**

La perception d'une part et la commande au sens large de l'autre part sont donc les deux thèmes majeurs de recherche pour obtenir un robot mobile parfaitement autonome. Parmi les problématiques liées à la commande, celle de la navigation qui tient un rôle important : elle consiste à déterminer les trajectoires que le robot sera capable de suivre pour lui permettre d'évoluer correctement au milieu d'obstacles.

# **Chapitre 2**

## **Approches de Navigation en Environnement Dynamique**

## 2.1 Introduction

Nos travaux s'intéressent donc à la navigation pour un robot mobile en environnement dynamique. Soit un système robotique équipé de capteurs lui permettant de percevoir son environnement et d'actionneurs lui permettant de se déplacer. Notre but consiste alors à déterminer un mouvement du robot qui :

- respecte les contraintes sur le mouvement du système robotique.
- mène à un but prédéterminé.
- évite toutes collisions avec les obstacles au cours de la navigation.

La détermination du mouvement pour un robot automatisé a été largement abordée au cours de ces cinquante dernières années. On distinguait habituellement deux grandes catégories d'approches : les approches délibératives et les approches réactives. Le principe des approches délibératives est de déterminer un mouvement complet (un chemin ou une trajectoire) du robot entre une position initiale et une position finale à partir d'un modèle de l'environnement dans lequel évolue le système aussi complet que possible. Toutefois, la complexité inhérente à ces approches peut empêcher le calcul du mouvement en temps réel. Les approches réactives quant à elles calculent uniquement le mouvement à appliquer au prochain pas du temps à partir de données capteurs récupérées par le système robotique à chaque instant. Une représentation de l'environnement est ainsi construite au fur et à mesure du déplacement : la navigation est donc possible en environnement incertain comme en environnement dynamique.

La convergence vers le but du système est néanmoins difficile à garantir.

En effet ces approches sont sujettes à des minima locaux dont il peut être difficile de sortir sans connaître le chemin global permettant de rejoindre le but.

Au regard des progrès réalisés dans le domaine de la navigation durant ces dernières années tel le DARPA Challenge 2007, la nécessité de disposer à la fois des capacités des approches réactives et délibératives est confirmée.

De nombreux travaux actuels combinent désormais une planification globale et un évitement d'obstacle local afin de palier les défauts de chacune de ces deux catégories d'approches.

Le lecteur peut se référer aux ouvrages [19, 20] pour un état de l'art plus complet des méthodes de navigation.

## 2.2 Approches délibératives

### 2.2.1 Définition du problème

Les approches dites délibératives consistent à résoudre un problème de planification de mouvement. La planification de mouvement est la détermination à priori d'une stratégie de mouvement entre une position initiale et une position finale du robot à partir d'une représentation de l'environnement dans laquelle il évolue.

Initialement motivée par l'utilisation de bras manipulateurs dans l'industrie manufacturière (cf. Fig. 2.1), la planification pour de tels systèmes robotiques disposant de multiples degrés de liberté cherchait à déterminer la séquence de poses (ou configurations) du robot permettant à son élément terminal (partie du robot destinée à "manipuler" d'autres objets afin de remplir sa tâche) de rejoindre une position but sans entrer en collision avec les objets se trouvant à la portée du robot. Formellement, une configuration  $q$  est définie par l'ensemble des paramètres indépendants définissant de manière unique la position et l'orientation de chaque partie du robot. L'espace de configuration  $C$  définit l'ensemble de toutes les configurations possibles du système robotique.



Figure 2.1 – Bras manipulateurs dans une industrie automobile

Parmi toutes les configurations constituant  $C$ , certaines d'entre elles caractérisent une pose du robot telle que l'un des éléments qui le composent se trouve en collision avec les obstacles. On note généralement  $C_{obs}$  l'ensemble de toutes les configurations en collision et son complément  $C_{libre} = C/C_{obs}$  l'ensemble des configurations libres. Le problème

basique de planification de mouvement consiste alors à déterminer un chemin  $\Psi_c$  (i.e. une séquence continue de configurations entre une configuration initiale  $q_{init}$  et une configuration finale  $q_{but}$ ), tel que toutes configurations  $q$  de  $\Psi_c$  appartiennent à  $C_{Libre}$ .

Souhaitant déterminer un mouvement sans collisions pour un robot évoluant dans un environnement dynamique caractérisé par des obstacles mobiles, une simple planification de chemin ne suffit pas : en effet, la position de ces obstacles évoluant au cours du temps. Il est nécessaire de planifier une trajectoire i.e. un chemin paramétré par le temps afin de s'écarter des obstacles au cours du temps. Celle-ci indique donc par quelles configurations le système passe, mais également à quels instants et à quelles vitesses. Une trajectoire est généralement exprimée dans l'espace des états-temps ou un état  $S$  représente à la fois la configuration prise par le robot à cet instant, mais également sa vitesse instantanée. Une représentation courante de l'espace d'états est l'espace de phase donné par  $(q, \dot{q})$ .

Un robot est néanmoins soumis à un certain nombre de contraintes. Tout d'abord, les contraintes cinématiques ; qui limitent le mouvement du système robotique. On distingue généralement deux types de contraintes cinématiques :

- Les contraintes holonomes limitent l'ensemble des configurations pouvant être prises par le robot. Par exemple, un bras manipulateur tenant un verre rempli d'eau et ayant pour tâche de ne pas le renverser ne pourra pas passer par une configuration à laquelle le verre se retrouve à l'envers.
- Les contraintes non-holonomes limitent le mouvement instantané du système mais pas l'ensemble des configurations qu'il peut occuper. Comme exemple une voiture disposant d'un angle de braquage maximal ne pourra pas se translater sur la cote. Par contre, en effectuant une manœuvre, elle pourra néanmoins rejoindre cette position.

Ensuite les contraintes dynamiques sont des contraintes sur l'état du système robotique et limitent l'évolution de son mouvement au cours du temps. Par exemple une voiture à l'arrêt dispose d'une accélération maximale l'empêche d'atteindre sa vitesse maximale instantanément.

Le problème étant posé, nous présentons ici un bref aperçu des principales approches délibératives ayant retenu notre attention. Elles peuvent principalement être regroupées en deux catégories :

- méthodes d'exploration d'un graphe de recherche.
- méthodes incrémentales de construction d'un arbre de recherche.

Celles-ci sont décrites ci-dessous.

### 2.2.2-Méthodes par graphes

Le principe de ces méthodes est de tenter de capturer la topologie de l'espace de recherche (espace de configuration ou espace d'état du système robotique) dans le but de simplifier le problème à une recherche dans un graphe. Elles sont donc constituées de deux étapes :

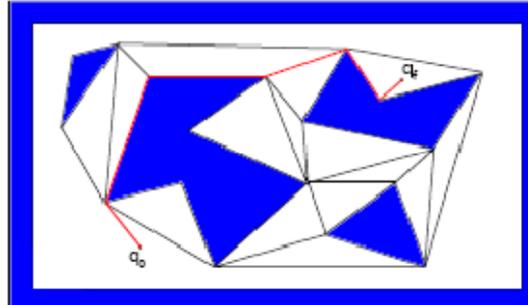
- Construction du graphe dans l'espace de recherche approprié
- Parcours du graphe dans le but de déterminer un chemin ou une trajectoire entre les configurations initiale et finale.

Le parcours du graphe s'effectue la plupart du temps de la même manière : un algorithme heuristique tel  $A^*$  [21] est utilisé dans le but d'éviter l'exploration complète de l'espace de recherche. La construction du graphe peut, quant à elle, fortement varier : alors que les premiers travaux de planification s'intéressaient à trouver un chemin pour des systèmes dépourvus de contraintes sur leur mouvement ou pouvant se déplacer dans toutes les directions (systèmes holonomes), les recherches actuelles prennent en compte les contraintes cinématiques et dynamiques des robots étudiés, et planifient des trajectoires dans l'espace-temps afin de considérer le mouvement futur des obstacles mobiles. La représentation de l'espace de recherche, s'est en conséquence adaptée à ces évolutions.

Une notion importante permettant d'évaluer la "qualité" d'un algorithme de planification a été proposée : il s'agit de la complétude.

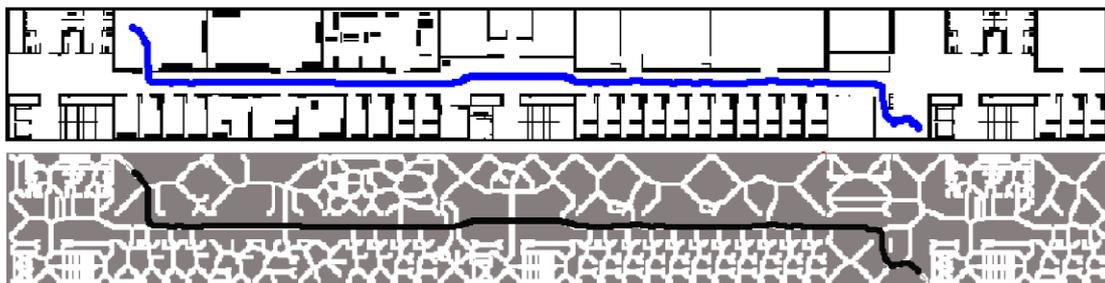
**Déf. 1** (Complétude) Un algorithme est dit complet si quelque soit l'entrée, il rapporte correctement si une solution existe ou non. De plus, si une solution existe, il doit être capable de la trouver en un temps fini.

Nous présentons ci-dessous les principales méthodes de représentation de ces espaces de recherches pour des systèmes et environnement de plus en plus contraints, en soulignant le degré de complétude de chaque algorithme. Construction d'un graphe complet



**Figure 2.2** – Chemin déterminé entre deux configurations  $q_0$  et  $q_f$  à partir d'un graphe de visibilité.

Lorsque la complexité du problème est assez faible (faible dimensionnalité de l'espace de recherche), des approches combinatoires garantissant ainsi la complétude de l'algorithme de planification, peuvent être utilisées. La construction d'un graphe de visibilité [22], qui se trouve peut-être dans la toute première approche de planification de chemin connue, fait partie de celles-ci. Un graphe de visibilité (Fig. 2.2) consiste à considérer chaque sommet des enveloppes convexes d'obstacles polygonaux, et aussi à relier chacun de ces sommets à tout autre sommet visible de cet ensemble. On obtient un graphe dans lequel peut être exécutée une planification après avoir relié les positions initiale et finale aux sommets de cet ensemble les plus proches. Notez que cette technique autorise les configurations de contact entre le système mobile A et les obstacles. C'est l'une des raisons pour lesquelles elle est relativement peu utilisée.

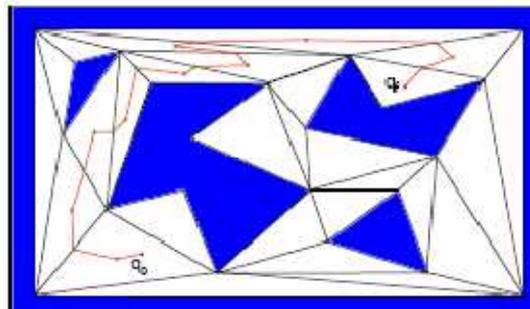


**Figure 2.3** – Diagramme de Voronoi calculé sur une carte de l'environnement statique d'un système robotique et chemin entre deux configurations données déterminé sur le diagramme (source [23]).

Afin d'éviter le contact avec les obstacles, une seconde option combinatoire (complète) consiste à construire un diagramme de Voronoï [24] dans l'espace de configurations  $C$  dans lequel évolue le système. On appelle région de Voronoï associée à un élément  $p \in C$  l'ensemble des points de  $C$  qui sont plus proches de  $p$  que de tout autre point de  $C$ . Pour deux points  $a$  et  $b$  de  $C$ , l'ensemble  $\Pi(a, b)$  des points équidistants de  $a$  et  $b$  est un hyperplan affine (un sous-espace affine de Co-dimension 1). Cet hyperplan est la frontière entre l'ensemble des points plus proche de  $a$  que de  $b$ , et l'ensemble des points plus proches de  $b$  que de  $a$ . On définit ainsi le diagramme de Voronoï d'un espace  $C$  comme étant l'ensemble des hyperplans équidistants des obstacles les plus proches pour chacune des régions de Voronoï de l'espace libre.

Le diagramme de Voronoï (fig 2.3) étant défini, on dispose donc du graphe induit où chaque nœud correspond à un sommet des arêtes du diagramme et chaque liaison correspond aux arêtes elles-mêmes. On peut alors comme précédemment, effectuer une planification par recherche dans ce graphe. Notez cependant que ce diagramme est assez facilement définissable dans un espace de dimension 2 mais qu'il devient très complexe à calculer dès que l'on passe en dimension supérieure.

Un dernier exemple d'approches complètes consiste en une décomposition Cellulaire de l'espace de configuration  $C$ . A partir d'une représentation simple de l'espace de configuration  $C$ , cette approche consiste à diviser cet espace en un nombre fini de sous-espace convexes. Par exemple, dans un espace de configuration  $C = \mathbb{R}^2$  dont la représentation des obstacles est polygonale (cf. Fig. 2.4), une décomposition cellulaire verticale [25]



**Figure 2.4** – Chemin déterminé entre deux configuration  $q_0$  et  $q_f$  à partir d'une triangulation de l'espace de configurations  $C$ .

ou par triangulation [26] peut être facilement calculée. Un graphe est alors construit

comme suit : les nœuds sont définis aux barycentres des cellules obtenues et au milieu de leurs cotes. Une arête relie ensuite chaque nœud défini sur un cote au barycentre des deux cellules adjacentes. Comme précédemment, en reliant les configurations initiale  $q_0$  et finale  $q_f$  aux nœuds du graphe les plus proches, une recherche heuristique dans le graphe résultant permet de trouver un chemin liant ces deux configurations.

Des méthodes de décomposition cellulaires plus complexes telles les "balles connectées" [27, 28] ont été conçues pour des environnements non structures et des espaces de recherche (configurations ou états) de plus fortes dimensions. En couvrant l'espace de recherche libre par des sphères se chevauchant de la dimension de cet espace, il est possible comme précédemment de construire un graphe connexe dont une arête est définie entre chaque couple de sphères dont l'intersection est non vide.

Quelques extensions ont été proposées à la construction de cartes de routes complètes en environnements dynamiques : Erdmann et Al. [29] ont proposé pour cela d'ajouter la dimension temporelle à l'espace de configuration. Une carte de route complète peut alors être définie dans ce nouvel espace. Fraichard a fait de même en définissant l'espace d'états-temps dans [30] et en y construisant un graphe essayant de capturer la topologie de cet espace. L'ajout de la dimension temporelle à ces approches augmente néanmoins fortement la complexité de la recherche exécutée et le temps de parcours du graphe associé.

Bien qu'attirantes par leur simplicité, les méthodes combinatoires présentées ci-dessus sont en pratique très peu souvent utilisables : pour un système robotique quelque peu complexe (forte dimensionnalité de l'espace de configuration, systèmes redondants, topologie des obstacles quelconque), une représentation des obstacles  $C_{obs}$  dans l'espace de configuration est difficilement accessible, et leur calcul explicite bien trop complexe. De plus, la géométrie du graphe ne se soucie guère des contraintes sur le mouvement du système. Un robot disposant par exemple de contraintes non holonomes sera absolument incapable de suivre les arêtes du graphe sans une adaptation du plan. Des méthodes alternatives ont alors été apportées afin d'éviter la caractérisation de  $C_{obs}$ .

### **Echantillonnage par grilles régulières**

Lorsque la complexité du système robotique A est telle qu'il est difficile de déterminer

la topologie de l'espace de configurations  $C$  (et l'espace  $C_{obs}$  des configurations du robot en collision avec un obstacle de l'environnement), une méthode alternative consiste à discrétiser  $C$  et à construire une approximation conservative de l'espace libre  $C_{libre} = C/C_{obs}$ . Pour ce faire, un échantillonnage de l'espace par une grille régulière de dimension  $n$  (ou  $n$  est la dimension de  $C$ ) peut être effectuée. Le graphe  $G$  en résultant est construit en définissant un nœud pour chaque échantillon et en le liant par une arête à chacun de ses  $2^n$  voisins directs.

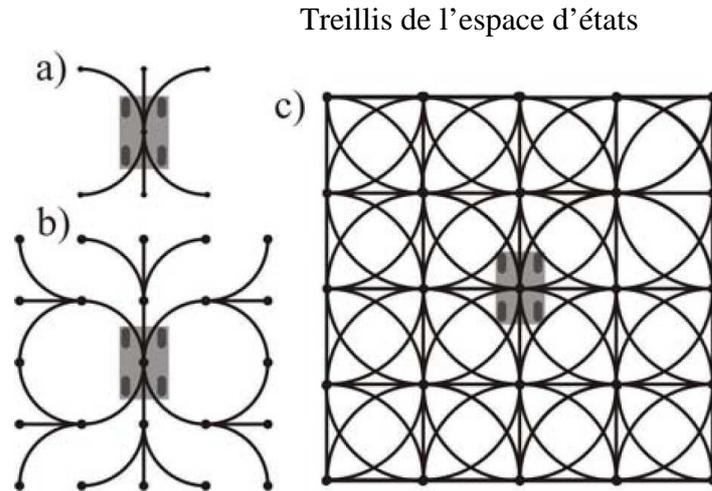
Une planification peut alors être effectuée entre deux configurations  $q_0$  et  $q_f$  en assimilant chacune de ces configurations à un nœud du graphe  $G$ , puis en explorant itérativement à partir de  $q_0$  ses nœuds voisins jusqu'à atteindre  $q_f$ . La détermination de l'obstruction des nœuds et des arêtes du graphe par les obstacles peut ainsi être effectuée uniquement lors de leur exploration par un module de vérification de collision (souvent considéré comme une boîte noire pour ce genre d'approches).

L'espace libre atteignable par une telle grille est un sous-espace de  $C_{libre}$ . La garantie de trouver une solution s'il en existe une est donc amoindrie et dépendante de la résolution de la grille. Ces approches sont alors dites complètes en résolution.

**Déf. 2** (Complétude en résolution) Un algorithme est dit complet en résolution si quelque soit l'entrée, il rapporte correctement si une solution existe ou non à une résolution donnée. Lorsque l'algorithme ne trouve pas de solution, il peut en exister une à une résolution plus fine que celle choisie.

Afin d'accélérer le processus de recherche sur le graphe, une représentation de l'environnement par grilles multi résolution fut proposé par la suite [32,33]. Une recherche de chemin peut alors être effectuée en premier lieu à basse résolution. Si aucune solution n'est trouvée les résolutions supérieures sont examinées jusqu'à ce qu'une solution ait été trouvée. Cet échantillonnage par grilles a également été la source de représentation des espaces libre  $C_{libre}$  et obstrué  $C_{obs}$  par grilles d'occupation probabilistes [31]. Une grille d'occupation probabiliste est une grille représentant une discrétisation régulière de l'espace dans laquelle chaque cellule est caractérisée par une probabilité d'occupation évaluée lors de la navigation par les capteurs du système robotique. La vérification de collision en chaque nœud du graphe induit est alors effectuée en estimant la probabilité de collision de la cellule de la grille probabiliste associée. L'avantage de telles grilles est sa possibilité de

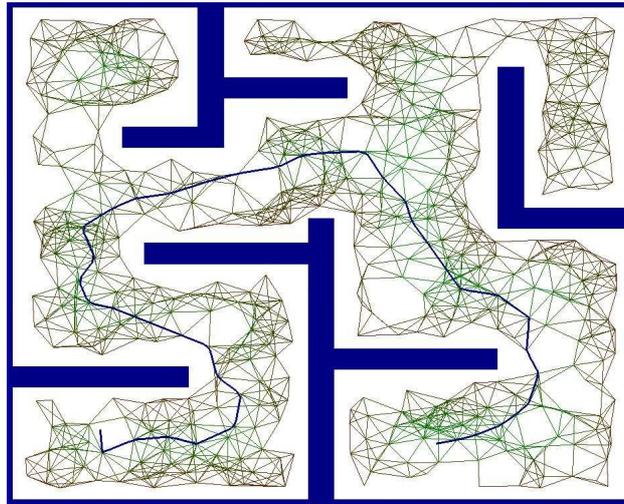
mise à jour au cours du temps : lorsqu'un obstacle mobile se déplace ou lorsqu'un nouvel obstacle est détecté par les capteurs du système, les probabilités d'occupation des cellules de la grille associées sont réévaluées. Le graphe induit peut en conséquence être modifié, mais s'il désactive un nœud ou une arête choisis lors de la planification, un nouveau mouvement doit être déplanifié.



**Figure 2.5** – Différentes étapes de construction d'un treillis sur l'espace d'état d'une voiture de Reeds & Shepp (source [34]).

Lorsque le système A dispose de contraintes sur son mouvement [19] (vitesse, accélération, angle de braquage d'un robot de type voiture, etc.), la connectivité de l'espace de configuration de A se trouve compromise : un chemin n'est pas nécessairement admissible pour A entre deux nœuds adjacents d'une grille régulière sur l'espace de configuration. Pivtoraiko et Kelly ont alors proposé la construction de treillis de l'espace d'état ([34]). Un treillis de l'espace d'état est alors un graphe  $G$  dont chaque nœud représente un état du système A et chaque arête représente un chemin, admissible pour A (cf. Fig. 2.5). Cette approche est complète en résolution : le treillis de l'espace d'état caractérise l'ensemble de tous les chemins à une résolution donnée. Cette approche dispose néanmoins d'un fort inconvénient : elle est extrêmement couteuse en termes de mémoire pour stocker l'ensemble des chemins admissibles pour le système. Une étude de la régularité de l'espace de configurations ainsi que la caractérisation de classes d'équivalence entre des chemins similaires sont alors effectués afin de limiter ce problème.

## Cartes de routes probabilistes



**Figure 2.6** – Chemin planifié pour un robot de type différentiel à partir d’une roadmap calculée dans l’espace de configuration du robot

Dans le cas d’espace de recherche de forte dimension, une discrétisation régulière de l’espace peut s’avérer bien trop coûteuse. Afin de diminuer la taille du graphe sur cet espace, une solution consiste à construire une carte de route probabiliste (en anglais : probabilistic roadmap [35]) sur celui-ci.

La construction d’une carte de route probabiliste s’effectue en sélectionnant des configurations aléatoires dans l’espace de recherche (cf. Fig. 2.6). Chaque nouvelle configuration est ajoutée au graphe si elle n’est pas en collision avec les obstacles de l’environnement. Dans ce cas un nouveau nœud est créé dans le graphe pour celle-ci. Des arêtes sont alors ajoutées à partir de cette configuration vers d’autres configurations appartenant déjà à la carte de route dans le cas où ces deux configurations sont suffisamment proches, et qu’il existe un chemin libre de collisions entre celles-ci. La construction de la roadmap se termine généralement lorsqu’un nombre prédéterminé de nœuds constituent celle-ci.

Comme dans le cas des grilles régulières sur l’espace de configuration, l’espace libre  $C_{libre}$  est caractérisé par un sous-ensemble de configurations atteignables et de chemins admissibles. La représentation de l’espace libre étant dépendante d’un nombre aléatoire d’échantillons, on parle ici de complétude probabiliste.

**Déf. 3** (Complétude probabiliste) Un algorithme est dit probabilistiquement complet si quelque soit l'entrée, la probabilité de rapporter correctement si une solution existe ou non tend vers un lorsque le nombre d'échantillons générés tend vers l'infini.

La qualité de telles approches est alors évaluée par rapport à deux critères : sa densité et sa dispersion. La dispersion reflète la taille maximale de l'espace libre  $C_{libre}$  non couverte par les nœuds composant la carte de route probabiliste. La densité s'illustre par son aptitude à s'approcher aussi près que possible de toutes les configurations de l'espace libre  $C_{libre}$ . De nombreuses extensions de ce type d'approches ont vu le jour afin d'optimiser ces deux paramètres tout en limitant le nombre de nœuds nécessaires.

Tout d'abord, [36] proposent un échantillonnage aux bornes de  $C_{libre}$  afin de pouvoir déterminer simplement un chemin vers une configuration proche des obstacles de l'environnement. Pour cela, lorsqu'une configuration aléatoirement choisie se trouve être en collision, elle est déplacée aléatoirement, puis une fois libre, elle est autant que possible connectée au reste du graphe. A l'opposé, [37] essaie de maximiser l'espace libre autour de chaque nœud du graphe.

Dans [35], une probabilité de distribution est associée à chaque nœud du graphe. Lors de l'insertion d'un nouveau nœud, son positionnement est optimisé afin de maximiser la probabilité de distribution sur l'ensemble de l'espace libre  $C_{libre}$  et de pouvoir atteindre ainsi de nouvelles configurations non visibles jusqu'alors.

Une carte de route par visibilité (en anglais : visibility roadmap) est proposée en [38, 39]. Pour celle-ci, deux types de nœuds sont définis : les gardes et les connecteurs. Un nœud est un garde s'il n'est pas visible dans  $C_{libre}$  par aucun autre garde. Un connecteur est un nœud visible par au moins deux gardes. En construisant un graphe connecté tel que toute région de  $C_{libre}$  soit visible par un garde et que le nombre de nœuds total soit minimal, on obtient une carte de route de faible taille (limitant ainsi le temps de recherche) et pouvant aisément connecter n'importe quel couple de nœuds de  $C_{libre}$ .

Enfin dans le cas de navigation en environnement dynamique, [40] propose une mise à jour dynamique de la carte de route probabiliste. En présence d'obstacles mobiles, certains nœuds et arêtes sont ainsi désactivés ou réactivés afin d'adapter la planification aux

mouvements des obstacles sans devoir reconstruire la carte intégralement.

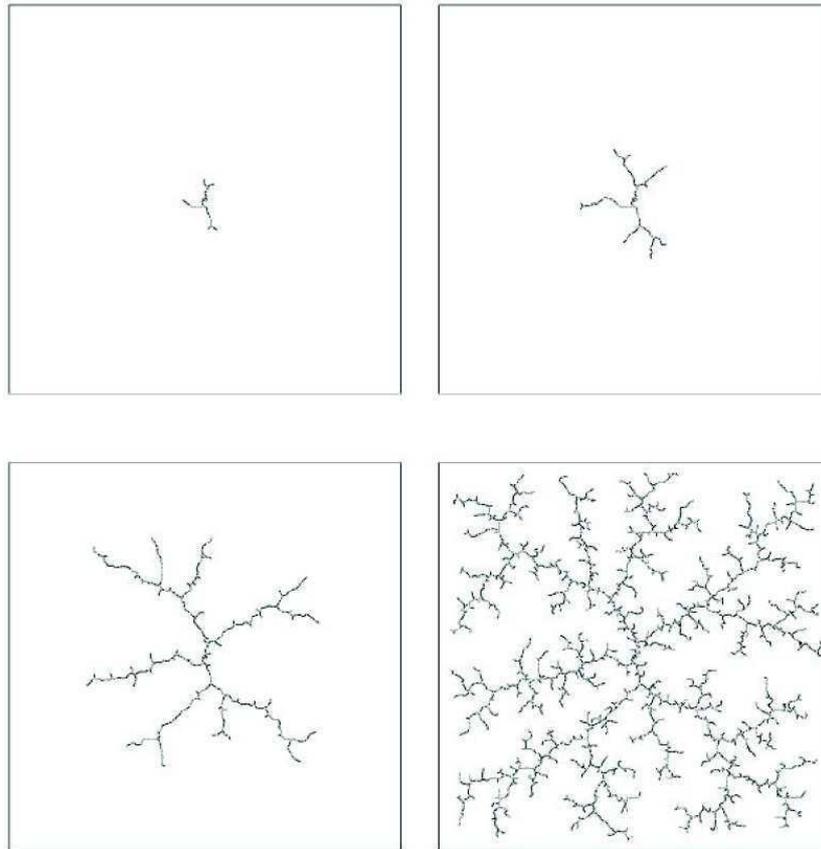
### Méthodes de replanification

En présence d'obstacles mobiles, certaines méthodes présentées ci-dessus permettent une adaptation du graphe sur lequel le chemin ou la trajectoire du robot est planifié, par exemple en déplaçant, activant ou désactivant des nœuds et des arêtes du graphe. Dans le cas où le plan initial passait par un nœud ou une arête n'étant plus valide, il est alors nécessaire de replanifier ([41]) tout ou une partie du mouvement suivi. Pour cela, diverses méthodes ont été proposées : Stentz a initialement proposé une extension (nommée D\* [42]) de l'algorithme de recherche heuristique A\* dans le cadre de la navigation de robots mobiles. Lors de l'invalidation d'un plan, celui-ci replanifie localement la partie du plan obstruée par les obstacles. Likhachev et al. ont proposé une extension "anytime" de l'algorithme A\* ([43]) : à chaque instant, le robot effectue une recherche A\* le plus loin possible vers le but en un temps de décision constant. D'autres méthodes de replanification ont vu le jour, telle [86] modifiant une partie du plan obstrué en cas d'obstacles inattendus et améliorant le chemin suivi lorsque le temps le permet.

#### 2.2.3 Méthodes par arbres

En parallèle de la planification classique par exploration d'un graphe de recherche sont apparues les méthodes par arbres. Celle-ci consiste, à partir de la configuration initiale du système, à construire un arbre se développant dans toutes les directions autour du robot dans l'espace de recherche. Elles sont donc bien adaptées dans le cas d'espaces de recherche à forte dimensionnalité.

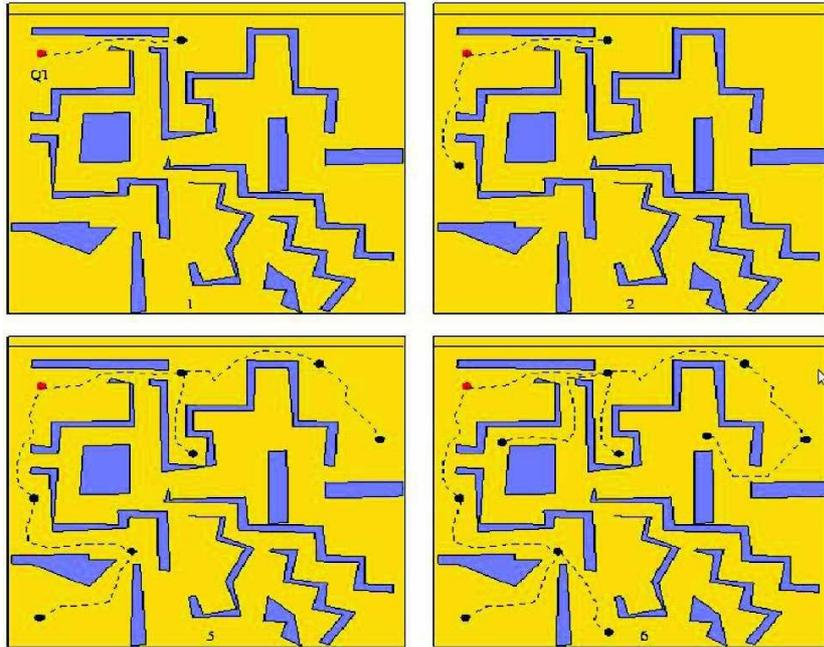
Les Rapidly-exploring Random Trees (RRT) initialement présentés par Lavalle [44, 45] représentent certainement l'une des approches de planification de mouvement les plus répandues à l'heure actuelle. À partir d'une configuration initiale  $q_0$ , l'espace de configuration du système est exploré en choisissant aléatoirement à chaque itération une nouvelle configuration  $q_0$  non obstruée par les obstacles vers laquelle se diriger. La branche la plus proche de l'arbre déjà construit est alors déterminée puis étendue



**Figure 2.7** – Rapidly Exploring Random Trees : Etapes successives de construction de l’arbre de recherche dans l’espace des configurations du système robotique (source [44]).

en direction de  $q_a$ . En répétant le processus, l’espace de recherche est alors rapidement couvert, et un chemin vers toutes configurations de cet espace peut alors être facilement déterminé s’il en existe un (cf. Fig. 2.7). Le but de la planification étant néanmoins d’atteindre une configuration finale  $q_f$ . Le processus essaie de déterminer un chemin liant la configuration la plus proche de l’arbre à  $q_f$ . Après un certain nombre d’itérations de l’expansion de l’arbre.

Dans le cas où le système évolue en environnement dynamique, une extension ”anytime” des RRTs a également été proposée ([46]) : l’arbre de recherche est mis à jour progressivement, et à chaque pas de temps le contrôle à appliquer est déterminé à partir de la racine de l’arbre menant vers la position se rapprochant le plus près du but.



**Figure 2.8** – Le fil d’Ariane : Algorithme de planification alternant deux étapes : une première étape d’exploration permettant d’étendre un arbre de recherche vers les régions inexplorées de l’espace de configuration. Une seconde étape de recherche permettant de vérifier s’il est possible de planifier un chemin jusqu’au but, à partir des dernières branches de l’arbre construites.

Le fil d’Ariane (en anglais : Ariadne’s Clew) présenté dans [47, 48] explore l’espace de configuration du système robotique à partir de sa configuration initiale en construisant un arbre de recherche par l’alternance de deux méthodes (cf. Fig. 2.8) :

- **Explore** : Cette méthode a pour but d’explorer l’espace de configuration libre en y plaçant des balises aussi loin que possible des balises existantes. A l’initialisation, la seule balise disponible est la configuration initiale du système. A chaque nouvelle appel de la méthode “Explore”, l’arbre est étendu à partir d’une des balises existantes choisie aléatoirement.
- **Search** : Cette méthode recherche autour d’une balise posée s’il est possible d’accéder directement à la configuration finale par un mouvement simple (chemin de Manhattan).

En répétant successivement ces deux étapes, l’arbre de recherche va s’étendre rapidement sur tout l’espace de configuration accessible à partir de la configuration

initiale. Jusqu'à converger vers le but, ou s'arrêter s'il n'est plus possible de placer une balise à moins d'une distance minimale de celles déjà posées.

D'autres méthodes moins connues de planification par expansion d'un arbre peuvent être notées : Parmi celles-ci on trouve une planification expansive sur l'espace de configuration ([49]) consistant à étendre itérativement un arbre de recherche en sélectionnant un nœud de l'arbre  $q_g$  à étendre à partir d'une probabilité inversement proportionnelle au nombre de nœuds dans la région qui l'entoure. Une nouvelle configuration  $q_g$  est alors choisie dans son voisinage proche et un chemin détermine entre ces deux configurations.

Dans la même idée, [50] propose une planification par marche aléatoire. Le principe ici est très simple : un nœud de l'arbre déjà construit est choisi aléatoirement et étendu dans une direction aléatoire. La longueur du chemin à parcourir à chaque étape ainsi que la variation de la direction à prendre par rapport à l'étape précédente sont déterminées à partir des observations sur l'environnement, obtenues lors des extensions précédentes de l'arbre.

Ces deux dernières approches bien que simples et fonctionnelles disposent malheureusement de fortes difficultés à traverser de longs espaces libres.

#### 2.2.4 Complexité des approches délibératives

Parmi toutes ces approches, il semble pertinent d'en étudier leur complexité. Celle-ci peut être évaluée sous deux aspects : tout d'abord sa borne maximale qui peut être déterminée par l'existence d'un algorithme capable de déterminer une solution au problème de planification. Celui-ci sert de preuve à la possibilité de résoudre le problème à une complexité donnée.

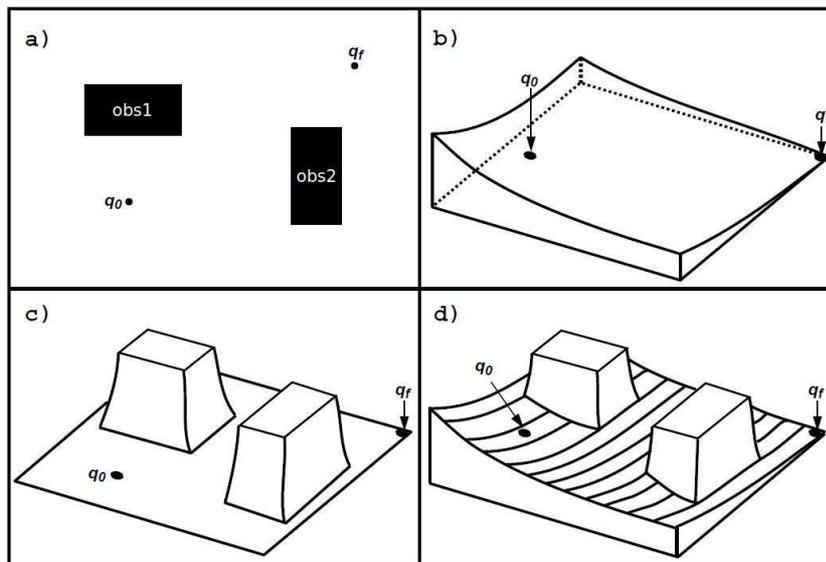
Ensuite sa borne minimale donne une indication de la difficulté du problème. Reif fut en 1979 le premier à établir l'existence d'une borne minimale de la complexité PSPACE-dur [51]. La décidabilité du problème de planification (existence d'une solution au problème donné) fut quant à elle établie par Schwarz et Sharir en 1983 dans le cas d'un système robotique simple sous contrainte. Néanmoins, dès que des contraintes supplémentaires (cinématiques ou dynamiques) sont prises en compte la complexité du problème de planification de mouvement devient NP-dur [52, 53].

Le temps de calcul de telles approches s'en trouve en conséquence bien trop élevé pour être exécuter en temps réel. Leur utilisation en environnement dynamique s'en trouve donc fortement contrariée. Afin de s'assurer de la sécurité du mouvement d'un robot au milieu d'obstacles mobiles il est alors nécessaire de disposer d'un approche de détermination du mouvement réactive. Ces approches sont donc présentées dans la suite de ce chapitre.

### 2.3 Approches réactives

Les approches réactives consistent à calculer à chaque pas de temps (après récupération des informations sur l'environnement fournies par les capteurs du système) le contrôle instantané à appliquer sur les actionneurs du système.

#### 2.3.1 Approches par champs de potentiel



**Figure 2.9** – Calcul d'un chemin entre deux configurations  $q_0$  et  $q_f$  par méthode de champs de potentiels. (a) Espace de configuration du robot et représentation des obstacles obs1 et obs2 dans celui-ci. (b) Champ attractif généré par la position finale. (c) Champ répulsif exercé par les obstacles. (d) Combinaison des deux.

Les approches dites par champs de potentiel initialement proposées par Khatib [54] consistent à considérer le robot mobile comme une particule soumise à divers champs électromagnétiques régissant son mouvement. Ses travaux considéraient les deux suivants (cf. Fig. 2.9) :

- Un champ de potentiel attractif provenant de la position finale  $p$  du système à atteindre.
- Un champ de potentiel répulsif provenant des obstacles statiques et mobiles de l'environnement.

Initialement conçus pour le calcul du mouvement de bras manipulateurs, cette méthode dispose de l'avantage de calculer ces champs de potentiels dans l'espace de travail  $W$  (espace euclidien  $\mathbb{R}^2$  ou  $\mathbb{R}^3$  dans lequel une représentation des obstacles est disponible), définissant ainsi une direction privilégiée à suivre par l'élément terminal du bras dans cet espace. Une modification de la configuration du robot dans son espace articulaire est alors déduite de ce champ dans un second temps.

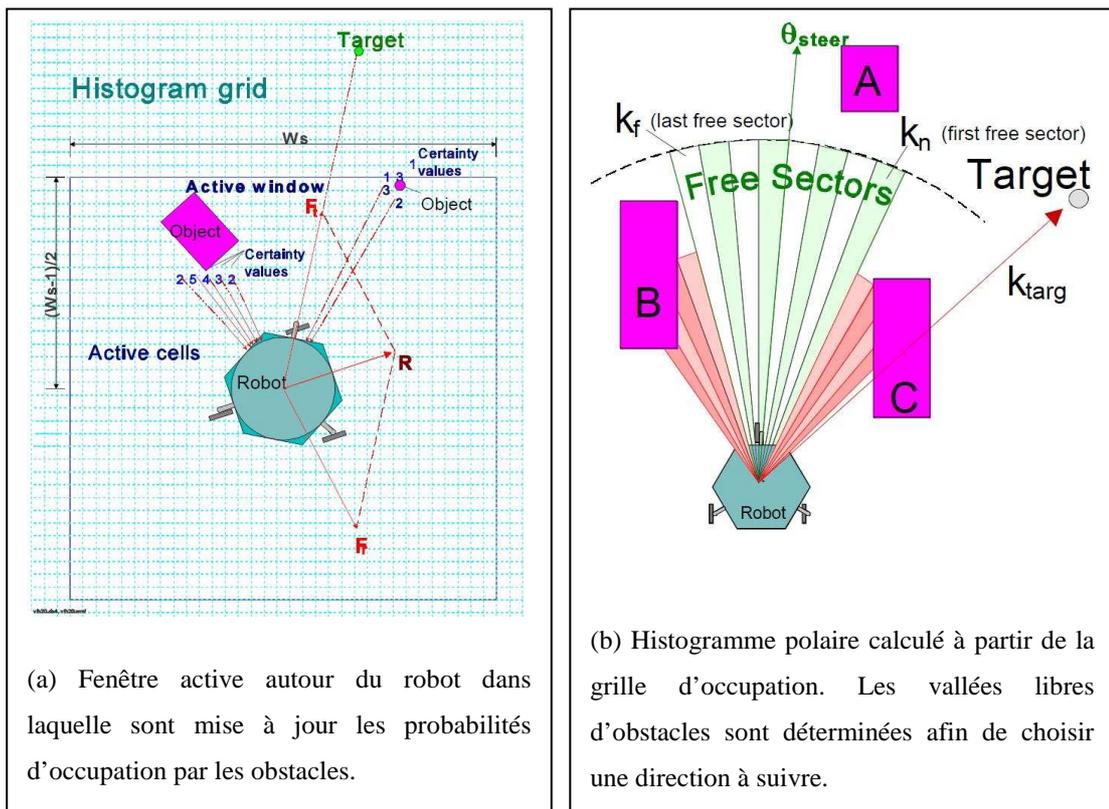
Bien que simple et élégante, cette méthode possède de nombreux inconvénients mis en évidence par Koren et Borenstein [55]. D'une part, cette approche est sujette à des minima locaux. par conséquent la convergence vers le but n'est pas assurée. D'autre part, ces potentiels peuvent donner lieu à de fortes oscillations du mouvement du robot en présence d'obstacles et principalement lorsque celui-ci navigue dans des passages étroits (couloirs, portes). Enfin, le vecteur de déplacement désigné par le champ de potentiel ne prend en aucun cas en compte la cinématique ou la dynamique du système robotique considéré. Un robot qui dispose de contraintes non-holonomes aura de sérieuses difficultés à suivre une telle direction.

Malgré ces limitations, de nombreuses techniques de navigation ont découlé de ces champs de potentiels. Ils ont par exemple été adaptés à la navigation au milieu d'obstacles mobiles dans [56, 57] en prenant en compte non seulement la distance aux obstacles mais également la vitesse de ces derniers pour calculer les champs répulsifs.

### 2.3.2 Histogramme de champs de vecteurs

Dans la lignée des approches par champs de potentiels, sont apparus les histogrammes par champs de vecteurs (en anglais : Vector Field Histogram - VFH). Ceux-ci, introduits par Koren et Borenstein [58] sont nés de la combinaison des champs de potentiels et des grilles d'occupation : un histogramme basé sur une grille cartésienne de l'environnement est construit et mis à jour au fur et à mesure de la navigation afin de reporter la présence d'obstacles à proximité du robot (cf. Fig. 2.10(a)). Afin de choisir une direction à suivre,

un histogramme polaire est construit à partir de la grille d'occupation : en discrétisant les différentes directions possibles autour du robot, l'histogramme polaire est construit en pondérant pour chaque secteur de la discrétisation polaire les cellules traversées de la grille d'occupation contenant des obstacles. Une fois cet histogramme polaire construit, des "vallées candidates" sont déterminées comme les suites de secteurs contigus de l'histogramme polaire libres d'obstacles (cf. Fig. 2.10(b)). La direction à prendre par le système est alors déterminée par le milieu de la vallée menant le plus directement au but.

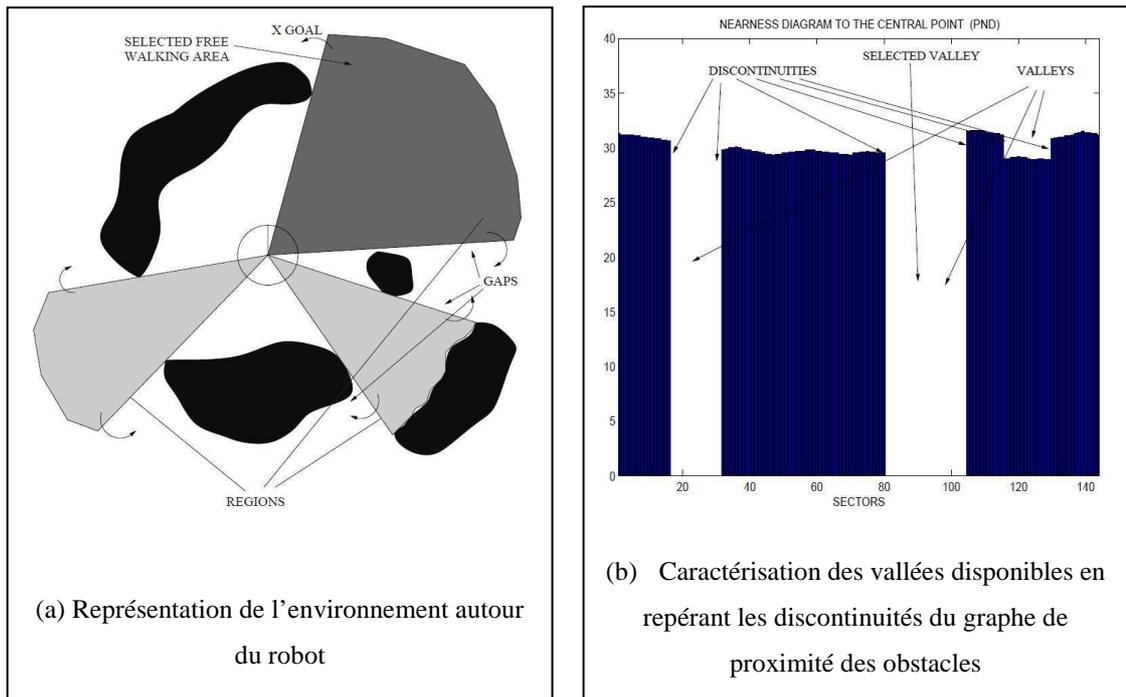


**Figure 2.10** – Histogramme de champs de vecteurs : La présence d'obstacle est mise à jour sur une grille d'occupation au fur et à mesure du processus de navigation. Après avoir caractérisé les "vallées" libres d'obstacles sur un histogramme polaire autour du robot, il détermine la plus proche du but et calcule le contrôle nécessaire afin de se diriger vers celle-ci (source [58]).

Initialement conçue pour la navigation de robots holonomes (pouvant naviguer dans toutes les directions), cette méthode a été étendue à plusieurs reprises afin de prendre en compte les dimensions du robot (par un espace de configuration implicite) et ses contraintes de vitesse [59]. Plus tard, les VFH ont été combinés à une recherche A\* (VFH\* [60]) afin de trouver un chemin menant vers le but et d'échapper ainsi aux minima locaux.

Les méthodes VFH disposent néanmoins encore de fortes limitations : Elles ne prennent en compte ni la dynamique du système robotique, ni l'éventuelle présence d'obstacles mobiles ; le mouvement instantané du robot est calculé uniquement à partir des informations sur la position courante des obstacles. Leur vitesse n'est en aucun cas considérée.

### 2.3.3 Navigation par diagrammes de proximité



**Figure 2.11** – Navigation par Diagrammes de Proximité (ND) : Méthode réactive utilisant une représentation de haut niveau de l'environnement en déterminant les vallées libres d'obstacles. Sélection dans un second temps d'une stratégie de navigation en fonction de la topologie de l'environnement et de la proximité des obstacles et de la position finale (source [61]).

L'approche de navigation par diagrammes de proximité (en anglais : Nearness Diagram Navigation - ND) proposée par Minguez et Montano [61] fortement inspirée des VFH se base sur la topologie de l'environnement pour choisir un contrôle applicable chaque instant. Pour ce faire, deux diagrammes polaires sont construits : l'un représente la distance du centre du robot aux obstacles dans toutes les directions autour de celui-ci (cf.Fig. 2.11) ; le second calcule cette même distance à partir des contours du robot afin d'estimer la distance de sécurité conservée. L'étude des discontinuités de ces diagrammes

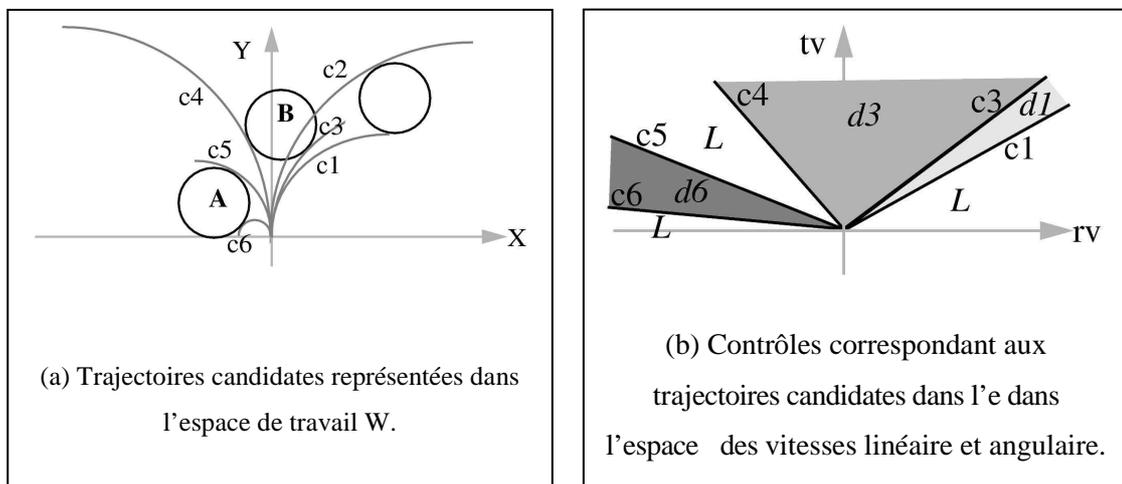
de proximité permet de caractériser les “vallées” libres d’obstacles autour du robot. La différence majeure par rapport aux VFH consiste en la stratégie de navigation choisie. La méthode ND utilise une stratégie déterministe de choix du comportement à adopter en fonction de la distance aux obstacles les plus proches, et en fonction de la topologie des obstacles qui l’entourent. Les options possibles se résument à :

- contourner un obstacle
- passer entre deux obstacles
- aller tout droit vers le but

Ainsi qu’à choisir une vitesse faible ou élevée suivant la proximité des obstacles. Un contrôle en vitesses linéaire et angulaire est alors calculé en fonction du comportement choisi.

De la même manière que les approches présentées précédemment, cette méthode n’est pas vraiment adaptée pour naviguer au milieu d’obstacles mobiles et ne prends pas en compte la dynamique du système.

### 2.3.4 Méthode de navigation courbure-vélocité



**Figure 2.12** – Méthode de navigation courbure-vélocité (CVM) : Caractérisation des mouvements possibles dans l’espace des vitesses linéaire et angulaire. Sélection du mouvement à suivre maximisant une fonction de coût (source [Sim96]).

A l’opposé des méthodes dites directionnelles présentées ci-dessus (essayant de se diriger vers le but en restant hors de portée des obstacles), se trouvent les méthodes dites de l’espace des vitesses. Celles-ci ont été introduites par la méthode de navigation

courbure-vélocité (en anglais Curvature-Velocity Method - CVM) proposée par Simmons [62]. Son principe est le suivant : au lieu de choisir une direction à suivre en fonction de la position finale et de l'environnement puis calculer une commande à appliquer dans l'espace des vitesses, la CVM évalue les différentes trajectoires possibles dans l'espace des vitesses puis sélectionne dans cet espace un mouvement à exécuter permettant d'éviter les obstacles et de se rapprocher du but. Afin de choisir quelle commande appliquer, à chaque couple vitesse linéaire / vitesse angulaire  $(v, \omega)$  est associée une fonction de cout  $J$  basée sur la distance aux obstacles. La modification de l'orientation du système par rapport au but et sur le temps nécessaire pour rejoindre le but (une vitesse linéaire élevée est donc préférée). La commande maximisant cette fonction de cout est alors sélectionnée et envoyée au robot lors du prochain pas de temps.

Sélectionner directement la commande dans l'espace des vitesses permet ainsi de prendre en compte la dynamique du robot : en effet, en considérant la durée

$T = t_i - t_{i-1}$  de chaque pas de temps auquel est répété le processus de sélection de la nouvelle commande  $(v_i, \omega_i)$  à appliquer au temps  $t_i$  les contraintes d'accélération linéaire  $a_{max}$  et angulaire  $\eta_{max}$  sont respectées si  $(v_i, \omega_i) \in [v_{i-1} - T * a_{max}, [v_{i-1} - T * a_{max}; \omega_{i-1} + T * \eta_{max}]]$

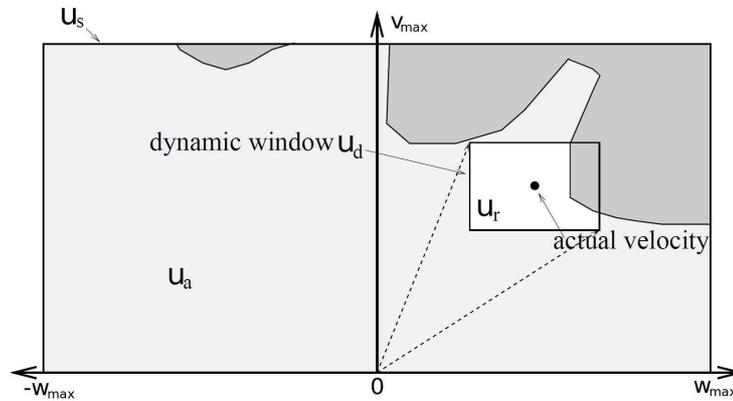
D'après les propres auteurs de la CVM, celle-ci n'est pas toujours apte à garantir la sécurité du mouvement. La CVM peut en effet pousser le robot à passer relativement proche des obstacles et rentrer en collision avec ces derniers. Afin d'éviter ce genre de comportements, ces travaux ont été étendus dans [63]. Cette nouvelle méthode intitulée "Lane Curvature Method" (LCM) est un algorithme de deux étapes : Tout d'abord, des "lignes" permettant de passer entre les obstacles en maximisant la distance par rapport à ceux-ci sont déterminées. Ensuite une commande permettant soit de suivre une ligne soit de rejoindre l'une d'entre elle est calculée comme précédemment par CVM.

### 2.3.5 Fenêtre dynamique

Découlant des CVMs, l'approche de fenêtre dynamique (en anglais Dynamic Window - DW) présentée par [64] conserve le principe de sélection d'un mouvement à suivre dans l'espace des vitesses. A l'instar de la plupart des approches réactives présentées précédemment, les DWs ont été développées pour des robots de type différentiel, contrôles en vitesse linéaire  $v$  et vitesse angulaire  $\omega$ . A chaque pas de temps, une nouvelle

commande constante  $(v, \omega)$  est sélectionnée parmi les vitesses qui respectent les contraintes suivantes :

- Contraintes cinématiques :  $v \in [0; v_{max}]$  et  $\omega \in [-\omega_{max}; \omega_{max}]$  ou  $v_{max}$  et  $\omega_{max}$  sont les vitesses maximales admissibles.
- Contraintes dynamiques : Les accélérations linéaire et angulaire  $a$  et  $\eta$  appliquées entre chaque pas de temps doivent être bornées.  $a \in [0; a_{max}]$  et  $\eta \in [-\eta_{max}; \eta_{max}]$  ou  $a_{max}$  et  $\eta_{max}$  sont les accélérations linéaires et angulaires maximales.
- Garantie de sécurité passive : Le système doit être certain de pouvoir s'arrêter avant d'entrer en collision avec un obstacle.



**Figure 2.13** – Fenêtre Dynamique (DW) : Calcul du mouvement à appliquer à chaque pas de temps dans l'espace des vitesses  $\tilde{u} = (v, \omega)$  Les commandes candidates  $\tilde{u}_r$  sont situées à l'intersection des vitesses admissibles  $\tilde{u}_s$ , des vitesses respectant les contraintes dynamiques  $\tilde{u}_d$  et des commandes  $\tilde{u}_a$  permettant de s'arrêter avant de rentrer en collision avec un obstacle de l'environnement (source [64]).

Notons  $\tilde{u}_s$  l'ensemble des vitesses admissibles respectant les contraintes cinématiques,  $\tilde{u}_d$  les vitesses respectant les contraintes dynamiques et  $\tilde{u}_a$  les vitesses permettant de s'arrêter avant d'entrer en collision avec les obstacles de l'environnement (cf. Fig. 2.13). L'ensemble des commandes candidates  $\tilde{u}_r$  est alors défini par :

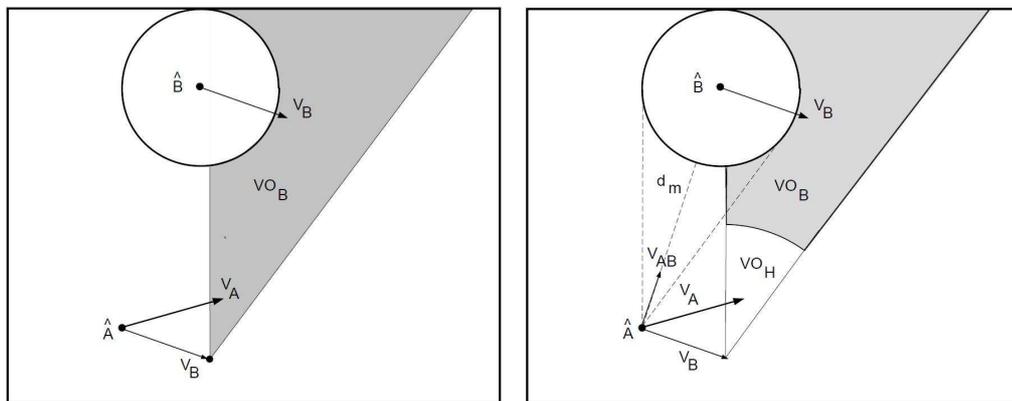
$$\tilde{u}_r = \tilde{u}_s \cap \tilde{u}_d \cap \tilde{u}_a$$

Une fois cet ensemble défini, une fonction de cout similaire aux CVMs est définie. La commande choisie est de même la commande maximisant cette fonction de cout.

Par sa volonté d'assurer une sécurité passive, l'approche de DW est devenue l'une des approches de navigation réactives les plus populaires de nos jours. Cette approche initiale souffrait d'une limitation importante : seule la position courante des obstacles était prise en compte, mais pas leur mouvement. La navigation en environnement dynamique avec ce type d'approche en était donc fortement compromise. Afin de palier ce problème, Seder et

Petrovic ont proposé une extension intitulée "Time Varying Dynamic Window" ([65]). Celle-ci calcule à chaque instant un ensemble de trajectoires probablement suivies par les obstacles dans le futur. Une vérification de collision à court terme peut donc être opérée.

### 2.3.6 Représentation des obstacles dans l'espace des vitesses



**Figure 2.14** – Représentation des obstacles dans l'espace des vitesses (VO) : Etant donné un robot A et un obstacle B, la région  $VO_B$  représente l'ensemble des vecteurs vitesse de A menant à une collision avec l'obstacle B si tous deux conservent leur mouvement.

(source [66])

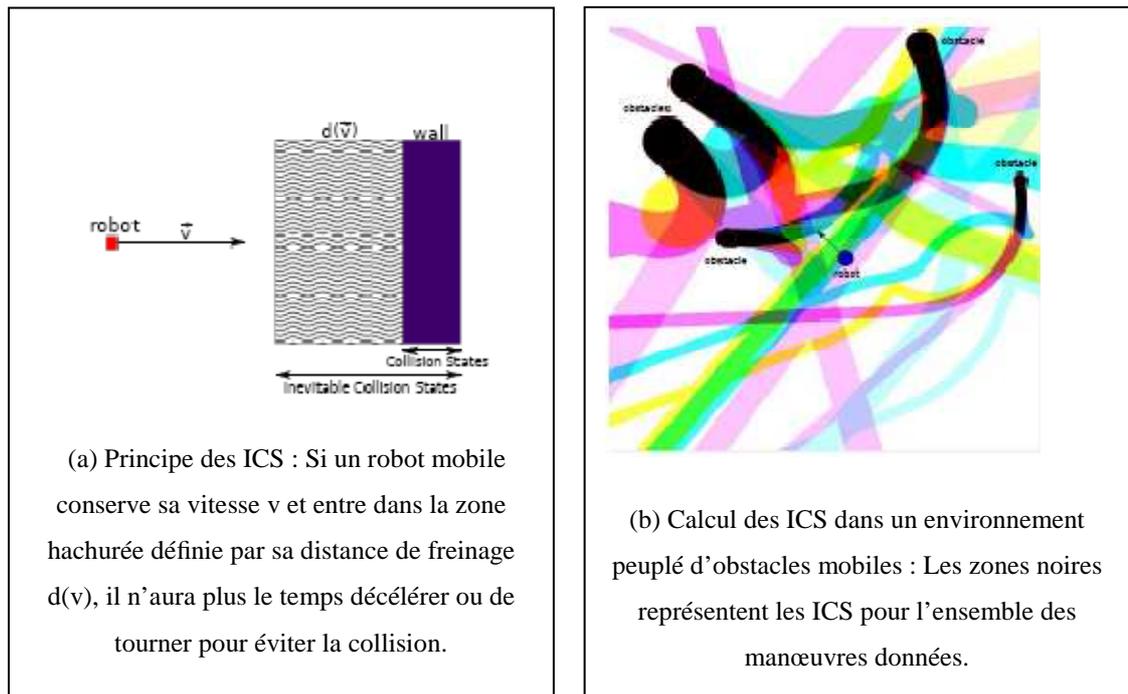
Dans le but de prendre en compte non seulement la dynamique du système robotique, mais également la dynamique de l'environnement dans lequel évolue ce système, Fiorini et Shiller ont introduit une approche intitulée "Velocity Obstacles" (VO [67]). Supposant une connaissance à priori du mouvement des obstacles mobiles, l'approche consiste à caractériser parmi les vitesses admissibles (respectant les contraintes cinématiques et dynamiques du système), celles menant à une éventuelle collision avec les obstacles dans le futur (jusqu'à un certain horizon temporel  $t_h$ ). En supposant qu'un obstacle B va conserver une vitesse constante dans un futur proche (par exemple par approximation

linéaire de sa vitesse courante), il est possible de déterminer les vitesses relatives du système A à cet obstacle menant à une collision dans le futur. L'ensemble de ces vitesses "interdites" s'illustre graphiquement comme présenté Fig. 2.14(a)) par un cône de vecteurs vitesse interdit.

Certaines de ces vitesses ne conduiront bien sur à une collision qu'après un temps relativement élevé. En limitant les  $VO_S$  à un horizon temporel  $t_h$ (cf. Fig. 2.14(b)), on obtient ainsi une approximation raisonnable des vitesses interdites pour le système A.

Plusieurs extensions de ces travaux ont vu le jour ces dernières années, telle la prise en compte d'approximation du modèle du futur des obstacles plus complexes [68] ou encore une tentative définition du "bon horizon temporel" nécessaire à la garantie de la sécurité du mouvement [69]. La détermination de cet horizon temporel est encore un sujet prêtant fortement à débattre à l'heure actuelle.

### 2.3.7 Navigation basée sur les états de collisions inévitables



**Figure 2.15** – Etats de Collisions Inévitables (ICS) : Un ICS est un état tel que, quelque soit le contrôle appliqué en entrée d'un système robotique A, il entrera en collision avec un obstacle. Ces états doivent donc être évités afin d'assurer la sécurité du système (source [70]).

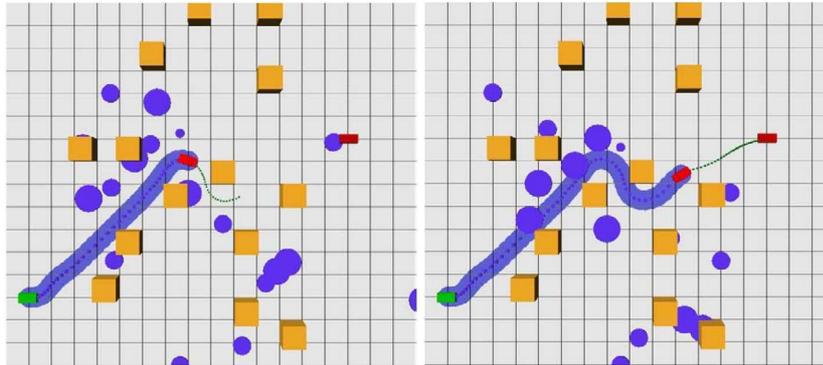
Visant désormais comme objectif l'insertion de robots autonomes en zones urbaines au milieu de piétons, de véhicules ou d'autres robots, la sécurité du mouvement des systèmes robotiques est devenue un axe prioritaire de recherche dans le domaine. Dans cette optique est née la notion d'état de collision inévitable fortement développée dans [71, 72, 70, 73] et illustrée Fig. 2.15.

**Déf. 4** (Etat de Collision Inévitable (ICS)) Un état  $S$  du système  $A$  est un état de collision inévitable si, quelque soit la séquence de contrôles appliquée en entrée du système  $A$ , il existe un temps  $t$  auquel le système  $A$  est assuré de rentrer en état de collision.

De par cette définition, il devient clair qu'il est nécessaire pour assurer la sécurité d'un système robotique (et des autres agents évoluant dans son environnement) d'éviter non seulement les états de collisions mais ; également les ICS, i.e. les états menant inévitablement à une collision. La détermination des ICS nécessite, comme pour les VOs de prendre en considération la dynamique du système, mais également celle des obstacles mobiles qui l'entourent (et par conséquent, une prévision de leur mouvement dans le futur). Parthasarathi et Fraichard se sont efforcés à proposer une méthode basée sur une sous-approximation de l'espace des contrôles permettant d'évaluer si l'état d'un système robotique est un ICS ou non [72]. Dans la continuité de ces travaux, Martinez et Fraichard ([73]) ont développé une méthode de navigation réactive permettant à chaque instant de passer d'un état non-ICS vers un autre état non-ICS.

Cette approche semble être à l'heure actuelle la meilleure option pour se rapprocher d'un risque de collision nul, néanmoins elle reste fortement couteuse et dépendante de la fiabilité du modèle prévisionnel du mouvement des obstacles considéré.

### 2.3.8 Planification de mouvement partiel



**Figure 2.16** – Planification de mouvement partiel : Etant donné un temps de décision fixe limite, la méthode choisit de suivre la trajectoire planifiée se rapprochant le plus près du but si celui-ci n’a pas été atteint (source [74]).

Une dernière approche réactive mérite d’être notée : il s’agit de la planification de mouvement partiel (en anglais : Partial Motion Planning – PM utilisée par [75, 76, 74]. Celle-ci consiste à calculer relativement, en un temps de décision fixe, une trajectoire se rapprochant le plus possible du but (cf. Fig. 2.16). Cette méthode consiste en un algorithme à trois étapes répète à chaque pas de temps :

- Mise à jour du modèle de l’environnement à partir des entrées capteurs du robot.
- Recherche délibérative d’une trajectoire menant à l’état but. Si le but n’a pas été atteint après un temps de décision fixe, la trajectoire calculée s’en rapprochant le plus est choisie comme trajectoire à suivre.
- Enfin, le mouvement planifié au pas de temps précédent est exécuté.

Cette approche permet donc d’être réactive aux diverses évolutions de l’environnement tout en étant capable de sortir des impasses non d’ détectées à priori.

Elle reste sujette à des minima locaux, mais en est néanmoins bien plus robuste que les approches citées précédemment.

### 2.3.9 Défaut de convergence vers le but

Toutes les approches réactives citées ci-dessus disposent d’une complexité suffisamment faible pour être employée en temps réel au cours de la navigation. Cette caractéristique n’assure cependant en aucun cas la sécurité du système robotique (il n’est

pour la plupart de ces approches ni garanti qu'il sera capable de s'arrêter s'il rencontre un obstacle et encore moins qu'il sera capable d'éviter un obstacle hostile se dirigeant vers lui). La capacité à raisonner sur le futur de [65, 68, 73] tend à favoriser une navigation sûre. C'est donc l'une des caractéristiques que nous souhaiterions intégrer au développement d'une nouvelle technique de navigation.

Malgré ces avantages par rapport aux approches délibératives, aucune de ces méthodes n'est capable d'assurer la convergence vers le but. Nous présentons alors dans la section suivante une méthode de déformation de mouvement essayant à la fois de s'assurer que celui-ci sera bien atteint, tout en évitant les obstacles au cours de l'exécution du mouvement.

## 2.5 Conclusion

Nous avons présenté dans cet état de l'art sur la navigation autonome d'une part des approches dites délibératives i.e. destinées à planifier un mouvement complet entre deux configurations, d'autre part des approches dites réactives i.e. calculant un nouveau mouvement à suivre à chaque pas de temps afin de pouvoir s'adapter au mouvement d'obstacles mobiles ou inattendus.

Cette thèse étant axée sur la navigation autonome en environnement dynamique, il va de soi qu'une simple planification de mouvement ne correspond pas à nos attentes tandis que le manque de convergence vers le but des approches réactives nous pousse à nous tourner vers une approche hybride palliant cet inconvénient.

# **Chapitre 3 :**

## **Conception et réalisation de la plateforme mobile**

### 3.1. Introduction

L'objectif de ce travail est l'application de la méthode de champ de potentiel artificiel sur une plateforme mobile expérimentale.

Pour entamer ce travail, on commence par la réalisation d'une plateforme mobile dont les étapes à suivre et les résultats obtenus sont présentés à la suite de ce chapitre.

### 3.2. Le cahier de charge

On a besoin d'une plateforme mobile expérimentale sur des roues, qui soit solide pour supporter des charges et doit avoir une possibilité d'extension pour s'adapter à d'autres applications que sa stabilité est exigée.

### 3.3 La réalisation pratique

De nombreuses configurations sont possibles pour un robot mobile muni de roues.

- Robot tricycle: un moteur de propulsion couplé à 2 roues motrices et un moteur de direction couplé à une roue directionnelle. Le centre de masse se retrouve le plus près possible de l'axe des roues motrices.
- robot à vitesses différentielles asymétrique: 2 moteurs de propulsion et de direction couplés à deux roues motrices. Les roues motrices sont disposées à l'avant ou à l'arrière et une roue-libre assurant la stabilité est disposée à l'autre extrémité du robot. Le centre de masse se retrouve le plus près possible de l'axe des roues motrices.
- robot à vitesses différentielles symétrique: 2 moteurs de propulsion et de direction couplés à deux roues motrices. Les roues motrices sont disposées au centre du robot et 2 roues-libres assurant la stabilité sont disposées à l'avant et à l'arrière du robot. Le centre de masse se retrouve le plus près possible de l'axe des roues motrices.
- robot à 4 roues motrices et directionnelles (configuration de B0b4, notre robot précédent): 4 roues motrices jumelées 2 à 2 (côté gauche ensemble et côté droit ensemble), 2 moteurs de propulsion (vitesses différentielles), un pour les roues de gauche et un pour les roues de droite, 2 moteurs de direction, un pour les roues avant et un pour les roues arrière. Le centre de masse se retrouve le plus près possible du centre du robot.

La configuration qui a été choisie est la configuration à vitesses différentielles symétriques. Nous n'énumérerons pas les qualités et les défauts de chacune des configurations puisque cela serait

trop long. Par contre nous pouvons justifier le choix effectué en mentionnant les principales qualités de cette configuration qui, dès le départ, ont été jugées plutôt intéressantes dans le but de respecter les objectifs de ce projet.

Voici les principaux avantages de cette configuration:

- Simplicité de contrôle : la cinématique et la dynamique du robot sont très simples, facilitant le développement de contrôleurs haut niveau.
- Positionnement précis: le positionnement du robot à l'aide de ses capteurs de position est relativement précis comparativement à d'autres configurations.
- Bonne fiabilité mécanique: le nombre de membrures et de composantes étant réduit, les bris seront peu fréquents.

### 3.3.1 Disposition des éléments

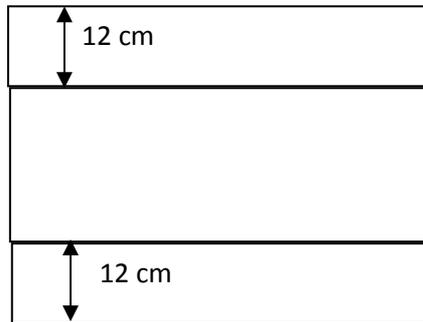
La configuration du robot est établie. Nous connaissons maintenant les différents éléments qui doivent se retrouver sur la base mécanique du robot. Ainsi, nous devons trouver un moyen d'agencer les roues motrices (2), les moteurs (2) et les roues-libres (2) en utilisant une structure légère et suffisamment rigide. La base mécanique se doit également d'incorporer les batteries (3) du robot puisqu'elles représentent près du tiers du poids du robot et il est donc nécessaire de les soutenir par une structure suffisamment rigide. Les lignes qui suivent présentent les principales règles qui ont été suivies pour déterminer la disposition de ces différents éléments et la base mécanique qui en a résulté.

Nous savons que la majorité du poids proviendra des batteries. Nous désirons donc conserver les batteries le plus près possibles de l'axe des roues motrices. Ces batteries doivent également être suffisamment basses pour permettre au robot d'atteindre les vitesses et les accélérations désirées sans le danger de chavirer. Les batteries seront donc disposées le plus près possible de l'axe des roues motrices et le plus près possible du sol. En conservant les roues motrices, les moteurs et les batteries disposées près du centre du robot et de façon symétrique à l'axe des roues motrices, nous obtenons ainsi une inertie qui sera relativement faible et nous conservons le centre de masse au centre de l'axe des roues motrices.

Nous avons toutefois conservé un espace entre les deux moteurs pour permettre l'ajout de moteurs plus puissants, possiblement plus longs, si nécessaire. Finalement, les roues-libres ont été disposées de façon à ce que les points de rotation de ces celle-ci et les points de contact des roues motrices forment un cercle.

### 3.4 Description de la base

La base de notre plateforme est un rectangle de dimensions Largeur : 34 cm ; Longueur : 42.5 cm traversé en longueur par deux barres ce qui engendre trois rectangles comme représenté par le schéma à la figure N° 3.1



*Figure N °3.1* : schéma explicatif du châssis de la base.

La matière de fabrication est une cornière d'aluminium de 5 cm .Ce choix nous assure la rigidité et la légèreté en même temps. L'assemblage fait par des (écrous –boulon Ø10) la figure le représente

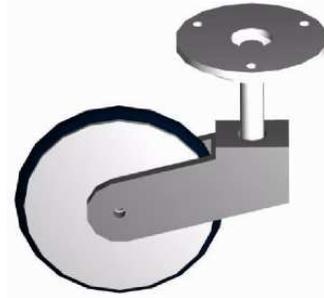


*Figure N °3.2* : châssis de la base du robot

### 3.4.1 Roues-libres

Les roues-libres assurent la stabilité du robot pour les différents mouvements possibles. Comme il a été mentionné précédemment, nous disposons de deux roues-libres à l'avant ,pour obtenir des performances intéressantes. Nous savons que les mouvements de ces roues, en particulier lorsque le robot passe d'une vitesse tangentielle positive à une vitesse tangentielle négative, engendrent des perturbations sur les mouvements du robot. Plus le poids et la friction de ces roues seront importants, plus les perturbations ne seront pas importantes. Nous cherchons donc à obtenir une roue-libre qui soit la plus légère possible et qui offre un roulement à friction très faible. Nous désirons également une roue-libre qui puisse s'ajuster en hauteur, de façon à pouvoir s'adapter à une variation du rayon des roues motrices.

Nous avons tout d'abord effectué une recherche pour trouver un modèle de roue-libre qui répond à nos besoins. Nous avons constaté que de telles roues (légères avec peu de friction) étaient introuvables et que nous devions donc les concevoir et les fabriquer. Après un court processus de conception et un choix judicieux de matériaux et de composantes, nous avons obtenu le résultat illustré (en modélisation 3D) dans la figure N °3.3.



*Figure N °3.3 : Roue-libre (modélisation 3D)*

La roue comme telle est constituée d'un mince disque d'aluminium et ce dernier est entouré d'un anneau de caoutchouc ("O-ring"). La rotation de la roue est assurée par deux petits roulements à billes. Nous obtenons ainsi une roue légère et ayant une bonne adhérence avec le sol. Ensuite, le support de la roue est constitué d'un étrier fait d'un matériau composite léger et rigide. Dans cet étrier est insérée une vis (permettant l'ajustement de la hauteur de la roue) qui sert de lien entre l'étrier et le point de fixation et de rotation de la roue-libre (disque à trois trous au-dessus). Le point de fixation et de rotation permet de fixer la roue-libre à la base mécanique du robot et il permet également à la roue de s'orienter selon le sens du mouvement. La rotation de cet axe est assurée par un roulement à billes. Nous obtenons donc un résultat très satisfaisant puisque la roue obtenue est très légère grâce à l'utilisation de matériaux légers, qu'elle offre un frottement minime grâce aux roulements à billes et finalement qu'elle est ajustable en hauteur comme nous le désirions au départ. Vu le manque de temps et de moyens, on utilisera des roues libres existant au marché. On installe les roues sur un support en aluminium avec des Rivets et on les fixe au châssis par des boulons. La roue libre utilisée est illustrée à la figure 3.4.



*Figure N °3.4 : L'une des roues folles utilisée*

La perception est une fonction essentielle en robotique, pour cette raison on dote notre plateforme mobile de deux capteurs de position et deux autres de proximité ultrason.

### 3.4.2 Capteur de position

Pour avoir la position de la plateforme, on utilise deux capteurs de type potentiomètre (Figure N °3.5). Le principe de fonctionnement consiste à l'exploit de la relation entre la position du curseur et la tension au borne du potentiomètre puis à faire l'étalonnage avec la position du robot et pour sa fixation à la base on utilise un support illustré à la **Figure N °3.6**.



Figure N °3.5 : capteur de position



Figure N °3.6 : Support de fixation du capteur de position

### 3.4.3 Le système roue motrice - axe - poulie

La mobilité de notre structure est assurée par les roues motrices qui sont fixées au châssis par un axe. Ce dernier est usiné en acier avec une longueur de 17 cm et de diamètres différents repartis comme représentés dans la figure n° 3.7.

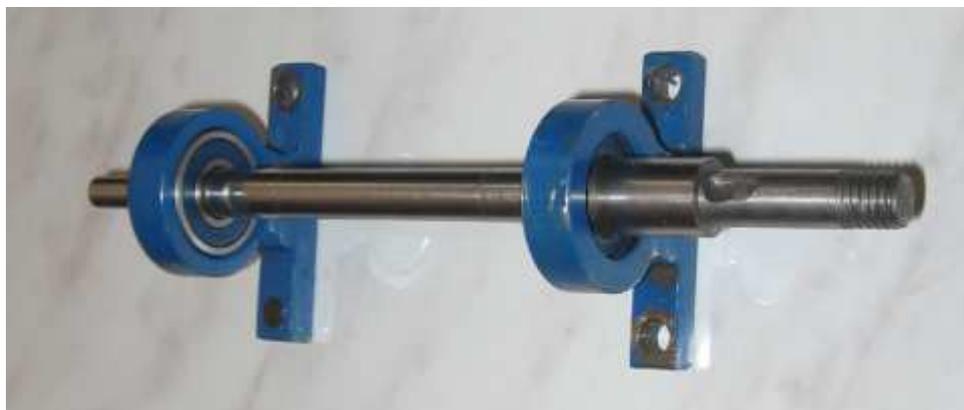


**Figure N \*3.7 :** Schéma illustratif de l'axe

La première partie dotée d'une loge de clavète pour fixer la poulie. Elle est filetée à l'extrémité pour assembler la roue motrice et la poulie par un écrou. Le rôle de la deuxième partie est la fixation de la poulie et du roulement. Sur les extrémités de la troisième partie on fixe deux roulements par pression  $\text{ØH7R6}$  [78]. Ces roulements sont enveloppés par des chemises soudées avec des morceaux de fer de deux trous, sur lesquels on fixe l'axe avec le châssis de la base de la plateforme comme c'est illustré dans les figures 3.8 et 3.9.



**Figure N \*3.8 :** Chemise de roulement



**Figure N \*3.9 :** L'axe avec des chemises et des roulements

La dernière partie assure la liaison entre l'axe et le capteur de position par une bague. Le système roue motrice - axe - poulie est représenté sur la Figure n° 3.10.



Figure N °3.10 : Dispositif Axe Roue et Poulie

### 3.4.4 Moteurs

La motorisation est constituée de deux moteurs série universel représenté sur la Figure N°3.11.



Figure N °3.11 : moteur série universel

La mise en place des deux moteurs avec le châssis est représentée à la figure N° 3.12.

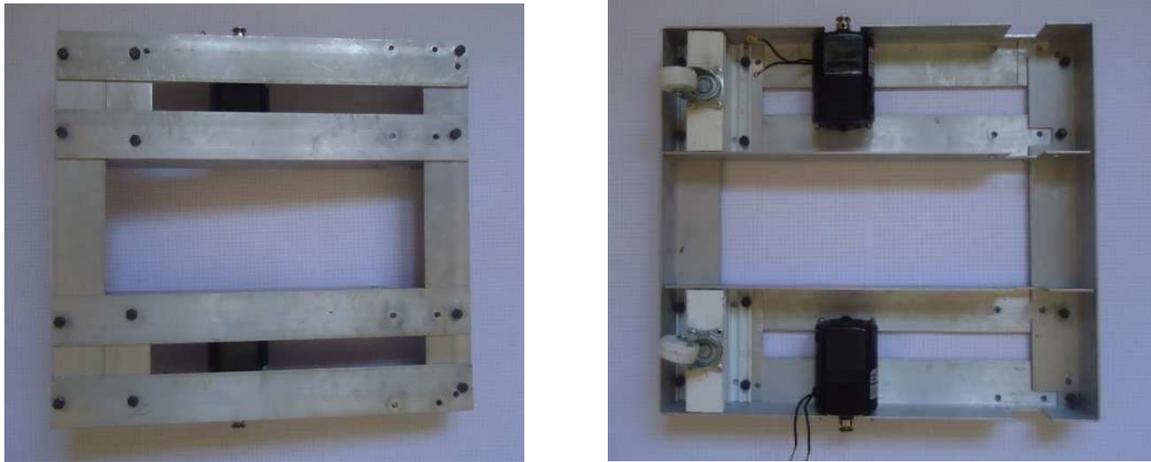


Figure N \*3.12 : châssis +moteurs +roues-libres

### 3.4.4.1 Le principe de fonctionnement d'un moteur série universel

Un moteur série universel est un moteur constitué comme un moteur série à courant continu. mais alimenté et utilisé en courant alternatif .En effet, si on intervertit les bornes d'un moteur –série (fig.3.13), le flux inducteur  $\Phi$  et le courant dans l'induit  $i$  changent tous les deux de sens, de telle sorte que le couple développé  $T = K \Phi i$  ne change pas de sens. Un moteur – série fonctionne donc indifféremment en courant continu ou en courant alternatif [77].

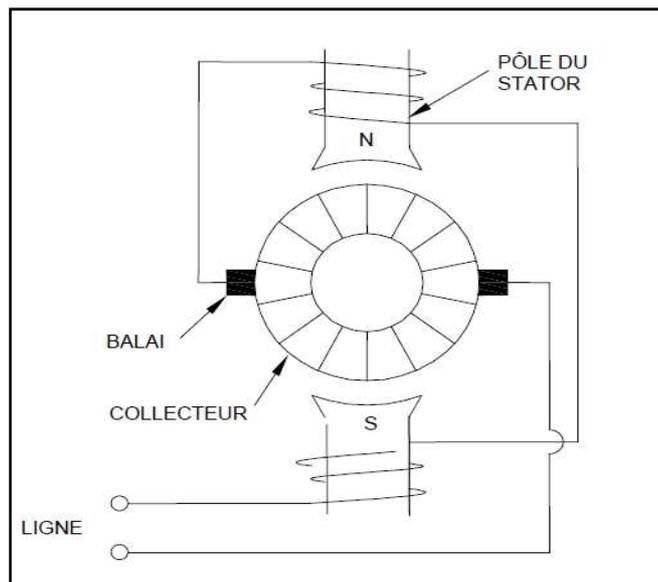


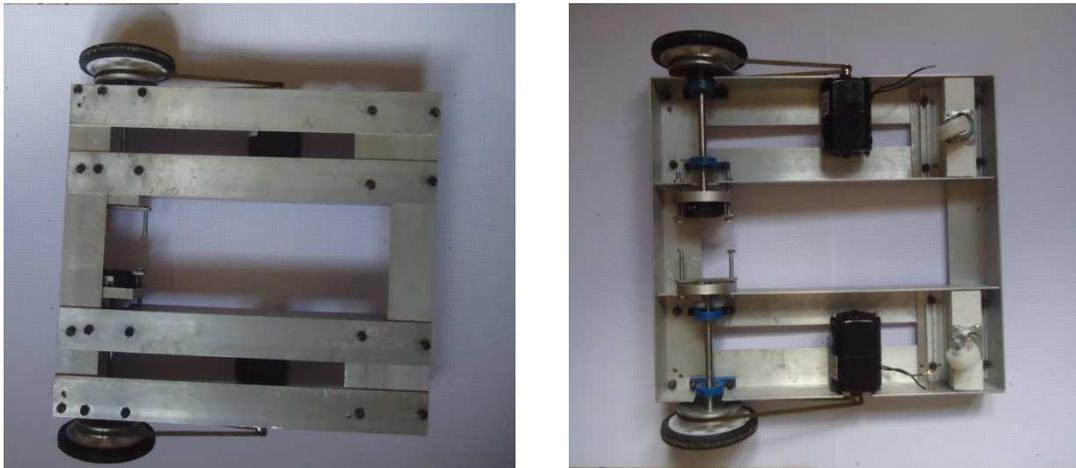
Figure N \*3.13 : fonctionnement d'un moteur série universel

La liaison des moteurs avec le dispositif axe, roue et poulie est assurée par des courroies. L'une des courroies est représentée sur la figure 3.14.



*Figure N °3.14 : La courroie utilisée*

La base mécanique réellement obtenue est représentée sur la figure 3.15.



*Figure N °3.15 : Base mécanique du robot*

### 3.5.1 Le boîtier des circuits

Le boîtier est fabriqué en cornière d'aluminium de 3 cm. pour être léger et solide .Il est conçu de telle sorte qu'il peut supporter et même embarquer un micro-portable comme illustré sur la figure 3.16. Sa forme est cubique, couverte par une tôle inox .son toit est en bois.



*Figure N °3.16 : micro-portable embarqué sur la plateforme*

Le boîtier est troué en avant et en arrière pour le dégagement de la chaleur due au circuit électronique. On fixe les supports des capteurs ultrasons sur le toit avec des angles bien calculés comme représenté sur la figure 3.17.

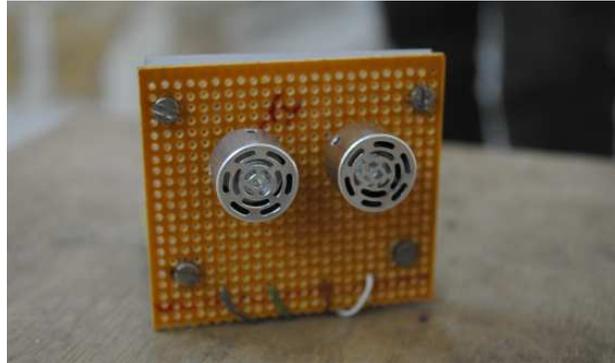


*Figure N °3.17 : le boîtier du robot*

Il est fixé sur la base par des boulons 10.

### 3.5.2 Capteur ultrason

Pour assurer à notre robot mobile la perception de l'environnement extérieur on doit le doter de deux capteurs ultrason voir la Figure N °3.18 (pour plus de détail voir chapitre n°4)



*Figure N °3.18 : capteur ultrason*

Le résultat que nous avons obtenu peut être observé sur la figure N° 3.22, qui représente la plateforme mobile réellement obtenue. Nous obtenons donc un résultat satisfaisant, soit une plateforme qui est symétrique. Nous obtenons également une structure légère qui pèse un total de 3,3kg ce qui inclut un poids de 1,30kg pour les moteurs.



*Figure N °3.22 : La plateforme mobile*

**NB** : les dessins mécaniques sont présentés à l'annexe A

### 3.6 Etage de puissance

L'étage de puissance de notre plateforme expérimentale consiste à réaliser deux hacheurs parallèles qui permettent à partir d'une alimentation de 24 V, d'alimenter et faire varier la vitesse de deux moteurs séries universels à courant continu de 220 V.

Ces moteurs sont utilisés pour générer les mouvements de notre plateforme expérimentale Aurès robot.

L'alimentation des hacheurs est garantie par deux batteries de 12V, embarquées sur notre robot mobile.



*Figure N °3.23* batterie de 12V utilisé

## II.6.2-Schéma synoptique de l'étage de puissance

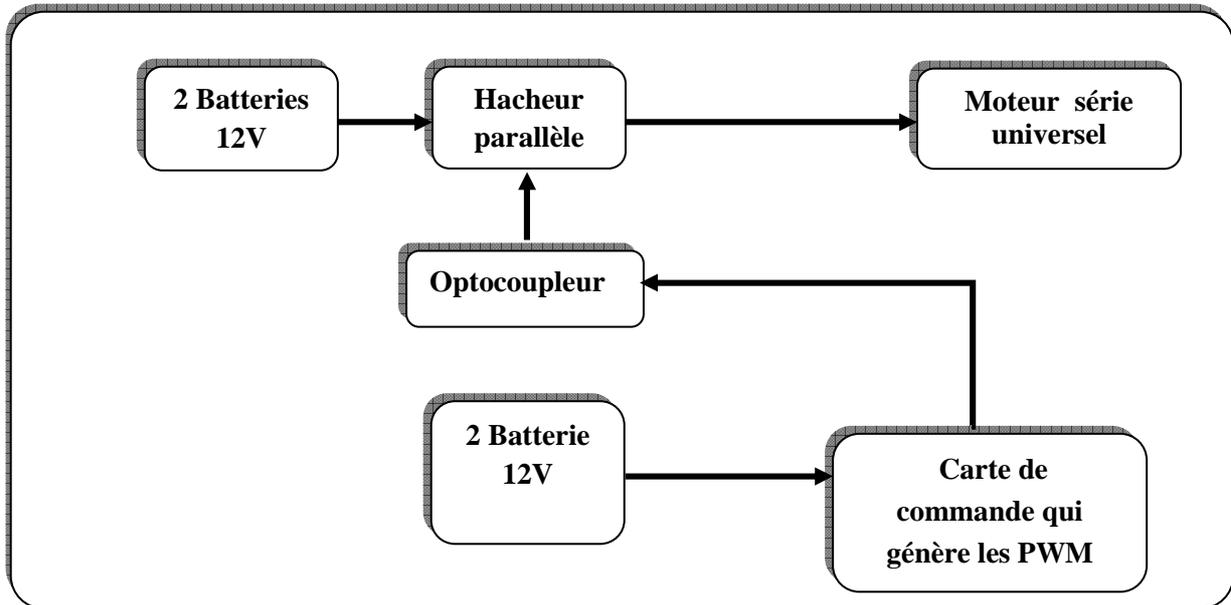


Figure N °3.24 : Schéma synoptique de l'étage de puissance

### 3.6.2 Choix des batteries

Le choix des batteries est crucial dans le processus de conception d'un robot mobile puisqu'il implique d'importantes contraintes aux niveaux de la conception mécanique et de l'autonomie électrique. Effectivement, le volume occupé par les batteries et le poids qu'elles possèdent influencent de façon importante la conception mécanique au niveau de la disposition des éléments et au niveau du choix des moteurs. Il est donc inévitablement nécessaire de faire des compromis entre autonomie électrique et poids des batteries pour ainsi obtenir un robot qui offre des performances en accélération et une autonomie électrique satisfaisantes.

Il existe trois principales familles de batteries rechargeables qui sont appropriées pour une utilisation dans un robot mobile (utilisation cyclique, décharge rapide et courants demandés de quelques ampères): les batteries à acide-plomb ("SLA"), les batteries au Nickel-Cadmium ("Ni-Cad") et les batteries au Nickel-Hydrure de métal ("Ni-MH"). Les deux dernières familles (Ni-Cad et Ni-MH) offrent une densité d'énergie beaucoup plus grande que la première (SLA). La plus grande densité étant offerte par les batteries Ni-MH. Ces batteries sont toutefois beaucoup plus dispendieuses que les batteries à acide-plomb<sup>1</sup> et elles demandent également une attention plus soignée au niveau de la recharge. La solution à acide-plomb constitue donc une solution très peu dispendieuse et la recharge de ces batteries est assez facile. Par contre, leur densité d'énergie est assez faible et elles impliquent

donc un poids important, ce qui limite les performances du robot. Vu notre budget assez limité pour le projet, le choix de la solution acide-plomb est approprié.

### 3.6.2 Principe de fonctionnement l'hacheur parallèle

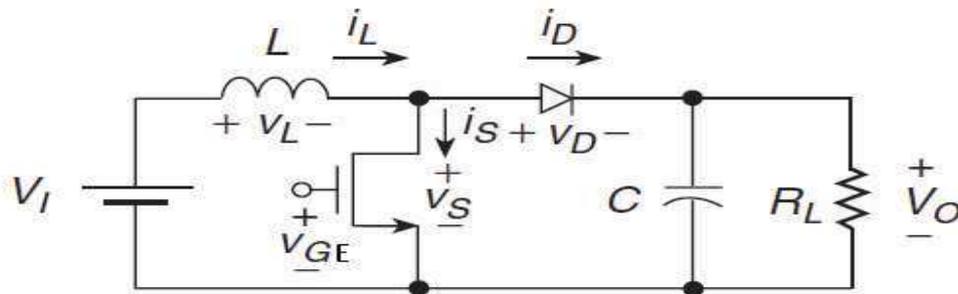


Figure N \*3.25 : Hacheur parallèle

On distingue 2 modes de fonctionnement:

- Continuous Conduction Mode (CCM) : fonctionnement à courant de source ininterrompu.
- Discontinuous Conduction Mode (DCM) : fonctionnement à courant de source interrompu.

### 3.6.3 Analyse du fonctionnement à courant de source ininterrompu :

1<sup>er</sup> phase : (0 < t < DT) :

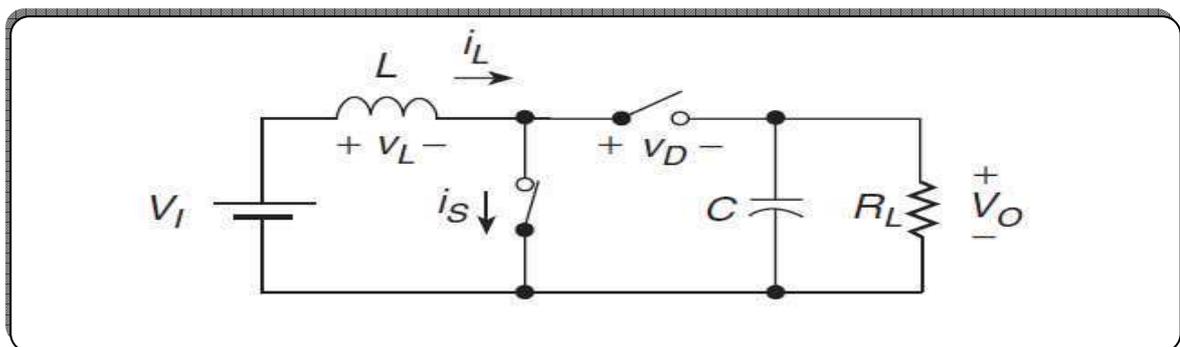


Figure N \*3.26: Hacheur parallèle quand S est fermée et D est ouverte .

La tension à travers l'inductance L est :

$$V_L = V_1 = L \frac{di_L}{dt}$$

Le courant de l'inductance  $i_L$  et le courant de transistor  $i_S$  est donné par :

$$i_S = i_L = \frac{1}{L} = \int_0^t V_L dt + i_L(0) = \frac{1}{L} \int_0^t V_I dt + i_L(0)$$

$$= \frac{V_1}{L} t + \frac{V_I}{L} t + i_L(0)$$

Où  $i_L(0)$  est le courant initiale de l'inductance (à  $t = 0$ ),

La valeur crête du courant de l'inductance :

$$i_L(DT) = \frac{DT V_I}{L} + i_L(0)$$

La fonction du transfert en courant continu :

$$M_{VDC} = \frac{V_0}{V_I} = \frac{I_I}{I_0} = \frac{1}{(1-D)}$$

La valeur crête à crête du courant d'ondulation de l'inductance est exprimée par

$$\Delta i_L = i_L(DL) - i_L(0) = \frac{V_I DT}{L} = \frac{V_I D}{f_S L} = \frac{V_C D}{M_{VDC} f_S L} = \frac{V_0 D(1-D)}{f_S L}$$

Pour des valeurs fixées de  $V_0, f_S, L$  :

$$\frac{d\Delta i_L}{dD} = \frac{V_0}{f_S L} (1 - 2D)$$

La valeur crête du  $\Delta i_L$  se produit à  $D = 0.5$  est donné par :

$$\Delta i_{Lmax} = \frac{V_0}{4f_S L}$$

Quand le rapport cyclique  $D$  augmente de 0 à 1, la valeur crête à crête de l'ondulation du courant de 0, jusqu'à son maximum à  $D = 0.5$ , et puis diminuée à zéro.

La tension de la diode et :  $V_D = -V_0$

La valeur moyenne du courant de l'inductance  $i_L$  est égale au courant d'entrée. par conséquent on arrive à la valeur de crête du courant de l'intercepteur :

$$I_{SM} = I_I + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_0}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2}$$

Cet intervalle de temps est terminé à  $t = DT$  quand l'interrupteur est ouvert par le circuit de commande (PWM). Le courant de l'inductance  $i_L$  circule sans interruptions pour le mode de conduction continu (CCM). Depuis  $i_L(DT)$

Est différent du zéro quand l'interrupteur est ouvert.

L'augmentation de l'énergie magnétique dans l'inductance est :

$$\Delta W_{L(in)} = \frac{1}{2} L [i_L^2(DT) - i_L^2(0)]$$

2<sup>eme</sup> phase ( $DT < t < T$ )

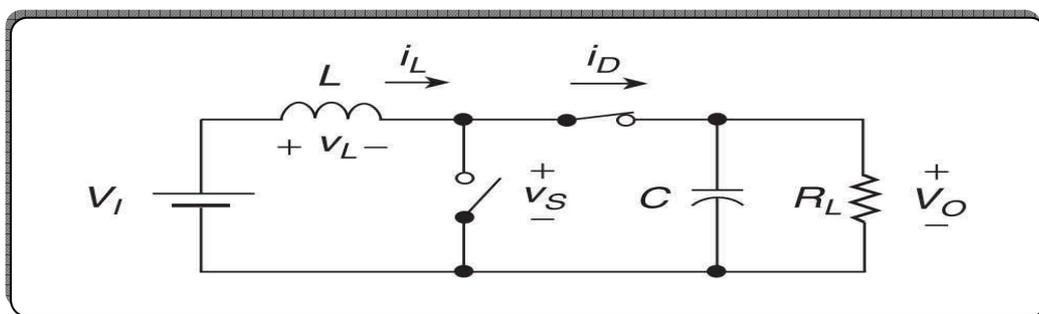


Figure N°3.27 : Hacheur parallèle quand S est fermée et D est ouverte .

$$V_L = V_I - V_O = L \frac{di_L}{dt} < 0$$

lorsque  $V_O > V_I \quad \longrightarrow \quad I_D = i_L = \int_{DT}^t V_L dt + i_L(DT)$

$$= \frac{1}{L} \int_{DT}^t (V_I - V_O) dt + i_L(DT)$$

$$= \frac{V_I - V_O}{L} (1 - DT) + i_L(DT)$$

Ou  $i_L(DT)$  est le courant de l'inductance initiale à  $t=DT$ . La valeur crête-à-crête de l'ondulation du courant de l'inductance est :

$$\Delta i_L = i_L(DT) - i_L(T) = \frac{(V_O - V_I)(1-D)T}{L} = \frac{V_O D(1-D)}{f_s L}$$

Quand :  $V_I = V_O(1 - D)$ .

La tension à travers l'interrupteur S est donnée par :

$$V_S = V_0 = V_{SM}.$$

La valeur crête du courant de la diode est la valeur crête du courant de l'interrupteur est :

$$I_{DM} = I_{SM} = I_I + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{I_0}{1-D} + \frac{\Delta i_L}{2}.$$

Dans le plus mauvais cas l'expression devient :

$$I_{DMmax} = I_{SMmax} = I_{Imax} + \frac{\Delta i_{Lmax}}{2} = \frac{\Delta i_{Lmax}}{1 - D_{max}} + \frac{\Delta i_{Lmax}}{2}$$

Cet intervalle fini à t=T quand l'interrupteur est fermé par le signal du circuit de commande (PWM).

La diminution de l'énergie magnétique stockée dans l'inductance L dans l'intervalle de temps DT < t < T est :

$$\Delta W_{L(out)} = \frac{1}{2} L [i_L^2(DT) - i_L^2(T)].$$

Dans l'état stationnaire, l'augmentation de l'énergie magnétique stockée dans l'inductance L dans l'intervalle de temps 0 < t ≤ DT est égale à la diminution de l'énergie magnétique stockée dans l'inductance L dans l'intervalle de temps DT < t ≤ .

La tension de sortie en fonction du rapport cyclique est :

$$V_0 = \frac{V_I}{1 - D}$$

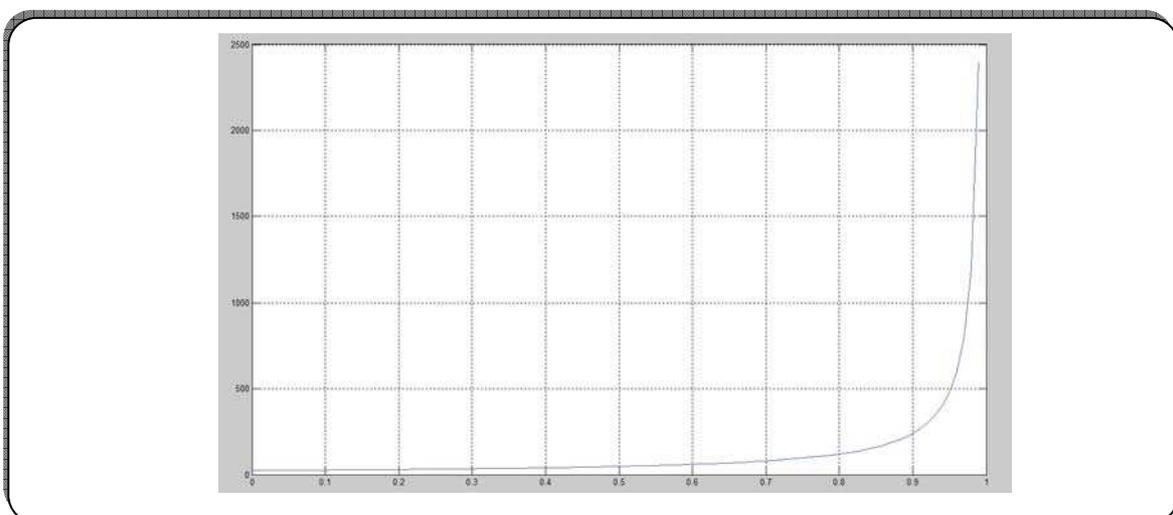


Figure N °3.28 : La courbe de la tension de sortie en fonction du rapport cyclique

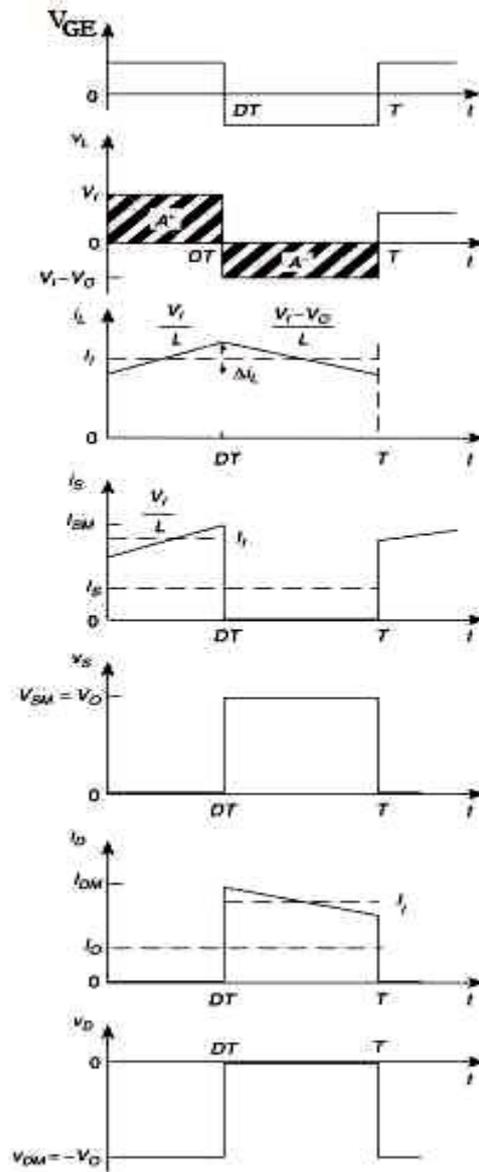


Figure N°3.29: Le chronogramme en mode CCM.

### 3.6.4 Analyse du fonctionnement à courant de source interrompu :

1<sup>er</sup> phase : (0 < t < DT) :

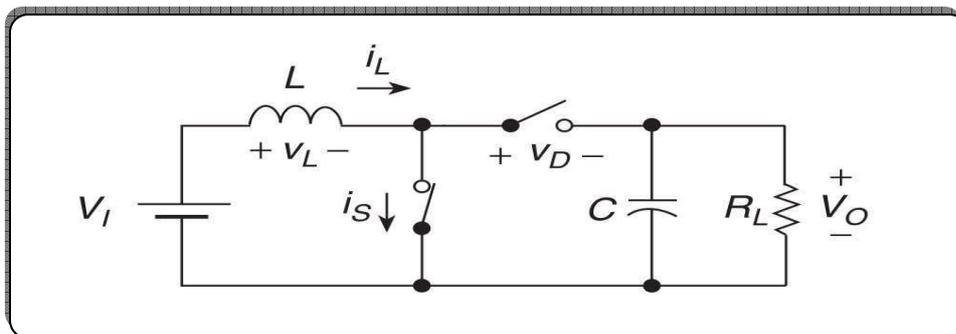


Figure N°3.30 : Hacheur parallèle quand S est fermée et D est ouverte.

$$V_S = 0, i_D = 0$$

La tension à travers l'inductance L est :

$$V_L = V_1 = L \frac{di_L}{dt}, i_L(0) = 0$$

Le courant de l'inductance et de l'interrupteur est :

$$i_S = i_L = \frac{1}{L} \int_0^t V_L dt = \frac{1}{L} \int_0^t V_1 dt = \frac{V_1}{L} t .$$

La valeur crête du courant de l'inductance et de l'interrupteur est :

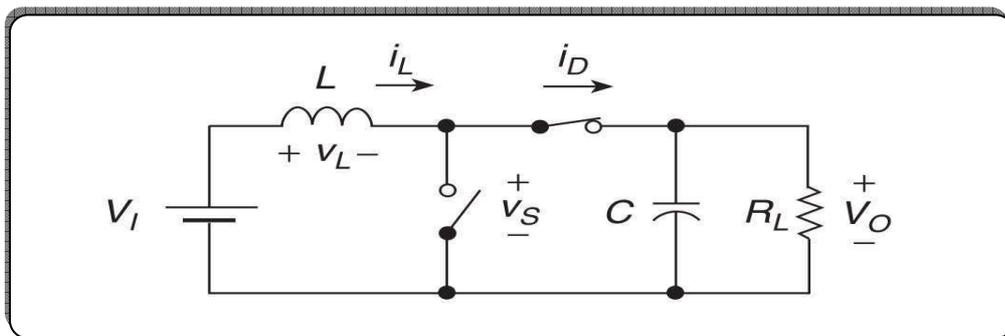
$$I_{SM} = \Delta i_L = i_L(DT) = \frac{V_1 DT}{L} = \frac{V_1 D}{f_S L}$$

La tension à travers la diode est :

$$V_D = -V_0$$

Cet intervalle de temps finit quand l'interrupteur est ouvert par le circuit de commande (PWM) .

**2<sup>eme</sup> phase ( $DT < t \leq (D + D_1)T$ )**



**Figure N \*3.31** : Hacheur parallèle quand S est ouverte et D est fermée.

$$i_S = 0, V_D = 0 .$$

La tension à travers l'inductance L est :

$$V_L = V_I - V_0 = L \frac{di_L}{dt} < 0 .$$

Le courant de la diode et l'inductance est :

$$\begin{aligned}
 i_D = i_L &= \frac{1}{L} \int_{DT}^t V_L dt + i_L(DT) \\
 &= \frac{1}{L} \int_{DT}^t (V_I - V_0) dt + i_L(DT) \\
 &= \frac{V_L - V_0}{L} (1 - DT) + i_L(DT) \\
 &= \frac{V_I - V_0}{L} (1 - DT) + \frac{V_I DT}{L}
 \end{aligned}$$

La valeur crête du courant de la diode et l'inductance est :

$$\begin{aligned}
 I_{DM} = \Delta i_L &= \frac{1}{L} \int_{(D+D_1)T}^{DT} V_L dt \\
 &= \frac{1}{L} \int_{(D+D_1)T}^{DT} (V_I - V_0) dt \\
 &= \frac{(V_0 - V_I) D_1 T}{L} \\
 &= \frac{(V_0 - V_I) D_1}{f_S L}
 \end{aligned}$$

La tension à travers l'interrupteur :

$$V_S = V_0 .$$

Quand le courant de la diode atteint le zéro, cet intervalle de temps est terminé .

**3<sup>eme</sup> phase  $(D + D_1) T < t < T$  :**

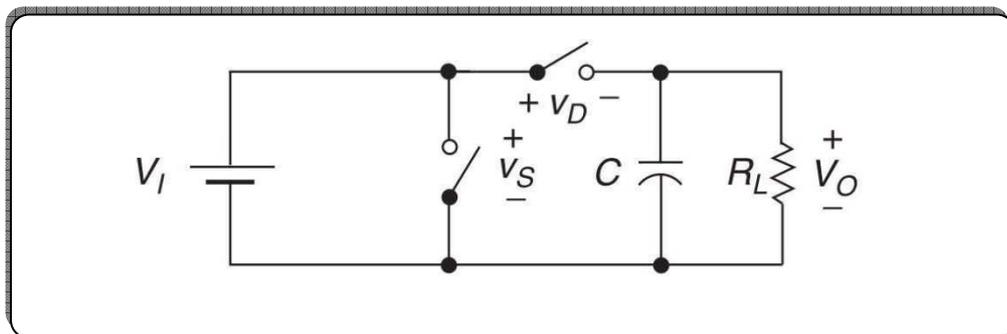


Figure N \*3.32 : Hacheur parallèle quand S et D sont ouverts .

$$i_L = 0; V_L = 0; i_S = 0; i_D = 0.$$

La tension à la borne de l'interrupteur :  $V_S = V_I$ .

Et la tension à la borne de la diode :  $V_D = V_I - V_O$

Cet intervalle de temps est terminé quand l'interrupteur est fermé par le circuit de commande (PWM).

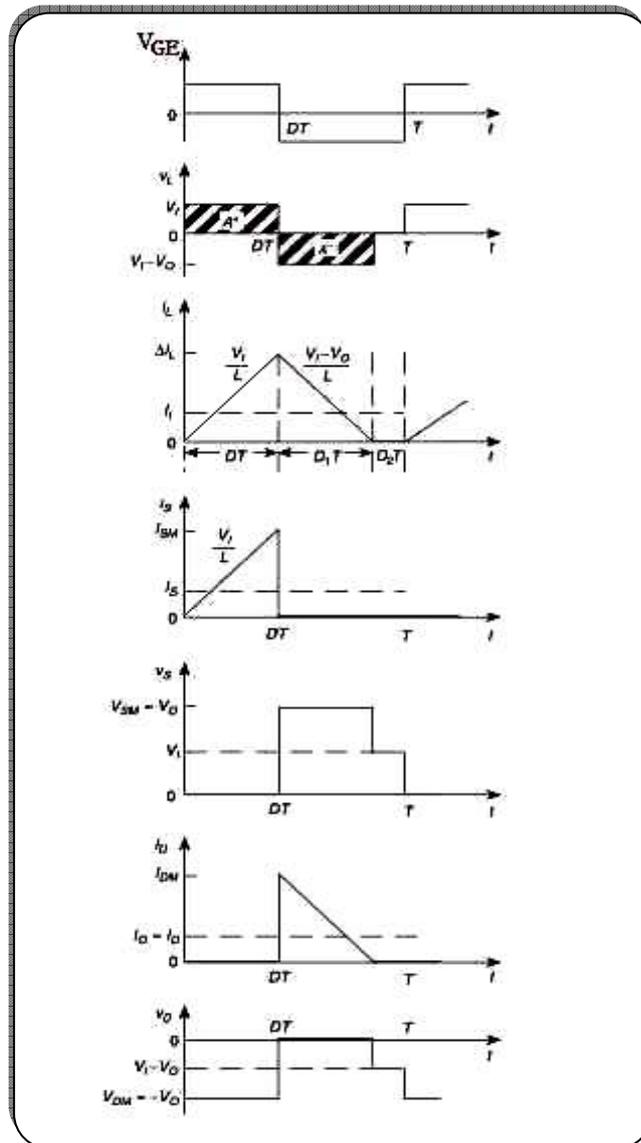


Figure N° 3.33 : Le chronogramme en mode DCM.

### 3.7 L'isolation galvanique :

#### 3.7.1 Les optocoupleurs :

Les composants optoélectroniques permettent d'effectuer la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique et inversement.

On peut associer en série les conversions électrique / optique et optique / électrique.

Ces composants appelés optocoupleurs permettent de transmettre l'information sans contact électrique (isolation galvanique entre les deux parties d'un montage).

##### 3.7.1.2 Principe :

Ce sont des composants comprenant un émetteur et un récepteur optique dans un même boîtier. Il en existe plusieurs types mais le principe reste le même.

L'émetteur est une DEL qui émet un rayon lumineux proportionnel au courant qui la parcourt.

Le récepteur est un composant photo sensible (photodiode, phototransistor...) dont la conduction est contrôlée par le rayon lumineux reçu.

Pour la suite de l'étude on considérera le récepteur comme étant un phototransistor. En régime linéaire le courant  $I_C$  est proportionnel au courant  $I_F$  : c'est le taux de Transfert en courant  $\frac{I_C}{I_F}$

##### 3.7.1.3 -Etat saturé :

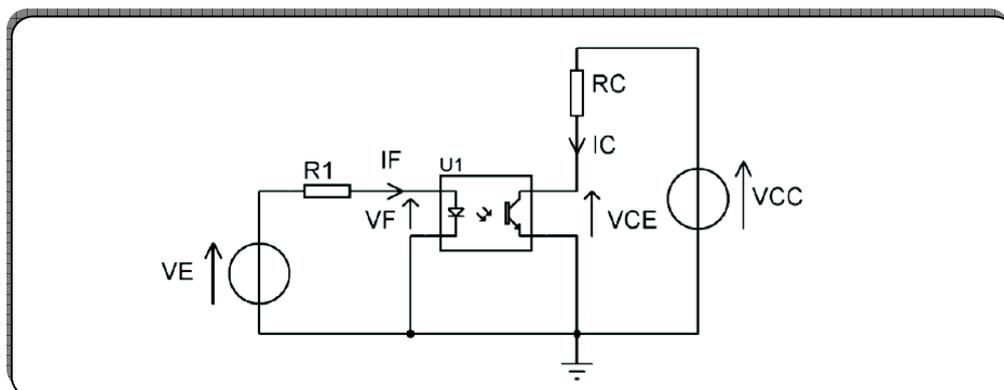


Figure N °3.34 : Schéma de principe d'utilisation de l'optocoupleur

Pour saturer le phototransistor il faut que le récepteur reçoive suffisamment de lumière. On doit avoir  $V_E > 0$  et  $R_1$  choisi correctement pour que  $I_F > I_{FSAT_{min}}$

$$I_F = \frac{V_E - V_{CESAT}}{R_C}$$

Le circuit de sortie détermine la valeur de  $I_C$  :

$$I_C = \frac{V_{CC} - V_{CESAT}}{R_C}$$

### 3.8. La conclusion

Les conclusions retirées de ce chapitre sont :

- Pour améliorer les performances de notre structure on doit utiliser les moteurs à courant continu.
- Notre structure est faite de telle sorte qu'elle peut avoir des extensions pour s'adapter à d'autres applications.

# Chapitre 4

Etude et réalisation d'une carte de commande analogique  
pour appliquer la méthode des champs de potentiel

## 4.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'étude et la réalisation d'une carte de commande analogique pour l'application de la méthode du champ de potentiel artificiel.

Les lignes qui ci-dessus expliquent en détail le fonctionnement elles interprètent les résultats obtenus.

## 4. 2. Le schéma synoptique de la carte de commande analogique

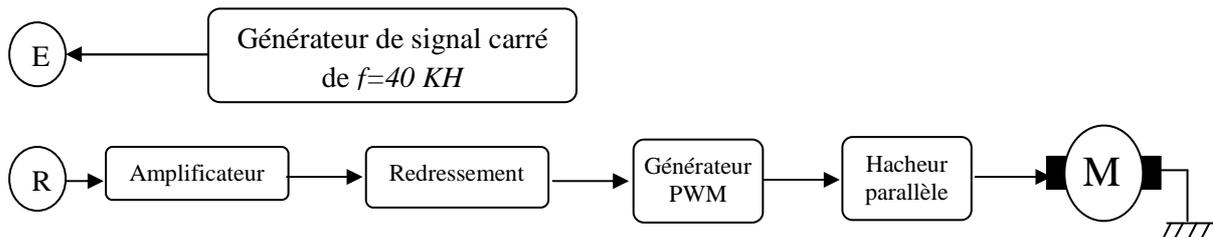


Figure N °4.1 : Schéma synoptique de la carte de commande analogique

## 4.3. Le principe de fonctionnement de la carte

La partie principale de notre carte de commande analogique est un système d'émetteur et de récepteur ultrasons.

La fonction de l'émetteur consiste à émettre des ondes sonores de fréquence de 40 KHZ, excités par un générateur de signal carré.

Si le paquet d'ondes sonores rencontre un objet, comme la surface d'un mur, les ondes sonores réfléchies vers le détecteur seront affaiblies à cause de phénomène d'amortissent. Pour cette raison on ajoute au détecteur un circuit amplificateur.

Le signal dû à l'amplification redressé est injecté à un amplificateur de différence et on le compare avec signal de seuil choisis. Le signal résultant est relatif par rapport à la distance de l'obstacle. Ce signal influe à son tour sur un générateur de PWM qui commande un hacheur parallèle lié à un moteur.

#### 4.4. Le module émetteur ultrason

La patte C, collecteur, du transistor étant reliée à la borne +VCC, et la patte E, émetteur, à la masse. En branchant un émetteur à ultrasons entre la masse et la patte C du transistor, nous émettons un signal carré à 40Khz.

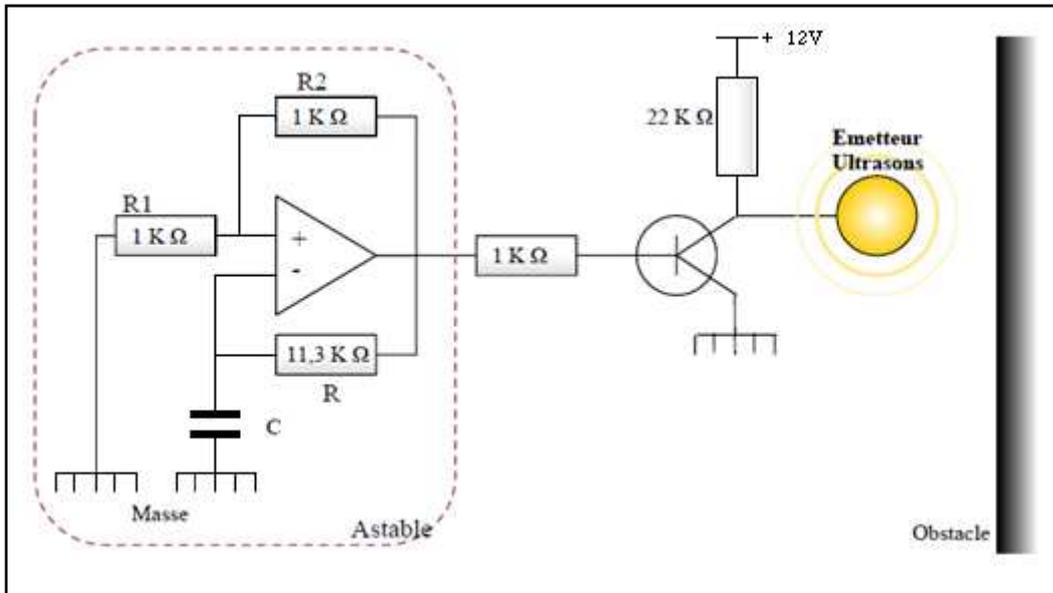


Figure N°4.2 : Schéma du circuit d'émetteur ultrasons

##### 4.4.1. Le générateur de signal carré

Pour créer un signal carré, il existe plusieurs possibilités. D'abord, utiliser un NE555 qui génère un créneau entre 0V et 15V ou encore un montage à amplificateur opérationnel. Le montage que nous avons retenu est le montage à AOP car il peut générer un signal entre -15V et +15V ce qui est plus adapté à notre système.

##### 4.4.2. Multivibrateur astable

On réalise le circuit de la figure (N°4.2) dans lequel  $R_2$  introduit une réaction positive. L'amplificateur fonctionne donc en régime de saturation.

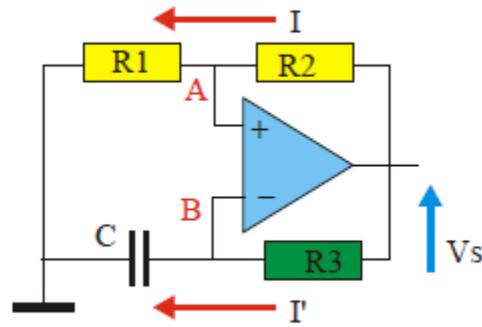


Figure N \*4.3 : Schéma du circuit générateur du signal carré

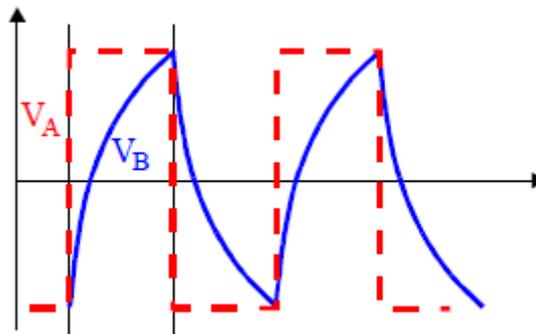


Figure N \*4.4 : Schéma qui représente le signal de la sortie VS

#### 4.4.3. Principe de fonctionnement.

Si  $V_A > V_B$ , on a :  $V_S = +U$ . Le condensateur C se charge à travers  $R_3$ . Le potentiel du point B croît jusqu'à la valeur  $V_A$  ( $R_1$  et  $R_2$  forment un pont diviseur), puis le montage bascule et alors  $V_S = -U$ .

Le potentiel de A devient négatif et donc :  $V_A < V_B$ . Le condensateur se décharge à travers  $R_3$ .  $V_B$  décroît jusqu'à ce qu'il devienne inférieur à  $V_A$  et le montage bascule à nouveau. Le système oscille indéfiniment entre ces deux cas astable avec une période en fonction des valeurs des éléments de circuit.

#### ❖ Calcul de la période.

On suppose que initialement  $V_S = +U$

$$V_A = V_S \cdot R_1 / (R_1 + R_2) \dots\dots\dots(a)$$

$$R_3 \cdot I' = V_S - V_B = R_3 \cdot C \cdot d(V_B) / dt \dots\dots\dots(b)$$

La solution générale de l'équation (b) est :  $V_B = U + K.e^{(-t/\tau)}$

Avec  $\tau = R_3C$ .

Une solution particulière est :  $V_B = V_S = -U$

La solution générale est donc :  $V_B = U + K.e^{(-t/\tau)}$

On prend comme origine de temps, l'instant où le système a basculé :

En  $t=0$  on a :  $V_B(0) = -V_A = -U.R_1/(R_1 + R_2)$

$$K = V_B(0) - U = -U.[1 + R_1/(R_1 + R_2)] = -U.(2.R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)$$

$$V_B = U - U[(2.R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)].e^{(-t/\tau)}$$

En  $t=0$  :

$$V_B = -U.R_1/(R_1 + R_2) : V_B \text{ croit jusqu'à } t = t_1 = T/2$$

Pour atteindre la valeur

$$V_b = +U.R_1/(R_1 + R_2)$$

$$V_B = U - U.[(2.R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)].e^{(-t_1/\tau)}$$

$$V_B = [(2.R_1 + R_2)/(R_1 + R_2)].e^{(-t_1/\tau)}$$

$$V_B = R_2/(R_1 + R_2)$$

$$(2.R_1 + R_2).e^{(-t_1/\tau)} = R_2 \Rightarrow e^{(t_1/\tau)} = 1 + 2.R_1/R_2$$

$$t_1 = \tau.ln(1 + 2.R_1/R_2)$$

L'expression de la période set donc :  $T = 2.RC.ln(1 + 2.R_1/R_2)$

#### ❖ Détermination des valeurs des composants

Afin d'obtenir un temps de réponse correspondant à la fréquence de résonance du quartz (40Khz), nous avons fixé les valeurs des résistances et nous avons pu déterminer ainsi la capacité C du condensateur.

On sait que :

$$\tau = RC.ln(1 + 2.R_1/R_2)$$

En posant :

$$R_1 = 5 \text{ KW}$$

$$R_2 = 10 \text{ K}\Omega$$

$$R = 36 \text{ K}\Omega \text{ et } \tau = 1/40000 \text{ s}$$

on trouve  $C = 0.7 \text{ nF}$

Nous choisirons donc un condensateur de capacité  $1 \text{ nF}$ .

#### ❖ Transistor 2N1711

Le signal carré établi, est amplifié à l'aide du transistor 2N1711 afin que l'émission de celui-ci par l'émetteur soit suffisamment importante pour être perçue par le récepteur.

Le signal amplifié est transformé en onde sonore sphérique progressive grâce à l'émetteur. A présent, celle-ci est acquise par le récepteur.

### 4.5. Le module récepteur ultrason

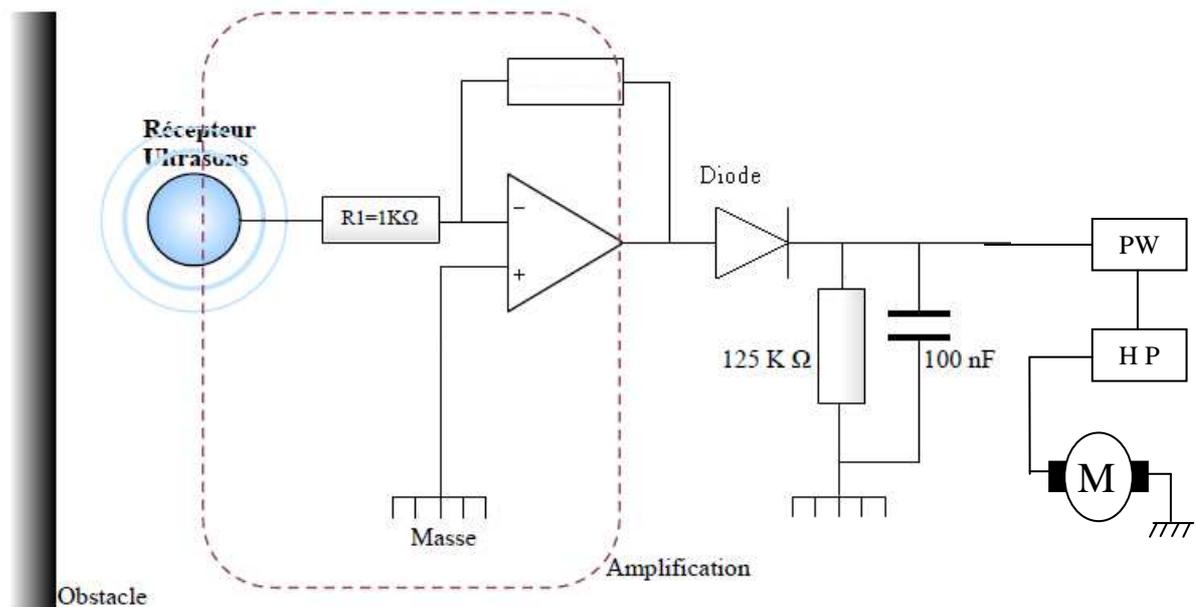


Figure N°4.5 : Schéma du circuit récepteur ultrasons

#### 4.5.1. Amplification

##### 4.5.1.2. Montage inverseur

Considérons le montage amplificateur inverseur figure (N°4.5)

Cas idéal

Dans le cas idéal,

- l'impédance d'entrée infinie implique que le courant dans l'entrée - de l'amplificateur est nul,
- le gain en tension  $\mu$  infini, implique que la tension  $u = u_- - u_+ = 0$  ; puisque la sortie  $V_S = -\mu u$  est finie.

On peut donc écrire :

$$i_1 = i_2 = 0$$

$$\frac{V_E}{R_1} + \frac{V_S}{R_2} = 0$$

D'où le gain du montage :

$$\frac{V_S}{V_E} = -\frac{R_2}{R_1}$$

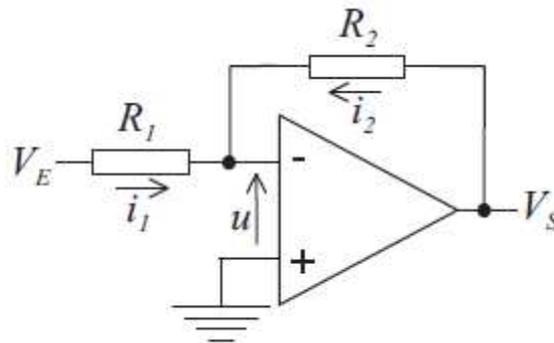


Figure N •4.6 : Montage amplificateur inverseur

## 4.6. Le module redressement

### 4.6.1. Redressement simple alternance

La diode, présente une résistance pratiquement infinie lorsqu'elle est polarisée en inverse. Elle peut être utilisée pour obtenir un signal unidirectionnel à partir d'un signal sinusoïdal.

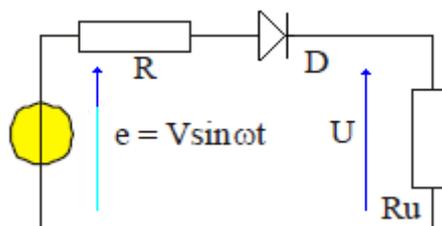


Figure N •4.7 : Schéma du circuit à diode

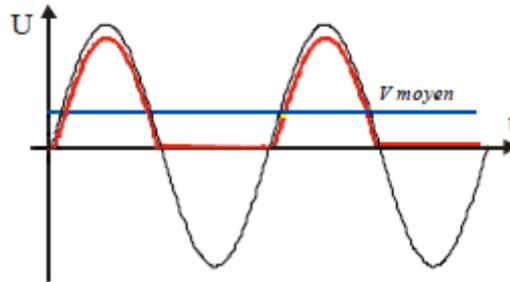


Figure N°4.8 : Schéma qui représente le signal de la sortie U.

Dans le circuit de la figure (N°4.8) la diode est passante quand le potentiel de son anode est supérieur de 0.6 v à celui de sa cathode. Si on néglige les effets dus à la tension de seuil, la charge  $R_u$  est traversée par un courant unique pendant les alternances positives.

#### ❖ Calcul du signal dû au redressement

On pose  $R_T = R_{diode} + R_{gén\acute{e}}$

$$e = V \cdot \sin \omega t = R_T + U$$

Or :

$$e = (R_T + R_U) \cdot I$$

$$\text{Si } e > 0 \quad R_{diode} \approx 0 \quad \text{donc } U = e \cdot R_U / (R_U + R_T)$$

$$\text{Si } e < 0 \quad R_{diode} \approx \infty \quad \text{donc } U = 0$$

Pour la tension sinusoïdale dont une seule alternance est redressée, la valeur moyenne de tension est égale :

$$\langle U \rangle = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} V \cdot \sin \omega t \cdot dt$$

#### 4.6.2. Détecteur de Crête

Le détecteur de crête repose sur la charge et la décharge du condensateur C à travers R. La constante de temps  $\tau = RC$  doit être choisie de manière judicieuse. Cette constante doit être supérieure à la période de l'onde porteuse, pour que le condensateur n'ait pas le temps de se décharger et ainsi il longe la sinusoïde. Mais cette constante doit être inférieure à la période de l'enveloppe pour ne pas la recouvrir. Le câblage d'un détecteur de crête est :

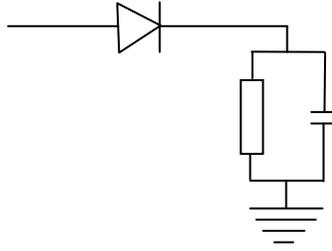


Figure N°4.9 : Schéma du circuit de détecteur de crête

Nous avons utilisé un condensateur de 220nF et une résistance de 100 kOhms, donc  $\tau=20\text{ms}$ . Cette constante est très supérieure à la période de la porteuse qui est de 25  $\mu\text{s}$ .

#### 4.7. Montage suiveur [84]

La figure (N° 4.10) montre que l'amplificateur opérationnel est monté en suiveur. Il s'agit simplement d'un amplificateur non-inverseur avec  $R_1$  infinie et  $R_2$  nulle (gain = 1). Un amplificateur de gain unitaire est parfois appelé tampon à cause de ses propriétés d'isolation (impédance d'entrée, impédance de sortie)

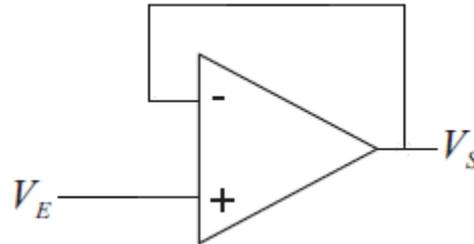


Figure N°4.10 : montage suiveur

#### 4.8. Le module générateur PWM [80]

La PWM consiste à moduler la largeur d'un signal carré par le résultat de la comparaison d'une tension continue à l'amplitude variable avec un signal triangulaire.

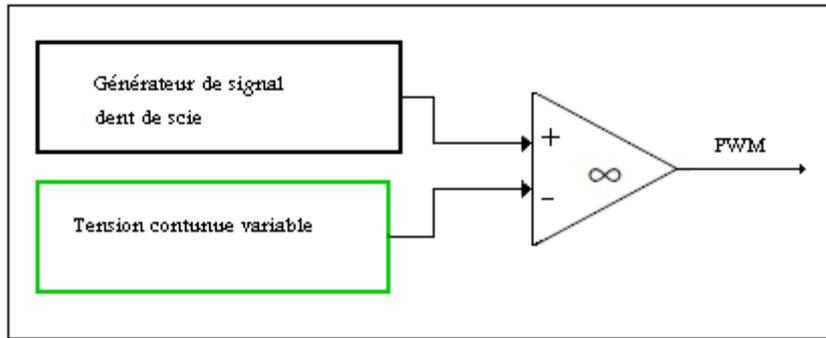


Figure N°4.11 : Schéma illustratif du générateur PWM

La tension impulsionnelle résultante de cette comparaison sert à commander un étage de puissance (voire le chapitre n°3).

#### 4.8.1. Générateur de signal dent de scie. [82]

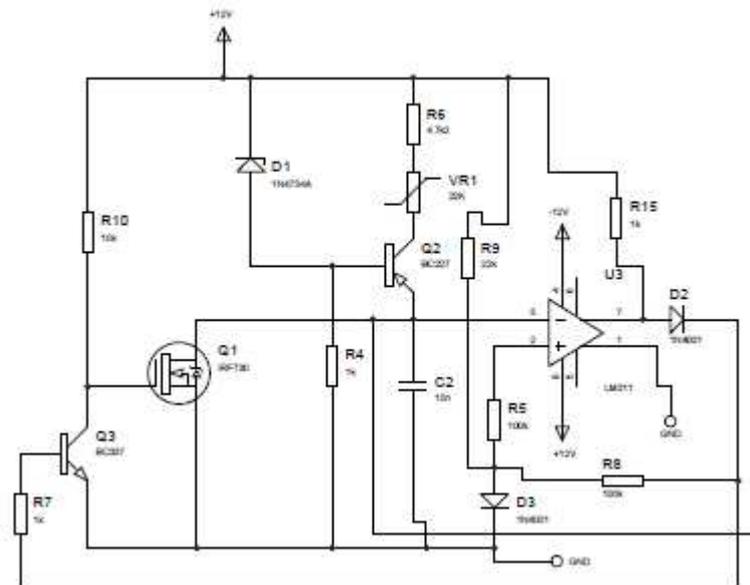


Figure N°4.12 : Schéma électrique du générateur de signal triangulaire.

##### 4.8.1.1. Fonctionnement du générateur de signal triangulaire

Un générateur de rampe fournit une tension en « dents de scie ». Le comparateur compare la tension d'entrée à la tension de seuil ( $V_t$ ). Lorsque la tension d'entrée atteint  $V_t$ , le comparateur ferme alors l'interrupteur et le condo se décharge presque instantanément. Lorsque le comparateur ré-ouvre l'interrupteur, ça recommence.

#### 4.8.2. Comparateur [83]

L'utilisation d'un amplificateur opérationnel ne se limite pas à la fonction d'amplification. Bien au contraire son utilité s'étend à d'autres domaines tels que la comparaison des signaux. La figure montre un circuit de base capable d'effectuer la comparaison entre deux signaux. Cette application nécessite que l'amplificateur opérationnel soit utilisé en boucle ouverte. Dans cette configuration, le gain en tension du circuit est extrêmement élevé de sorte qu'une faible différence d'amplitude aux entrées permette le basculement de la sortie de l'amplificateur de  $V_{CC}$  à  $V_{EE}$  ou vice versa de  $V_{EE}$  à  $V_{CC}$ .  $V_{CC}$  et  $V_{EE}$  étant les lignes d'alimentation. Dans notre application on utilise la même configuration (voire la figure n°4.13)

Le fonctionnement d'un tel circuit se résume de la façon suivante :

$$V_{e1} > V_{e2} \Rightarrow V_S = V_{EE}$$

$$V_{e1} < V_{e2} \Rightarrow V_S = V_{CC}$$

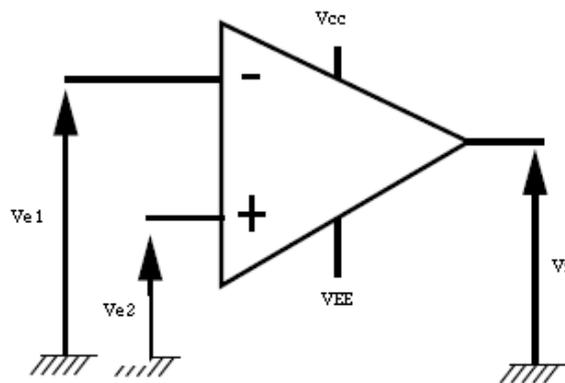


Figure N °4.13 : montage competeur

### 4.8.3. Génération de PWM [80]

On obtient le signal PWM en comparant le signal dent de scie avec une composante continue à la valeur variable générée par le module soustracteur (figure n° 4.14) en variant la retirance de sa valeur minimale à sa valeur maximale. Le rapport cyclique du signal PWM passe de 0 à  $+\infty$ . La valeur moyenne du signal engendré passe de 0 à  $V_{CC}$ .

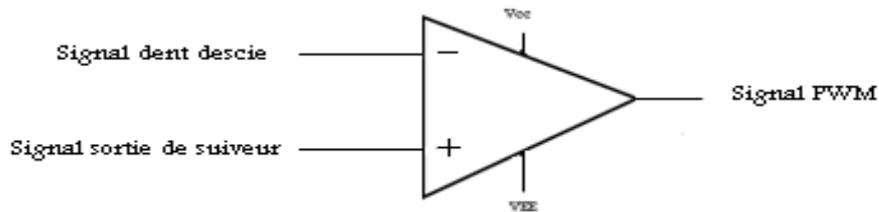


Figure N °4.14 : PWM à partir du signal dent de scie

### 4.9. Le principe d'évitement d'obstacle par la carte analogique

La plateforme mobile est équipée de deux moteurs et de deux capteurs. Ils sont placés de coté droite et du coté gauche comme est représenté dans la figure N °4.15. Le capteur gauche relie à la carte de commande du moteur droite et le capteur droite relie à la carte de commande du moteur gauche (voire le § : 4.3). Quand le robot rencontre un obstacle à gauche c'est le moteur droite qui freine se qui produit le tournement à droite pour l'éviter, et le contraire pour le coté gauche.

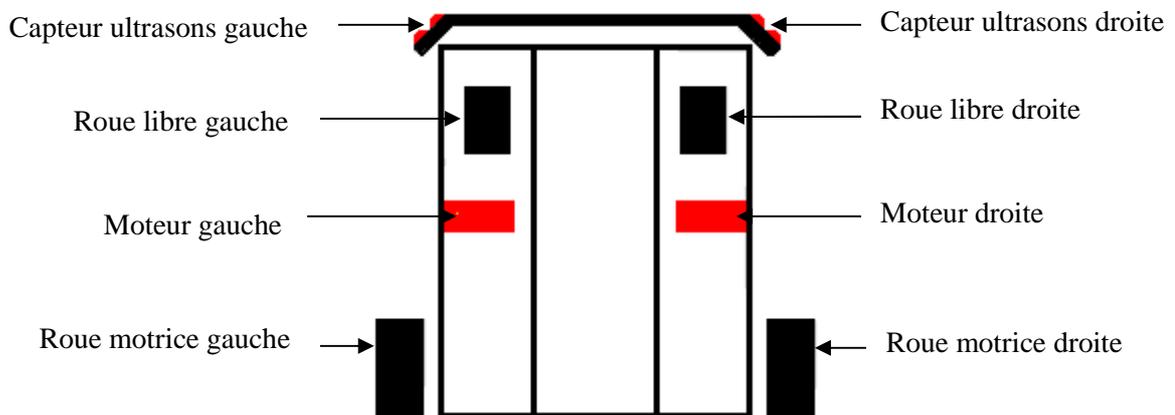
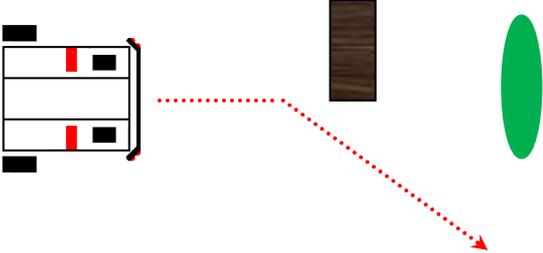
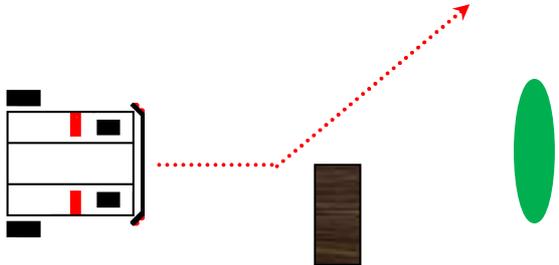
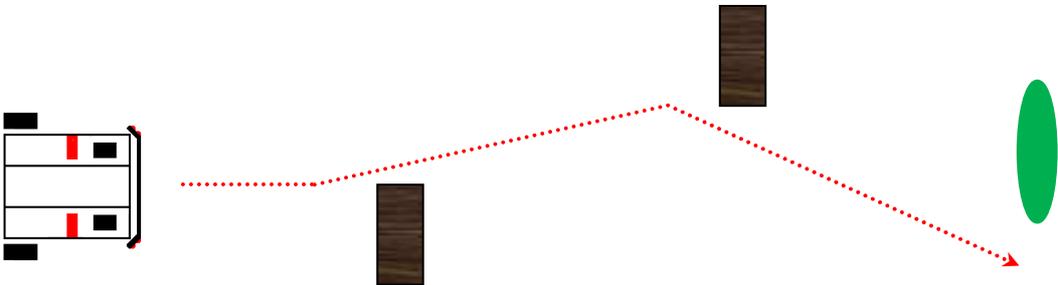
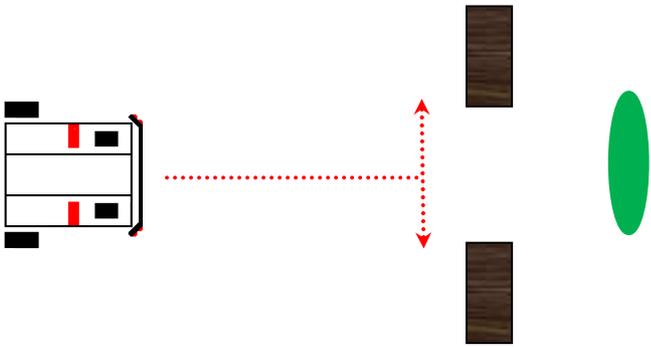


Figure N °4.15 : Schéma représentatif de la plateforme mobile

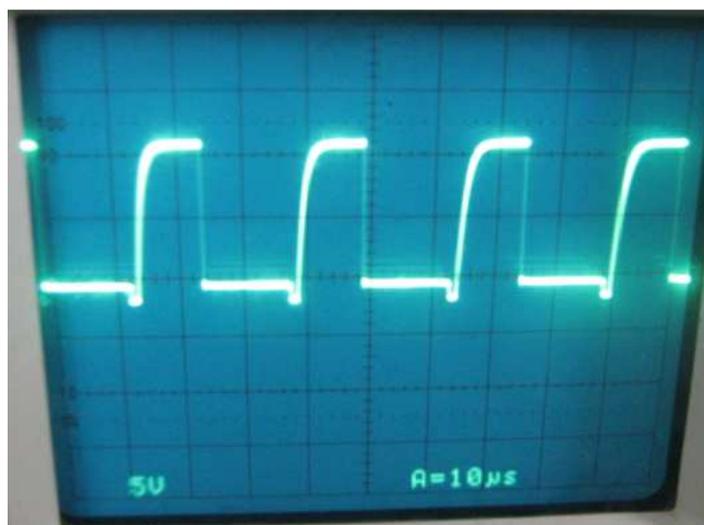
Tab N°1 : Représentation de la navigation du robot avec la carte analogique

	
<p><b>Fig N°16</b> : Navigation sans obstacle.</p>	<p><b>Fig N°17</b> : Navigation avec minima local.</p>
	
<p><b>Fig N°18</b> : évitement d'un obstacle à gauche</p>	<p><b>Fig N°19</b> : évitement d'un obstacle à droite</p>
	
<p><b>Fig N°20</b>: évitement d'un obstacle à gauche puis à droite</p>	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La cible  </li> <li>• Obstacle  </li> </ul>
<p><b>Fig N°21</b> : Navigation avec oscillation</p>	

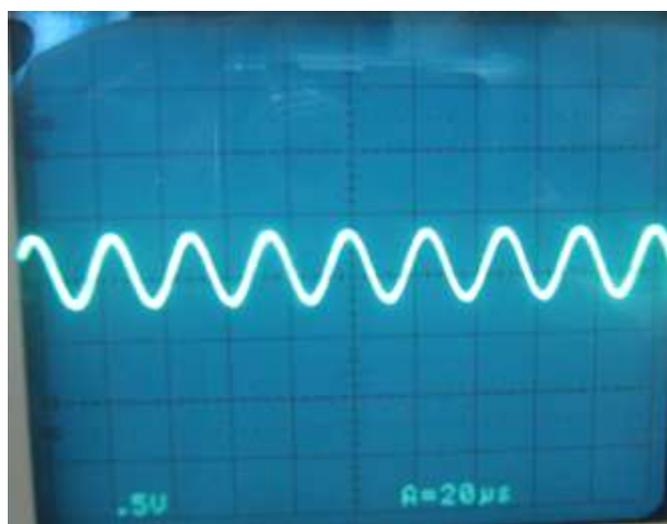
#### 4.9. Différente situation de la navigation de la plateforme mobile

1. Lorsqu'il n'y a pas d'obstacle, la plateforme marche en direction droite comme c'est représenté à la figure N°16 du tableaux.
2. Lorsqu'il y a un obstacle près de but, la plateforme s'arrête. ce cas est l'un des problèmes de la méthode du champ de potentielle appelé minima locaux comme c'est représenté à la figure N°17 du tableaux.
3. Lorsqu'il y a un obstacle à gauche, la plateforme tourne à droite comme c'est représenté à la figure N°18 du tableaux.
4. Lorsqu'il y a un obstacle à droite, la plateforme tourne à gauche comme c'est représenté à la figure N°19 du tableaux.
5. Lorsqu'il y a deux obstacles à droite et à gauche mais pas en face, dans ce cas la plateforme tourne à gauche puis à droite comme c'est représenté à la figure N°20 du tableaux.
6. Lorsqu'il y a un passage étroite, la plateforme oscille. ce cas est considéré comme un problème de la méthode du champ de potentielle appelé oscillation comme c'est représenté à la figure N°21 du tableaux.

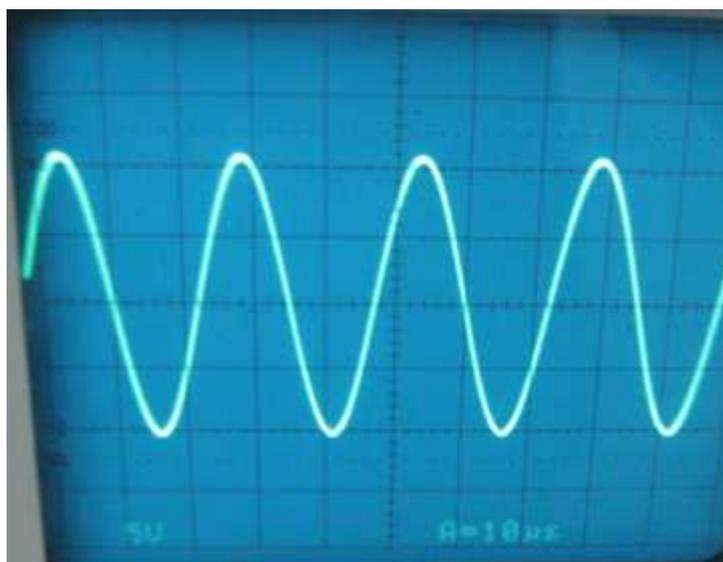
#### 4.11. Les résultats obtenus



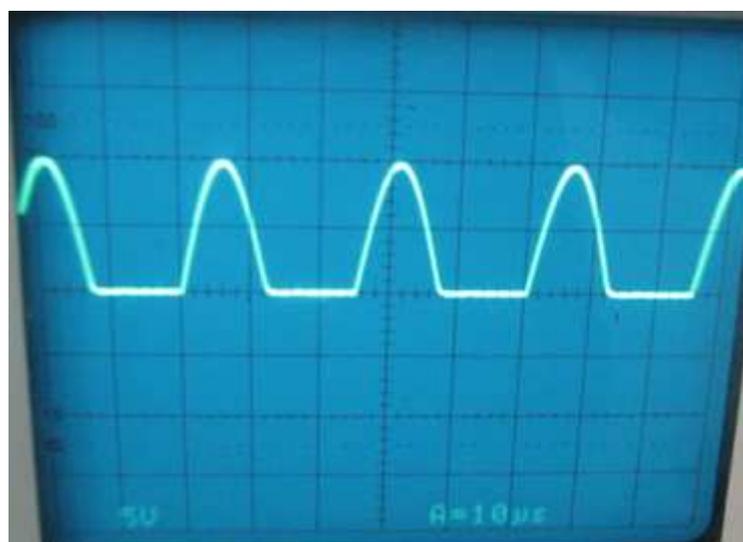
*Figure N°4.21* : le signale obtenu a la sortie du circuit électronique de l'émitteur de la carte analogique (voir Figure N° C-1 'Annexe C')



*Figure N°4.22*: le signale obtenu a la sortie du receptrer ultrason de la carte analogique (voir Figure N° C-5 'Annexe C')



*Figure N°4.23* : le signal obtenu a la sortie du circuit électronique de l'amplification de la carte analogique (voir Figure N° C-5 'Annexe C')



*Figure N°4.24* : le signal obtenu a la sortie du circuit électronique après le redressement (voir Figure N° C-5 'Annexe C')

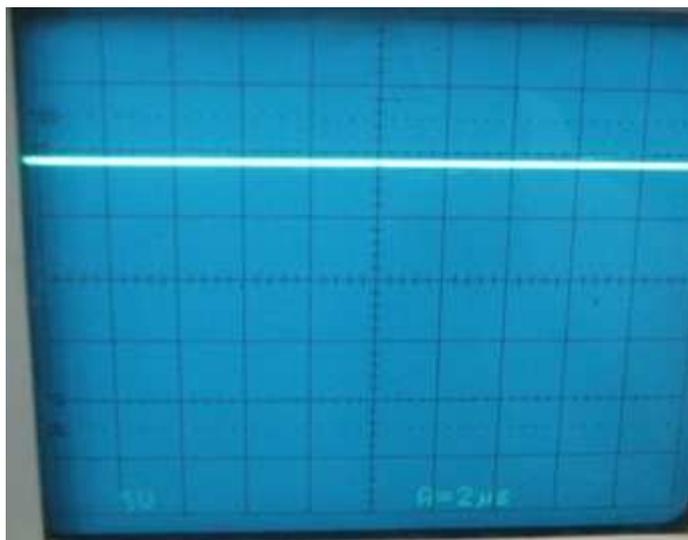


Figure N°4.25 : le signal obtenu a la sortie du circuit électronique après le le filtrage (voir Figure N° C-5 'Annexe C')

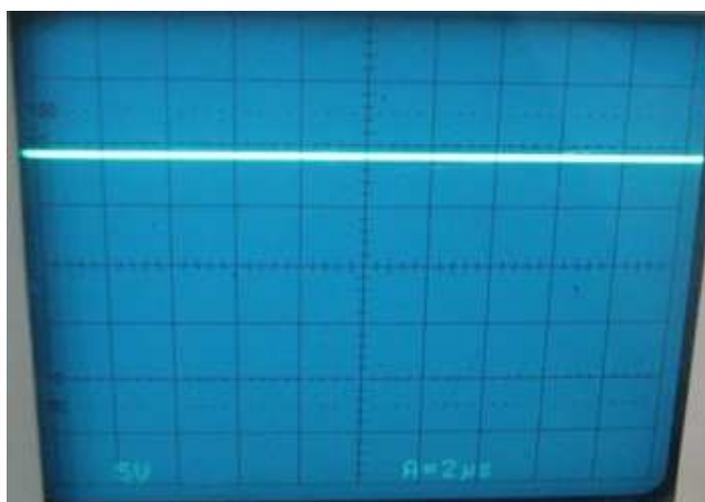
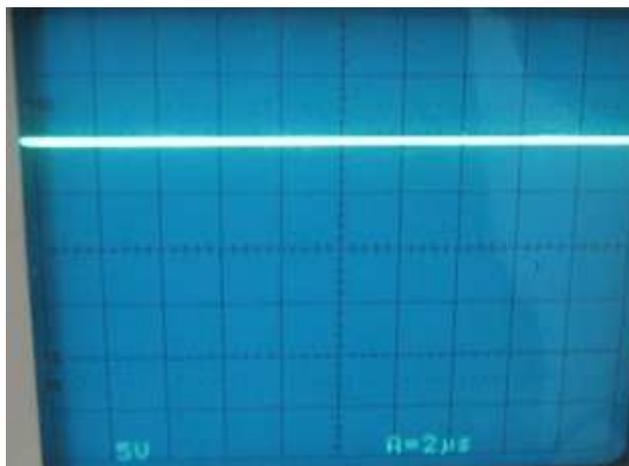
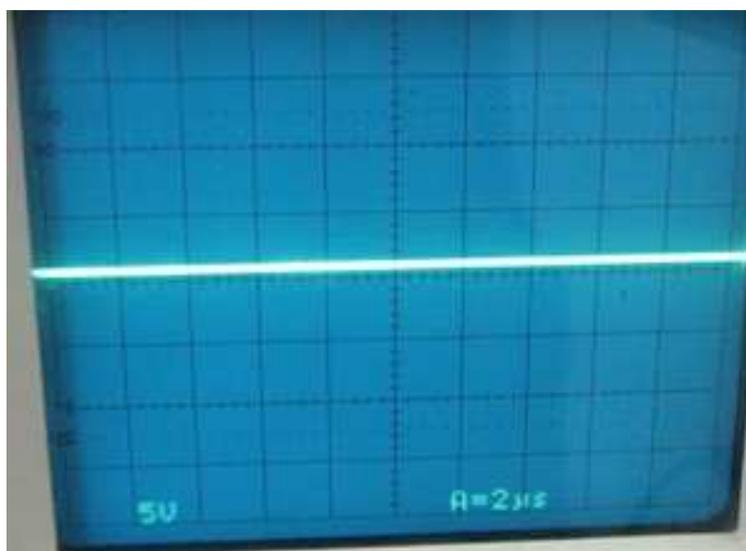


Figure N°4.26 : le signal obtenu a la sortie du circuit électronique le suiveur de la carte analogique (voir Figure N° C-5 'Annexe C')



*Figure N°4.27* : le signale obtenu a la sortie du suiveur lorsque il y a un obstacle (voir Figure N° C-5 'Annexe C')



*Figure N°4.28* : le signale obtenu a la sortie du suiveur lorsque il n'y a pas d'obstacle (voir Figure N° C-5 'Annexe C')

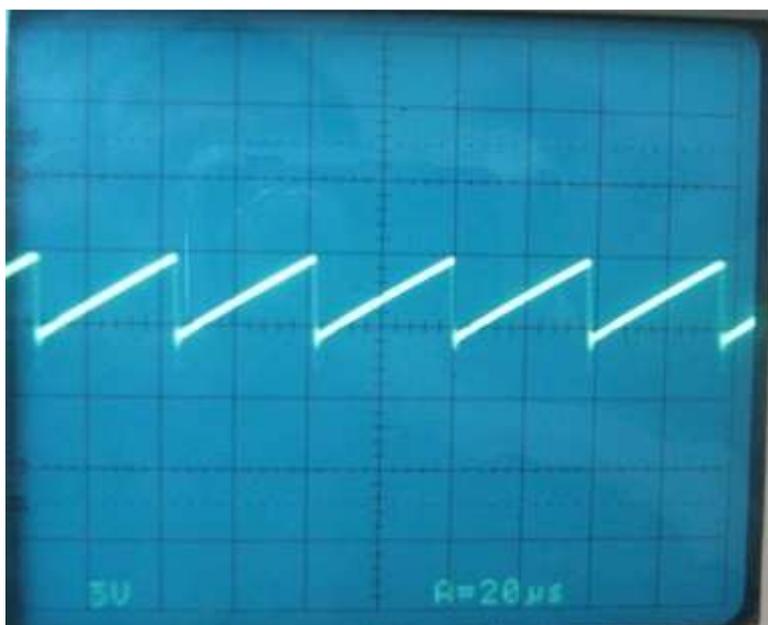


Figure N°4.29 : le signal obtenu a la sortie du circuit électronique generateur de signal dent de scie de la carte analogique(voir Figure N° C-5 'Annexe C')

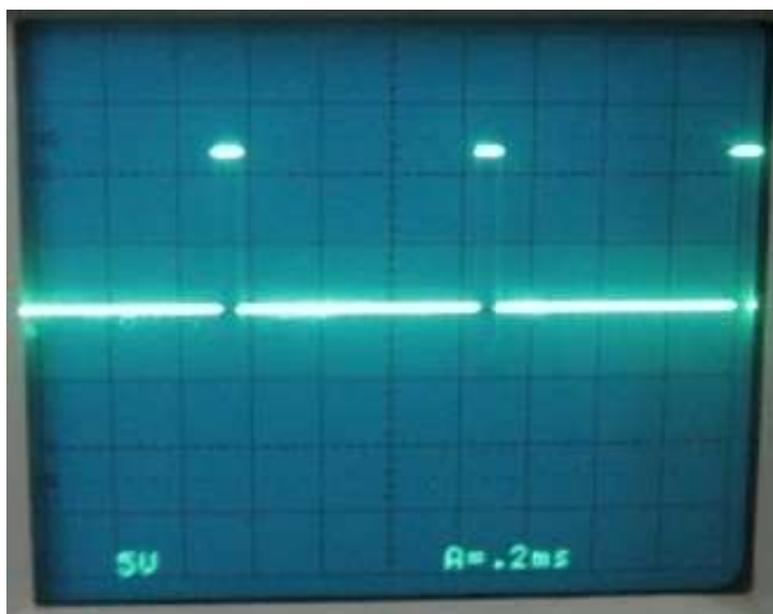


Figure N°4.30 : le signal PWM obtenue (voir Figure N° C-5 'Annexe C')

**Remarque :** lorsque on essaye notre carte de commande analogique sur notre structure, on constate quelque anomalie au niveau de l'hacheur parallèle ce qui empêche le déplacement de structure, pour remédier ce problème on construit une nouvelle structure avec des moteurs à courant continu (**voire annexe E**)

#### 4.12. La conclusion

- Malgré les résultats satisfaisants obtenus par la carte de commande analogique en matière d'évitement d'obstacle, elle a un échec total en matière de convergence vers le but, sachant que l'acheminement vers le but est une fonction essentielle en robotique. Pour ces raisons on réfléchit à réaliser une autre carte numérique à base de pic 18f4550 plus performante mais nous n'avons pas réussi à compléter ce travail, faute de temps et de moyens.

- La méthode de champs de potentiel a des limitations, comme le problème de minima locaux et le problème d'oscillation. Ceci nécessite le développement de la méthode pour surmonter ces limitations.
- L'amplificateur opérationnel est une brique essentielle en électronique analogique.

Le nombre de capteur utilisé est insuffisant pour balayer toutes les directions. On doit doter notre structure avec une ceinture de capteurs ou bien un seul capteur fixé sur une base rotative.

# **CONCLUSION GENERALE**

L'élaboration de ce projet de bout en bout nous a permis d'approfondir nos connaissances dans beaucoup de domaines.

En cas d'un terrain accidenté il faut utiliser une autre structure robot mobile de genre tous terrain car notre structure (la plateforme expérimentale « Aurès Robot ») navigue uniquement à l'intérieur ou bien sur un terrain plat.

Les détecteurs à ultrasons que nous avons utilisés possèdent une faculté exceptionnelle de détecter les obstacles d'une manière sûre et fiable indépendamment de leurs couleurs ou de leurs formes. Pour cette raison, les détecteurs à ultrasons sont de plus en plus utilisés.

Après les essais que nous avons réalisés nous constatons que les moteurs série universel ne répondent pas d'une manière parfaite à nos exigences puisqu'ils fonctionnent dans un seul sens ce qui engendre la limitation des solutions de navigation et pour remédier à ce problème on a doté la plateforme avec des moteurs à courant continu.

Pour obtenir une précision exacte à notre application il est préférable d'utiliser un télémètre ultrasons.

Le problème majeur de la méthode des champs de potentiel est le blocage du robot dans le minima local ou sont oscillation lors du franchissement d'un passage étroit entre des obstacles.

Pour balayer toutes les directions on doit doter notre structure avec une ceinture de capteurs ou bien avec un seul fixé sur une base rotative.

Le manque de convergence vers le but des approche réactives nous pousse à nous tourner vers une approche hybride pour pallier cet inconvénient.

Notre structure peut être utilisée uniquement en l'air terrestre à cause des capteurs ultrasons qui ne fonctionnent pas au vide.

Notre travail reste très modeste en comparaison avec ce qui peut réellement être accompli avec plus de moyens, mais a le mérite de pouvoir être un point de départ pour des études plus complexes et plus poussées de systèmes de plus en plus compliqués.

# **Références Bibliographiques**

- [1].Foret, J.; Bruneau, O.; Fontaine, J.G., "Unified approach for m-stability analysis and control of legged robots", 2003 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2003. (IROS 2003). Proceedings. Volume 1, Issue , 27-31 Oct. 2003 Page(s): 106 - 111 vol.1
- [2].Ghommam, J., Poisson, G., « Motion coordination control of multiple marine crafts », 10th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2008. AMC '08. Publication Date: 26-28 March 2008 On page(s): 44-49
- [3].Creuze, V., Parodi, O., Xiang X., «Design, Simulation and Experimental Results of Taipan 300, a New Autonomous Underwater Vehicle Prototype», published in OCEANS'09 IEEE, Bremen, Germany : (2009)
- [4].J. Canou, D. Sallé, M. Traonmillin, V. Dupourqué: The Anglet Experiment: A Cybercar on the Beach. EUROCAST 2007: 1066-1072
- [5].Yang Cheng, Maimone, M.W., Matthies, L. , “*Visual odometry on the Mars exploration rovers- a tool to ensure accurate driving and science imaging*”,*IEEE Robotics & Automation Magazine*, Volume 13, Issue 2, June 2006 Page(s):54 – 62
- [6].G. Campion, G. Bastin et B. D’Andréa-Novel. *Structural Properties and Classification of Kinematic and Dynamic Models of Wheeled Mobile Robots*. IEEE Transactions on Robotics and Automation, vol. 12, no. 1, pages 47–62, 1996.
- [7].P. Fabiani, V. Fuertes, A. Piquereau, R. Mampey, et F. Teichtel-Konigsbuch. Autonomous flight and navigation of VTOL UAVs : from autonomy demonstrations to out-of-sight flights. *Aerospace Science and Technology*, 11(2-3) : 183–193, 2007
- [8].Pin, F.G., Killough, M.S., « *A New Family of Omnidirectional and Holonomic Wheeled Platforms for Mobile Robots*”, IEEE transactions on robotics and automation, Vol 10, N°4, August 1994
- [9].Mourioux, G., Novales, C., Poisson, G. et Vieyres, P.: Omni-directional robot with spherical orthogonal wheels : concepts and analyses. Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2006, Orlando, Floride USA, 15-19 mai 2006
-

- [10]. Ellouze, M. and Andr´ea-Novel, B.d'. 2000. Control of unicycle-type robots in the presence of sliding effects with only absolute longitudinal and yaw velocities measurement. *European Journal of Control*, 6(6):567–584.
- [11]. Pivtoraiko, M., Kelly, A, and Rander R., “Efficient Braking Model for Off-Road Mobile Robots.” *Field and Service Robots*, October 2005, Port Douglas, Australia
- [12]. Lenain, R. Thuilot, B. Cariou, C. Martinet, P., “Rejection of sliding effects in car like robot control: application to farm vehicle guidance using a single RTK GPS sensor”, *Intelligent Robots and Systems*, 2003. (IROS 2003). Proceedings. , 27-31 Oct. 2003 Volume: 4, On page(s): 3811- 3816 vol.3, ISBN: 0-7803-7860-1
- [13]. Pruski, A., “Robotique mobile, la planification de trajectoire”, ED. Hermes, Paris 1996
- [14]. Jetto, L., Longhi, S., Vitali, D., « Localization of a wheeled mobile robot by sensor data fusion based on a fuzzy logic adapted Kalman filter”, *Control Engineering Practice* 7, 763-771, 1999
- [15]. Canou J., Novalés C., Poisson G., Marché P. Quick primitives extraction using inertia matrix on measures issue from an ultrasonic network ICRA 2001-IEEE, International Conference on Robotics and Automation, Séoul, Corée, 21-26 Mai, 2001
- [16]. Cappelle, C. , El Badaoui El Najjar, M., Pomorski, D., Charpillet, F., "*Détection, suivi et géolocalisation d'obstacles à l'aide d'un modèle 3D géo-référencé, une caméra et un GPS : validation avec un lidar*", Conférence Internationale Francophone d'Automatique, CIFA'08, Bucarest, Roumanie, 3-5 Septembre, 2008
- [17]. J. Courbon, Y. Mezouar, L. Eck, P. Martinet, “A generic framework for topological navigation of urban vehicle”, ICRA09 Workshop on Safe navigation in open and dynamic environments Application to autonomous vehicles, ICRA09, Kobe, Japan, May 12th, 2009
- [18]. Pradel, G., Hoppenot, P., "Symbolic trajectory description in mobile robotics" - *Journal of Intelligent & Robotics Systems*, vol. 45, 157-180, 2006.
- [19]. Jean-Claude Latombe. *Robot Motion Planning*. Kluwer Academic Publishers, 1991.
-

- [20]. S. M. Lavalle. Planning Algorithms. Cambridge University Press, 2006
  - [21]. P.E. Hart, N.J. Nilsson, and B. Raphael. A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE Trans. on Systems Science and Cybernetics, 4(2) :100–107, 1968.
  - [22]. N. J. Nilsson. A mobile automaton : An application of artificial intelligence techniques. In Proc of the 1st International Conference on Artificial Intelligence, pages 509–520, 1969.
  - [23]. S. Garrido and L. Moreno. Path planning for mobile robot navigation using voronoi diagram and fast marching. In IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, pages 2376–2381, 2006.
  - [24]. F. Aurenhammer. Voronoi diagrams : A survey of a fundamental geometric data structure. ACM Comput. Surv., 23, 1991.
  - [25]. B. Chazelle. Voronoi diagrams : A survey of a fundamental geometric data structure. Algorithmic and Geometric Aspects of Robotics, pages 145–185, 1987.
  - [26]. A. Lingas. The power of non-rectilinear holes. In In Proceedings 9th International Colloquium on Automata, pages 369–383, 1982.
  - [27]. Brock and L.E. Kravaki. Decomposition-based motion planning : a framework for real-time motion planning in high dimensional configuration spaces. In IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pages 1469–1474, 2001.
  - [28]. N. Vandapel, J. Kuffner, and O. Amidi. Planning 3-d path network in unstructured environments. In IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation, pages 4624–4629, 2005.
  - [29]. M. Erdmann and T. Lozano-Pérez. On multiple moving objects. Algorithmica, 2(4) :477–521, 1987.
  - [30]. T. Fraichard. Trajectory planning in a dynamic workspace : a state-time space approach. Advanced Robotics, 13(1) :75–94, 1998.
-

- [31]. A. Elfes. Occupancy grids : A stochastic spatial representation for active robot perception. In Proc. 6th Conference on Uncertainty in AI, pages 60–70, july 1990.
  - [32]. Kimon P. Valavanis, Timothy Hebert, Ramesh Kolluru, and Nikos C. Tsourveloudis. Mobile robot navigation in 2-d dynamic environments using an electrostatic potential field. *IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics*, 30(2), march 2000.
  - [33]. C.-T. Kim and J.-J. Lee. Mobile robot navigation using multiresolution electrostatic potential field. 2005.
  - [34]. M. Pivtoraiko and A. Kelly. Generating near minimal spanning control sets for constrained motion planning in discrete state spaces. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2005.
  - [35]. L. Kravaki, P. Svestka, J-C. Latombe, and M. Overmars. Probabilistic roadmaps for path planning in high-dimensional configuration space. *IEEE Trans. Robotoc and Automation*, 12(4) :566–580, 1996.
  - [36]. N. M. Amato and Y. Wu. A randomized roadmap method for path and manipulation planning. In Proc. *IEEE Int. Conf. On Robotics & Automation*, pages 113–120, 1996.
  - [37]. S. A. Wilmarth, N. M. Amato, and P. F. Stiller. Maprm : A probabilistic roadmap planner with sampling on the medial axis of the free space. In Proc. *IEEE Int. Conf. on Robotics & Automation*, pages 1024–1031, 1999.
  - [38]. T. Simeon, J.-P. Laumond, and C. Nissoux. Visibility based probabilistic roadmaps for motion planning. *Advanced Robotics*, 14(6), 2000.
  - [39]. L. Jaillet and T. Simeon. Path deformation roadmaps : Compact graphs with useful cycles for motion planning. *Int. Journal of Robotics Research*, 27(11-12), 2008.
  - [40]. Jur P. van den Berg and Mark H. Overmars. Roadmap-based motion planning in dynamic environment. *IEEE Transactions on Robotics*, 21(5), 2005.
  - [41]. S. Koenig and M. Likhachev. Improved fast replanning for robot navigation in unknown terrain. In *IEEE Int. Conf. On Robotics and Automation*, 2002.
-

- [42]. Anthony Stentz. Optimal and efficient path planning for unknown and dynamic environments. *International Journal of Robotics and Automation*, 10 :89–100, 1993.
  - [43]. M. Likhachev, D. Ferguson, G. Gordon, A. Stentz, and S. Thrun. Anytime dynamic a\* : An anytime replanning algorithm. 2005.
  - [44]. S. M. LaValle. Rapidly-exploring random trees : A new tool for path planning. TR 98-11, October 1998.
  - [45]. S. M. LaValle and J. J. Kuffner. Randomized kinodynamic planning. *International Journal of Robotics Research*, 20(5) :378–400, 2001.
  - [46]. Dave Ferguson and Anthony Stentz. Anytime rrts. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Beijing, China, Oct. 2006.
  - [47]. P. Bessiere, J. Ahuactzin, T. El-Ghazali, and E. Mazer. The ariane’s clew algorithm : Global planning with local methods. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, pages 1373–1380, 1993.
  - [48]. E. Mazer, J. Ahuactzin, and P. Bessiere. The ariane’s clew algorithm. *Journal of Artificial Intelligence Research*, 9, Nov. 1998.
  - [49]. D. Hsu, J.-C. Latombe, and R. Motwani. Path planning in expansive configuration spaces. *Int. Journal Computational Ge-ometry & Applications*, 9 :495–512, 1999.
  - [50]. S. Carpin and G. Pillonetto. Robot motion planning using adaptive random walks. *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, 21(1) :129–136, 2005.
  - [51]. J.H. Reif. Complexity of the mover’s problem and generalizations. In *In Proc. of the 20th IEEE Symposium on Foundations of Computer Science*, pages 421–427, 1979.
  - [52]. J.H. Reif. and M. Sharir. Motion planning in the presence of moving obstacles. In *IEEE Symposium on the Foundations of Computer Science*, pages 144–154, 1985.
  - [53]. J. Canny and J.H. Reif. New lower bound techniques for robot motion planning problems. In *IEEE Symposium on the Foundations of Computer Science*, pages 49–60, 1987.
-

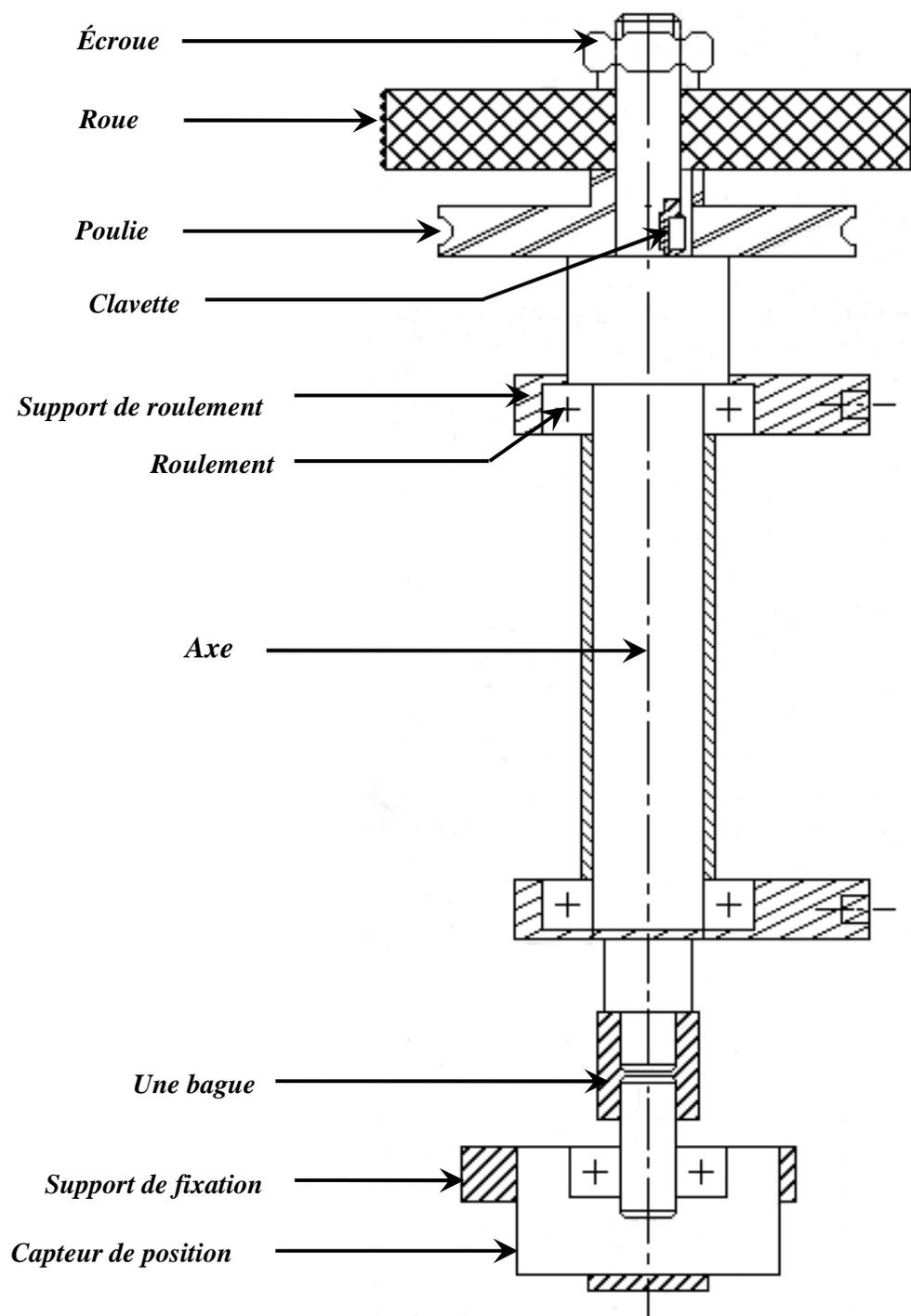
- [54]. O. Khatib. Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots. *Int. Journal of Robotics Research*, 5(1), 1986.
  - [55]. Y. Koren and J. Borenstein. Potential field methods and their inherent limitations for mobile robot navigation. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, April 1991.
  - [56]. S.S. Ge and Y.J. Cui. Dynamic motion planning for mobile robots using potential field method. *Autonomous Robots*, 13(3) :207–222, 2002.
  - [57]. L. Huang. Velocity planning for a mobile robot to track a moving target - a potential field approach. *Robotics and Autonomous Systems*, 57(1) :55–63, 2008.
  - [58]. J. Borenstein and Y. Koren. The vector field histogram – fast obstacle avoidance for mobile robots. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, 7(3) :278–288, 1991.
  - [59]. I. Ulrich and J. Borenstein. Vfh+ : Reliable obstacle avoidance for fast mobile robots. pages 1572–1577, 1998.
  - [60]. I. Ulrich and J. Borenstein. Vfh\* : Local obstacle avoidance with look-ahead verification. San Francisco, USA, 2000.
  - [61]. J. Minguez and L. Montano. Nearness diagram navigation (nd) : A new real time collision avoidance approach. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 2000.
  - [62]. R.G. Simmons. The curvature-velocity method for local obstacle avoidance. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pages 3375–3382, 1996.
  - [63]. N.Y. Ko and R.G. Simmons. The lane-curvature method for local obstacle avoidance. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, 1998.
  - [64]. D. Fox, Burgard W., and S. Thrun. The dynamic window approach to collision avoidance. *IEEE Journal on Robotics and Automation*, 4(1), 1997.
  - [65]. M. Seder and I. Petrovic. Dynamic window based approach to mobile robot motion control in the presence of moving obstacles. In *Proc. of the Intl Conf. on Robotics & Automation*, April 2007.
-

- [66]. P. Fiorini and Z. Shiller. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles. *International Journal on Robotics Research*, 17(7) :760–772, July 1998.
- [67]. P. Fiorini and Z. Shiller. Motion planning in dynamic environments using the relative velocity paradigm. In *IEEE Int. Conf. on Automation & Robotics*, volume 1, pages 560–566, 1993.
- [68]. F. Large, C. Laugier, and Z. Shiller. Navigation among moving obstacles using the nlvo : Principles and applications to intelligent vehicles. *Autonomous Robots Journal*, 19(2), September 2005.
- [69]. Oren Gal, Zvi Shiller, and Elon Rimon. Efficient and safe online motion planning in dynamic environments. In *Proc. of the Intl Conf. on Robotics & Automation*, Kobe, Japan, May 2009.
- [70]. Luis Martinez-Gomez and Thierry Fraichard. An efficient and generic 2d inevitable collision state-checker. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, France Nice, 2008.
- [71]. Thierry Fraichard and Hajime Asama. Inevitable collision states a step towards safer robots. In *IEEE-RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Las Vegas, NV(US), 2003.
- [72]. R. Parthasarathi and T. Fraichard. An inevitable collision state checker for a car-like vehicle. In *Proc. of the Intl Conf. On Robotics & Automation*, Roma, Italy, April 2007.
- [73]. Luis Martinez-Gomez and Thierry Fraichard. Collision avoidance in dynamic environments : an ics-based solution and its comparative evaluation. In *Proc. of the Intl Conf. on Robotics & Automation*, Kobe, Japan, May 2009.
- [74]. Stephane Petti and Thierry Fraichard. Partial motion planning framework for reactive planning within dynamic environments. In *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, Barcelona, Spain, 2005.
-

- [75]. E. Frazzoli, M. A. Dahleh, and E. Feron. Real-time motion planning for agile autonomous vehicles. *AIAA Journal of Guidance, Control and Dynamics*, 25(1) :116–129, 2002.
- [76]. Stephane Petti and Thierry Fraichard. Safe Navigation of a Car-Like Robot in a Dynamic Environment. In *Proc. of the European Conf. on Mobile Robots, Ancona (IT)*, 09 2005.
- [77]. électrotechnique et machines électriques B.Saint Jean .ing Edition Eyrolles
- [78]. Technologie de construction mécanique M. Robert et R. Philippe ; Edition UZES (Gard)
- [79]. Data sheet Microchip
- [80]. B.Hichem ,A.Chahrazed et B.Samira : Commande d’un processus physique par PC. Mémoire d’ingénieur d’état promotion 2001.
- [81]. O. Khatib,(Commande dynamique dans l’espace opérationnel des robots manipulateurs en présence d’obstacles \_ Phd thesis\_ Ecole Nationale Supérieure l’Aéronautique et de l’Espace, Toulouse, France,1980.
- [82]. HARA OUBIA B. série les carnets de l’ingénieur « amplificateurs opérationnels ». ENAG EDITIONS 1994
- [83]. M. Boulemden. L’électronique analogique. Presse de l’Université de Batna.1997
- [84]. HORWITZ Paul & WINFIELD Hill . *Traité de l’électronique analogique et numérique*. ELEKTOR
- [85]. JUTTEN Christian. *Conception de systèmes électroniques analogiques*. Université Joseph Fourier - Polytech’ Grenoble. Cours de deuxième année du département 3i. Janvier 2007.
- [86]. David Ferguson and Anthony Stentz. Using interpolation to improve path planning : The field D\* algorithm. *Journal of Field Robotics*, 23(2) :79-101, 2006.
-

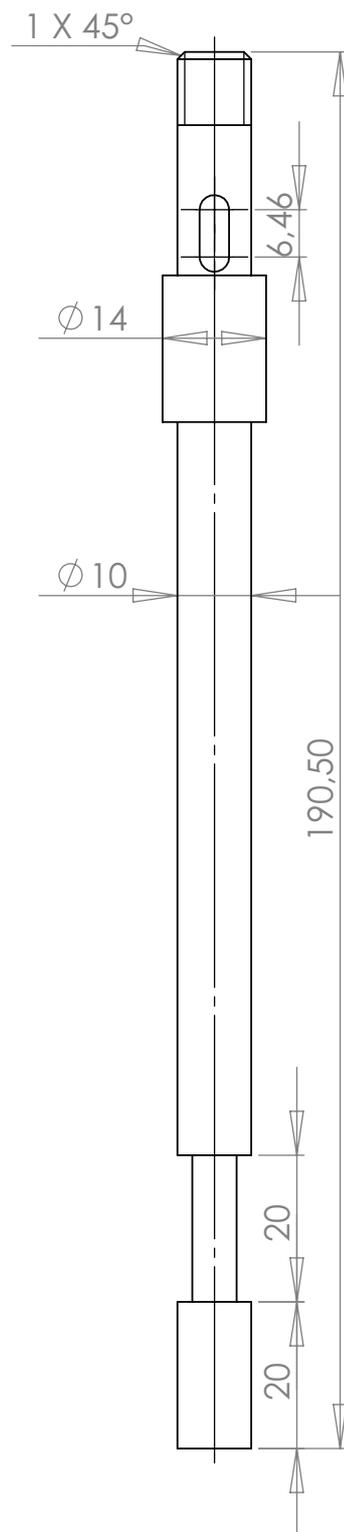
**Annexe**

**"A"**



Université El-Hadj Lakhdar – BATNA –

Faculté de Technologie	Schémas d'assemblage mécanique de système roue – Poulie – Axe – Capteur.	Réaliser par : Bouali Abdelmalek
Département d'électronique		Encadrée par Dr S. Aouaghlante
Echelle : 1/1		Année universitaire 2010/2011



Université EL-Hadj Lakhdar-BATNA-

Faculté de technologie	Schéma de l'arbre sans roulements	Réaliser par: Bouali Abdelmalek
Département d'électronique		Encadrée par Dr S. Aouaghllante
Echelle: 1/1		Année universitaire 2010/2011



Université EL-Hadj Lakhdar-BATNA-

Faculté de technologie	Shéma de l'arbre 3D	Réaliser par: Bouali Abdelmalek
Département d'électronique		Encadrée par Dr S. Aouaghlante
Echelle: 1/1		Année universitaire 2010/2011

**Annexe**

**"B"**

## Méthode de champ de potentiel

Depuis qu'un siècle, Lord Kelvin a remarqué qu'un système mécanique dissipatif perd son énergie potentielle le long de ses trajectoires et qu'en conséquence les trajectoires passant au voisinage d'un minimum d'énergie potentielle convergent asymptotiquement vers ce minimum. Dans le contexte de la robotique, ce type a inspiré O.Khatib, qui a proposé une méthode d'évitement d'obstacle en définissant dans l'espace d'évolution du robot un champ de potentiel artificiel analogue au champ de gravité [81]. Dans cette méthode devenue classique, le but à atteindre joue un rôle d'un pôle attractif, alors que les obstacles génèrent un champ répulsif. Le robot suit alors le gradient de potentiel ainsi défini, jusqu'à atteindre le minimum.

Cette méthode est bien adaptée à la problématique du contrôle du mouvement des robots mobiles : la force dérivée du potentiel permet de calculer une direction de déplacement et une accélération proportionnelle à son intensité, et est donc facilement transformable en commande dynamique (accélération) ou cinématique (vitesse ou position).

### Les avantages de la méthode de champ de potentiel

- Simplicité algorithmique de la mise en œuvre (la méthode est analytique)  
«Adaptabilité à de nombreux types de capteurs extéroceptifs.
- Possibilité de traiter aussi bien les obstacles fixes que les obstacles mobiles

### Formalisation de la méthode

Considérons un obstacle  $O_i$  que nous représentons par une fonction analytique dans le plan  $(O, x, y)$ . Si  $X_g$  le vecteur qui représente la position du but et  $X$  celle du robot ( $A$  est le vecteur d'état du robot), nous pouvons écrire la formule du potentiel artificiel  $U(X)$  appliqué au robot :

$$U(X) = U_g(X) + U_{O_i}(X) \quad (B.1)$$

Où

$U_g(X)$  : Le potentiel attractif produit par le but en X

$U_0(X)$  : Le potentielle répulsif induit par l'obstacle en X. Nous pouvons alors calculer la force résultante F par :

$$F = F_g + F_{0_i} \quad (B.2)$$

$$F_g(X) = -\overrightarrow{\text{grad}}[U_g(X)] \quad (B.3)$$

$$F_{0_i}(X) = -\overrightarrow{\text{grad}}[U_{0_i}(X)] \quad (B.4)$$

La force  $F_g$  est une force attractive qui permet au point de contrôle du robot d'arrivé au but,  $F_{U_{0_i}}$  est une force induisant une répulsion artificielle de la surface de l'obstacle produite par le potentiel  $U_{0_i}(X)$ .

Le potentiel attractif  $U_g(X)$  est une fonction positive dont la dérivée de premier ordre est continue, et dont le seul minimum est de valeur nulle à  $X = X_g$ . Par conséquent, le potentiel  $U_{0_i}(X)$  sera défini de telle sorte que la fonction de potentiel artificiel  $U(X)$  soit non négative, continu dérivable et qui atteigne son minimum de valeur nulle à  $X = X_g$ . La fonction  $U_{0_i}(X)$  doit elle-même être continu, non négative, dérivable, sa valeur devant tendre vers l'infini sur la surface de l'obstacle.

Dans le cas général où  $n$  obstacle sont présents dans l'environnement, le potentiel répulsif  $U_{0_i}(X)$  est la somme des potentiels répulsifs  $U_0(X)$  générés par chacun des obstacles, et la force résultante totale s'écrit :

$$F = F_g + F_0 = F_g + \sum_{i=1}^n F_{0_i} \quad (B.5)$$

Cette force résultante  $F$  est alors transformée en commande du robot. La difficulté réside maintenant dans la définition des fonctions de potentiel  $U_{0_i}$  et  $U_g$ .

Si potentiel attractif  $U_g(X)$  et répulsif  $U_{0_i}(X)$ . Vérifie les conditions précédents

alors, la fonction  $U_o(X)$ .doit donc elle-même être continue, dérivable, sa valeur devant tendre vers l'infini sur la surface de l'obstacle. Les fonctions initialement proposées dans [81] sont les suivantes :

➤ Le potentiel attractif est défini par

$$U_g = \frac{1}{2} K_g (X - X_g)^T (X - X_g) \quad (B.6)$$

Où  $K_g$  est un gain à déterminer. Ce potentiel génère donc une force :

$$F_g = -K_g (X - X_g) \quad (B.7)$$

Afin d'éviter que le minimum global du potentiel total diffère de celui du potentiel attractif, la fonction de potentiel répulsif ne doit avoir une influence que dans une région délimitée autour de l'obstacle, définir une distance  $d_0$  (distance euclidienne) et la distance

$d_0$  doit donc toujours être inférieur ou égale à la plus courte distance le but et l'obstacle.

Dans [81] ce potentiel est donné par l'équation suivante :

$$U_o(X) \begin{cases} \frac{1}{2} \eta \left( \frac{1}{d(X)} - \frac{1}{d_0} \right)^2 & \text{Si } d < d_0 \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (B.8)$$

Où  $d$  la plus courte distance de l'obstacle  $O$  au robot, et  $\eta$  le gain de cette fonction. Ce potentiel génère la force :

$$F_o(X) \begin{cases} \eta \left( \frac{1}{d(X)} - \frac{1}{d_0} \right) \frac{1}{d(X)^2} \cdot \frac{\partial d}{\partial X} & \text{Si } d < d_0 \\ 0 & \text{Si non} \end{cases} \quad (B.9)$$

Dans cette équation, le terme  $\frac{\partial d}{\partial X}$  représente le vecteur unitaire de la dérivée partielle de la distance  $d$  entre le robot et l'obstacle, il détermine la direction de la force à appliquer.

**Annexe**

**"C"**



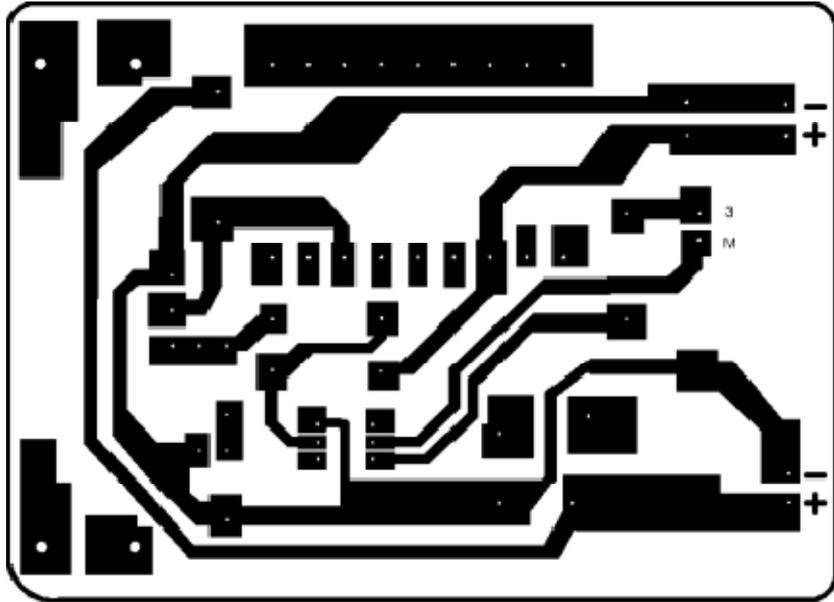


Figure N° C-3 : Schéma du circuit imprimé de l'étage de puissance

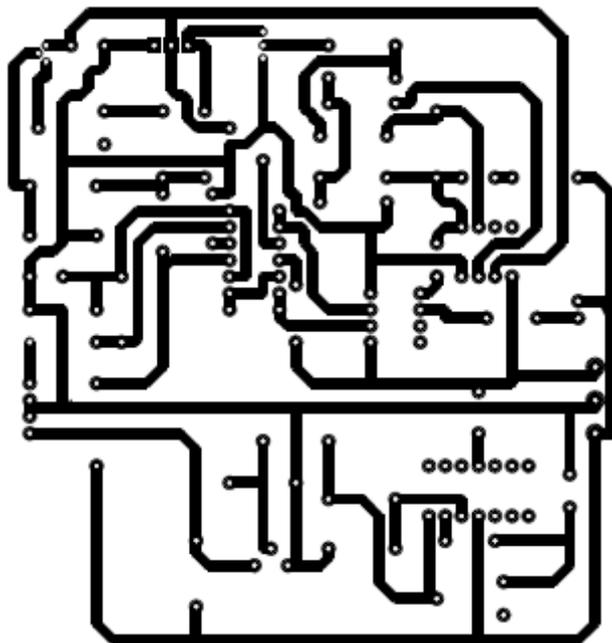


Figure N° C-4 : Schéma du circuit imprimé de la carte analogique

## Liste des composants

R1 = 1K $\Omega$	D1 = 1N4148
R2 = 1M $\Omega$	
R3 = 15K $\Omega$	D2 = diode Zener 3v
R4 = 4.7K $\Omega$	
R5 = 1k $\Omega$	D3 = 1N4148
R6 = 100K $\Omega$	
R7 = 100K $\Omega$	D4 = 1N4148
R8 = 22K $\Omega$	
R9 = 1k $\Omega$	D5 = 1N4148
R10 = 10K $\Omega$	
R11 = 1K $\Omega$	D6 = diode Zener 16v
R12 = 1K $\Omega$	
R13 = 1K $\Omega$	D7 = diode Zener 16v
R14 = 1K $\Omega$	
R15 = 1K $\Omega$	D8 = BYV95c
R16 = 270K $\Omega$	
R17 = 2.4K $\Omega$	T1 = BC327
R18 = 100 $\Omega$	
R19 = 10K $\Omega$	T2 = IRF730
R20 = 100K $\Omega$	
C1 = 100nf	T3 = BC337
C2 = 10nf	
C3 = 1nf	T4 = BC141
C4 = 100nf	
C5 = 220 $\mu$ f(63v)	T5 = BUP307D (IGBT)
C6 = 150 $\mu$ f(385v)	

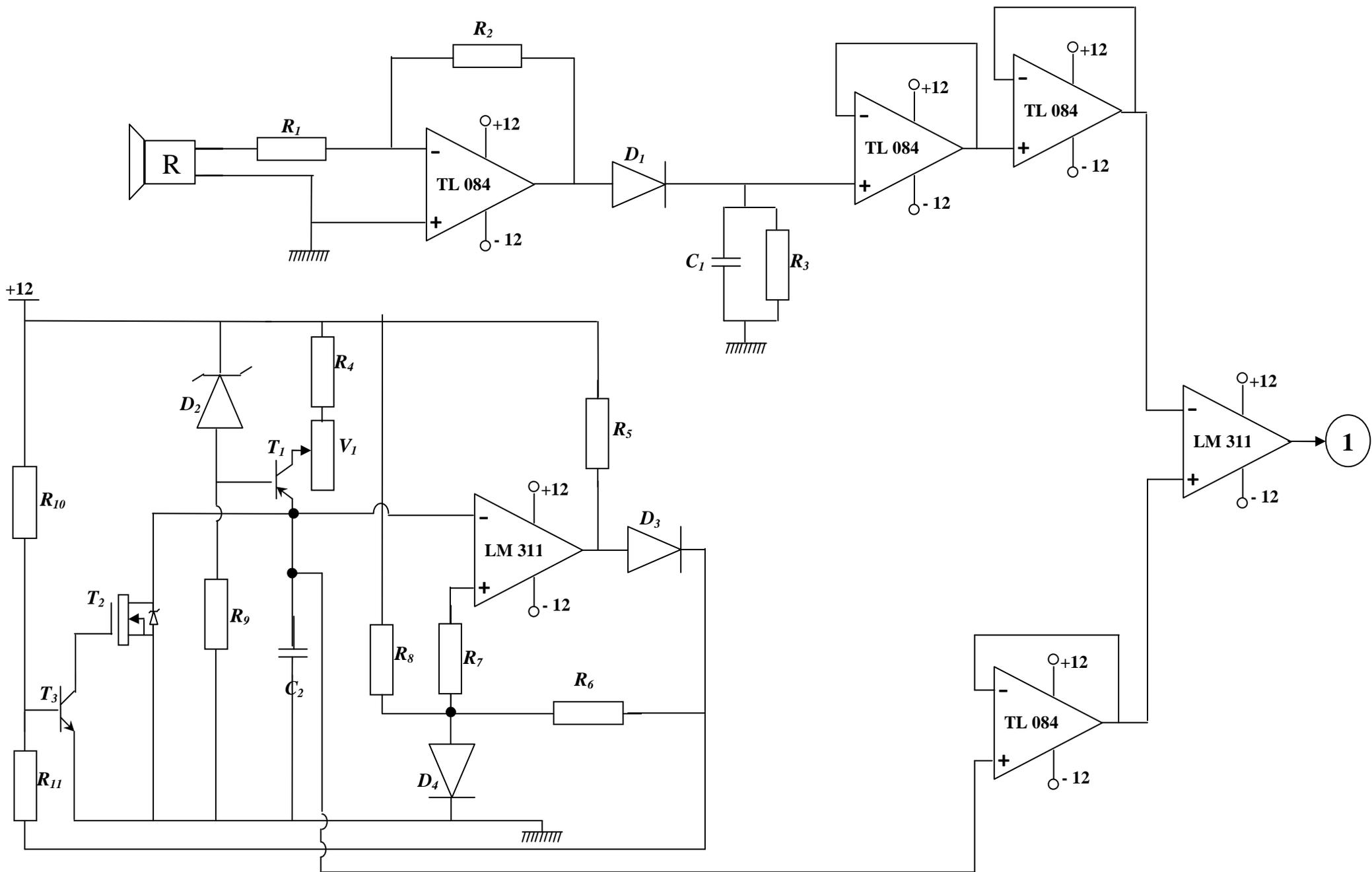


Figure N°C-5 : circuit électronique de la carte de commande analogique

**Annexe**

**"D"**

# Etude et réalisation d'un chargeur de batterie 12 v à base d'une alimentation à découpage

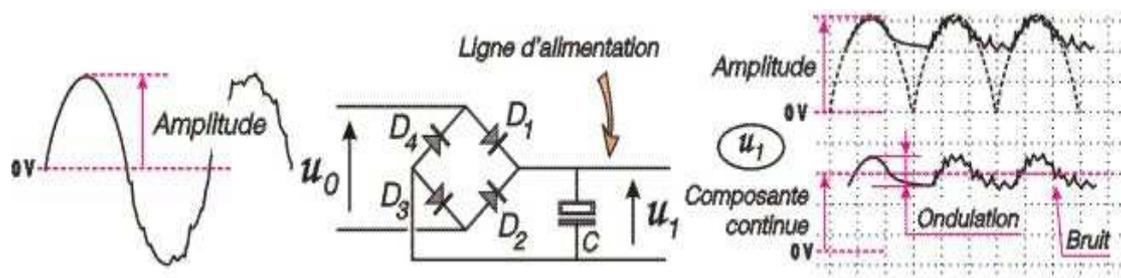
## Introduction

Dans tous les domaines, la gestion de l'énergie est devenue une préoccupation de tous les instants. Il en est bien évidemment de même dans les systèmes électroniques. La recherche d'un rendement élevé et la qualité des tensions d'alimentation (stabilité, absence de perturbations, ...) sont des critères essentiels. Notre objectif c'est la réalisation d'un chargeur de batterie 12v à base d'une alimentions à découpage.

## Les principaux critères d'une bonne alimentation

Les circuits électroniques numériques (microprocesseur, microcontrôleur, mémoire, convertisseur analogique/numérique, convertisseur numérique/analogique, circuit escaler, ...) et les circuits électroniques analogiques (amplificateur audio, amplificateur vidéo, démodulateur, oscillateur, préamplificateurs, ...) ne peuvent fonctionner correctement que si les tensions d'alimentation sont parfaitement constantes. Il faut pouvoir supprimer l'ondulation résiduelle et le bruit. L'ondulation résiduelle (figure 1) est mesurable aux bornes du condensateur C (de forte capacité, souvent quelques centaines de microfarads  $\mu\text{F}$ ) câblé en sortie du circuit de redressement (pont de diodes D1 à D4 dans l'exemple). A cette ondulation résiduelle peut se superposer le bruit (petites variations de hautes fréquences dues aux perturbations de voisinage) véhiculé par les lignes d'alimentation.

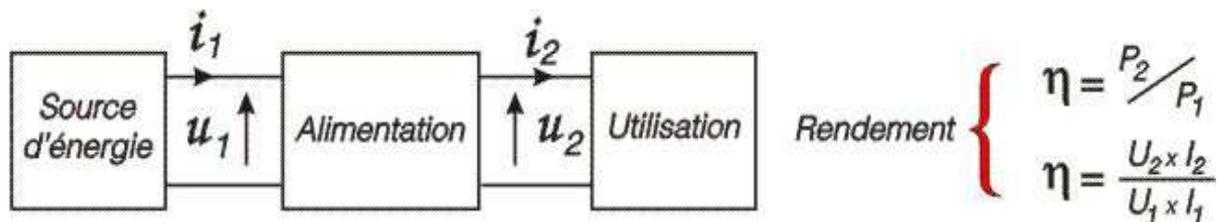
*Figure N • D-1 : Ondulation et bruit sur une ligne d'alimentation*



Il est également nécessaire de supprimer les fluctuations de la composante continue (tension continue) correspondant aux variations de consommation (sur la ligne  $u_1$ ) et aux variations de la tension d'entrée  $u_0$  de la source d'énergie. Le rendement de l'alimentation doit être élevé. Le rendement mesure le rapport entre la puissance  $P_2$

disponible en sortie de l'alimentation et la puissance  $P_1$  consommée en entrée de celle-ci. Le rendement est d'autant meilleur qu'il se rapproche de 100%. Les alimentations à découpage peuvent avoir un rendement supérieur à 80%. L'énergie perdue dans les circuits de l'alimentation produit un échauffement (d'où la possibilité d'utiliser un ventilateur pour réduire la température moyenne des composants, voir alimentation de PC par exemple).

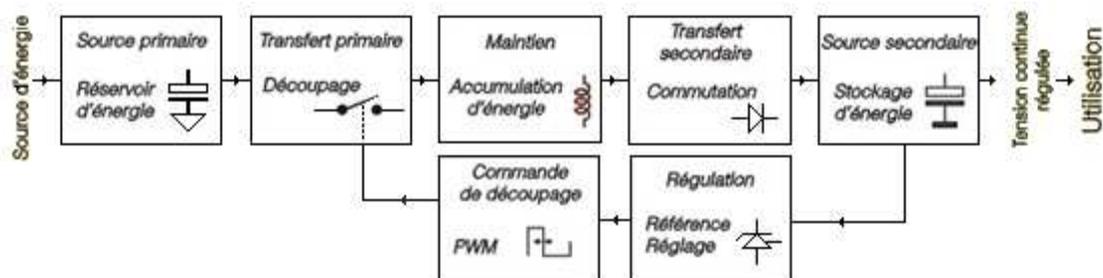
Figure N • D-2 : Rendement d'une alimentation



### Principe général de l'alimentation à découpage

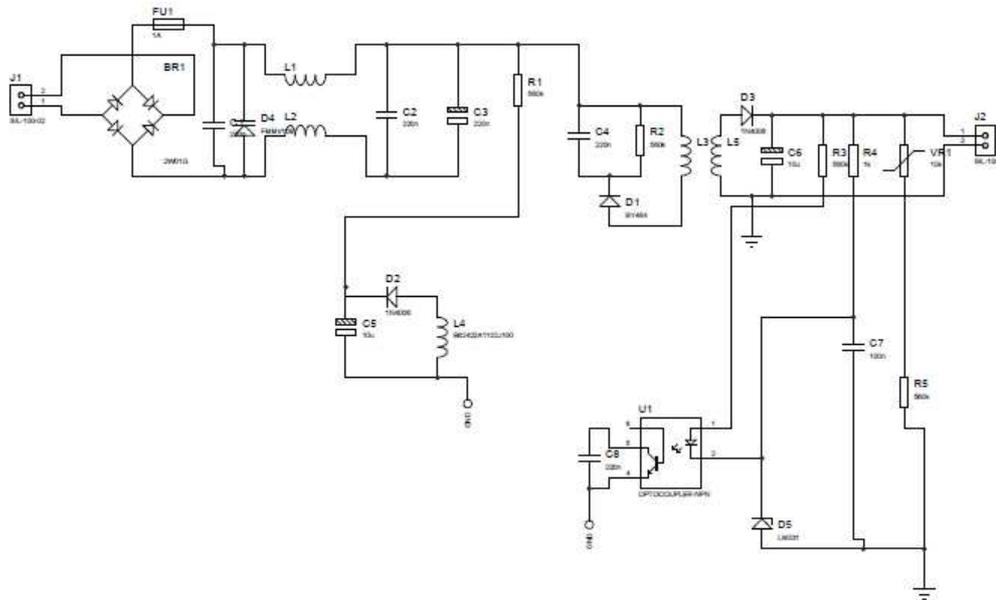
Partant d'une tension continue  $u_1$  (en sortie de la source primaire de la figure 3, cette tension  $u_1$  comporte des défauts identiques à ceux mis en évidence sur la figure 1), on cherche à obtenir une tension continue régulée (source secondaire) parfaitement stable et exempte des défauts énoncés (absence de fluctuation, d'ondulation et de bruit). Afin d'obtenir un rendement élevé, la quantité d'énergie transférée (transfert primaire, figure 3) est découpée de façon à répondre exactement aux besoins de l'utilisation. La quantité d'énergie en cours de transfert doit être maintenue (accumulation dans un circuit magnétique) pour ensuite être acheminée (transfert secondaire) vers la source secondaire. Les fonctions de commande de découpage et de régulation déterminent et ajustent la quantité d'énergie en cours de transfert.

Figure 3 : Schéma synoptique d'une alimentation à découpage



### Schéma d'alimentation à découpage

Dans notre cas nous utilisons le schéma d'une alimentation à découpage de type **fly-back** (fonctionnement alterné) représenté à la (figure 4). Ce type d'alimentation est mis en œuvre dans les matériels audiovisuels et électroniques quand la puissance nécessaire reste inférieure à 500W.



*Figure N •D- 4 : Schéma de principe partiel d'une alimentation à découpage de type fly-back.*

### **Le principe de fonctionnement**

Partant du réseau électrique (220V ; 50Hz) et du circuit secteur, la tension secteur est redressée par le pont P de diodes puis filtrée par le condensateur C1 de forte capacité. La tension ainsi obtenue (en sortie de la source primaire) présente une composante continue de l'ordre de :  $230 \times 1,4$  soit environ 310V, si on veut prendre en compte les pertes dans les circuits (1,4 correspond à la racine de 2).

Cette tension est appliquée à l'enroulement primaire  $L_p$  du transformateur d'alimentation Tr. L'autre borne de l'enroulement primaire est connectée à un SMPS qui contient un transistor Q (découpeur, il fonctionne en bloqué/saturé et permet le transfert primaire des paquets d'énergie dans le circuit de maintien constitué par les composants associés R, D, C, le primaire  $L_p$  et le noyau magnétique du transformateur). Le transfert des paquets d'énergie vers les circuits secondaires est

réalisé par les diodes D11 quand le transistor de découpage Q est bloqué (fonctionnement alterné ou fly-back lié au sens de câblage des enroulements secondaires du transformateur). L'énergie transférée sur le condensateur C13 détermine les tensions VS.

Une tension proportionnelle à VS est récupérée afin de constituer une grandeur de mesure qui est ensuite ramenée et comparée à une référence de tension (Ref) de façon à réaliser une commande de régulation. Cette commande de régulation est ensuite appliquée à la fonction PWM de façon à ajuster les paquets d'énergie transmis.

### **Conclusion :**

Les alimentations à découpage sont légères et peu encombrantes.

Elles ont un excellent rendement. Par contre leur stabilité est moyenne ou médiocre.

Elles sont donc très utilisées en électronique embarquée (légereté, rendement) ou simplement pour leur excellent rendement lorsque la stabilité n'est pas une caractéristique essentielle.

**Annexe**

**"E"**



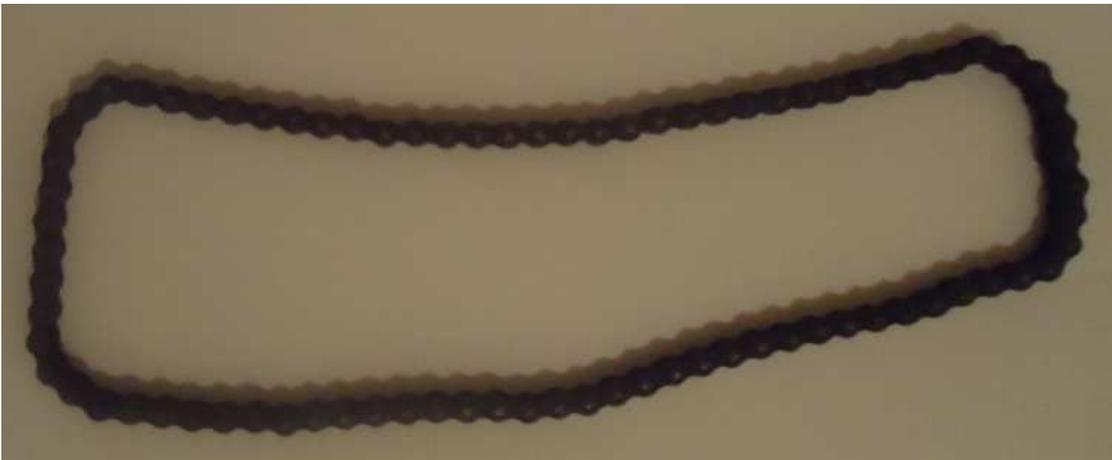
*Figure N •E.1 : Base mécanique du robot*



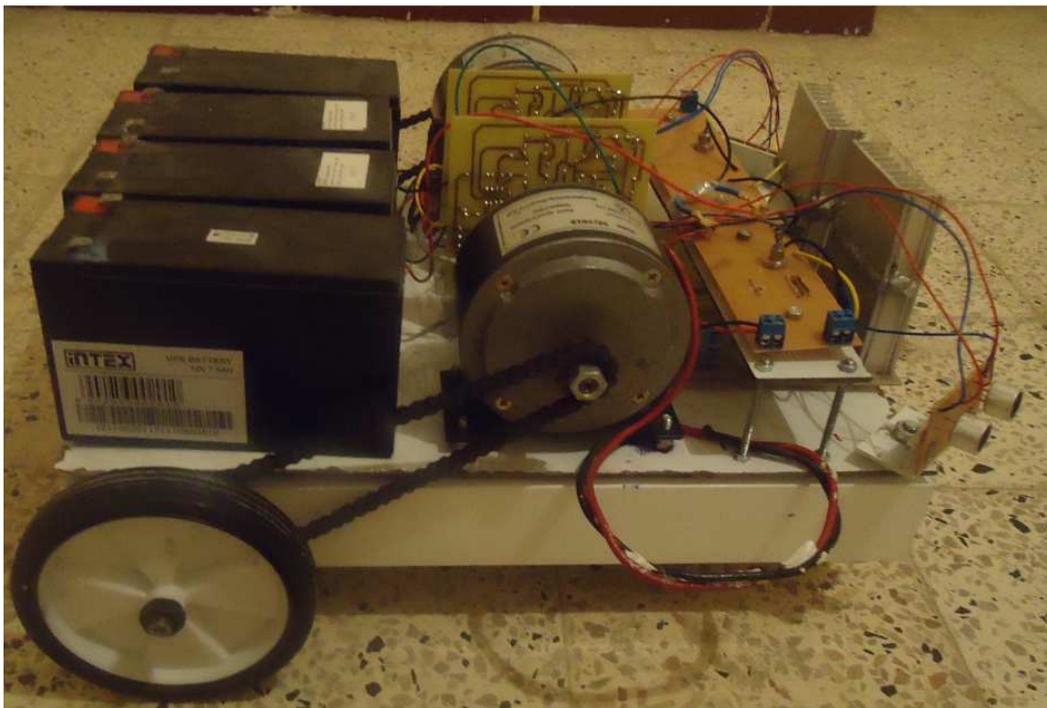
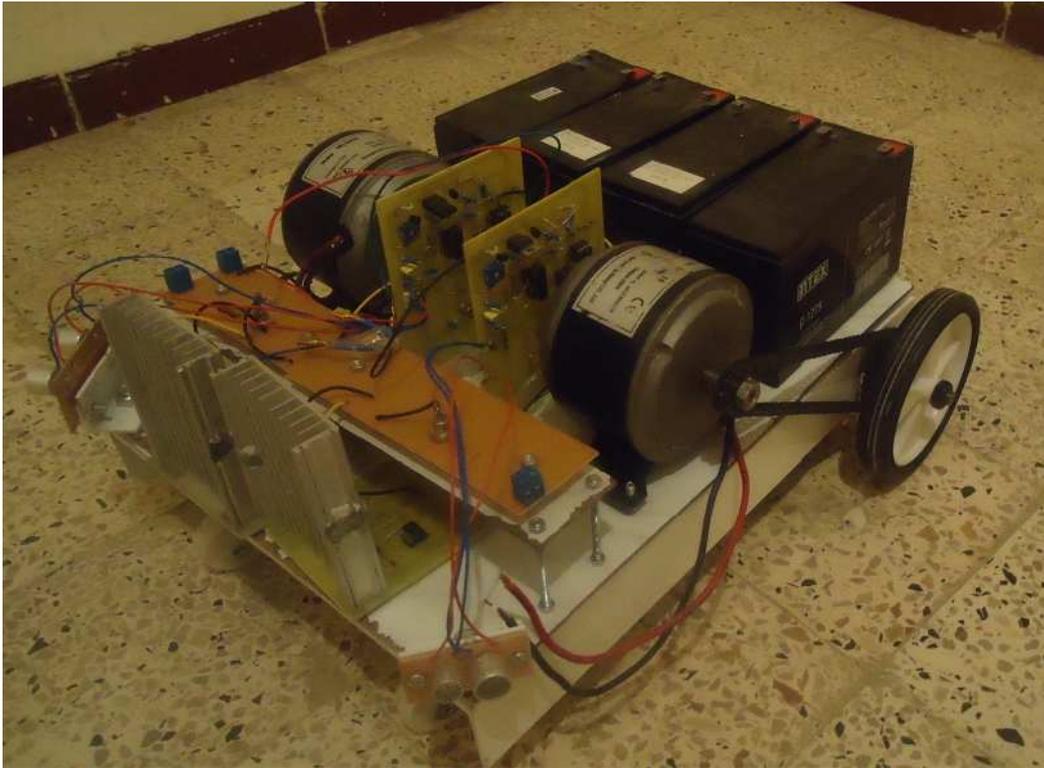
*Figure N •E.2 : moteur à courant continue*



*Figure N °E.3: La roue dentée*



*Figure N °E.4 : La chaine utilisée*



*Figure N °E.5 : La nouvelle plateforme mobile*