

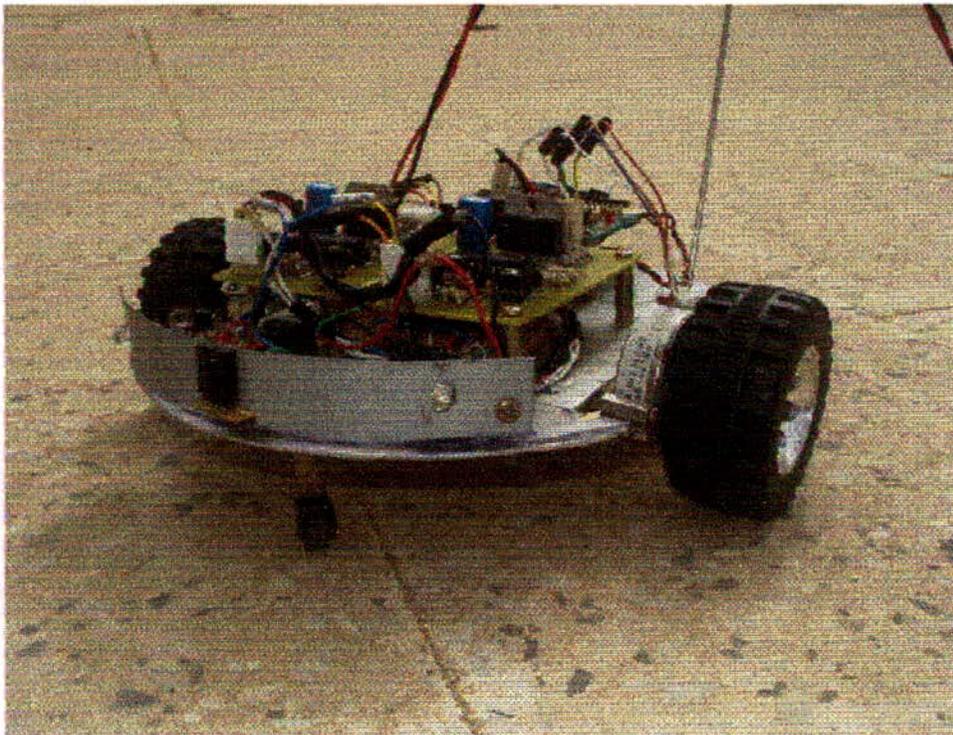


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

19/04

المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات  
BIBLIOTHEQUE — المكتبة  
Ecole Nationale Polytechnique

# ETUDE ET REALISATION D'UN ROBOT MOBILE



Projet de Fin d'Etudes  
pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état  
en Automatique

Proposé par :  
M<sup>r</sup>. R. SADOUN

Etudié par :  
ZIAT Mehdi

PROMOTION : SEPTEMBRE 2004  
E.N.P.10, AVENUE HASSEN BADI, EL-HARRACH, ALGER.

المدرسة الوطنية المتعددة التخصصات  
المكتبة — BIBLIOTHEQUE  
Ecole Nationale Polytechnique

À tous les miens,

## Remerciements



À Mr R. SADOUN, initiateur et encadreur de ce projet pour sa disponibilité, son assistance et son implication tout au long de la conception et de la réalisation du Robot qui est aussi le sien. Qu'il trouve ici l'expression de notre gratitude et de notre considération inconditionnelles,

Aux membres de ma famille pour leur soutien, leur aide et leur compréhension durant tout ce temps qu'aura duré ce projet et notamment ma mère, mon jeune frère Wanis et mes cousins Hakim, Malek, Fayçal et Mimo,

À S.K. qui se reconnaîtra et qui malgré la distance a partagé les joies et les peines quotidiennes qui ont jalonné la réalisation de ce projet,

À mes amis où qu'ils soient et qui m'ont compris et aidé durant les moments difficiles,

Aux techniciens et personnels des départements d'Electronique et de Génie Mécanique pour leur aide et leur assistance durant la réalisation de **KifPloo**,

À mes camarades de l'ENP et des cyber communautés [www.astrowars.com](http://www.astrowars.com) et [www.js-kabylie.com](http://www.js-kabylie.com) pour l'intérêt qu'ils ont manifesté à mon travail et pour leurs encouragements incessants,

À tout le corps enseignant de l'ENP, tout départements confondus et spécialement aux enseignants d'Automatique qui ont permis que je présente ce travail,

À tout le personnel de l'ENP qui, au jour le jour, fait que cette école soit ce qu'elle est,

À tout les concepteurs de robots de part le monde qui en partageant leurs idées et leurs expériences font que cette jeune science avance et se développe,

Aux membres du jury pour l'attention qu'ils prêteront à ce travail.

## Abstract

يهدف هذا المشروع الى تحميل, دراسة و انشاء روبوت متحرك ذو عجلات تفاضلية. تطرقنا خلال دراستنا الى تصميم الهيكل الميكانيكي جهاز التحريك استقطاب الحواجز و عنصر التحكم عن طريق برمجة البروسييسور 68HC11. الكلمات الاساسية البرمجة – البروسييسور 68HC11 – لمحركات الخطوية – ركة المتح الآليات – روبوت متحرك

*This work involves the study, conception and realization of an experimental wheeled mobile robot: **KifPloo**. During our work, we focused on the mechanical structure, the motion, the perception and the command of the robot. The mechanical structure performs a differential drive motion. Two independent stepper motors make the robot move. The obstacle avoidance is completed by a self-made IR module. Finally, a microcontroller M68HC11 programmed in assembly language achieves the whole system direction.*

Key words: mobile robot – mobile robotics – stepper motors – microcontroller – assembly language – infrared detection.

*Ce travail comporte l'étude, la conception et la réalisation d'un robot mobile expérimental à roues différentielles : **KifPloo**. Durant notre étude, nous nous sommes intéressés à la structure mécanique, la motorisation, la perception et la commande du robot. La structure mécanique est de type holonomique. La motorisation est assurée par des moteurs pas à pas bipolaires. Un dispositif de détection Infrarouge assure la perception d'obstacles. Enfin, l'ensemble du système est commandé par un microcontrôleur M68HC11 programmé en assembleur.*

Mots clé : Robot mobile – robotique mobile – moteurs pas à pas – microcontrôleur – assembleur – détection infrarouge.

## Plan

<b>Introduction</b>	13
<b>Robotique – Généralités</b>	17
1. Robotique – rétrospective	17
1.1. Les robots dans la Mythologie	17
1.2. Les précurseurs	19
1.3. Etymologie	21
1.4. Robotique moderne	22
2. Cas particulier : la robotique mobile	24
3. Typologie	27
3.1. Robots mobiles à roues	28
3.1.1. Robots mobiles à roues avec essieux	28
3.1.2. Robots mobiles à roues différentielles	28
3.2. Robots mobiles à pattes	29
3.2.1. Les robots à une patte	29
3.2.2. Les robots à deux pattes	29
3.2.3. Les robots à quatre pattes	29
3.2.4. Les robots à six ou huit pattes	29
3.2.5. Les robots « mille-pattes »	30
3.3. Robots mobiles à chenille	30
3.4. Robots volants (drones)	30
3.5. Robots navigants	31
<b>Notions fondamentales en Robotique mobile</b>	35
1. Structure mécanique	35
2. Charge utile	36
3. Structure de commande	36
3.1. Perception de l'environnement	36
3.1.1. Mesure de distance sans contact	36
3.1.2. Imagerie 2D	37
3.1.3. Relevé 3D	37
3.2. Interaction homme machine (IHM)	38
3.3.1. Principes généraux de l'interface homme robot	38
3.3. Commande	40
3.4. Localisation	42
3.4.1. Les grandes familles de systèmes de localisation	42

3.4.1.1 Localisation absolue	43
3.4.1.2. Localisation à l'estime (relative)	44
<b>Architecture du robot mobile à réaliser</b>	51
1. <b>Structure mécanique</b>	51
1.1. Le Châssis	54
1.2. Les essieux	55
1.3. Les roues	56
2. <b>Moteurs</b>	57
2.1. Choix des moteurs	57
2.1.1. Choix 1 : Moteur à courant continu	57
2.1.2. Choix 2 : Moteur pas à pas	58
2.2. Les moteurs pas à pas	58
2.2.1. Définition	58
2.2.2. Moteur à aimant	59
2.2.3. Moteur à réluctance variable	61
2.2.3.1. Moteurs à circuit magnétique simple	61
2.2.3.2. Moteur à circuits magnétiques multiples	62
2.2.4. Moteur hybride	62
2.2.5. Moteurs utilisés	63
2.3. Commande des moteurs pas à pas	64
2.3.1. Alimentation en tension constante	64
2.3.2. Alimentation en courant constant	64
2.3.3. Type de commande choisie	65
2.4. Cartes de puissance	65
2.4.1. Le circuit intégré L297	66
2.4.2. Le circuit intégré L298	70
3. <b>Commande</b>	72
3.1. Le microcontrôleur 68HC11	72
3.2. La carte de commande	76
4. <b>Perception</b>	78
<b>Mise en œuvre réalisation et résultats</b>	83
1. Mise en oeuvre de la carte de commande	83
2. Choix des moteurs	85
3. Réalisation des cartes de puissances	85
4. Réalisation de la structure mécanique	86
5. Montage des parties commande et puissance sur la structure Mécanique	89

<b>6. Premiers tests des algorithmes de mouvement sur le robot en mode « aveugle »</b>	90
<b>7. Réalisation des modules de perception</b>	92
<b>8. Mise en œuvre de la partie perception sur le robot</b>	94
<b>9. Mise en œuvre de la stratégie de mouvement et de l'algorithme final</b>	94
<b>Conclusion</b>	97
<b>Bibliographie</b>	101
<b>Annexes</b>	109

## Introduction

Ce projet est avant tout un travail préliminaire visant à introduire ce domaine d'avant garde qu'est la robotique mobile en Algérie. En effet, le lancement de recherches dans ce domaine nécessite impérativement l'acquisition de robots et plates formes mobiles d'expérimentation. Considérant le coût élevé de ces équipements de pointe, l'idée de réaliser nos propres outils d'expérimentation s'est imposée naturellement à notre esprit. *KifPloo*, le robot réalisé, est avant tout un outil de recherche et de développement mis à la disposition de nombreuses spécialités telles que les systèmes embarqués, les systèmes asservis, l'informatique temps réel, la vision par ordinateur, le traitement du signal, l'intelligence artificielle et bien d'autres dont la robotique mobile réalise la parfaite symbiose.

Nous avons à travers ce travail étudié tout d'abord la robotique mobile en tant que science nouvelle. Cette dernière de part sa relative jeunesse et son perpétuel développement est une science où il est assez incongru de parler de théorie spécifique. Nous parlerons plutôt de notions générales concernant cette science vu la diversité des applications réalisées à l'heure actuelle et la grande variété des pistes de recherches explorées. Par la suite, et après avoir réalisé un tour d'horizon non exhaustif des différentes réalisations existantes, nous avons pensé notre propre système. Autour de l'organe principal que constitue le microcontrôleur M68HC11, nous avons construit les différents composants de notre robot que nous avons voulu **modulaire, adaptatif et évolutif**. La motion a particulièrement retenu notre attention, étant intrinsèque à la notion même de robot mobile. La partie perception qui elle, assure l'autonomie du robot dans son environnement, a également été traitée. Enfin, la structure mécanique a été minutieusement choisie en fonction de critères exposés plus avant.

# **Robotique - Généralités**

Bien qu'étant une discipline relativement récente, la robotique tire ses origines loin dans le passé de l'humanité. Son rapide développement ainsi que les perspectives prometteuses qu'elle laisse entrevoir n'ont de cesse de faire rêver, industriels, chercheurs et grand public. La robotique essentiellement orientée vers le domaine de l'industrie depuis ses débuts a emprunté depuis peu une nouvelle orientation qui tend à se distinguer comme une science à part entière : la Robotique mobile. Cette nouvelle direction se distingue par l'immense diversité de ses applications.

## **1. Robotique – rétrospective**

### **1.1. Les robots dans la Mythologie**

La notion de robot apparaît très tôt dans l'imaginaire humain. Pour les Mésopotamiens, les humains seraient eux-mêmes des robots sensés servir les dieux. En effet, d'après la mythologie mésopotamienne, au commencement des temps, les dieux vivaient entre eux dans une société inégalitaire où une majorité d'entre eux travaillait pour le compte d'une minorité oisive. Les dieux travailleurs, se sentant exploités se révoltèrent. Le dieu des techniques se proposa alors de fabriquer des pantins doués de vie qui travailleraient à la place des dieux mais qui seraient mortels et beaucoup moins puissants. Ces pantins, étaient les premiers hommes.[1]

Quelques siècles plus tard, dans la Grèce antique, on retrouve cette idée de machine, création des dieux pour les servir ou les protéger. Dans son Iliade, Homère (VIIIe siècle av. J.-C.) nous raconte qu'Héphaïstos, fils de Zeus et d'Héra, dieu de la forge, fut le premier fabriquant de créatures artificielles. Il décrit notamment des tables circulaires sur trois pieds munis de roues et qui transportait vers l'Olympe les produits de la forge d'Héphaïstos. Homère nous dit aussi que le dieu de la forge s'était construit deux servantes en or pour l'assister dans ses travaux. Ces dernières étaient douées d'intelligence et de la parole.

Toujours dans la Grèce antique, le mythe de Talos nous rappelle que les robots peuvent aussi avoir pour fonction, dans l'imaginaire collectif, la défense et la protection des hommes. Talos, dont la construction est attribuée à Héphaïstos ou à Dédale (père d'Icare et constructeur du labyrinthe de Minos), est une statue géante en bronze représentant un guerrier en armes et armure. Sa spécificité est qu'elle était douée de vie et qu'elle avait pour fonction la défense de la Crète du roi Minos. Talos portait son corps à incandescence et embrasait ses ennemis en une étreinte fatale. Dans l'Odyssée (Homère, VIIIe siècle av. J.-C.), c'est ce même Talos qui précipite des pierres sur le navire d'Ulysse pour tenter de le couler. [1], [2], [3]

La mythologie romaine fait elle aussi référence à ces créatures dotées de vie. Dans ses *Métamorphoses*, Ovide (43 av. J.-C. - 17 apr. J.-C.) nous conte l'histoire de Pygmalion. Jeune roi de Chypre, ce dernier était aussi un sculpteur de talent. Aucune femme ne trouvant grâce à ses yeux, il « *sculpta dans l'ivoire à la blancheur des neiges un corps auquel il donna une beauté qu'aucune femme ne peut tenir de la nature* ». Par la suite, Pygmalion s'épris de sa statue. Vénus, déesse de la beauté et de l'amour, le prit en pitié et donna vie à la statue qui fut nommée Galatée. Celle-ci épousa Pygmalion et lui donna un fils du nom de Paphos. [2], [3], [4], [5]

Dans la cabale juive, le Golem qui signifie « embryon » prends le sens de robot ou d'automate. Selon des légendes hébraïques du Moyen Age, certains savants juifs avaient le pouvoir d'insuffler la vie à des effigies au moyen de formules magiques. D'après l'une de ces légendes, le rabbi Juda Löwi (env. 1525-1609) de

Prague aurait créé un Golem qui lui servait de domestique jusqu'au jour où celui-ci devenant indocile, le rabbi fut obligé de le détruire. L'écrivain autrichien Gustav Meyrink s'est inspiré de cette légende pour son roman *Le Golem* (1916). [3], [5]

Plus récemment, la mythologie contemporaine et avant même l'apparition du terme *robot* reprit la thématique d'une créature façonnée par l'homme et doué de vie. Dans son roman *Frankenstein* (1818), Mary Shelley raconte l'histoire d'un jeune scientifique du nom de Frankenstein qui a assemblé un être en laboratoire et lui a insufflé la vie par le truchement de l'électricité. La créature mesurait près de deux mètres cinquante et son horrible visage donnait des crises de nerfs à tous ceux qui le contemplaient. Le monstre n'arrivant pas à s'adapter à la société finit par se retourner contre son créateur. Il assassina les parents du jeune scientifique avant de tuer ce dernier. Il s'en alla ensuite se perdre dans le désert pour y périr de remords. On peut résolument établir que ce roman a joué un grand rôle dans le développement des théories pessimistes ultérieures concernant l'évolution à long terme de la science en général et de la robotique en particulier. Il a contribué à étendre l'image du savant « fou » et irresponsable dans l'imaginaire collectif. Les questions éthiques qui continuent à agiter au jour d'aujourd'hui les milieux scientifiques concernant la possibilité de créer une vie ou une intelligence artificielle se sont très largement répandues à la suite de la parution de l'ouvrage. [3], [5], [6]

## 1.2. Les précurseurs

L'origine de la robotique contemporaine remonte à l'Alexandrie ptolémaïque. En effet, à partir du VI<sup>e</sup> siècle av. J.-C, apparaissent des systèmes hydrauliques et pneumatiques, ancêtres des systèmes de régulation d'aujourd'hui. Ces recherches ont principalement pour but l'élaboration de nouvelles machines de guerre et d'instruments de levage. Ces machines sont pour la plupart fabriquées à l'aide de leviers, de poulies, de ressorts et de mouffles. D'autres innovations de l'école d'Alexandrie trouvent même leur concrétisation dans la robotique moderne,

notamment les engrenages mécaniques, d'abord en bois puis en métaux précieux, les cylindres, les arbres à cames, les pistons, les pompes mais surtout les instruments de mesure telles que les clepsydres. Parmi ces précurseurs de l'école d'Alexandrie, on peut citer Héron d'Alexandrie (Ier siècle apr. J.-C.), mathématicien, auteur de nombreux ouvrages sur les automates, les machines de guerre et de levage et Ctésibios (IIIe siècle av. J.-C.) qui mit au point de nombreux systèmes mécaniques et hydrauliques. On lui attribue notamment l'invention des clepsydres, horloges hydrauliques qui ont révolutionné la mesure du temps dans l'antiquité. [1], [2], [3]

La Chine impériale a elle aussi été le berceau de recherches sur les automates. On y connaissait les clepsydres dès l'antiquité ainsi que *les sphères armillaires équatoriales* assemblage d'anneaux ou de globes figurant les mouvements célestes. Vers 124 av. J.-C, Zhang Heng mit au point une machine astronomique ainsi que le premier sismographe de l'histoire. Au début du XIe siècle, une horloge de 12 mètres de haut actionnée par une roue hydraulique et renfermant des automates dont les apparitions symbolisaient l'écoulement du temps aurait été construite dans la ville de Honan.[1], [2]

D'après les chroniqueurs, parmi les nombreux présents qu'aurait offert le calife abbasside Haroun al-Rachid à l'empereur Charlemagne en 809 apr. J.-C. figurait un automate mécanique. Peu de détails nous sont parvenus sur la nature de cet automate.[4]

De nombreuses avancées ont été réalisées dans le domaine des automates durant la Renaissance. Les travaux réalisés à partir du XVIe et siècle par Léonard de Vinci dans les domaines hydrauliques et mécaniques ont pour résultat l'énoncé de plusieurs principes indispensables à la robotique moderne. Léonard, inventeur de plusieurs machines dont la réalisation ne sera possible que bien après sa mort fût aussi un visionnaire. Il a ouvert de nombreuses pistes de recherches dont beaucoup ont abouti à des automates ou des robots telles que la modélisation du

vol des oiseaux : sa machine volante, l'ornithoptère, peut être considérée comme l'un des ancêtres des drones actuels; ses nombreuses machines de guerres dont beaucoup ont vu le jour des siècles plus tard et qui maintenant sont en passe de devenir entièrement automatisées ou robotisées comme les chars de combats. En effet, dès 1482, Léonard de Vinci prévoyait que la guerre du futur serait menée à l'aide de chariots blindés en bois, cuir et métal. Son idée n'a pas vu le jour par faute de système de propulsion adéquat.[2]

Le siècle des lumières est celui où va s'opérer la synthèse de toutes ces avancées et découvertes antérieures. Des mécaniciens de génie comme Pierre Jacquet-Droz (1721-1790) ou encore Jacques de Vaucanson (1709-1782) vont fabriquer des automates dont la complexité et l'authenticité sont inimaginables pour l'époque. Jacques de Vaucanson réalise un canard capable de picorer, boire et rejeter des excréments : le *Canard digérateur* (1738), découvert bien plus tard comme une supercherie pour sa pseudo digestion. Une séquence d'instructions, fournie à l'avance, permettait au canard de réaliser une séquence d'actions. Il réalise également en 1737, le *Joueur de flûte traversière* qui est le premier exemple d'androïde : automate à figure humaine selon l'Encyclopédie de Diderot. Jacques de Vaucanson est également l'inventeur du métier à tisser automatique (1745), il mit aussi au point de nombreux organes qui sont utilisés de nos jours dans les machines outils modernes. [2], [3], [4]

### 1.3. Etymologie

Le mot « robot » en lui-même apparaît pour la première fois en 1920 dans une pièce de théâtre de l'écrivain dramatique tchèque Karel Capek intitulée *R.U.R (Rossum's Universal Robots)*. Créé par l'auteur à partir du mot tchèque *robota* qui signifie travail forcé, il désigne des androïdes fabriqués par Rossum et son fils et capables d'effectuer toutes sortes de tâches. Dans la pièce, les robots prennent de plus en plus d'importance dans la vie des humains jusqu'à leur devenir

indispensables. La pièce se termine par la destruction de l'humanité par les robots qui deviennent les maîtres du monde.

Par la suite, l'auteur russe Isaac Asimov donnera au robot ses lettres de noblesses et inventera le mot « *robotique* ». Véritable père de la science fiction en tant que genre littéraire, Isaac Asimov définit en 1942 « *Les trois lois de la robotique* » (Annexe 1). Ces dernières sont sensées protéger l'humanité des risques que pourrait engendrer une trop forte « *robotisation* » de la société. Elles seront ensuite mises en exergue de son livre *I ROBOT* (1950) qui réunit neuf histoires se passant dans un futur où les robots ont une place prépondérante dans la vie des hommes. Ce livre, plus qu'un roman, est aussi une réflexion philosophique toujours d'actualité sur les concepts d'éthique scientifique, d'intelligence artificielle et de définition du caractère *humain* de l'homme. [2], [3], [6], [7], [8]

#### 1.4. Robotique moderne

Les premières machines outils qui font leur apparition dans les usines au XIXe siècle puis les bras télé opérés des années quarante peuvent être considérés comme les ancêtres des robots industriels actuels. Mais, c'est en 1961, avec la création de *Unimate* (*universal mate* : compagnon universel), que naît le premier robot de l'histoire. La genèse de l'aventure Unimation Inc. est quelque peu inattendue. En effet, lors d'un cocktail, un soir de 1956, deux hommes se rencontrent, à l'aube de l'avènement de l'ère électronique, sans savoir qu'ils vont bouleverser le monde. Joseph F. Engelberger était physicien à l'Université de Columbia mais surtout grand fan d'Isaac Asimov et des romans de science fiction. George C. Devol venait de déposer un brevet étiqueté « Le transfert d'article programmé ». Cinq ans après cette rencontre, et malgré de nombreuses difficultés était déposé le brevet 2.988.237 pour un bras articulé programmé du nom d'*Unimate*. Les robots pouvaient désormais se lancer à la conquête du monde. [3], [5], [7], [8]

L'apparition d'Unimate et de ses successeurs n'a été possible que grâce à l'apparition de l'informatique. En effet, Asimov avait bien doté ses robots de cerveaux « positroniques » mais encore fallait-il les réaliser. Les connaissances mécaniques existant depuis longtemps, seul manquait « l'intelligence ». L'apparition de l'ordinateur, permet de combler le besoin urgent en matière grise qu'exprimaient les apprentis roboticiens. [3]

A la fin des années soixante dix, les robots bras articulés commencent à se répandre dans les usines des grands pays industrialisés (Etats-Unis et Japon notamment). A l'origine, ces robots n'avaient aucune perception de la tâche qu'ils accomplissaient ce qui les rendaient très limités. Ils étaient pour la plupart affectés à des tâches simples de manutention ou d'usinage. Afin de combler cette lacune, des recherches en vue de doter les robots industriels de moyens de perception (visuels, tactiles ou autres) ont été entamées. Les robots de seconde génération sont nés de ces recherches. Ils sont capables de localiser une pièce à saisir parmi d'autres, de suivre un joint de soudure ou d'assembler des pièces. Leur caractéristique principale est la *perception de l'état de la tâche*. [3], [7]

Un pas supplémentaire doit être franchi si l'on veut faire du robot un automate hautement adaptatif capable de raisonner sur la tâche à réaliser et l'exécuter en fonction de l'état réel de celle-ci. L'intégration de cette nouvelle fonction aux deux précédentes, qui caractérise les robots de troisième génération permet de développer des machines dites « intelligentes », c'est à dire dotées d'intelligence artificielle (IA) qui leur donne des capacités d'autonomie décisionnelle et opérationnelle.

A la fin des années soixante, Nils J. Nilsson et son groupe du *Stanford Research Institute* en Californie, qui travaillent sur l'IA et la vision par ordinateur, entreprennent un projet d'avant garde, *Shakey* : un robot mobile autonome, petit véhicule sur quatre roues, bourré d'électronique et de capteurs qui doit pouvoir se déplacer sans lien matériel dans un environnement intérieur, en partie inconnu. Les robots mobiles actuels sont les descendants directs de ce robot. *Shakey* était

déjà un outil de recherche pour l'intelligence des machines au sens d'une intelligence perceptuelle et des capacités de raisonnement sur l'action. Bien que cette première tentative fût extrêmement intéressante, beaucoup de progrès restaient à réaliser notamment dans le développement de l'informatique embarquée, fortement intégrée et à faible consommation d'énergie, des capteurs et des connaissances théoriques encore insuffisantes.

La majorité des projets qui se sont développés partout dans le monde à partir des années quatre-vingts, portés par les progrès spectaculaires réalisés dans les domaines de la microélectronique et de la micro-informatique, ont contribué et contribuent encore à rendre concrète, certes à un niveau encore bien modeste, la définition usuelle dans les milieux scientifiques des robots de troisième génération : *machines dotées de la capacité de raisonner sur la tâche à accomplir, de mettre en œuvre pour son exécution des relations intelligentes entre perception et action.* [7]

## **2. Cas particulier : la robotique mobile**

Il est possible de classer l'ensemble des activités humaines du point de vue de la mécanisation en deux très grandes catégories :

La première catégorie, solidement implantée dans la vie économique, concerne les activités de fabrication réalisées en usine; c'est typiquement le cas de l'industrie manufacturière (automobile ou autre). Dans ce type d'activités, c'est le travail qui va à la machine; il est alors possible et même très utile d'organiser le processus de fabrication et de conditionner les divers postes pour tirer le meilleur parti des machines robot et autres.

Dans la seconde catégorie sont regroupées, dans une très large mesure, les activités de terrain (*outdoor*), de chantier et de service, qui concernent un nombre considérable de domaines applicatifs. Parmi les secteurs les mieux établis, on peut notamment citer : l'agriculture, les services, le bâtiment, les forêts, la protection civile, les mines, les travaux publics... dans ce cas, d'est la machine

qui doit aller au travail ou à la tâche dans un environnement très peu structuré et contraignant pour l'exécution de la mission assignée. [9]

Dans le premier cas, le robot est implanté dans un environnement de travail bien conditionné, il exécute ses mouvements tout en conservant un lien mécanique constant avec son bâti.

Un tel lien n'existe pas dans le second cas. Le robot mobile doit donc obligatoirement pouvoir se repérer dans ses mouvements par rapport à son environnement et à l'état de la tâche en cours au moyen de capteurs. Ces derniers, dans la majorité des cas, sont des capteurs de contact ultrasoniques, électromagnétiques ou optoélectroniques.

Il ne peut, dans ce cas, s'agir que de robots de la seconde génération au minimum. En fait, bien souvent, la nécessité de s'adapter à la situation effective demande la mise en œuvre en ligne, c'est à dire lors du travail proprement dit, de capacités décisionnelles d'intelligence soit humaine (télé opération), soit artificielles (on aura alors un robot de troisième génération avec les attributs d'autonomie opérationnelle et décisionnelle). [7] [10]

Ce sont ces difficultés techniques qui ont fait jusqu'à ces dernières années de la robotique mobile un domaine essentiellement dominé par les aspects de la recherche. Supports de recherche privilégiés, nous l'avons vu dans le cas de *Shakey*, pour bien des sujets tels que l'IA ou la vision par ordinateur, les robots mobiles se sont imposés progressivement comme objets de recherche en soi, à la fois sur le plan scientifique et par les perspectives applicatives qui furent ainsi ouvertes.

C'est à partir du milieu des années 80 que le développement s'est accéléré, sous l'impulsion d'abord des projets à caractères militaires, notamment le projet américain ALV (*Autonomous Land Vehicle*) de véhicule automatique de la DRPA en 1984, les travaux de Dickmans sur la mobilité autonome en extérieur. Plus récemment, c'est à l'exploration planétaire que l'on doit le regain d'intérêt à l'égard des robots mobiles. Les applications civiles de la robotique mobile

prennent largement, aujourd'hui, le relais des recherches au contexte exclusivement militaire. Il en est ainsi pour les robots de service où nous retrouvons comme propagandiste J. Engelberger, avec la nouvelle société. Qu'il a créé. [7], [11]

Ce domaine demeure toutefois très fortement tourné vers la recherche. Les estimations les plus optimistes donnaient, tous domaines confondus, un chiffre de l'ordre de 2000 à 3000 robots de service en opération à la fin de 1995, souvent sous forme de prototypes d'essais.

Le sens attaché au concept de robot autonome inclut bien sur l'autonomie opératoire, mais aussi les attributs d'autonomie décisionnelle liés à l'interprétation de la tâche, de son état tel que perçu à travers les capteurs, et les mécanismes de raisonnement susceptibles d'amener à son accomplissement l'ensemble des actions élémentaires n'ayant pas été préalablement précodées. En fait, en parlant d'un tel type de machine, nous supposons l'autonomie décisionnelle présente, avec les attributs à un niveau significatif qui caractérisent la classe des robots de troisième génération.

Les machines développées avec l'objectif d'obtenir les attributs d'adaptabilité et d'intelligence s'appuient d'une part sur la mise en œuvre de mécanismes de raisonnement et de décision opérant sur des modèles et des représentations symboliques, images imparfaites de la réalité, d'autre part sur les mécanismes de mise en exécution et de contrôle des actions dans le monde réel d'évolution de la machine. C'est à dire la prise en compte des informations perceptuelles et du retour sensoriel dans les boucles de commande et d'asservissement.

Une telle démarche, qui manipule des modèles de l'environnement de travail et des tâches réalisables ainsi que des processus de raisonnement associés, met en œuvre des capacités d'« intelligence délibératoire ». Un débat, bien souvent mal posé, met aux prises cette approche avec celle dite de l'« intelligence réactive » proposée par un chercheur du *Massachusetts Institute of Technology* (MIT), R.

Brouks, en 1986. Celle-ci vise à obtenir les capacités fonctionnelles du robot par une architecture imbriquant des systèmes bouclés, définis comme des « comportements élémentaires ».

Dans ce débat, on oppose comportementalisme-réactivité et représentations-raisonnement en prétendant que les systèmes fondés sur le raisonnement ne peuvent gérer la réaction à des perturbations du monde extérieur d'une manière efficace. En réalité, dès qu'il s'agit d'un système réel, la réactivité est non seulement nécessairement présente, mais elle est une composante centrale à des niveaux multiples.

L'ampleur des axes et orientations de recherche en robotique mobile démontre la richesse de cette nouvelle science. De nouvelles approches sont explorées parmi lesquelles le bio mimétisme ou il s'agit d'imiter le vivant et préférentiellement l'homme, notamment dans sa capacité de perception et d'analyse de scènes globales et rapides, ses différents niveaux de mémoire comme la formation des chaînes moléculaires inspira l'algorithmique génétique.

[7]

### 3. Typologie

Il est possible de classer les robots mobiles de nombreuses manières et selon de nombreux critères tels : le domaine d'application, le degré d'autonomie, le degré d'« intelligence ». Nous avons préféré les classer, puisque leur mobilité est l'une de leurs caractéristiques essentielles, selon leur mode de locomotion.

On peut classer les robots mobiles en cinq catégories selon leur mode de locomotion :

- Les robots mobiles à roues (*wheeled robots*).
- Les robots mobiles à pattes.

- Les robots mobiles à chenilles.
- Les robots mobiles volants (drones)
- Les robots mobiles navigants (marins ou sous-marins)

### 3.1. Robots mobiles à roues

Ils sont les plus répandus car les plus simples à concevoir. Il existe deux grands types de robots mobiles à roues selon leur mode de direction :

- Les robots mobiles à roues différentielles (*differential drive*).
- Les robots mobiles à roues avec essieu classique (*steer drive*).

#### 3.1.1. Robots mobiles à roues avec essieux (*steer drive configuration*)

Ils sont pour la plupart utilisés dans des applications éducatives car faciles à mettre en œuvre à base de châssis de modèles réduits automobiles. Le mouvement avant-arrière du robot est assuré par deux roues motrices. La direction quant à elle est calquée sur le modèle automobile.

La commande de ce type de robots est assez simple mais leur capacité en terme de mouvement est réduite. En effet, leur comportement dit « non holonomique » les contraint à des manœuvres compliquées (créneau) et limite considérablement leur angle de braquage. C'est pour cette raison qu'ils sont très peu utilisés dans les projets de recherche actuels (mis à part quelques projets militaires visant à robotiser des jeeps de reconnaissance).

#### 3.1.2. Robots mobiles à roues différentielles (*differential drive configuration*)

Les robots de ce type possèdent deux roues motrices possédant chacune son moteur et placées en parallèle l'une de l'autre. Leurs vitesses peuvent donc être commandées indépendamment. En jouant sur les vitesses de chaque roue, on obtient une gamme pratiquement illimitée de mouvements. Malgré une commande plus complexe que celle des robots à roues classiques, leurs capacités en terme de braquage mais aussi la possibilité de tourner sur eux mêmes fait des robots mobiles à

roues différentielles le type de robots mobiles à roues le plus adapté à des applications industrielles. [10] [11] [12]

## **3.2. Robots mobiles à pattes**

On distingue notamment et selon le nombre de pattes :

### **3.2.1. Les robots à une patte**

Un robot doté d'une seule patte a été assemblé au MIT. Le robot sautille sur une patte orientable à deux degrés de liberté, dotée d'un actionneur linéaire pour la propulsion verticale. Il n'est pas autonome.

### **3.2.2. Les robots à deux pattes**

Les robots bipèdes sont surtout étudiés au Japon où les progrès dans ce segment sont assez significatifs. En 1997, Honda et son humanoïde P2, font rêver le monde entier de robots domestiques. Mais, ces résultats quoique très impressionnants sont loin de ceux escomptés par les auteurs de science-fiction.

### **3.2.3. Les robots à quatre pattes**

Encore une fois, c'est au Japon qu'il faut chercher les robots quadrupèdes les plus évolués : le robot de compagnie Aibo (robot chien) de la firme SONY, notamment dans sa seconde génération est assez « vivant ». Il reproduit en effet une large palette de comportements « canins ».

### **3.2.4. Les robots à six ou huit pattes**

Ce sont les robots à pattes les plus répandus à travers le monde. Avec leurs six pattes ils sont statiques mais aussi faciles à programmer et à mettre en œuvre, chaque patte n'ayant besoin que de deux degrés de liberté.

### 3.2.5. Les robots « mille-pattes »

Ces robots sont très utilisés dans l'entretien et la réparation des conduites et autres endroits inaccessibles. La demande professionnelle pour ce type de robots est très importante. [10] [12]

### 3.3. Robots mobiles à chenille

Les chenilles assurent à un mobile une meilleure adhérence au sol. Elles sont employées lorsque le sol est perturbé, essentiellement en environnement extérieur. La commande est de type *differential drive*. On peut citer le robot ANT de la *West Virginia University*. [12] [13]

### 3.4. Robots volants (drones)

Les drones, petits avions autoguidés ou téléguidés d'une dizaine de kilogrammes, ont de nombreuses applications militaires et éventuellement civiles (surveillance d'autoroutes). Des projets visent à réaliser un avion autonome de moins de 20 cm d'envergure, transportant une caméra infrarouge et un transmetteur radio. Il est plus facile de faire voler un avion de 50 cm d'envergure ne pesant que quelques grammes (*show flyer*) ; ces avions *indoor* sont délicats à construire et fragiles à manipuler mais ils ne cassent pas contre les obstacles, à cause de leur faible inertie. Le vol stationnaire est encore plus difficile à maîtriser. Le concours de robots volants organisé chaque année à Atlanta en Georgie montre combien il est difficile de stabiliser en vol un hélicoptère et de commander ses déplacements avec assez de précision. Dans la plupart des cas, l'énergie est fournie par un moteur de modèle réduit à explosion. [12]

### 3.5. Robots navigants

La construction d'un robot bateau ou sous-marin est facilitée par le fait que le poids n'est pas un facteur limitatif à la mobilité. Les torpilles sont bien connues des militaires, mais il y a peu de recherches civiles ont été lancées sur les robots mobiles sous marins appelés AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*). Ces derniers sont notamment utilisés dans le secteur pétrolier (off-shore) et dans l'exploration sous marine. [9] [12]

Comme on l'a vu, La Robotique mobile est le fruit d'un long cheminement et le concept même de robot mobile est très ancien dans l'imaginaire collectif. Le grand nombre d'applications et de champs d'intervention de cette nouvelle branche de la robotique qui tend à se distinguer de plus en plus comme une discipline à part entière fait qu'elle ne possède pas de théorie à proprement parler. Par contre, il existe des notions fondamentales qui régissent la mise en œuvre de la majorité des systèmes apparentés aux robots mobiles.

**Notions fondamentales  
en  
Robotique mobile**

## **IV- Notions fondamentales en robotique mobile**

La robotique mobile, malgré sa relative jeunesse en tant que discipline scientifique, a développé des notions propres aux nombreuses applications qui la composent. Réalisant une véritable symbiose de plusieurs disciplines parfois très éloignées, elle jette les bases de ce qui sera dans un avenir proche une science de première importance dans le développement même de l'espèce humaine.

Un robot mobile autonome se décompose en trois sous-systèmes :

- La structure mécanique
- La charge utile
- La structure de commande

### **1. Structure mécanique**

Elle rassemble les éléments mécaniques et électriques permettant d'assurer la fonction de mobilité. Le mouvement est obtenu en associant la propulsion et l'appui sur le milieu. La propulsion, très liée à l'application du robot, est assurée par des techniques variées (électrique, thermique, pneumatique ou hydraulique) en fonction de sa taille, sa masse et de son lieu d'évolution. Le milieu dans lequel évolue le mobile détermine en général le mode d'appui. On dénombre deux grands types de milieux naturels : le milieu solide et le milieu fluide. La majorité des applications des RMA relève du premier cas. Le second, plus restreint, concerne les robots sous-marins ou robots volants (drones). [14]

## **2. Charge utile**

La mobilité du robot autonome n'est pas une fin en soi. Le déplacement est dicté par une action à réaliser sur l'environnement. La charge utile concerne directement l'application du robot. Il s'agit en général de véhiculer soit un outil, soit un instrument de mesure ou un objet quelconque. [14]

## **3. Structure de commande**

La structure de commande repose sur trois modules fonctionnant de manière indépendante entre eux. Il s'agit des modules :

- De perception de l'environnement
- De communication homme machine
- De commande

### **3.1. Perception de l'environnement**

Les capacités de perception de l'environnement et de travail sont essentielles pour un robot mobile, et cela avec des niveaux de difficulté étroitement liés au degré plus ou moins élevé d'autonomie dont on veut le doter. Les informations obtenues à partir de capteurs extéroceptifs, tels que ceux utilisant les ultrasons, le laser et des caméras vidéo, devront être interprétées à l'aide d'un ordinateur pour satisfaire trois fonctions de complexité croissante.

Les principaux types de capteurs utilisés pour les mesures de distances sans contact, ainsi que pour les relevés 2D et 3D sont les suivant :

#### **3.1.1. Mesure de distance sans contact**

On distingue la proximétrie pour les distances allant du millimètre au décimètre, et la télémétrie au delà.

- La proximité comprend les capteurs à induction (reluctance variable et courants de Foucault, effets Hall et magnéto-résistifs), les capteurs électrostatiques et optiques (capteurs IR)

- La télémétrie s'appuie sur les principes suivants :

- Temps de vol d'une impulsion (IR, HF, US)
- Déphasage d'une onde stationnaire (IR, HF)
- Triangulation (IR + système optique)

### 3.1.2. Imagerie 2D

Une image 2D est une représentation de la mesure d'une grandeur physique dans une direction avec, éventuellement, la projection sur un plan image. Le pointage dans la direction peut être optique (lentille), mécanique (torelle 2 degrés de liberté) ou électronique. Dans l'antenne à balayage électronique, la variation du déphasage entre les éléments émetteurs/récepteurs permet le contrôle de la direction effective de l'antenne.

### 3.1.3. Relevé 3D

Pour une image en profondeur, la grandeur physique à mesurer dans la direction, est la distance à l'obstacle. Une transposition des coordonnées 3D du point visé dans le repère du monde permet d'établir le modèle géométrique de l'environnement qui, au niveau le plus bas, consiste en la représentation de chacun des points par ses coordonnées  $(x, y, z)$ . Les différents procédés qui permettent de la mesurer sont les suivants :

- Télémètre monté sur support
- Caméra(s) :
  - Une caméra en présence de lumière structurée (triangulation)
  - Deux (ou trois) caméras fixes les unes par rapport aux autres : stéréovision active (lumière structurée), passive (lumière ambiante).
  - Une caméra et des connaissances (géométriques ou cinématiques)

- Une caméra : mesure indirecte de distance par détermination de la profondeur de focalisation

- Deux caméras en mouvement dirigé par l'observation : vision active.

[15]

### **3.2. Interaction homme machine (IHM)**

La structure de commande intègre les aspects communication entre le robot et l'ordinateur de tâches. La communication est réalisée à l'aide de multiples supports : écrit, visuel, sonore. Ce module de communication semble prendre de plus en plus d'importance à l'heure actuelle. Cela semble paradoxal avec le principe d'autonomie de notre robot. En fait, l'idée de robot mobile totalement autonome semble perdre du terrain de nos jours. La majorité des développements en cours, industriels ou dans les laboratoires s'orientent vers des fonctions autonomes des robots permettant de faciliter la tâche d'un opérateur. Pour cette raison, la communication avec l'homme est un maillon essentiel de la structure de commande.

#### **3.3.1. Principes généraux de l'interface homme robot**

La finalité de l'interface homme robot est de permettre à l'homme d'utiliser au mieux les possibilités du robot, ceci en fonction des contraintes technologiques ou d'ordre plus opérationnel comme les débits d'informations. L'IHM consiste en l'harmonieuse cohabitation d'une multitude d'interfaces élémentaires :

- Découpage en zones élémentaires : chaque fois que plusieurs domaines fonctionnels peuvent être dégagés, il convient de les séparer lors de la conception des interfaces. Une fois ces fonctions séparées, il faut leur donner des priorités respectives, ce qui permet de trancher en cas d'antagonisme. Cette notion de priorité peut évoluer dans le temps et au cours du fonctionnement du système. Ainsi, dans un système de téléconduite, on peut distinguer deux niveaux d'intervention pour l'homme, même si ces rôles sont souvent joués par la même personne : le pilote et

l'opérateur. Le pilote agit sur les actionneurs équivalents à ceux du véhicule, dans le but d'assurer une mobilité correcte du robot, alors que l'opérateur est chargé de superviser le fonctionnement du système de manière à permettre l'action du pilote dans de bonnes conditions.

- Etude des niveaux informatifs : pour chaque interface élémentaire, il faut définir le besoin de précision des informations proposées. Les informations délivrées à un pilote doivent être le plus synthétiques possibles. Ainsi, en plus des compteurs classiques d'un tableau de bord automobile, celui-ci ne doit disposer que d'une zone de surveillance visuelle. Les informations sont dispensées sous la forme d'icônes pouvant apparaître en cours de fonctionnement. L'opérateur est par contre à même de pouvoir interpréter des informations plus précises, comme des messages en clair, et d'effectuer des actions simples comme l'utilisation de boutons poussoirs. Il arrive que le fonctionnement impose des commutations d'intérêt entre le pilote et l'opérateur. Pour faciliter et rendre naturel ce passage, on utilise des redondances d'informations entre les interfaces élémentaires, en leur faisant jouer le rôle de passerelles.

- Règles de base : ces quelques principes permettent de rendre les interfaces pratiques et facilement assimilables :

- Harmonisation des modes de représentation : la couleur des indicateurs doit être cohérente vis-à-vis d'une convention homogène. Le libellé des messages en clair doit être choisi avec soin afin d'éviter les ambiguïtés. Un même type d'information doit toujours être présenté au même endroit.

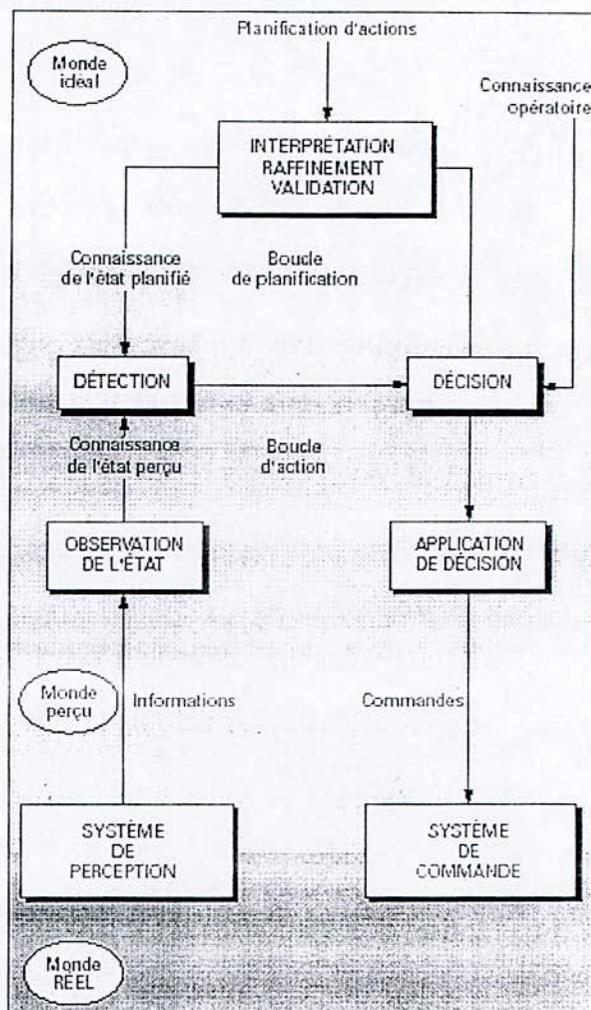
- Facilité de mise en oeuvre: empêcher l'opérateur de commettre des erreurs, en ne lui proposant à tout moment que les actions licites. Prévoir toutes les erreurs possibles et adopter un comportement par défaut en fonction d'impératifs de sécurité.

Malgré toutes les précautions dans la réalisation d'une IHM, il est néanmoins clair que le risque d'erreurs est toutefois présent par l'introduction du critères subjectif corollaire de l'introduction de l'élément humain dans le système. [11]

### 3.3. Commande

Comme le montre la figure ci-dessous, la planification des actions et le contrôle des déplacements se situent dans trois référentiels différents. Du plus abstrait au plus concret, on distingue : monde idéal, monde perçu et monde réel.

Cette décomposition est classique pour les systèmes automatiques de commande. L'élément nouveau, s'agissant des robots mobiles, est que le monde idéal a un champ très étendu, car se référant, éventuellement, non seulement à des représentations de type intégral-différentiel, mais aussi à des représentations et classifications de type sémantique (corridors, pièces, obstacles, repères...). Ainsi, le monde idéal dans lequel évolue le robot sera l'objet d'au moins trois modélisations, correspondant à des niveaux de planification différents. Du niveau le plus abstrait au niveau le plus concret.



Il s'agit de la modélisation sémantique, de la modélisation topologique et de la modélisation géométrique.

Le modèle sémantique est celui qui va permettre la planification au plus haut niveau des missions du robot. On doit pouvoir identifier des classes d'éléments dont les propriétés sont telles qu'elles pourront être instanciées par la mesure et

l'observation effectuées par les étages *ad hoc* du sous système perceptif. Ainsi, une pièce pourra être qualifiée par l'existence de quatre parois dont la trace au sol forme un polygone; ce qui amène à définir aussi une paroi, par exemple, comme étant un plan borné par la détection de quatre lignes formant un polygone, l'une d'entre elles étant située au niveau du sol.

Le modèle topologique sert à décrire les relations d'adjacence entre les différents éléments de l'environnement dans lesquels le robot va évoluer. Il est utilisé pour décomposer en une séquence de sous missions la mission globale du robot.

Par ses capteurs, le robot mobile autonome mesure des distances et des dimensions. Les traitements associés au sous-système perceptif permettent de dégager une géométrie des objets de l'environnement.

Trois modules essentiels composent la partie commande : le planificateur de tâches, le contrôleur d'exécution et le contrôleur d'état du système. Ces modules peuvent être agencés selon trois architectures différentes :

- Une architecture hiérarchisée qui décompose le système en niveaux : niveau bas pour les fonctions de perception et de pilotage, niveau haut pour l'ordonnancement et la planification des tâches.
- Une architecture décentralisée qui décompose le contrôleur d'exécution en modules élémentaires dont chacun représente un comportement dans une situation particulière.
- Une architecture mixte formée d'un noyau décisionnel central et d'un ensemble de moniteurs de surveillance.

La commande du mouvement d'un robot mobile autonome s'effectue de deux manières. Soit le mouvement correspond à respecter une consigne en terme de contraintes sur les informations issues des capteurs. Soit le mouvement correspond à un ensemble de points de passage.

Dans le premier cas, les informations-capteurs traduisent un état de l'environnement qui après traitement définira une consigne en terme d'orientation, de vitesse ou de position. Dans le second cas, qui est le plus fréquemment utilisé à

l'heure actuelle, la planification délivre une séquence de points de passage que le contrôleur d'exécution va tenter de suivre. L'asservissement du système sur ces points de passage nécessite une connaissance de la situation géométrique instantanée du robot. Celle-ci est délivrée sur le module de localisation qui se base sur plusieurs méthodes. [14]

### **3.4. Localisation**

La localisation est la fonction consistant à déterminer, dans un repère de travail donné, certains paramètres de position et/ou d'attitude du robot qui sont nécessaires à l'accomplissement de sa mission.

Cette fonction de localisation peut être nécessaire en statique (mobile à l'arrêt) ou en dynamique (mobile en mouvement).

#### **3.4.1. Les grandes familles de systèmes de localisation**

Deux grandes familles de méthodes peuvent être identifiées :

- Les méthodes dites de localisations à l'estime ou l'on détermine la position courante par intégration de déplacements successifs orientés depuis la position de départ, à partir d'informations fournies par des capteurs généralement proprioceptifs qui peuvent être :

- De nature odométrique (mesure du déplacement relatif par rapport au sol)

- De nature inertielle (mesure des accélérations et/ou des rotations par rapport à un repère galiléen).

- Les méthodes de localisation dites absolues ou l'on détermine la position courante par des mesures effectuées sur des repères (ou balises) de positions connues. Ces balises sont généralement situées dans l'environnement proche du robot (de quelques mètres à quelques kilomètres) sauf dans le cas exceptionnel où celles-ci sont des satellites artificiels en orbite autour de la terre (système GPS).

### 3.4.1.1 Localisation absolue

La localisation commence par la reconnaissance de structures particulières de l'environnement. Ces dernières reçoivent le nom d'amers (pour les repères naturels), les autres de balises actives ou passives selon qu'elles utilisent ou non une source d'énergie. Les coordonnées des balises, ou amers, sont connues dans le repère de référence, on cherche la position et souvent l'orientation d'un objet dans ce même repère à partir de mesures effectuées entre l'objet et les balises. Suivant le type de mesure, on distingue les systèmes directionnels, circulaires et hyperboliques.

- Systèmes directionnels ou goniométriques

Ces systèmes sont basés sur la triangulation c'est à dire sur la mesure de trois angles  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  entre l'objet et trois balises A,B,C. la position de l'objet M est le point d'intersection des trois cercles passant chacun par deux balises et l'objet.

- Systèmes circulaires

La multilatération consiste à calculer la position d'un objet à partir de plusieurs mesures de distance. Avec une distance mesurée entre une balise et l'objet, le lieu des positions de l'objet est un cercle. Avec trois balises A, B, C le point d'intersection des trois cercles donne la position de l'objet M sans ambiguïté.

- Systèmes hyperboliques

La distance est généralement obtenue par la mesure du temps de vol aller-retour d'une onde. Avec la mesure de la différence de distance entre deux balises A, B et l'objet M, le lieu des positions de l'objet est une hyperbole. Une troisième balise permet de créer une deuxième ligne de base et de lever l'ambiguïté de position de M.

En dehors du principe, les systèmes de localisation absolue se distinguent par la nature des ondes utilisées et leur longueur.

On obtient la classification suivante :

- Radio localisation et technologies radar

Les systèmes de radiolocalisation et les systèmes radar sont essentiellement utilisés dans les domaines maritimes et aériens. Le GPS (*Global Positioning System*) s'étend de plus en plus à des applications terrestres. Il existe des systèmes dérivés mais

caractérisés par une portée moindre. On peut prendre pour exemple le Loran C de portée inférieure à 200 NM. Des radars expérimentaux à très faible portée pour des applications de type robotique mobile commencent à émerger dans les laboratoires, comme le radar à modulation de fréquence d'une portée de 500 m pour une précision de l'ordre de 10 cm en distance et  $0.5^\circ$  en angle.

- Technologie Laser et ultrasons

Les systèmes de localisation sont directionnels ou circulaires mais plus généralement mixte. Pour la localisation 2D, on mesure les coordonnées cylindriques (distance, angle d'azimut) et pour la localisation 3D, les coordonnées sphériques (distance, angle d'azimut, angle de site). La distance entre amers ou balises est obtenue soit par mesure directe par le biais de mesures de phase ou de temps de vol, soit par triangulation (faisceau laser + caméra). Pour viser n'importe quel point de l'espace 2D ou 3D, le faisceau est orientable (laser sur tourelle ou à deux axes de rotation ou faisceau laser dévié par miroirs).

#### 3.4.1.2. Localisation à l'estime (relative)

Le système de localisation donne une mesure directe des déplacements relatifs de l'objet mobile indépendamment de son environnement. La situation du mobile (position et/ou cap) est calculée à partir de la situation initiale par intégration d'informations, vitesse ou accélération, mesurée.

Les capteurs de localisation relative de position (odomètre, vélocimètre, centrale inertielle) ou de cap (gyromètre, compas, gyrocompas) induisent, surtout les moins onéreux, des dérives qu'il faut corriger à intervalles réguliers. Cette opération de recalage utilise les données de la localisation absolue.

Par exemple, l'odométrie est la mesure de la distance curviligne parcourue par un mobile à roues ou à chenilles. Cette mesure est utilisée pour estimer sa position dans le repère initial en projetant les incréments de déplacement sur les axes de ce repère.

Le moyen le plus simple pour évaluer le déplacement curviligne est de compter le nombre de tours de roues du mobile, suivant la nature du sol, la charge du mobile,

chaque incrément est entaché d'une erreur qui s'ajoute à la précédente. Le capteur est généralement un codeur incrémental placé sur l'axe moteur ou sur une roue indépendante. Cette dernière solution accroît sensiblement la précision en évitant la variation du diamètre de la roue. Ainsi, une entreprise propose une roue odométrique de 300 mm de diamètre délivrant 43200 impulsions/tour.

La précision de l'odométrie est de quelque %. En prenant beaucoup de précautions, il semble possible d'atteindre la quelque ‰.

Le tableau suivant donne quelques caractéristiques des capteurs utilisés en localisation à l'estime :

Systeme	Paramètres fondamentaux	Spécifications
Gyromètre	Dérivée absolue Stabilité du facteur d'échelle Température Vibration	< 1°/heure < 01 % -40 à +80°C qq. g
Vélocimètre	Etendue de mesure Précision Distance mesurée Température Principe	2.5 à 200 Km/h ± 0.3% oui -40 à 85°C Doppler hyperfréquence
Accéléromètre	Etendue de mesure Biais absolu Stabilité du facteur d'échelle Sensibilité aux vibrations	> 20 g < 1 mg < 0.1 % <10 <sup>-4</sup> g/g <sup>2</sup>

Tableau1 : Caractéristiques des capteurs utilisés en localisation relative

Pour les gyromètres, quatre paramètres interviennent de façon prépondérante sur la qualité de la localisation : la dérive absolue, la dérive à court terme, la stabilité de la sensibilité ou le facteur d'échelle et l'insensibilité aux conditions de

fonctionnement (température, tension d'alimentation...). Pour les accéléromètres, les quatre paramètres sont le biais, la stabilité du biais, la stabilité de la sensibilité ou le facteur d'échelle et l'insensibilité aux conditions de fonctionnement.

Par définition, la navigation inertielle s'appuie quand à elle sur des capteurs mesurant des accélérations. En fait, ces systèmes inertiels sont souvent associés à des odomètres pour améliorer les performances.

Ces deux familles possèdent chacune des avantages et des inconvénients caractéristiques qui les font apparaître plus complémentaires que réellement concurrentes comme nous pouvons le constater dans le tableau suivant :

LOCALISATION A L'ESTIME	LOCALISATION ABSOLUE
Nécessité d'intégrer la trajectoire passée	Localisation indépendante de l'origine
Fonctionnement continu	Fonctionnement non continu (masques...)
Autonomie par rapport à l'environnement	Dépendance de l'environnement (balises)
Précision indépendante de la position	Précision dépendante de la position
Dérive de la précision au cours du temps	Précision indépendante du temps
Systèmes imbrouillables	Systèmes brouillables
Erreurs relativement faciles à modéliser	Erreurs difficiles à modéliser

Tableau 2 : *Avantages comparatifs de la localisation à l'estime et absolue*

La tendance actuelle est de combiner les informations saisies par des capteurs différents pour localiser le mobile. La fusion d'information basée notamment sur le filtrage de Kalman offre des perspectives intéressantes car elle a l'avantage d'intégrer en même temps algorithmes, recalage et localisation relative. Cette approche se justifie par la diversité des capteurs utilisés en robotique mobile en termes de principes de mesure, de performances, de coût et aussi par leur complémentarité.

La fusion d'information peut être abordée suivant trois points de vue : temporel, spatial et symbolique. Les solutions proposées font appel en partie à des techniques éprouvées comme celles utilisées dans le filtrage. [11], [12], [14], [15], [16]

Comme on l'a vu, un robot mobile se doit de posséder un certain nombre de dispositifs réalisant les fonctions de bases que sont la motion, la perception, la localisation, la prise de décision et l'interaction homme machine. C'est en considérant cet ensemble d'éléments tout en gardant à l'esprit la réalisabilité de notre entreprise que nous avons pensé l'architecture de notre système.

# Architecture du robot à réaliser

## V- Architecture du robot mobile à réaliser

Après avoir étudié les notions de base de la robotique mobile, nous avons pensé notre propre système. Le robot mobile que nous nous proposons de réaliser possède une architecture modulaire, adaptative et évolutive dérivée des notions de bases explicitées auparavant.

### 1. Structure mécanique

Le robot mobile que nous nous proposons de réaliser est un robot mobile à roues. Le type de système de locomotion utilisé est le système dit *differential drive* (commande différentielle). Pour cela nous avons réalisé un robot mobile à quatre roues : deux roues motrices se faisant face sur l'axe de mouvement du robot et deux roues dites « folles » multidirectionnelles sur l'axe médian ou axe tangent à la courbe de mouvement. Afin d'optimiser les performances du robot en déplacement, notamment dans les virages ou les coins, nous avons fait en sorte que l'ensemble de la structure mécanique du robot soit holonomique circulaire, soit comprise dans un cercle de 20 cm au sol. De ce fait, le robot peut effectuer des rotations ou des semi rotations sur lui-même ce qui facilite l'extraction en cas de blocage dans un coin ou dans une voie sans issue.

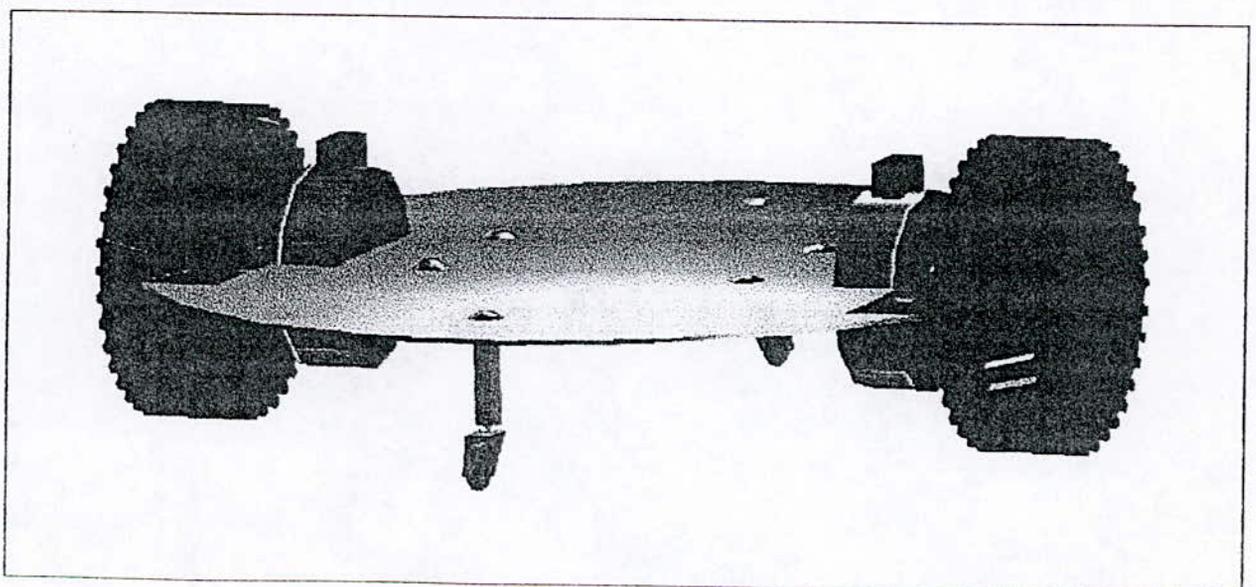


Figure 1. Structure mécanique : vue 3D de face

La partie mécanique du robot est constituée principalement des éléments suivants :

- Le châssis
- Les essieux
- Les roues

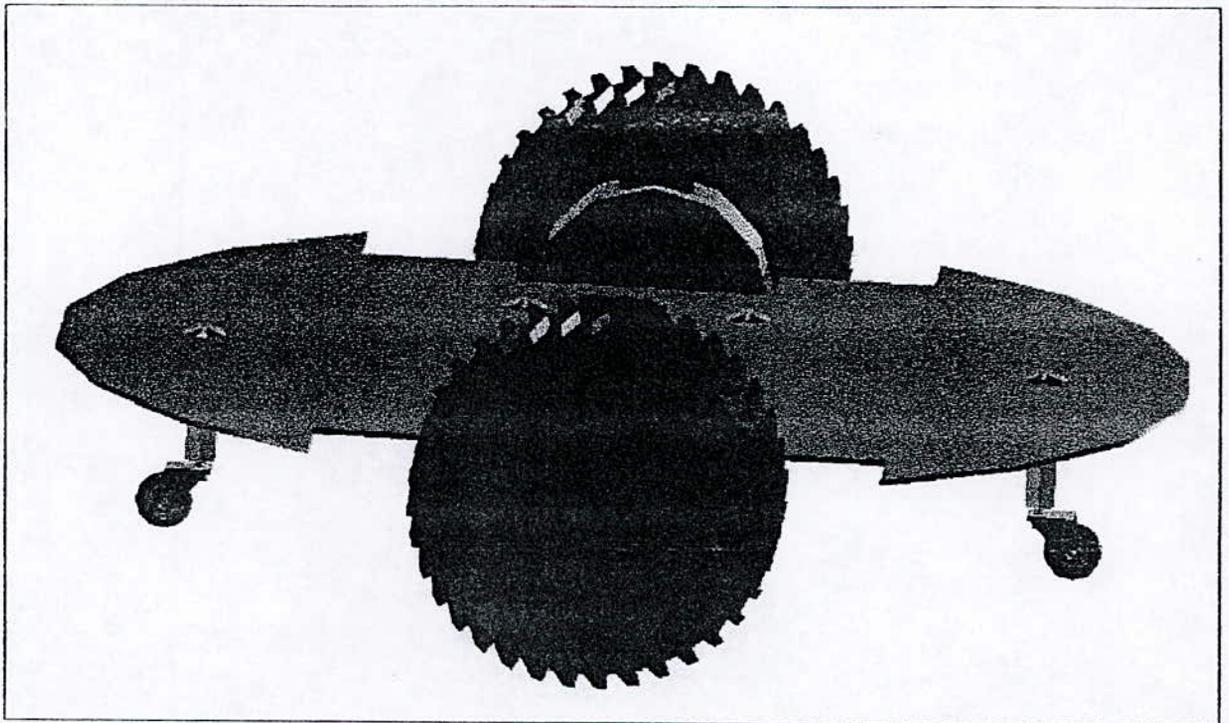


Figure 2. Structure mécanique : vue 3D de profil

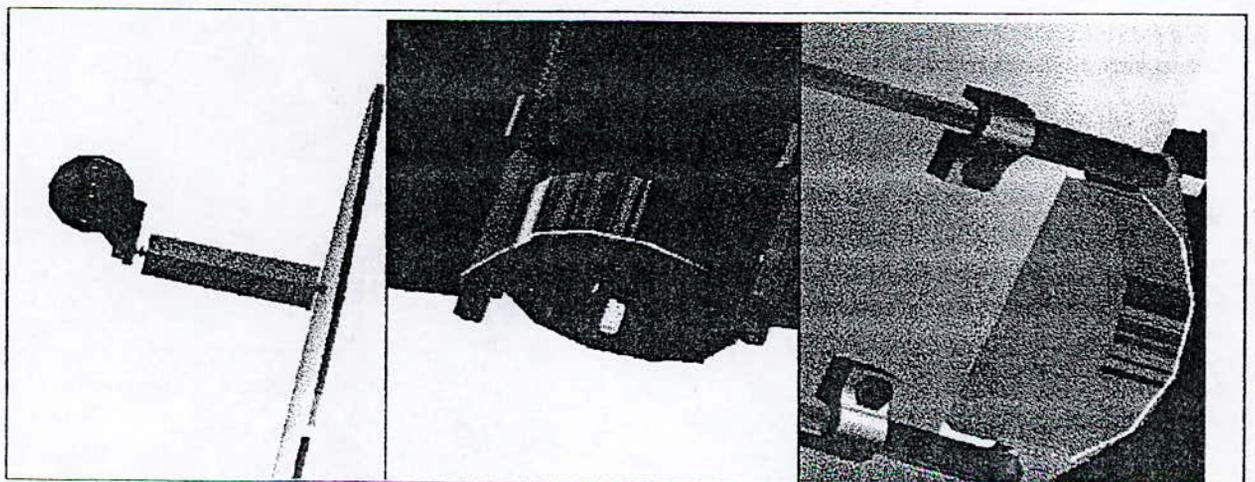


Figure 3. Structure mécanique : détails

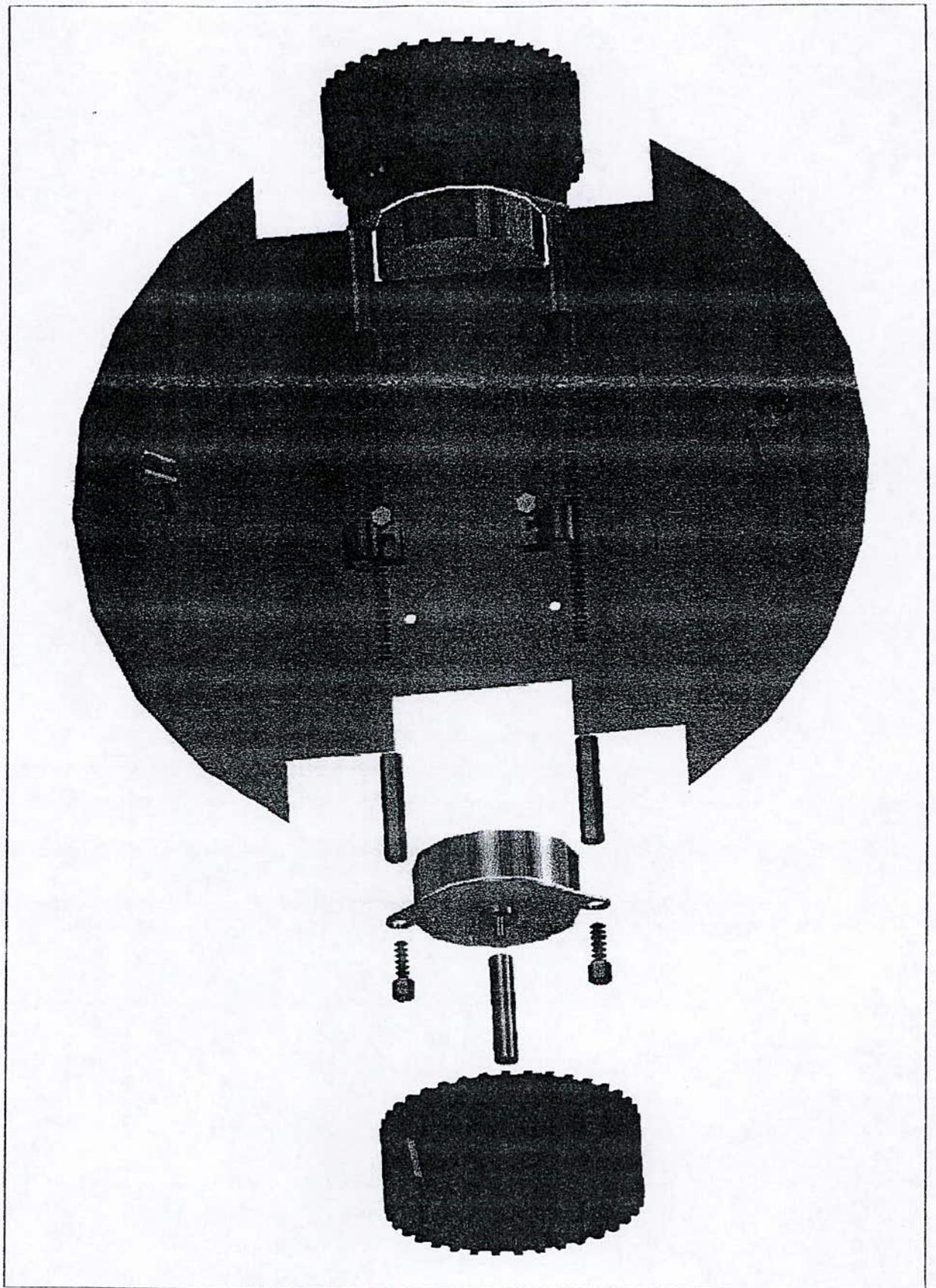


Figure 4. Structure mécanique : décomposition 3D

## 1.1. Le Châssis

Comme indiqué, le châssis devait être compris dans un cercle de 20 centimètres. Nous avons donc dessiné un châssis circulaire d'un diamètre de 20 cm et avons réalisé des encoches parallèles de part et d'autre de la ligne médiane de la structure afin que les moteurs et les roues restent compris dans le diamètre de la structure. En plus de l'optimisation du mouvement, le fait d'imbriquer les roues dans la structure circulaire est aussi motivé par le fait de vouloir protéger le robot d'obstacles éventuellement non détectés par le système de perception. Une roue bloquée pourrait induire des conséquences néfastes sur le comportement du robot et même mettre en péril le système à long terme. En optant pour l'insertion des roues dans le châssis, ces dernières se retrouvent à l'abri d'une grande partie de ces inconvénients.

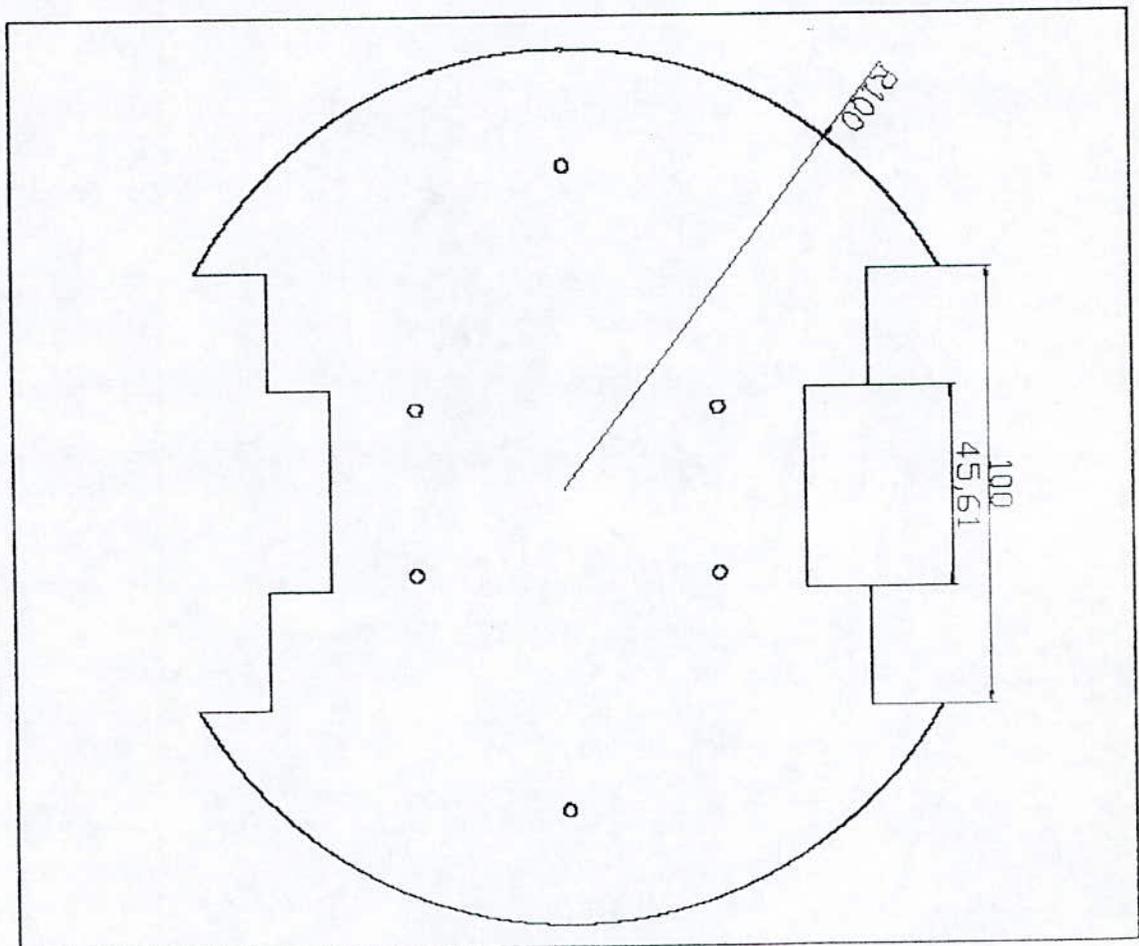


Figure 5. Le châssis : vue de haut

Par ailleurs, et étant conscient que le robot allait évoluer dans un environnement d'intérieur inconnu, il était évident qu'un dispositif d'évitement d'escaliers et autres

fossés était nécessaire. Pour cela, les ailerons du châssis en avant et en arrière des roues ont été prévus pour l'installation de détecteurs de sol. Nous reparlerons de ce dispositif plus en détail dans la partie perception.

## 1.2. Les essieux

Les essieux ont été réalisés afin de fixer les moteurs sur le châssis, ils sont fixés au bas du châssis, perpendiculairement à la ligne médiane. Nous avons optés pour deux essieux pour soutenir les moteurs afin d'augmenter la rigidité de la structure : en effet, même sans le châssis, le système mécanique moteurs - essieux reste rigide et stable. Cette rigidité et cette stabilité sont primordiales afin de s'assurer que les moteurs et par conséquent les roues soient parallèles et que, de ce fait, les mesures de distances parcourues soient précises. La fixation du système moteurs - essieux sur le châssis, assure une rigidité et un parallélisme supplémentaire à la structure mécanique du robot.

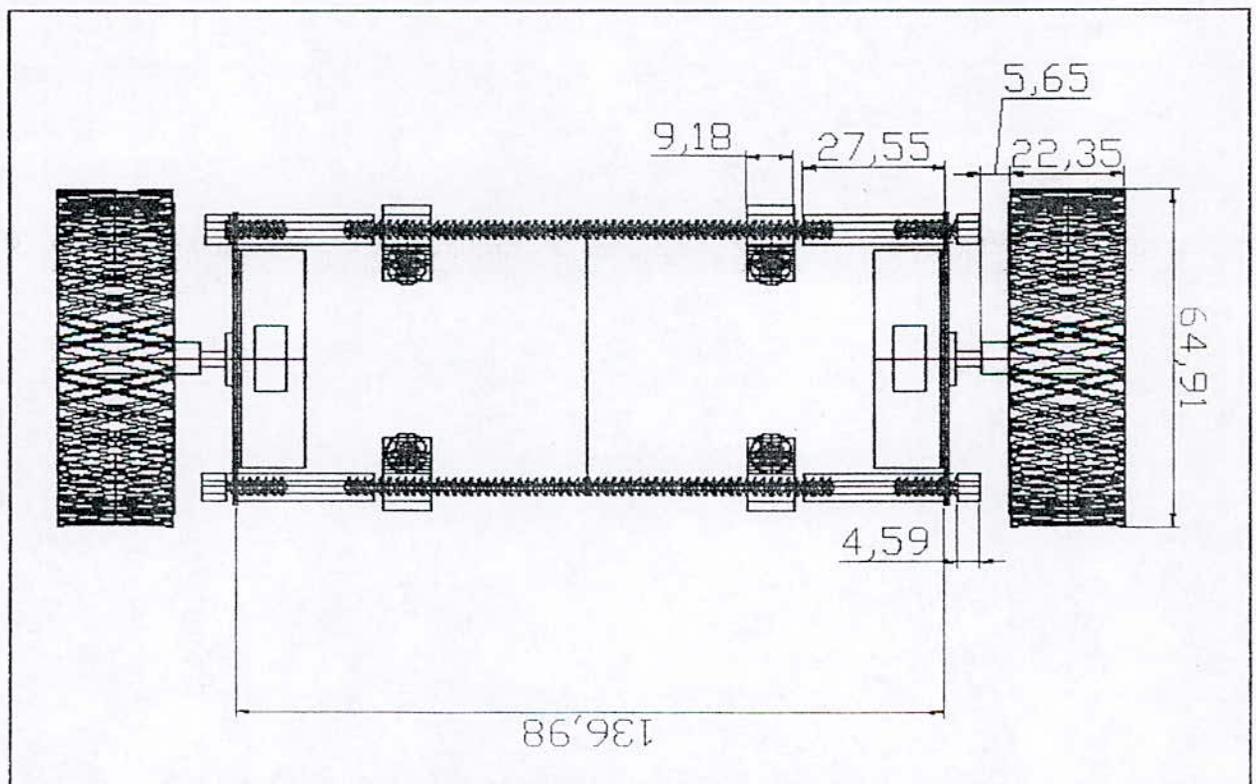


Figure 6. Système essieux moteurs roues avec fixations

### 1.3. Les roues

Les roues motrices sont directement placées sur les arbres des moteurs, l'utilisation d'un réducteur étant superficielle et inutile vu le type de moteurs utilisés. De ce fait, il apparaît que le souci de parallélisme présidant lors de la mise en œuvre du système châssis - moteur, et maintenant châssis - moteur - roues était vraiment de rigueur. En effet, avoir des moteurs bien parallèles induit directement que les roues soient elles aussi parallèles. Les roues folles ont été placées à l'avant et à l'arrière du robot. Dans un souci d'équilibrage, elles sont aussi symétriques par rapport à la droite portant le système essieux - moteurs - roues. Les roues folles n'ont aucun rôle directeur ni aucune influence sur le mouvement du robot. Elles ont pour seule fonction d'apporter deux autres points de contacts nécessaires à l'équilibre de la structure mécanique choisie. Nous aurions pu nous contenter d'une seule et unique roue folle, mais il nous aurait fallu renoncer à la nature holonomique du robot et à une bonne partie de ses performances en matière de mouvements rotatoire et curviligne. Nous aurions alors opté pour une structure en tricycle qui pour nous est beaucoup moins optimale et moins riche en matière de possibilités de mouvement que la structure holonomique circulaire adoptée.

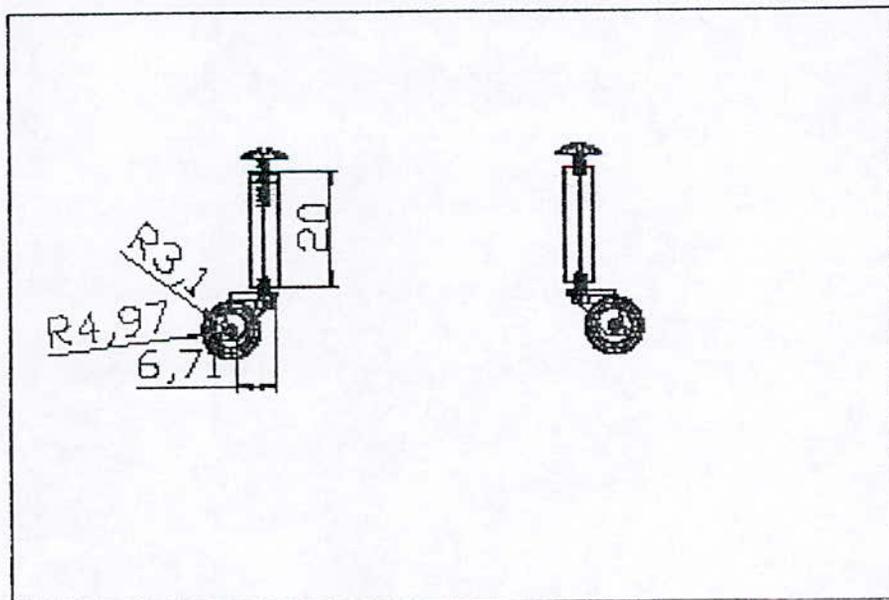


Figure 7. Roues folles : vue de profil

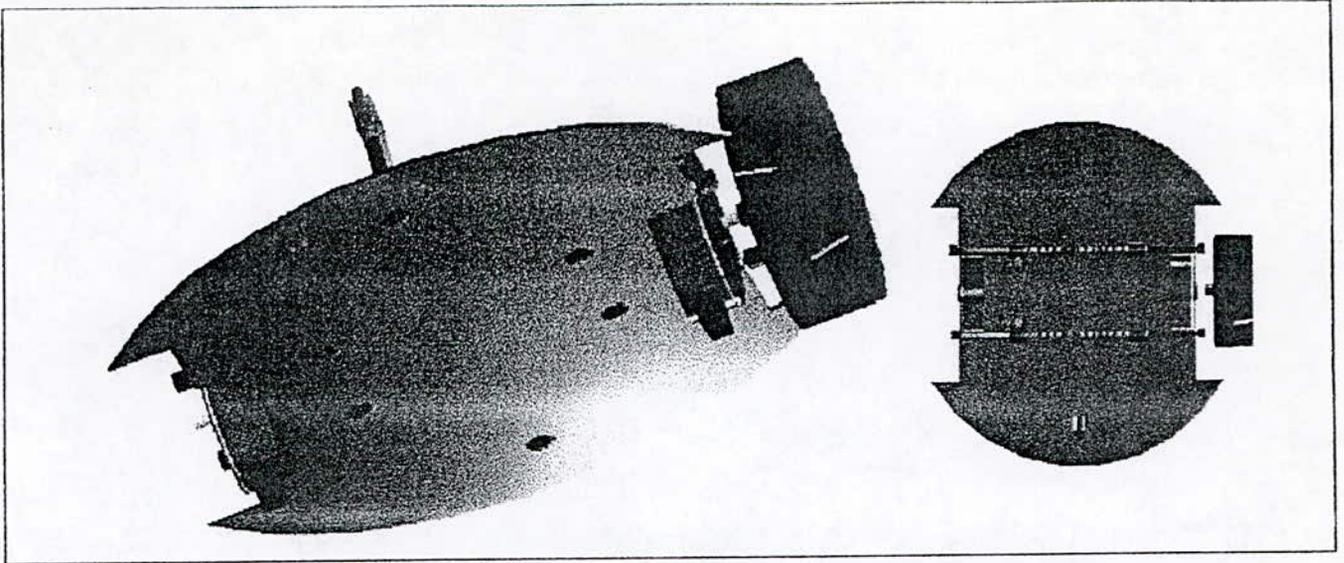


Figure 8. Structure mécanique : version finale vues 3D et 2D

## 2. Moteurs

### 2.1. Choix des moteurs

Afin de mettre en mouvement notre robot, il était évident qu'il fallait le doter d'actionneurs électriques et plus précisément de moteurs électriques. Deux types de moteurs s'offraient à nous : les moteurs à courant continu et les moteurs pas à pas.

#### 2.1.1. Choix 1 : Moteur à courant continu

Notre première intention était l'utilisation de moteurs à courant permanent pour mouvoir notre robot. Après avoir réalisé une étude détaillée sur ce type de moteurs, leurs capacités ainsi que les différentes stratégies de commande, le choix de ce type de moteurs s'avérait très séduisant. Néanmoins, les moteurs à courant continu nécessitent l'implémentation de capteurs de position ou de vitesse ou les deux dans certain cas ou la précision exigée est importante. Nous avons donc décidé d'utiliser des moteurs à courant continu commandés à vitesse constante avec capteurs de position. Le type de capteur choisi était l'odomètre. Après avoir vainement tenté de nous procurer des odomètres sur le marché et devant la difficulté d'en implanter un

de notre fabrication, nous avons décidé d'abandonner l'idée d'utiliser des moteurs à courant continu.

### **2.1.2. Choix 2 : Moteur pas à pas**

Le principal inconvénient des moteurs pas à pas est la relative difficulté de la commande par rapport aux moteurs à courant continu. Mais, en passant outre la commande, le moteur pas à pas offre des avantages non négligeables parmi lesquels la grande précision en position et en vitesse. Etant donné que le système de localisation que nous allons utiliser sur le robot était le système dit dead-reckon qui se base sur des sommations successives des positions angulaires du robot (voir partie localisation), la précision offerte par les moteurs pas à pas nous a finalement décidé à utiliser ce type d'actionneurs.

## **2.2. Les moteurs pas à pas**

Le principe du moteur pas à pas est connu de longue date, mais son développement a commencé dans les années 1960 grâce à l'avènement de l'électronique numérique. De nos jours, les moteurs pas à pas sont quasiment indispensables à la réalisation des systèmes informatiques. Ils sont utilisés dans les disques durs, les lecteurs de disquettes, les scanners et les imprimantes. Dans le domaine de la robotique, ils permettent d'obtenir une précision extraordinaire grâce notamment à leur conception mécanique et électrique.

### **2.2.1. Définition**

Un moteur pas à pas est une machine tournante dont le rotor se déplace d'un angle élémentaire appelé pas, chaque fois que son circuit de commande effectue une commutation de courant dans un ou plusieurs de ses enroulements. Il s'agit donc avant tout d'un actionneur de positionnement. Toutefois, une succession rapprochée de commutation permet d'obtenir une rotation continue.

Compte tenu de son principe, la commande de la position ou de la vitesse d'un moteur pas à pas peut se faire sans asservissement : il n'est pas nécessaire de contrôler les résultats qui correspondent exactement aux ordres donnés à condition de respecter certaines limites de fonctionnement. Ce mouvement par pas est appelé incrémental. Pour avoir une bonne résolution dans le positionnement, la machine doit avoir un pas assez faible. [17]

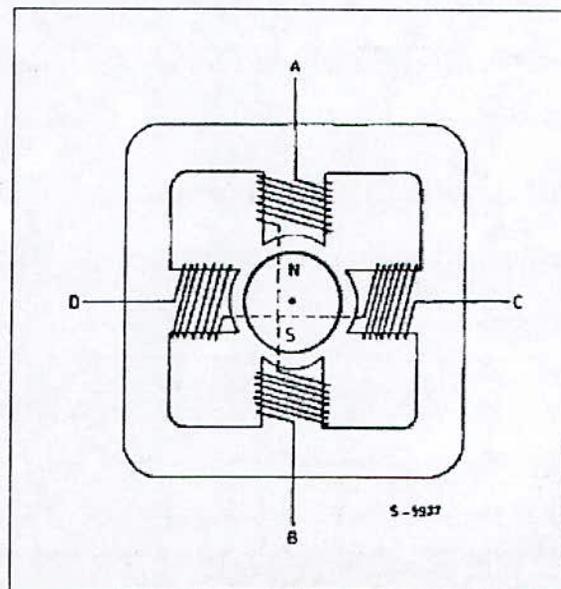


Figure 9. Moteurs pas à pas : schéma simplifié

En dehors de ces caractéristiques générales, on ne peut pas parler du moteur pas à pas, mais plutôt des moteurs pas à pas car il existe trois types de moteurs pas à pas : les moteurs à aimants, les moteurs à réluctance variable et les moteurs dits « hybrides ».

Malgré les différences existant entre les moteurs, le résultat recherché est l'avance d'un seul pas, c'est à dire la rotation de leur axe suivant un angle déterminé à chaque impulsion que l'une ou l'autre de leurs bobines recevra. [18]

### 2.2.2. Moteur à aimant

Le rotor porte des aimants permanents. Le stator comporte des enroulements. En l'absence de courant dans les enroulements, le rotor se place dans une position

d'équilibre stable, sa paire de pôles étant en face d'une paire de plots du stator. Ce phénomène est dû à la structure à pôles saillants de la machine. Pour écarter le rotor de sa position de repos, il faut exercer un couple appelé couple de détente. Il n'existe pas dans les moteurs à « pôles lisses », mais cette solution n'est guère rencontrée en pratique. On peut alimenter les quatre enroulements de diverses manières. La plus simple est d'imposer un courant, toujours de même sens, dans une seule bobine à la fois. On a ainsi un moteur à quatre phases à alimentation unidirectionnelle. Considérons par exemple que le sens de bobinage et l'alimentation sont tels qu'un pôle sud soit créé par une phase alimentée. Celui-ci attire alors le pôle Nord du rotor. Les positions d'équilibre stable correspondent donc à l'axe magnétique du rotor en face de l'axe des bobines, pôle Nord associé au pôle sud. Il y a ainsi quatre positions d'équilibre.

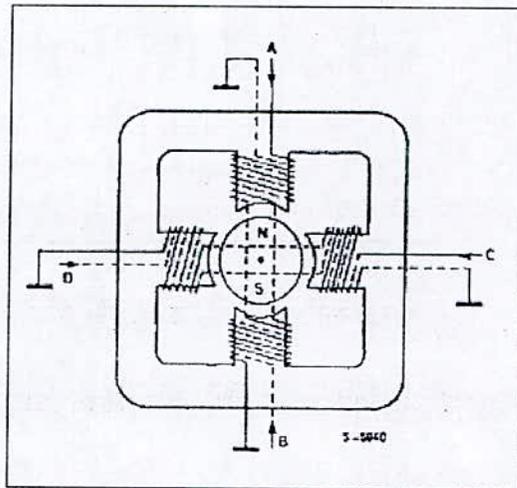


Figure 10. Moteur à aimant permanent unipolaire

On arrive ainsi à un pas de  $90^\circ$ , soit quatre pas par tour. Le sens de rotation dépend de l'ordre dans lequel on effectue les commutations : de 1 à 4 pour le sens trigonométrique et de 4 à 1 pour le sens horaire.

Dans ce mode de fonctionnement, la machine est mal utilisée car seul un quart du cuivre est parcouru par un courant à un instant donné. Par contre, l'alimentation est simple puisqu'on n'a pas besoin d'inverser le courant dans les bobines.

Pour mieux utiliser le cuivre, on préfère employer deux bobines par phase.

Pour obtenir un tour complet, il faut maintenant pouvoir inverser le courant dans les enroulements : l'alimentation doit être bidirectionnelle. Il faut toujours quatre commutations pour obtenir une rotation d'un tour complet. Le pas est toujours de  $90^\circ$ . Le cuivre est mieux utilisé puisque la force magnétomotrice a doublé, mais l'alimentation est plus complexe puisqu'elle doit permettre l'inversion des polarités.

Il est possible d'améliorer encore l'utilisation du cuivre en alimentant deux phases à la fois. Les positions d'équilibre se situent cette fois suivant les bissectrices des angles formés par les axes des deux phases. Le nombre de pas par tour est inchangé, mais le couple est plus important. [17]

### 2.2.3. Moteur à réluctance variable

#### 2.2.3.1. Moteurs à circuit magnétique simple

Le principe est totalement différent. Le rotor ne comporte aucun aimant, mais est simplement formé d'une structure dentée. Le stator est toujours muni de plots bobinés, mais il faut un minimum de trois phases. Le positionnement se fait suivant le principe de la réluctance minimale. Deux dents du rotor se placent dans l'axe des deux bobines formant la phase alimentée du stator pour minimiser la réluctance du trajet offert aux lignes de champ.

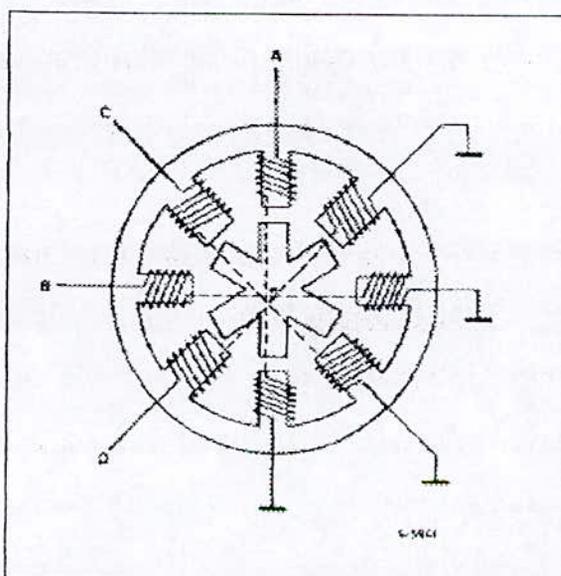


Figure 11. Moteur pas à pas à réluctance variable

A chaque commutation, ce sont les dents les plus proches des plots alimentés qui se placent en face d'eux. Le sens du courant n'ayant aucune influence sur le phénomène, on n'emploie que des alimentations unidirectionnelles. Si les dents du rotor sont séparées par un angle  $\alpha_r$  et les plots du stator d'un angle  $\alpha_s$  le pas du moteur est :

$$\alpha_p = | \alpha_s - \alpha_r |$$

### 2.2.3.2. Moteur à circuits magnétiques multiples [17]

Dans ce cas, le stator de la machine possède  $m$  circuits magnétiques indépendants affectés chacun à l'une des  $m$  phases. Ces différents éléments sont décalés d'un angle égal à :

$$\alpha_p = \alpha_s / m$$

Où  $\alpha_s$  est l'angle entre deux plots statoriques. Le rotor place l'une de ses dents en face du plot alimenté. A chaque commutation, il tourne d'un angle  $\alpha_p$  qui est donc le pas du moteur. On peut écrire le nombre de pas par tour :

$$N_p = m Z_s$$

$Z_s$  : nombre de plots du stator.

### 2.2.4. Moteur hybride [17]

On cherche à combiner les avantages des deux types précédents : la bonne résolution due au grand nombre de dents du rotor et le couple élevé dû à la présence d'aimants. Le stator est toujours une structure à pôles saillants sur lesquels sont placés les enroulements.

On considère par exemple une machine pour laquelle on a bobiné deux phases sur huit plots. L'alimentation est bidirectionnelle. Le rotor est constitué de deux roues dentées décalées entre elles d'un demi pas dentaire, reliées par un aimant axial. Ainsi, les dents de l'un des deux demi rotors se comportent comme des pôles Nord vis à vis du stator tandis que les dents de l'autre demi rotor agissent comme des pôles sud. Si un plot du stator possède une dent du rotor dans son axe, les plots

voisins voient une dent décalée d'un quart de pas dentaire. La séquence des commutations est inchangée par rapport au moteur pas à pas à aimant : à chaque fois, le rotor se déplace d'un quart de pas dentaire qui est ainsi le pas du moteur. Pour notre exemple, le pas vaut  $9^\circ$ , ce qui correspond à 40 pas par tour. De manière générale, si le nombre de phases est  $m$  et le nombre de dents d'un demi rotor  $Z_r$ , le nombre de pas par tour est :

$$N_p = 2m Z_r$$

### 2.2.5. Moteurs utilisés

Les moteurs utilisés sont des moteurs pas à pas PM42S-096 de NMB Technologies Corporation (Annexe 2). Leurs principales caractéristiques sont exposées dans le tableau ci dessus :

Motor ref	PM42S-096	
No. Of Steps per Rotation	96 ( $3.75^\circ$ / step)	
Drive Method	2 – 2 phase	
Drive Circuit	UNIPOLAR CONST. VOLT.	BIPOLAR CHOPPER
Drive Voltage	24 [V]	24 [V]
Current / PHASE		500 [mA]
Coil Resistance / PHASE	90 [ $\Omega$ ]	10 [ $\Omega$ ]
Drive IC	SMDT - 002	UDN2916B-V
Magnet Material	Nd-Fe-B bonded magnet	

Tableau 3 : Principales caractéristiques des moteurs pas à pas utilisés

Ces moteurs offrent en fonctionnement optimal (vitesse de 250 PPS) un couple atteignant 0.045 N.m. [19]

## **2.3. Commande des moteurs pas à pas**

Les moteurs pas à pas peuvent être commandés de différentes manières. Nous allons présenter tout d'abord les principaux types de commandes avant de présenter l'option choisie afin de commander les moteurs du robot.

### **2.3.1. Alimentation en tension constante**

L'alimentation en tension constante peut être utilisée pour des moteurs unipolaires ou bipolaires. Le terme anglais est L/R drive car cette méthode est basée sur la relation entre l'inductance  $L$  et la résistance  $R$  des bobines. Cette technique est utilisée pour les faibles vitesses car la constante de temps électrique de la phase retarde l'établissement du courant. Cependant, il est possible de diminuer cette constante de temps en mettant une résistance en série, mais la puissance dissipée augmente. Cela nécessite une alimentation en volts plus grande, l'échauffement est alors plus important. Pour faire face à ce problème, une autre solution est d'avoir deux sources d'alimentation de niveaux différents. Une haute tension pour l'inversion du sens du courant, puis, une plus faible. La puissance dissipée diminue et le rendement augmente mais il faut deux alimentations.

### **2.3.2. Alimentation en courant constant**

La commande en courant constant est une méthode efficace en terme de consommation d'énergie pour contrôler un moteur pas à pas. Elle permet d'obtenir un plus fort couple qu'une commande à alimentation en tension constante. Le terme anglais est Chopper drive. Ce type de commande est particulièrement utilisé pour les moteurs à enroulements bipolaires. Son principe est celui du hachage, il permet un contrôle logique rapide du courant circulant dans les bobines. [20]

### 2.3.3. Type de commande choisie

La puissance disponible étant limitée à bord du robot, il était préférable d'utiliser une alimentation en courant constant qui permet d'avoir un couple plus important avec une même valeur d'alimentation. De plus, la puissance dissipée est moins importante qu'en utilisant l'alimentation en tension constante.

L'actionneur choisi est comme nous l'avons vu précédemment un moteur pas à pas bipolaire. Le fabricant préconise d'utiliser un chopper drive à base du circuit UDN2916. Ce dernier n'étant pas disponible sur le marché national et vu le coût élevé des chopper drive vendus en Europe, nous avons préféré recourir à un chopper drive de notre fabrication. Le circuit de puissance a été réalisé à base de la célèbre paire de circuits L297/L298 de SGS-Thompson (Annexes 3 et 4). Ces deux circuits ont le monopole des chopper drive à travers le monde. Leur disponibilité sur le marché algérien et leur grande fiabilité ont déterminé notre choix.

### 2.4. Cartes de puissance

Chaque moteur est commandé par son propre circuit. Nous avons donc réalisé deux cartes de puissances à base des circuits L297 et L298 de SGS – Thompson.

Ces circuits intégrés sont les composants les plus utilisés lorsqu'il s'agit de commander des moteurs pas à pas. Ils peuvent en outre commander des moteurs unipolaires ou bipolaires et peuvent délivrer un courant allant de quelques dizaines de milliampères à plusieurs ampères. Les circuits L297 et L298 ont été conçus afin d'être utilisés conjointement mais ils peuvent également être utilisés séparément dans d'autres montages afin de commander des moteurs pas à pas ou même des moteurs à courant continu. [18]

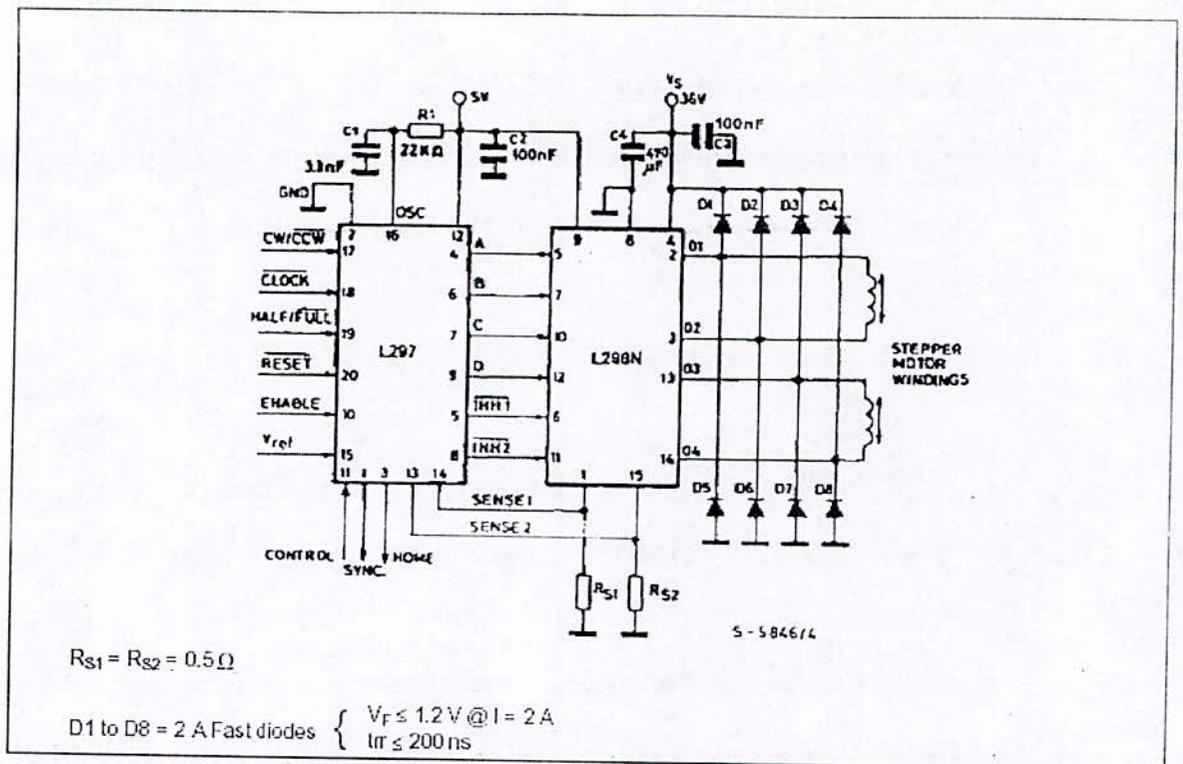


Figure 12. Cartes de puissance : association des circuits L297 et L298

Le chopper drive que nous avons réalisé s'inspire en grande partie de ce montage. Nous allons en présenter le fonctionnement :

#### 2.4.1. Le circuit intégré L297 [17], [18], [20], [21]

Le L297 est un contrôleur de moteurs pas à pas. Il a été conçu afin d'être associé au circuit L298. Mais, il peut également être utilisé avec le L293E.

Les principales fonctionnalités offertes par le circuit intégré L297 sont :

- Commande en mode monophasé ou biphasé
- Mode demi pas ou pas entier
- Sens de rotation horaire ou anti-horaire
- Courant de charge programmable
- Peu de composants externes nécessaires
- Entrée de remise à zéro
- Sortie de passage à la position initiale
- Entrée de validation du circuit
- Doubleur d'impulsions de pas (sur L297A uniquement)

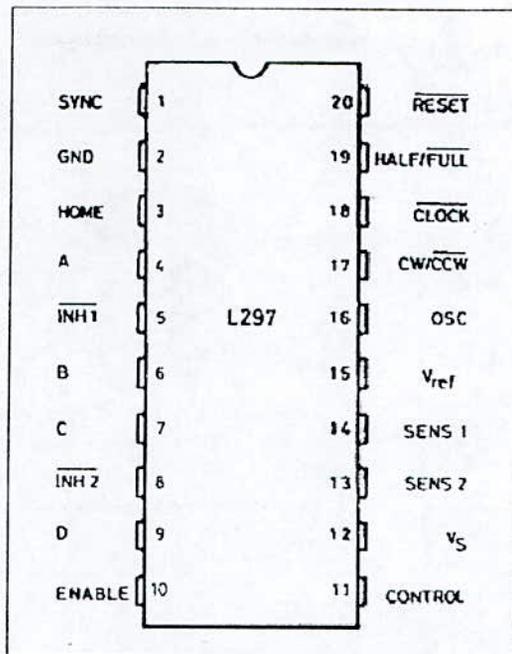


Figure 13. Circuit L297 : brochage et boîtier externe

Le 297 est conçu afin de fonctionner avec un driver en double pont, un réseau de quatre Darlington de puissance ou des composants discrets. Il lui suffit de recevoir les signaux de CLOCK (avance des pas), de direction et de mode afin de piloter le moteur pas à pas. Il génère ensuite la séquence de commande de l'étage de puissance. Le L297 possède deux principaux étages : un translateur qui génère les différentes séquences de commande et un double hacheur PWM qui régule le courant traversant les bobinages du moteur. Le translateur génère trois séquences qui sont déterminées par le niveau logique appliqué sur l'entrée HALF/FULL.

Le circuit intégré L297 permet deux types de commandes par pas entiers : l'une dite normale où une seule phase est alimentée à la fois et l'autre dite hybride où les deux phases sont alimentées en même temps. Le choix est là compromis entre le couple désiré et la puissance d'alimentation. En effet, la méthode hybride fournit plus de couple mais consomme plus d'énergie. Nous allons dans u premier temps utiliser la commande par pas entiers dite normale tout en gardant en mémoire la possibilité d'augmenter le couple en utilisant la méthode hybride.

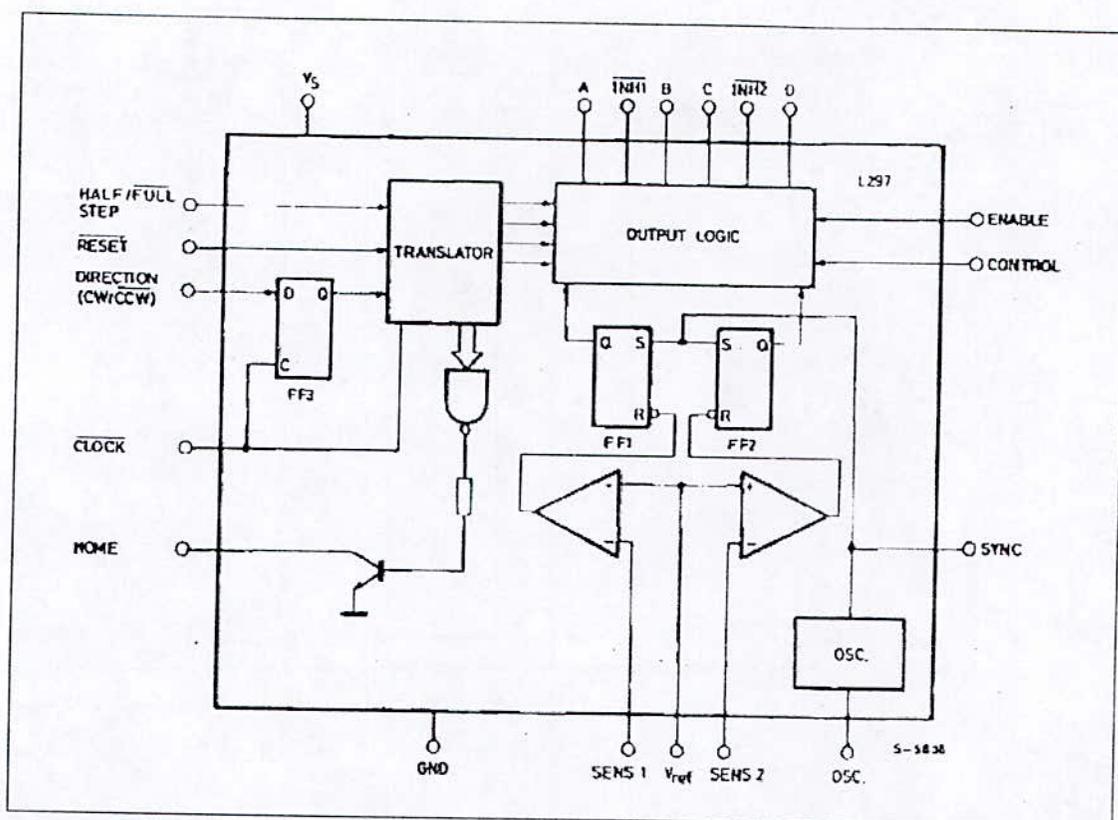


Figure 14. Circuit L297 : structure interne

Nous avons donc quatre pas par tour. A et B commandent la même bobine (enroulement bipolaire). A correspond à un sens de parcours du courant et B au sens inverse dans la même phase. Même chose pour C et D. Ce mode d'alimentation est sélectionné par un niveau bas sur l'entrée HALF/FULL, il faut que le changement se fasse quand le compteur est sur un nombre pair. L'entrée CW/CCW indique la direction. Une horloge avance le séquenceur au pas suivant. Le séquenceur possède quatre sorties logiques A, B, C, D qui correspondent aux différentes phases d'alimentation des enroulements. Le L297 possède également deux sorties INH1 et INH2 qui sont fonctions de la commande choisie. Ces deux sorties servent à accélérer la chute du courant lorsqu'une bobine est désactivée. Le séquenceur est constitué d'un compteur 3 bits permettant d'avoir une séquence de huit phases par cycle. RESET est une entrée de remise à zéro qui replace le séquenceur dans sa position d'origine. La sortie HOME permet de signaler quand le moteur passe à position d'origine évitant de ce fait l'utilisation d'une roue codeuse ou de tout autre capteur de position. L'entrée ENABLE sert à mettre toutes les sorties du séquenceur à zéro et

de ce fait déconnecter le moteur. Une entrée nommée CONTROL/ détermine le moment où le hacheur devra agir sur les sorties a, B, C et D ou les entrées INH1 et INH2.

Un oscillateur interne commande les hacheurs. Lorsque le courant traversant l'un des bobinages du moteur atteint la tension programmée (valeur fixée par les résistances connectées aux entrées SENS1 et SENS2), le comparateur correspondant interrompt l'alimentation du moteur jusqu'à la prochaine impulsion de l'oscillateur.

Une tension de référence fixant la valeur du courant est dispensée aux deux comparateurs par un diviseur de tension connecté à la broche 15 (Vref) du L297. Ce diviseur de tension peut être constitué d'une résistance fixe et d'une résistance ajustable afin de pouvoir régler la valeur du courant.

Le tableau ci dessous donne une description détaillée de chacune des broches du L297 :

Broche	Nom	Fonction
1	SYNC	Synchronisation de plusieurs L297 en parallèles
2	GND	Connexion de la masse au circuit
3	HOME	Sortie indiquant que le L297 est revenu à son état initial
4	A	Sortie du signal de la phase A du moteur
5	INH1	Inhibition des sorties A et B
6	B	Sortie du signal de la phase B du moteur
7	C	Sortie du signal de la phase C du moteur
8	INH2	Inhibition des sorties C et D
9	D	Sortie du signal de la phase D du moteur
10	ENABLE	Entrée de validation du circuit
11	CONTROL	Contrôle du fonctionnement du hacheur
12	Vs	Alimentation + 5 V du circuit
13	SENS2	Entrée du palpeur de courant des phases C et D
14	SENS1	Entrée du palpeur de courant des phases A et B
15	Vref	Tension de référence du hacheur
16	OSC	Fréquence du fonctionnement du hacheur
17	CW/CCW	Sens de rotation du moteur
18	CLOCK	Horloge permettant l'avance des pas du moteur
19	HALF/FULL	Modes pas entiers ou demi pas
20	RESET	Remise à zéro du circuit

Tableau 4 : Fonctions des broches du circuit L297

### 2.4.2. Le circuit intégré L298 [17], [18], [20], [22]

Le circuit intégré L298 est complémentaire au L297 vu ci dessus. Il est utilisé comme étage de puissance.

En effet, le L298 est un double pont de commande de puissance possédant des sorties de mesure du courant consommé par le moteur ainsi que des entrées de validation. Il nécessite que très peu de composants externes (lorsqu'il est utilisé avec un pont de diodes intégré).

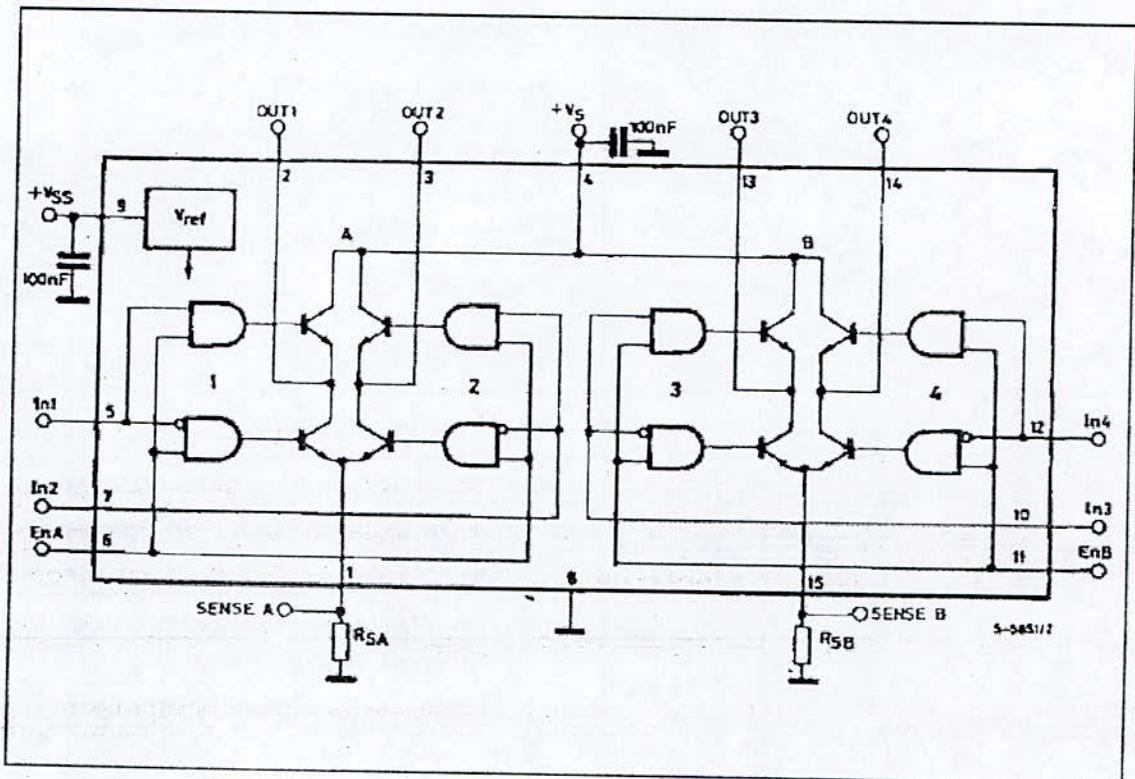


Figure 15. Circuit L298 : structure interne

Les entrées sont donc : In1, In2, EnA, In3, In4, EnB. Elles correspondent aux valeurs de A, B, Inh1, C, D, Inh2.

Le L298 est composé de deux montages push-pull qui servent de driver de puissance. Il comporte 20 pins, les plus importantes étant les sorties du montage A alimentant l'une des deux bobines Out1 et Out2. Input1 et Input2 : entrées du pont A. Enable A et Enable B : un niveau bas sur l'une de ces deux entrées met hors service le pont A ou B. Input3 et Input4, entrées du pont B et

enfin Output3 et Output4 : sorties du montage B pour alimenter une bobine du moteur.

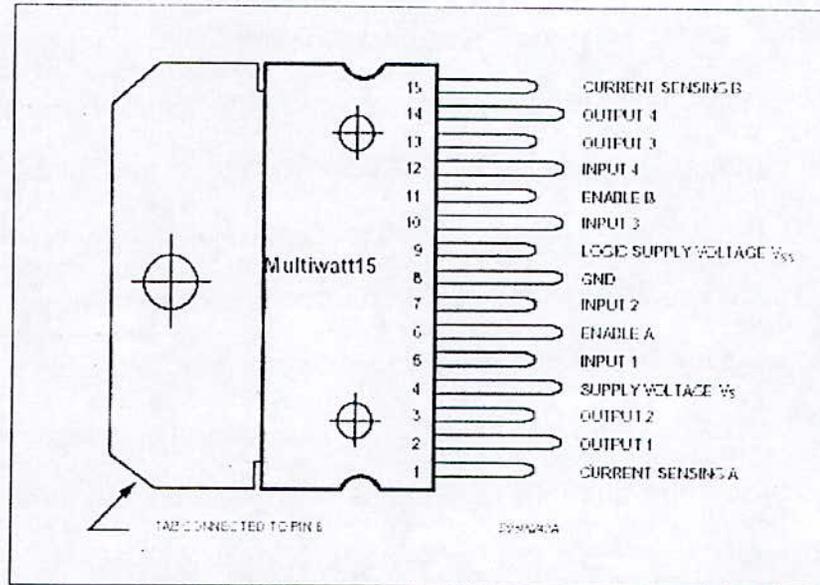


Figure 16. Circuit L297 : brochage et boîtier externe

Les fonctions attribuées à chacune des broches sont décrites dans le tableau ci dessous :

Broche	Nom	Fonction
1 et 15	SENSE A et B	Contrôle du courant circulant dans les bobinages du moteur
2 et 3	OUT1 et 2	Sorties du pont A
4	Vs	Entrée de la tension d'alimentation
5 et 7	INPUT1 et 2	Entrées compatibles TTL du pont A
6 et 11	ENABLE A et B	Entrées permettant de valider les ponts A et B
8	GND	Masse du circuit
9	Vss	Tension d'alimentation de la partie logique
10 et 12	INPUT 3 et 4	Entrées compatibles TTL du pont B
13 et 14	OUT3 et 4	Sorties du pont B

Tableau 5 : Fonctions des broches du circuit L298

### 3. Commande

La commande du robot est sans conteste la partie la plus complexe à étudier. En effet il s'agit de gérer, contrôler, commander et synchroniser toutes les autres parties du robot. La solution commande que l'on devait implémenter se devait de pouvoir assimiler des informations en provenance de capteurs, les analyser et les transformer en données exploitables, prendre des décisions en fonction de ces données et traduire ces décisions en signaux de commandes compréhensibles par les deux cartes de puissances. Plusieurs possibilités correspondaient à ce cahier de charges : DSP, FPGA, microcontrôleurs. Pour des raisons de coût, de temps et de réalisabilité la solution pour laquelle nous avons penché a été l'option microcontrôleur.

#### 3.1. Le microcontrôleur 68HC11

Le MC68HC11 est un microcontrôleur 8 bits produit par la firme Motorola. Selon un usage désormais courant, il n'existe pas un seul 68HC11 mais plusieurs dizaines de circuits de types différents. Si tous ces circuits font évidemment appel à la même architecture interne, ils divergent néanmoins par les différentes fonctions supplémentaires qu'ils contiennent ou par la taille et la nature des blocs mémoires dont ils sont pourvus.

L'ensemble des microcontrôleurs de la famille 68HC11 dispose d'une architecture interne dont l'unité centrale est héritée de celle du fameux microprocesseur 6801. Autour de cette dernière, on retrouve tout d'abord les différents blocs mémoire dont la taille et la présence diffèrent d'un circuit à un autre. On distingue tout d'abord la RAM ou mémoire vive, de 256 octets au moins et dont la présence est commune à tous les 68HC11. La ROM ou mémoire morte peut être présente ou absente. Elle peut être du type ROM programmable par masque (à la fabrication du circuit) ou de type EPROM (programmable électriquement). Dans ce cas, elle peut être non effaçable (OTEPROM) ou, programmable et effaçable électriquement (EEPROM) ou aux ultraviolets (UVPROM).

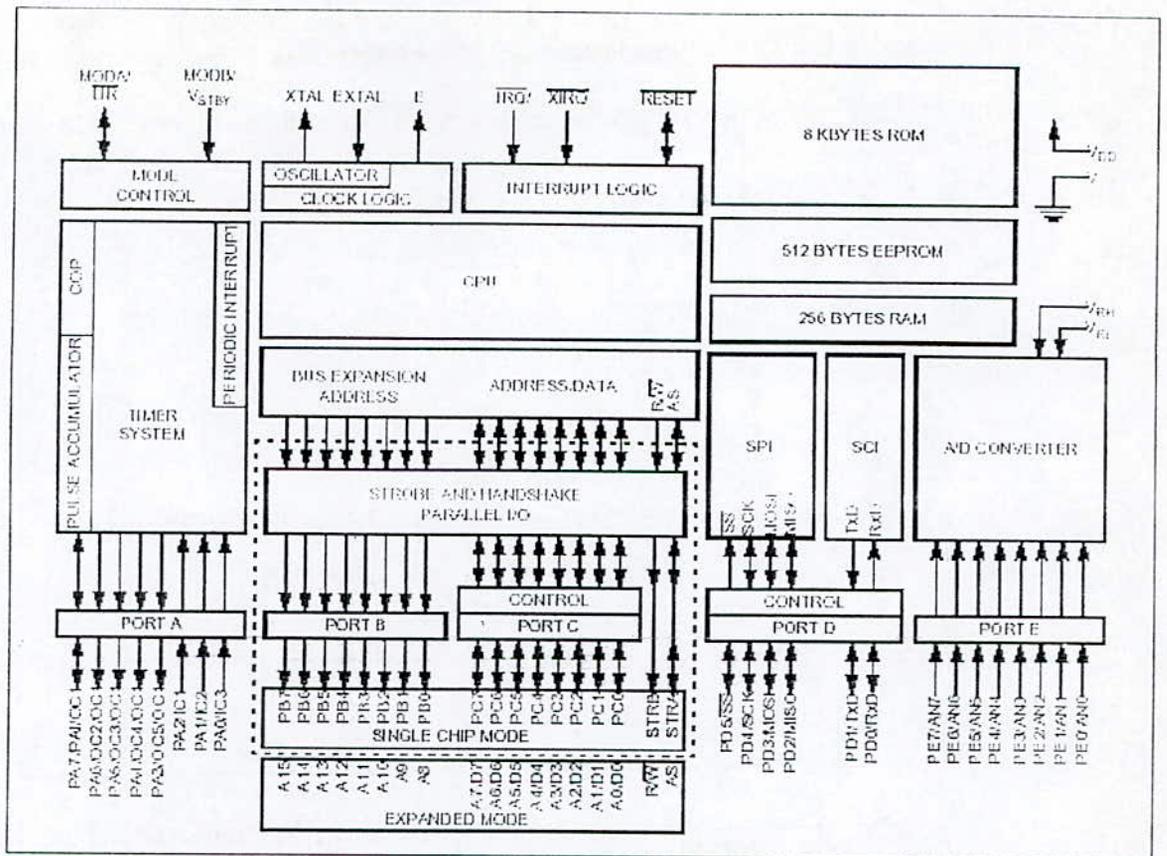


Figure 17. Microcontrôleur 68HC11 : Schéma block

Comme on le voit sur la figure, l'unité centrale est entourée de ports parallèles allant du port A au port E qui peuvent être bidirectionnels ou unidirectionnels selon le cas. Certaines lignes de ces ports sont également communes à d'autres ressources internes et ne sont donc pas nécessairement accessibles directement en permanence. Le port E par exemple joue aussi le rôle d'entrée au convertisseur analogique/digital.

Le 68HC11 dispose aussi d'entrées/sorties séries qui peuvent être en mode synchrone ou asynchrone selon que l'on utilise SPI ou SCI.

Un module Timer est également disponible. Il se compose de plusieurs timers très évolués, d'un accumulateur d'impulsions, d'une horloge temps réel et d'un « chien de garde » ou COP (*Computer Operating Properly*) dont le rôle est de surveiller le bon fonctionnement du circuit. Le 68HC11 possède aussi un convertisseur analogique/digital à huit entrées.

La mise en œuvre matérielle du microcontrôleur est très simple et ne requiert qu'un module d'horloge (quartz) et une cellule pour le Reset.

Le circuit peut être utilisé selon deux modes : single chip ou circuit seul et expanded ou mode étendu qui permet d'adresser des circuits externes comme n'importe quel microprocesseur. [23], [24]

En plus des différents ports disponibles, le 68HC11 possèdent de nombreux signaux en entrée ou en sortie que nous allons présenter ci-dessous :

- $V_{DD}$  (+V) et  $V_{SS}$  (masse) : pattes d'alimentation du circuit. Certaines versions du 68HC11 s'alimentent sous 3 à 5 volts, d'autres uniquement sous 5 volts.

- MODA/LIR et MODB/Vstby : pattes à double fonction. Lors d'un RESET du circuit, les pattes sont à considérer comme des entrées appelées MODA et MODB. Elles permettent alors de sélectionner l'un des modes de fonctionnement du circuit comme le montre le tableau suivant :

Inputs		Mode Description
MODB	MODA	
1	0	Normal Single Chip
1	1	Normal Expanded
0	0	Special Bootstrap
0	1	Special Test

Figure 18. Microcontrôleur 68HC11 : modes de fonctionnement

En fonctionnement normal, la patte MODA devient une sortie nommée LIR. Cette patte est à zéro lors du premier cycle d'horloge lors de l'exécution d'une instruction. La patte MODB quant à elle devient une entrée d'alimentation de sauvegarde pour la RAM interne. Tant que l'alimentation  $V_{DD}$  est normale, la RAM est alimentée via la patte  $V_{DD}$ . Dès que cette dernière devient inférieure à  $V_{stby}$  (0.7 volts environ), la RAM est alimentée par la tension appliquée à  $V_{stby}$ .

- EXTAL, XTAL : ces broches permettent la connexion du quartz qui délivrera le signal d'horloge nécessaire au fonctionnement du microcontrôleur.

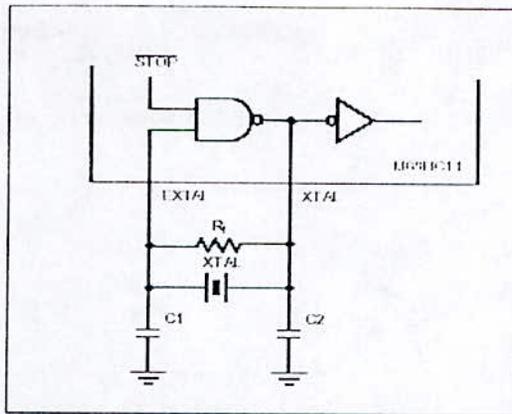


Figure 19. Microcontrôleur 68HC11 : circuit d'horloge

■ **RESET** : broche de réinitialisation du 68HC11. Contrairement à beaucoup de circuits, c'est une ligne bidirectionnelle. Utilisée en entrée et forcée à la masse, elle provoque une remise à l'état initial. Si par contre une anomalie interne se produit, le COP (chien de garde) provoque un RESET interne et génère un niveau bas sur la patte afin que l'information soit exploitée par des circuits externes.

■ **IRQ, XIRQ** : entrées d'interruption externes. IRQ est une entrée d'interruption masquable alors que XIRQ est non masquable une fois passée la phase d'initialisation du circuit.

■ **VREFL, VREFH** : sont les entrées de référence basse et haute, respectivement du convertisseur Analogique/Digital. Afin d'obtenir des performances optimales, l'écart entre VREFL et VREFH doit être au moins de 2.5 volts. Par ailleurs, VREFH doit impérativement être inférieur à 5 volts (tension d'alimentation)

■ **PE0 à PE7** : entrées du port parallèle E. Ces lignes sont partagées avec les entrées du convertisseur Analogique/Digital.

■ **PD0 à PD7** : entrées/sorties parallèles du port D, elles sont communes avec les ports de communication série SPI et SCI.

■ **PC0 à PC7** : entrées/sorties parallèles du port C. Elles deviennent la partie de poids faible du bus multiplexé adresses/données en mode étendu.

■ **PB0 à PB7** : sorties parallèles du port B. Elles véhiculent les 8 bits de poids fort du bus d'adresses en mode étendu.

■ STRA, STRB : (AS et R/W respectivement en mode étendu) en mode circuit seul, ces lignes peuvent servir à divers protocoles de dialogue via les ports B et C.

■ PA0 à PA7 : entrées/sorties parallèles du port A. PA0, PA1 et PA2 sont configurées en entrée alors que PA3, PA4, PA5 et PA6 sont configurées en sortie. PA7 est une ligne bidirectionnelle. Le port A partage ses entrées/sorties avec le Timer. Les entrées PA0 à PA2 servent d'entrées de capture (Input capture), PA3 à PA6 servent en sorties de comparaison (Output compare). La broche PA7 peut être configurée en entrée de capture (IC) ou en sortie de comparaison (OC). Elle sert aussi d'entrée à l'accumulateur d'impulsions. [23], [24].

### 3.2. La carte de commande

La carte de commande utilisée est la Adapt11 (Annexe 5). Cette carte est fabriquée par TECHNOLOGICAL ARTS. Elle se compose essentiellement d'un microcontrôleur MC68HC811E2FN, d'un circuit d'horloge, d'un circuit d'alimentation et de régulation ainsi que d'un module de communication RS232 qui permet de la connecter à un PC via un câble prévu à cet effet. [25]

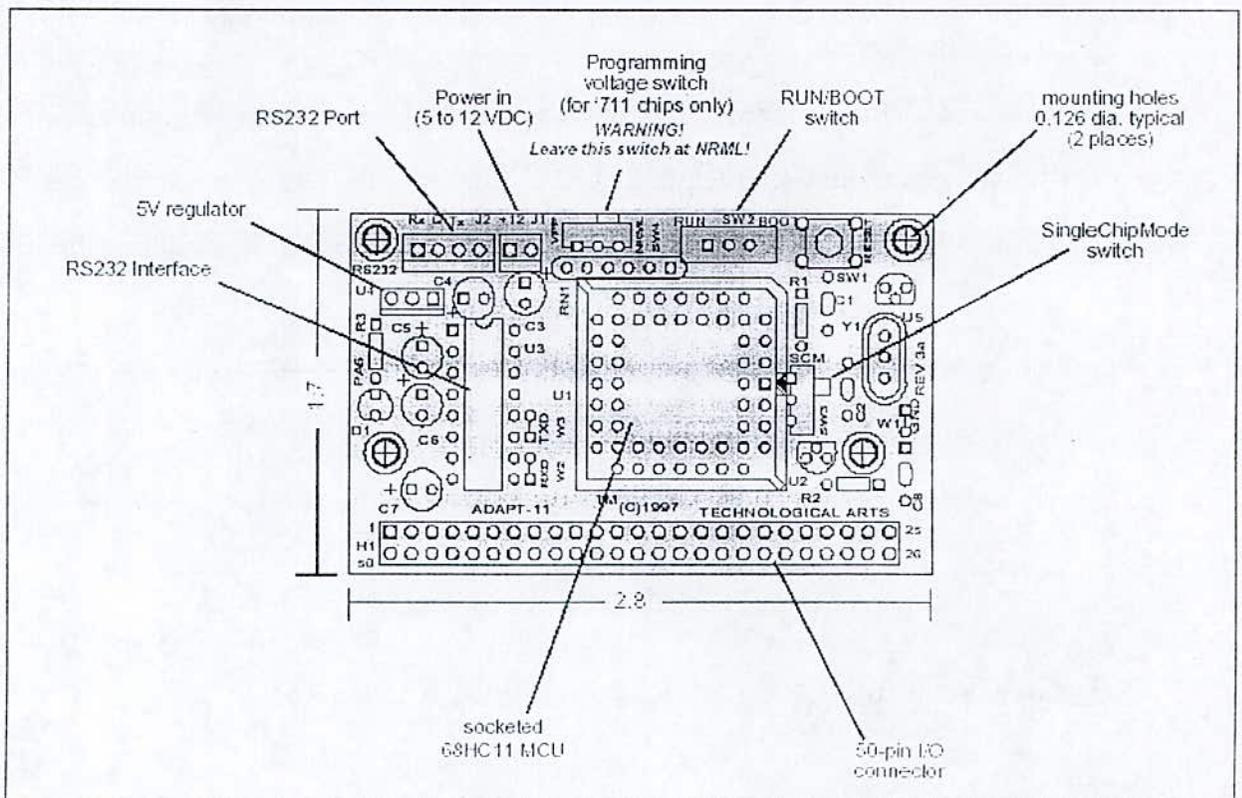


Figure 20. Adapt11 module : Circuit imprimé

Il est possible d'utiliser le microcontrôleur en mode Boot-Strap, Single Chip ou Expanded Chip en sélectionnant les différents switchers prévus à cet effet sur la carte.

Les ports du 68HC11 sont accessibles via un connecteur 50 broches selon la table suivante :

PIN #	NAME	PIN #	NAME
1	PD2/MISO	50	GROUND
2	PD3/MOSI	49	GROUND
3	PD4/SCK	48	PD0/RXD
4	PD5/SS*	47	+5V
5	PD1/TXD	46	IRQ*
6	PA7/PA1/OC1	45	XIRQ*
7	PA6/OC2/OC1	44	RESET*
8	PA5/OC3/OC1	43	RESERVED
9	PA4/OC4/OC1	42	PC7 (ADDR7/DATA7)
10	PA3/IC4/OC5/OC1	41	PC6 (ADDR6/DATA6)
11	PA2/IC1	40	PC5 (ADDR5/DATA5)
12	PA1/IC2	39	PC4 (ADDR4/DATA4)
13	PA0/IC3	38	PC3 (ADDR3/DATA3)
14	PB7 (ADDR15)	37	PC2 (ADDR2/DATA2)
15	PB6 (ADDR14)	36	PC1 (ADDR1/DATA1)
16	PB5 (ADDR13)	35	PC0 (ADDR0/DATA0)
17	PB4 (ADDR12)	34	STRB (R/W*)
18	PB3 (ADDR11)	33	E
19	PB2 (ADDR10)	32	STRA (AS)
20	PB1 (ADDR9)	31	VRL
21	PB0 (ADDR8)	30	VRH
22	PE0/AN0	29	PE4/AN4
23	PE1/AN1	28	PE5/AN5
24	PE2/AN2	27	PE6/AN6
25	PE3/AN3	26	PE7/AN7

Figure 21. Adapt11 module : Brochage du connecteur

Comme cité précédemment, le module Adapt11 est réalisé autour d'un 68HC811E2. Ce microcontrôleur possède de nombreuses particularités qui le distinguent des autres microcontrôleurs de la gamme HC11. [25]

Tout d'abord, le E2 ne possède pas de ROM interne. Il possède 256 octets de RAM et surtout 2048 octets (2Ko) d'EEPROM. Cette EEPROM de 2Ko est très intéressante. En effet, elle permet de tester des programmes stockés de manière permanente en mode normal et de les effacer le cas échéant. Dans le cas des autres microcontrôleurs de la classe HC11, les programmes éphémères doivent être stockés en RAM ce qui induit leur effacement à chaque mise hors tension. L'utilisation du E2 nous permet d'éviter ce désagrément. [23], [26], [27]

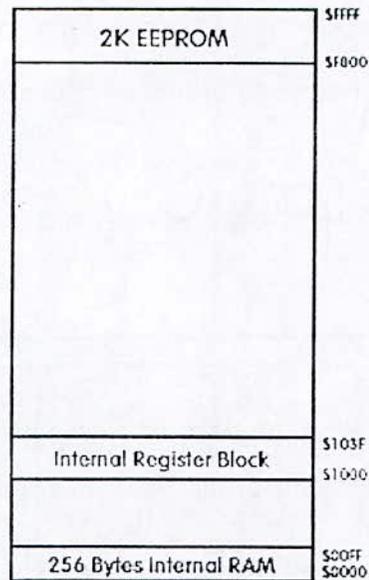


Figure 22. Adapt11 module : Memory Map

Le 68HC811E2 possède en outre et comme la majorité des autres HC11 un Timer 16 bits, 38 Entrées / Sorties, deux ports de communication série (SCI et SPI), un convertisseur Analogique / Numérique 8 bits. On peut éventuellement étendre le système en ajoutant de la mémoire externe (mode étendu). [23], [26], [27]

#### 4. Perception

Le robot est doté d'un système de perception lui permettant de détecter d'éventuels obstacles et de les éviter le cas échéant. Cette fonction se base sur un dispositif d'émetteurs/récepteur infrarouges.

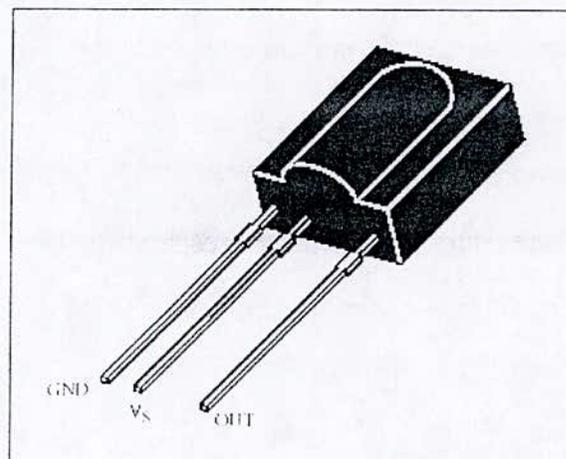


Figure 23. TSOP1738 : vue externe

Les émetteurs sont deux LEDs infrarouges. Ces dernières sont disposées de chaque côté du robot et orientées vers l'avant légèrement à l'extérieur. Le récepteur infrarouge est un TSOP1738 de Siemens (Annexe 6). La principale caractéristique de ce récepteur est qu'il ne détecte que les faisceaux infrarouges émis à une fréquence de 38kHz. Nous avons donc procédé à la réalisation d'un oscillateur 38kHz.

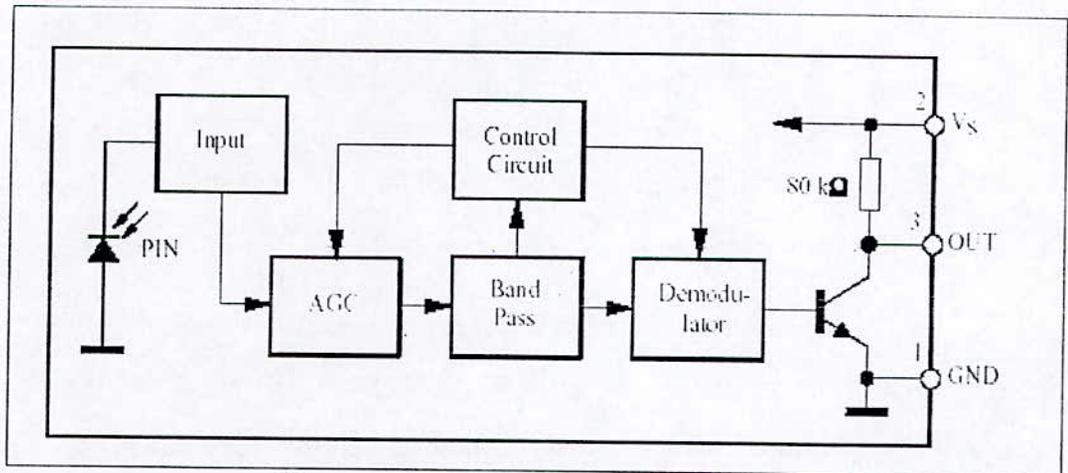


Figure 24. TSOP1738 : schéma block

L'oscillateur génère un signal à la fréquence désirée (38kHz dans notre cas). Ce signal est ensuite introduit dans une porte AND où l'on introduit un signal de commande des LEDs en provenance du microcontrôleur. De ce fait on peut activer simultanément ou l'une après l'autre chacune des deux LEDs. Le TSOP1738 possède parmi ses caractéristiques une fonction de filtrage des bruits et autres perturbations. Les signaux continus de 38kHz sont pour lui synonymes de bruits et filtrés. Pour cela, le signal émis par les LEDs est un signal sous forme de BURST. Les LEDs sont commandées via un transistor par les sorties de portes AND. L'autre entrée de cette porte provient du 68HC11. C'est un signal d'enveloppe. Il nous donne la fréquence des BURST. De ce fait on obtient un signal de 38kHz couplé à un autre de 1kHz. Le TSOP 1738 détecte le signal de 38kHz en provenance des LEDs. Il le répercute en sortie sous forme de 0. Ainsi, si un obstacle est détecté, on obtiendra en sortie du récepteur un signal de fréquence égale à celle émise par le microcontrôleur.

Les LEDs sont activées l'une après l'autre pour pouvoir déterminer plus précisément la position de l'obstacle. Si une détection se produit alors que la LED droite est activée, on désactive cette dernière et on active la LED gauche. Si cette dernière rencontre un obstacle, on saura que l'obstacle se trouve droit devant et il prendra les mesures nécessaires pour l'éviter. On agit de la même façon pour détecter des obstacles se trouvant en avant, à droite ou à gauche.

Comme annoncé, l'architecture du robot mobile que nous allons réaliser est modulaire, adaptative et évolutive. En effet, à chaque fonction est affecté un module propre. De plus, le système peut être porté sur beaucoup d'autres structures mécaniques et utilisé dans de nombreuses applications. Enfin, chaque module peut être amélioré ou entièrement repensé sans que cela n'affecte de manière sensible les autres parties du robot.

# Mise en oeuvre et réalisation

## **VI- Mise en œuvre, réalisation et résultats**

Après avoir jeté les bases de l'architecture du robot, nous avons débuté la réalisation de ce dernier. Bien entendu, le passage de la théorie à la pratique nous a mis face à des problèmes corollaires à toute réalisation de ce type. L'architecture a été adaptée à certaines contraintes posées par les conditions réelles. De plus, certaines limitations du point de vue des moyens de réalisation et des outils de développement nous ont contraints à renoncer à certaines solutions envisagées précédemment.

La mise en œuvre et la réalisation de notre robot s'est déroulée selon les étapes suivantes:

- Mise en oeuvre de la carte de commande
- Choix des moteurs
- Réalisation des cartes de puissances
- Réalisation de la structure mécanique
- Montage des parties commande et puissance sur la structure mécanique
- Premiers tests des algorithmes de mouvement sur le robot en mode « aveugle »
- Réalisation des modules de perception
- Mise en oeuvre de la partie perception sur le robot
- Mise en œuvre de la stratégie de mouvement et de l'algorithme final

### **1. Mise en oeuvre de la carte de commande**

Comme expliqué précédemment, la carte de commande est une carte électronique à base du microcontrôleur MC68HC11E2 de Motorola. La carte étant déjà réalisée, nous nous sommes contentés d'effectués des tests à base de petits programmes en assembleur afin de vérifier son bon fonctionnement. La carte 68HC11 est programmée en mode boot-strap en utilisant un câble de liaison RS232 relié à un PC.

Après vérification du fonctionnement de la carte, le choix d'un langage de programmation s'imposait. Nous avons prévu l'implantation d'un système d'exploitation temps réel RTOS (*Real Time Operating System*) développé en langage C et qui aurait géré les différentes tâches effectuées par le robot. Après avoir étudié le ucos-II et approfondi la programmation en C orientée temps réel en utilisant le compilateur GCC, nous avons écrit nos premiers programmes que nous avons tenté de compiler. Après plusieurs compilations infructueuses, il apparut que l'implantation du RTOS était impossible. En effet, le faible espace mémoire ainsi que des problèmes d'incompatibilité logicielle liés à notre compilateur nous ont fait renoncer à cet ambitieux projet.

Une extension mémoire aurait été possible mais nous aurait demandé de repenser tout notre système microcontrôleur en passant du mode circuit seul au mode étendu. Le temps de développement nécessaire à cette extension ainsi qu'à l'écriture du programme (communément appelé *port*) réalisant la compatibilité (*porting*) du RTOS avec le compilateur GCC aurait été trop long vu le délai imparti.

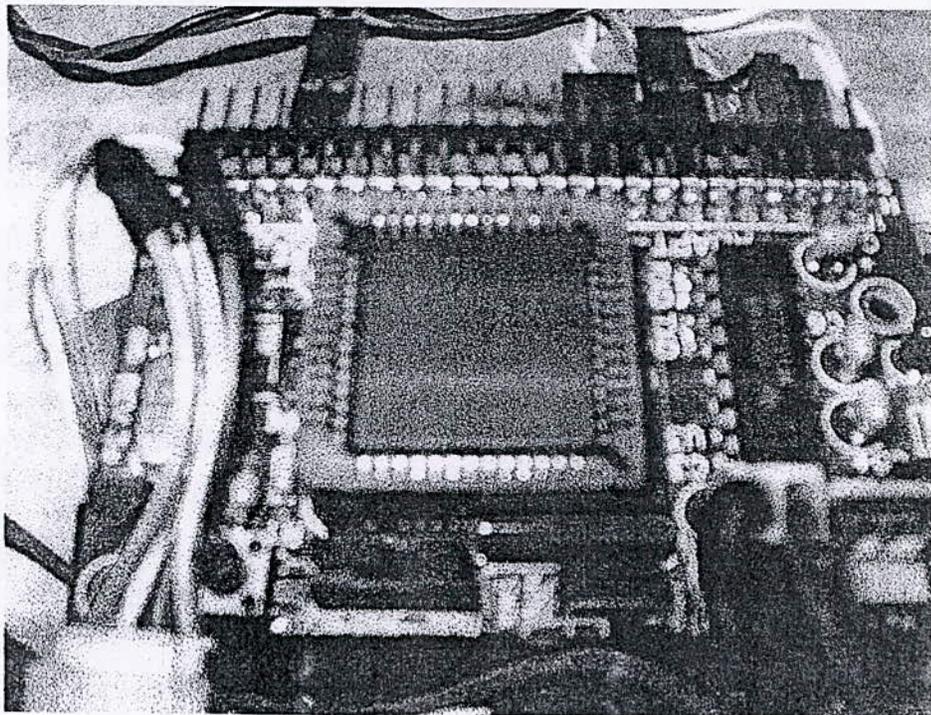


Figure 25. Carte Adapt11 – 68HC11

Finalement, nos programmes ont été écrits en assembleur. Nous avons donc mis en œuvre nos outils de développement. Le kit de développement se compose d'un simulateur, d'un assembleur, d'un debugger et d'un compilateur C. afin de conserver l'esprit d'ouverture qui a présidé à la réalisation de ce travail, nous avons opté pour des logiciels open source ou freeware. Le simulateur utilisé est le Wookie168, l'assembleur est l'AS11 fourni gratuitement sur le site de Motorola, le debugger utilisé est le Winbug11 et le compilateur C est le GCC.

## **2. Choix des moteurs**

Les moteurs pas à pas utilisés ont été récupérés sur deux imprimantes hors service de marque EPSON. Après avoir récupéré plusieurs moteurs pas à pas, nous avons optés pour un couple de moteurs identiques (afin de se prémunir d'éventuelles différences de caractéristiques) et dont nous avons trouvé la documentation. Ayant les caractéristiques mécaniques et électriques des moteurs, il ne restait plus qu'à réaliser l'interface de puissance.

## **3. Réalisation des cartes de puissance**

Les cartes de puissance ont été réalisées par nos soins. Après avoir dessiné le schéma électronique sous Capture CIS et avoir obtenu un PCB fonctionnel, le temps de développement de nos cartes s'avérait trop long. Nous avons finalement opté pour un PCB équivalent mais plus compact déjà réalisé et utilisé sur une fraiseuse industrielle. Après réalisation d'un premier circuit imprimé et implantation des composants, nous avons testé la première carte qui n'a malheureusement pas fonctionné pour des raisons pratiques : coupures de plusieurs pistes du circuit imprimé induisant un dysfonctionnement de la carte et une surchauffe des circuits. La deuxième carte, réalisée parallèlement à la première mais avec un circuit imprimé réalisé par un fournisseur différent s'est avérée pleinement fonctionnelle. Après réalisation, des tests ont été effectués en branchant le dispositif carte moteur à une alimentation stabilisée et à un générateur de tension (afin de préserver la carte de

commande impossible à remplacer en cas de détérioration). Le moteur pas à pas a été testé à différentes vitesses de rotations (de 50 à 500 pas par seconde) et sous différentes tensions (de 12 à 20 volts). Etant assuré du fonctionnement de la première carte de puissance, nous avons réalisé une seconde qui elle aussi s'est avérée fonctionnelle. Pour finir, nous avons testé les deux cartes simultanément en les synchronisant (utilisation de la fonction sync du L297) et avons obtenu des résultats satisfaisants (fonctionnement irréprochable, synchronisme parfait)

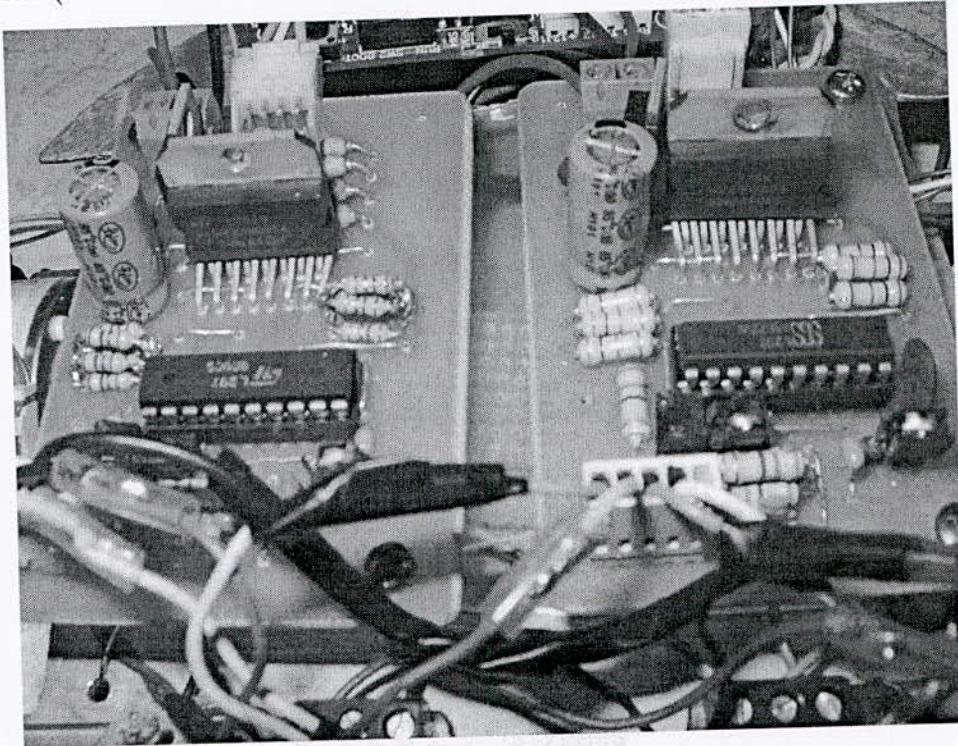


Figure 26. Cartes de puissance

#### 4. Réalisation de la structure mécanique

La structure mécanique a été essentiellement réalisée à base de plaques d'aluminium usagées récupérées au niveau du département d'électronique. L'usinage des pièces n'a pas été sans poser des problèmes d'ordre variés. Les disques et les équerres ont été usinés à l'aide d'une guillotine et d'une plieuse au sein du département de Génie Mécanique de l'Ecole. Nous avons par ailleurs utilisé la foreuse dudit département afin de réaliser une partie des perçages requis. Les pièces obtenues après usinages ne nous donnant pas satisfaction du point de vue de la

précision et de la qualité de surface, nous avons décidé de poursuivre l'usinage à nos frais et en utilisant nos ressources personnelles. Les différentes pièces ont été meulées et ré usinées chez un tourneur, les angles on été corrigés et les arrondis retravaillés jusqu'à obtention d'un résultat optimal. Nos avons dans un premier temps réalisé une structure se composant de disques d'aluminium superposés fixés sur des doubles équerres percées afin de permettre le passage des arbres des moteurs. Apres le montage de cette structure, il paraissait clair que cette dernière était beaucoup trop volumineuse pour l'application envisagée. Toutefois, elle serait appropriée dans une évolution future du système, notamment si l'implémentation de la vision par ordinateur ou de la détection laser 2D ou 3D est envisagée ; le disque supérieur servant de support à ces différents dispositifs.

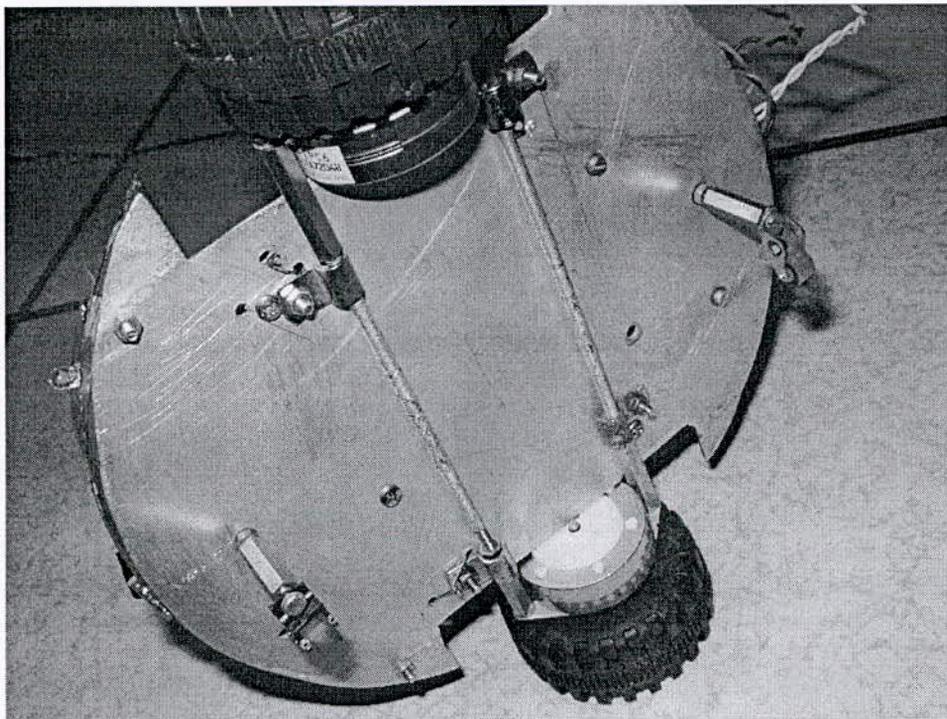


Figure 27. Châssis vu de bas

Nous avons donc pensé à une structure plus légère et moins volumineuse et avons finalement opté pour l'utilisation de l'un des deux disques sur lequel serait implanté l'ensemble des parties électroniques (puissance-perception-commande). La fixation des moteurs sur le disque d'aluminium a fait l'objet de plusieurs propositions. Nos avons dans un premier temps opté pour des équerres simple (à base de celles déjà

réalisées) mais la mauvaise précision de l'angle ( $85^\circ$  au lieu de  $90^\circ$ ) et la relative mauvaise stabilité et rigidité de la structure nous ont fait envisager des solutions alternatives. Une première solution consistait en l'utilisation d'entre toises vissées sur le disque et permettant de fixer les moteurs de telle manière que leurs axes soient au même niveau que le disque. La mise en œuvre de cette solution nécessitait l'utilisation d'entre toises carrées. Malheureusement, ces dernières ne sont pas disponibles sur le marché et après avoir tenté de trouver des entre toises de récupération, nous avons dû envisager une autre solution. Celle-ci nous a été inspirée par l'industrie automobile. Elle consistait à fixer des tiges filetées sur le disque et de fixer les moteurs de part et d'autre des essieux ainsi réalisés. Nous avons fait face lors de l'application de cette solution à un problème inattendu : l'indisponibilité sur le marché algérien de tiges filetées d'un diamètre de 3 mm (obligatoires afin de convenir aux moteurs utilisés). Après des recherches infructueuses, nous avons pris le parti de réaliser nous même les tiges filetées à l'aide d'une fileteuse manuelle dont disposait le magasin du département de Génie Mécanique. Nous avons ainsi réalisé des tiges filetées de 3 mm de diamètre et de longueurs convenables à notre application. Après mise en œuvre de cette solution à base de tiges filetées, nous n'étions pas satisfaits de la stabilité des moteurs et de la rigidité de la structure. Nous avons donc pensé à combiné les 2 deux solutions : nous avons raccourci les tiges et les avons dotés d'entre toises à chaque extrémité. De ce fait, les moteurs se fixaient désormais sur des entre toises elles même fixées à des tiges. Cette solution offrait une telle stabilité et une telle rigidité que même en l'assemblant sans le disque, les moteurs restaient parfaitement parallèles. Après fixation de la structure ainsi obtenue sur le disque d'aluminium, nous avons constaté que les moteurs avaient tendance à s'excentrer vers le haut de la structure et à perdre leur parallélisme. Une solution envisagée pour pallier à ce problème est le renforcement de la structure par la fixation d'équerres afin d'empêcher les moteurs de s'excentrer. Ainsi, on voit bien que la structure mécanique est le fruit d'un souci constant d'amélioration et de perfectionnement. Elle englobe finalement les

constant d'amélioration et de perfectionnement. Elle englobe finalement les différentes options envisagées en une solution hybride : équerres - tiges filetées - entretoises.

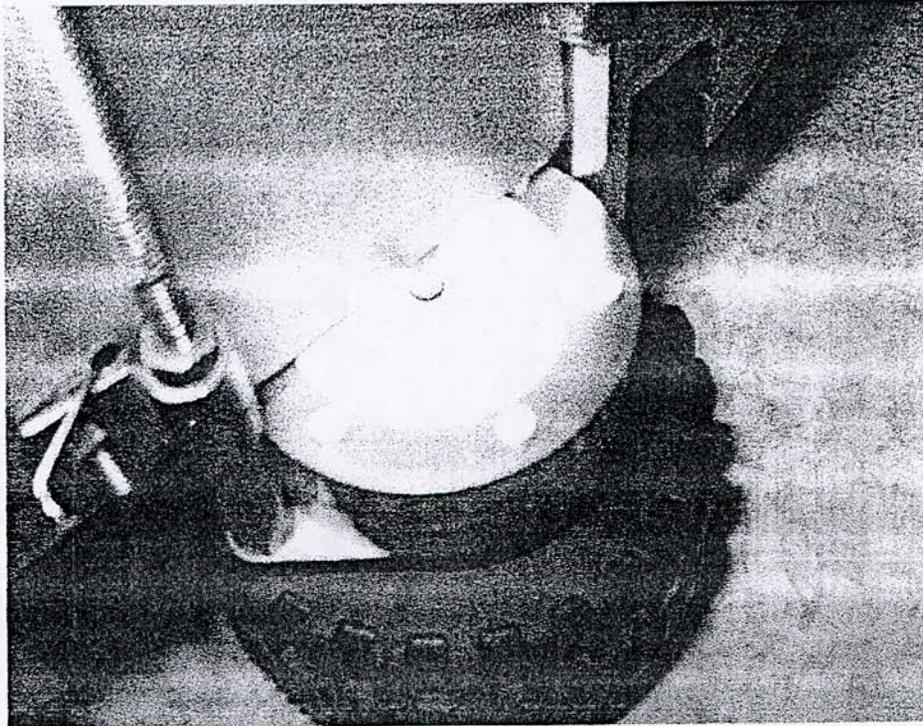


Figure 28. Fixation des moteurs

## 5. Montage des parties commande et puissance sur la structure mécanique

Après avoir réalisé la structure mécanique du robot, nous y avons implanté les 2 cartes de puissance ainsi que la carte de commande 68hc11. Nous avons par la suite réalisé les différentes connections entre les différents éléments : moteurs - cartes de puissance - carte de commande. Pour finir nous avons couplé les alimentations des 3 cartes électroniques afin, pour faciliter les tests, de ne relier le robot à l'alimentation que par un seul et unique fil d'Ariane.

Une fois les éléments électroniques en place sur la structure mécanique, nous avons effectué des premiers tests qui se sont avérés contradictoires, en effet, le fonctionnement du robot était instable : les roues tournaient sans synchronisation ou ne tournaient pas du tout. Après vérifications, il s'avérait que les vibrations dues au fonctionnement des moteurs provoquaient des pertes de contact au niveau des

connecteurs. Ces mêmes vibrations ont provoqué le déplacement et la chute des cartes de puissance et nous avons de ce fait changé le système de fixation de ces dernières à la structure mécanique. Après avoir remédié à ces problèmes dus essentiellement aux vibrations mais aussi à certains réglages électroniques, l'ensemble mécanique-puissance-commande était totalement opérationnel.

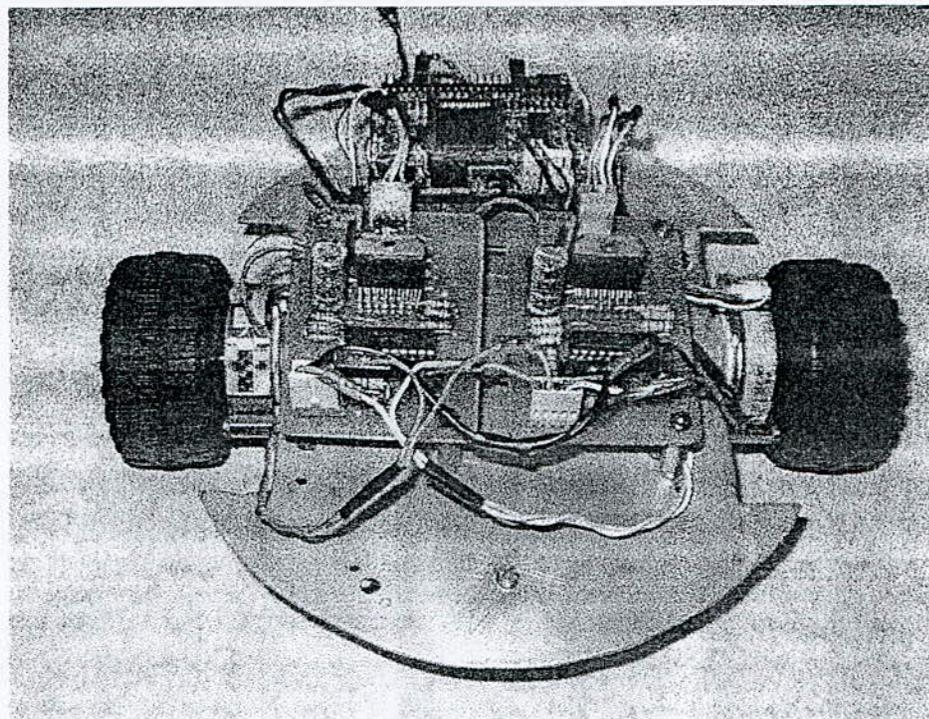


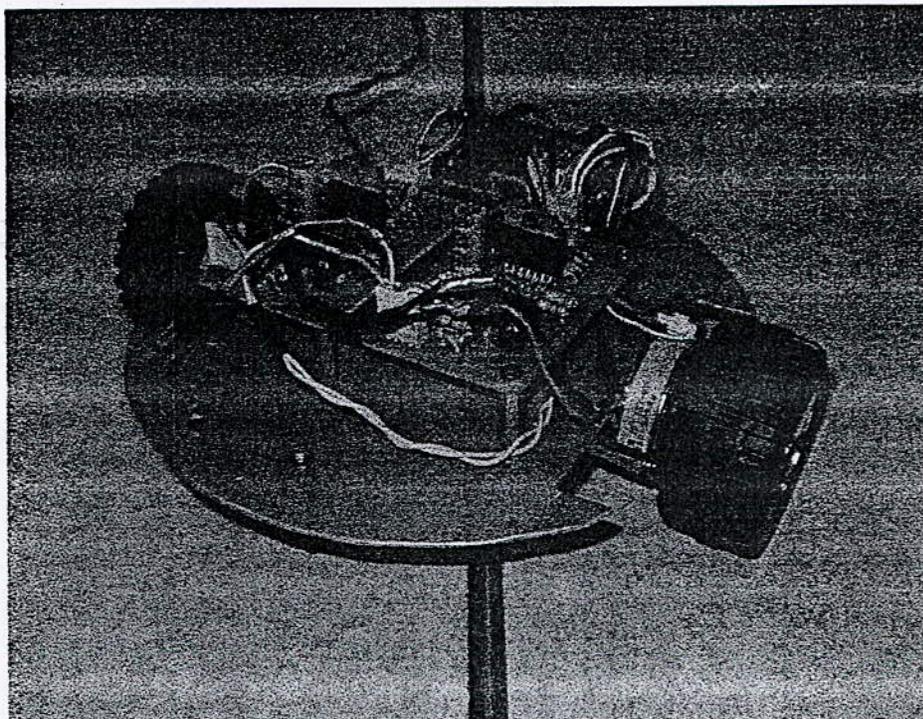
Figure 29. Implantation des cartes sur la structure mécanique

## 6. Premiers tests des algorithmes de mouvement sur le robot en mode « aveugle »

Les premiers tests des algorithmes de commande des moteurs ont été effectués avant la réalisation du module de perception c'est donc des tests en mode aveugle étant donné que le robot n'était doté d'aucun moyen de perception. La commande de chaque carte de puissance nécessite en plus de l'alimentation  $V_{cc}$  (+5V) 2 bits de commande : Le premier indique le sens de rotation du moteur et le second délivre le signal d'horloge incrémentant d'un pas le moteur à chaque période d'horloge.

La commande du sens de rotation des deux moteurs est assurée par l'écriture d'un un ou d'un zéro sur les sorties PB0 et PB1 du microcontrôleur. Concernant le signal d'horloge, une première possibilité était d'écrire une fonction de temporisation dite

« *DELAY* » qui serait introduite dans une boucle infinie. Cette fonction n'a pour seul et unique but que la temporisation d'une durée équivalente à la fréquence que l'on désire appliquer aux moteurs. En entrée de la boucle on met les 2 pins reliés au moteur à l'état haut, on entre ensuite dans la fonction *DELAY* et on retourne dans la boucle en mettant cette fois ci les sorties à l'état bas. On obtient ainsi un signal périodique carré d'une manière relativement simple.



**Figures 30. Premiers tests en mode aveugle**

La méthode décrite plus haut est la plus utilisée dans les robots mobiles que nous avons étudié (ceux de la Société de Robotique de Seattle en particulier). Elle offre l'avantage de la simplicité au dépend de la précision. En effet la fréquence de sortie est asservie à la vitesse d'exécution du programme en CPU. Une méthode plus précise aurait été de générer un signal d'horloge en utilisant le module Timer du 68HC11. Ce dernier possède en effet une fonction Output Compare qui a pour principale caractéristique la génération d'un signal d'horloge sur les pins du PORT A du microcontrôleur.

La fonction Output Compare se base sur un compteur 16 bits contenu dans le timer du 68HC11. On stocke une valeur dans le registre affecté à la fonction, TOCx et à

chaque incrément du compteur, ce dernier est transféré dans un registre de comparaison où il est comparé à la valeur contenue dans TOCx. Dès que les deux valeurs concordent et à condition que l'interruption OCx soit autorisée, la pin associée à l'Output Compare bascule et change d'état.

On active l'interruption Ocx en mettant à un le bit OcxI correspondant dans le masque d'interruption TMSK1.

A chaque interruption un flag d'interruption OcxF est mis à un dans le Flag register TFLG1.

Après avoir écrit le programme (Annexe 7) à l'aide du simulateur Wookie168, nous l'avons implanté sur notre carte Adapt11. Les résultats obtenus étaient certes satisfaisants du point de vue de la précision de la commande : la fréquence programmée était quasiment identique à celle obtenue pendant l'exécution du programme.

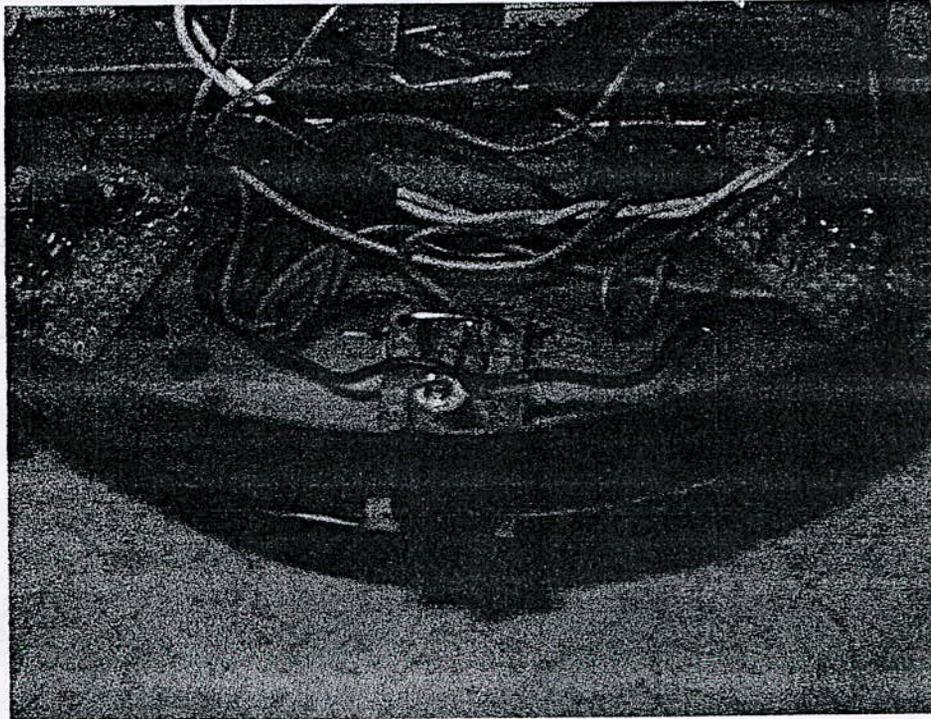
## 7. Réalisation des modules de perception

Comme annoncé précédemment, le module de perception du robot est basé sur la détection infrarouge. Pour cela nous avons tout d'abord réalisé des tests en utilisant un émetteur et un récepteur infrarouges. L'émetteur infrarouge utilisé est une LED IR de 5mm de diamètre. Le récepteur est un SIEMENS TSOP1738.

Comme décrit précédemment, le TSOP1738 détecte des signaux infrarouges dans une gamme de fréquences comprises entre 35kHz et 41kHz. Il était donc impératif que l'émetteur produise une onde dans la même gamme de fréquences. Afin d'obtenir ce signal de 38kHz, nous avons réalisé un oscillateur de 38kHz à base du circuit CD4011. Ce circuit se compose de 4 portes NAND qui combinées entre elles et reliées à un circuit externe minimal (2 résistances, une capacité et un potentiomètre) produit un signal de 38kHz commandable directement par le microcontrôleur. En effet la sortie de l'oscillateur est injectée dans une porte NAND en compagnie du

signal de commande provenant du 68HC11. On obtient ainsi le signal désiré qui de plus peut être activé ou inhibé par le microcontrôleur.

Après avoir réalisé le montage, nous avons procédé à des tests. En plaçant l'émetteur en face du récepteur, nous avons obtenu une distance de détection de l'ordre du mètre. Une fois ces tests validés, nous avons réalisé le module de perception proprement dit.



**Figure 31. Module de détection IR**

Le module de perception se constitue principalement de 4 circuits inter connectés et montés sur un support. Les quatre circuits sont : un oscillateur, un circuit récepteur à base du TSOP1738 et deux circuits émetteurs. Le support est constitué d'un demi disque en plastic sur lequel est fixé une bande d'aluminium flexible percée. Les ouvertures pratiquées dans la bande d'aluminium permettent de placer les deux LEDs et le récepteur IR. Les circuits sont fixés sur le support en plastic à l'aide d'attaches métalliques. Des borniers ont été placés sur les modules et permettent de brancher les connections nécessaires. On obtient ainsi un module de détection IR pouvant se fixer à n'importe quel system. Après avoir réalisé le module IR nous l'avons testé à l'aide d'un générateur de fonction simulant la commande du

microcontrôleur. Ces tests nous ont permis de régler l'orientation des LEDs émettrices afin d'obtenir une distance critique de perception d'environ 16cm.

## 8. Mise en œuvre de la partie perception sur le robot

Une fois le module de détection IR opérationnel, nous l'avons implanté sur le robot. La base en matière plastique est fixée au-dessus du châssis en aluminium à l'aide de deux vis ce qui conforte la modularité du système. Une fois le module IR placé, nous l'avons testé en délivrant un signal à partir du port A du 68HC11 en utilisant une nouvelle fois la fonction Output Compare du Timer. Nous avons généré un signal d'une fréquence de 1 kHz à partir de la carte de commande. Ce signal est ensuite injecté dans une porte NAND avec le signal provenant de l'oscillateur 38kHz.

On obtient de ce fait un signal en créneaux ou *burst*. La largeur d'un burst étant de 0.5 ms. On branchant la sortie du récepteur sur un oscilloscope l'on obtient après détection, le même signal que celui émis sur les LEDs ce qui valide l'essai ainsi réalisé.

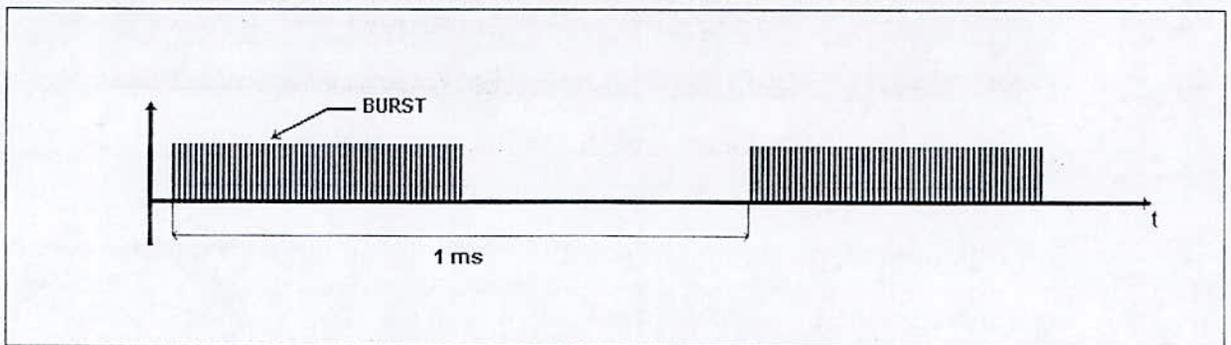


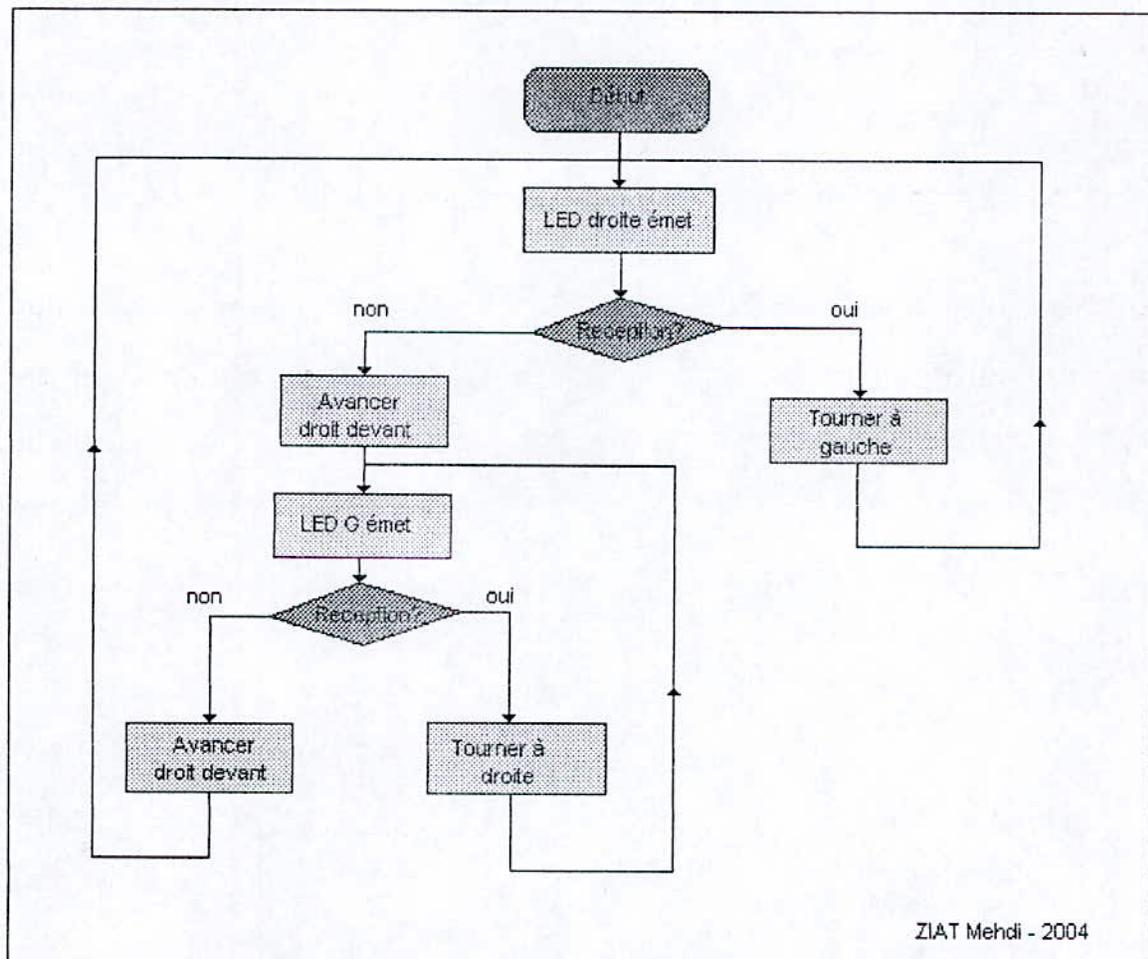
Figure 32. Signal de détection IR

## 9. Mise en œuvre de la stratégie de mouvement et de l'algorithme final

La stratégie comportementale implémentée sur le robot est la suivante : le robot avance droit devant. Les LEDs droite et gauche émettent alternativement un signal IR. Tant que le récepteur ne reçoit pas de signal, le robot continue à avancer droit devant lui. Dès qu'un signal est détecté sur la sortie du récepteur, le robot vérifie la

provenance de ce dernier. Si le signal provient de la LED droite, le robot tourne vers la gauche et continue d'émettre sur uniquement sur la LED droite. Dès que le signal disparaît au niveau du récepteur, l'émission de la LED gauche est activée. Si aucun obstacle n'est détecté, le robot reprend son mouvement en avant sinon il se met en mode veille. Si le robot tourne plus de 2 fois sur lui-même en essayant de trouver une issue, il se met en mode veille.

Nous avons commencé par écrire un programme qui fasse avancer le robot en avant et l'arrête dès qu'un obstacle est détecté droit devant (activation des deux LEDs simultanément) une fois ce programme implémenté sur le robot et testé avec succès, nous avons entamé l'écriture du programme final (Annexe 7).



ZIAT Mehdi - 2004

Figure 33. Algorithme de détection

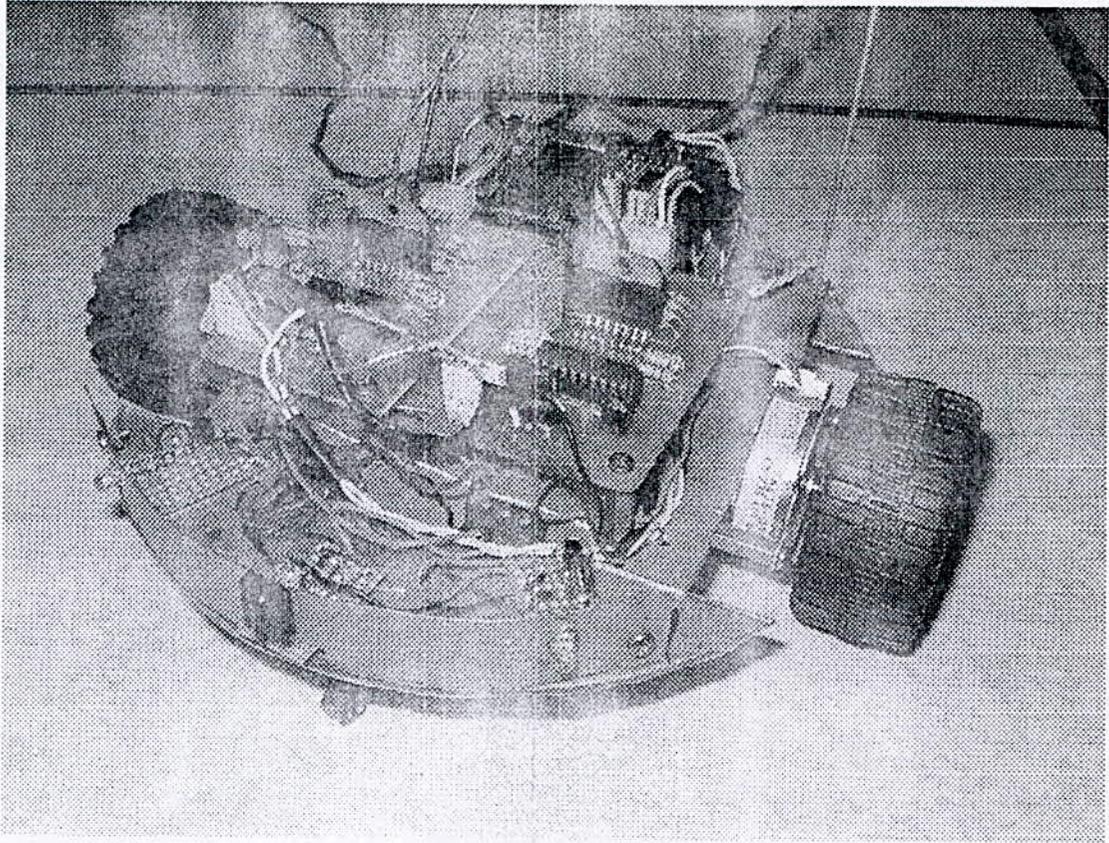


Figure 34. KifPloc totalement opérationnel

On l'a vu, la réalisation du robot n'a pas été chose aisée, de nombreux compromis ont dû être réalisés entre les solutions envisagées lors de la conception et les contraintes apparues lors de la réalisation. Toutefois, nous avons réussi à maintenir intacte l'architecture générale du système et avons même amélioré certaines parties en cours de réalisation.

## Conclusion

Nous avons à travers ce travail tenté d'apporter notre contribution à l'introduction de la Robotique mobile en Algérie. Les nombreux problèmes rencontrés lors de la réalisation de ce projet en font un véritable défi.

Nous sommes conscients que ce projet est loin d'être une fin en soi. En effet, sa vocation première était d'offrir un outil à même d'envisager de plus ambitieuses réalisations dont la mise en œuvre aurait été impossible sans la réalisation de cette plateforme. Par ailleurs, de nombreuses améliorations qui n'étaient pas l'objet de notre étude peuvent être apportées dans un futur immédiat. Tout d'abord, il est possible d'optimiser la structure mécanique afin de réduire la surface au sol et la masse du système. De plus, l'autonomie énergétique peut être mise en œuvre en réalisant le bilan de puissance et en plaçant une source énergétique adéquate. La carte de commande qui a véritablement constitué un handicap du fait de ses nombreuses limitations peut et doit être remplacée par une plus performante du même type ou même de type FPGA. Enfin, le nombre et la nature des capteurs peuvent être multipliés afin d'améliorer la perception qu'a le robot de son environnement.

# **Bibliographie**

## Bibliographie :

- [1] Y. Nguyen Minh, R. Audemard, CNAM, 1997.
- [2] Encyclopédie Encarta 2004.
- [3] I. Aleksander, P. Burnett, "Le robot pensant", Denoel, 1983.
- [4] Micros et Robots N°III p18,
- [5] J.M. Selig, "Introductory robotics", Prentice hall, 1992.
- [6] I. Asimov, "Les robots", J'ai lu, Flammarion, 1950.
- [7] G. Giralt, "La robotique", Dominos, Flammarion, 1997.
- [8] J.F. Engelberger, "Les robots industriels : Applications, gestion et pratique",  
Hermes Publishing, 1981.
- [9] P. Dauchez, "Applications non manufacturières de la robotique", Systèmes  
Automatisés, Traité IC2 information-Commande-Communication, HERMES  
Science Europe Ltd, 2000.
- [10] F.L. Lewis; et. al. "Robotics" *Mechanical Engineering Handbook* Ed. Frank  
Kreith Boca Raton: CRC Press LLC, 1999.
- [11] C. Fargeon; et. al. "Robotique mobile", teknea, 1993.
- [12] J.D. Nicoud, "Robots Mobiles miniatures", Techniques de l'ingénieur, S7854,  
2000.
- [13] B. Akihiko, "Robot Navigation using Ultrasonic Feedback", Master of Science  
in Mechanical Engineering, Dpt of Mechanical and Aerospace Engineering,  
Morgantown, West Virginia, 1999.
- [14] A. Pruski, "Robot mobiles autonomes", Techniques de l'ingénieur, R7850,  
1998.
- [15] F. Chavand, E. Colle, "Perception de l'environnement en robotique",  
HERMES, 1998.
- [16] J. Borenstein, H. R. Everett, L. Feng, "Where am I? Sensors and Methods for  
Mobile Robot Positioning", The University of Michigan, 1996.
- [17] P. Mayé, "Moteurs électriques pour la robotique", Collection EEA, DUNOD,  
Paris, 2000.

- [18] P.Oguic, "Moteurs pas à pas et PC", ETSF, DUNOD, Paris, 2001.
- [19] NMB Technologies Corporation, "Product catalog 2004", Thailand, 2004.
- [20] P. Zerbib, A. Decadi, K. Diemunsch, "Projet IPT 2003", UAH, ESTACA, 2003.
- [21] SGS-THOMPSON Microelectronics, "THE L297 STEPPER MOTOR CONTROLLER", Application note, 1995.
- [22] ST Microelectronics, "THE L298 DUAL-FULL BRIDGE DRIVER", 2000.
- [23] C. Tavernier, "Microcontrôleur 68HC11 & versions UVPRM et EEPROM - Applications", Collection EEA, DUNOD, Paris, 1997.
- [24] Motorola, "68HC11 Reference Manual", Motorola, Inc., 1996.
- [25] Mechanical Arts, "Adapt11 Module Mechanical Data and Pin Configuration"
- [26] Motorola, "M68HC11E Family - Technical Data", Motorola, Inc., 2000.
- [27] Motorola, "M68HC11 E SERIES – Programming reference guide", Motorola, Inc., 1997.

### **Ouvrages consultés:**

1. F. Giamarchi, L. Flores, "Construisons nos robots mobiles", ETSF, DUNOD, Paris, 2001.
2. J.J. Labrosse, "MicroC/OS-II, The Real Time Kernel", CMP Books, Kansas, 1999.
3. K. S. Chong, L. Kleeman, "Large Scale Sonarray Mapping using Multiple Connected Local Maps", International Conference on Field and Service Robotics, ANU December 8-10, 1997, pp. 538-545.
4. F. Michaud; et. al. "Azimut, a Multi-Modal Locomotion Robotic Platform", Université de Sherbrook, Québec Canada, 2003.
5. F. Michaud, S. Caron, "Roball, the Rolling Robot", Université de Sherbrook, Québec Canada, 2001.
6. F. Michaud; et. al, "Experiences with an Autonomous Robot Attending the AAAI Conference", Université de Sherbrooke, Québec Canada, 2001.
7. B. Villaumié "Modèle de Carte Corticale pour un Robot doté d'une caméra

- mobile", DEA IAA, Université Henri Poincaré Nancy I - Supelec Metz, 2002.
8. D. Laing, C. Martin, C. Frith, "Gang Green Final Report" University of Alberta, Canada, 2001.
  9. R.D. Hersch, "Microcontrôleurs : principes et aspects temps réel", Techniques de l'ingénieur, S8035, 2001.
  10. Encoder, The newsletter of the Seattle Robotics Society – December 1996 - winter 2004.
  11. Electronique et loisirs magazine – n°49, 06-2003, pp. 16-25, 58-65.
  12. Electronique Pratique – n°278, 11-2003, pp. 56-61.

## Webographie :

- [www.ancr.org](http://www.ancr.org) Association Nationale des Créateurs de Robots
- [www.seattlerobotics.org](http://www.seattlerobotics.org) Seattle Robotics Society
- [www.msoe.edu](http://www.msoe.edu) Milwaukee School of Engineering
- [www.ucos-ii.com](http://www.ucos-ii.com) site du noyau temps réel Micro C / OS II
- [www.enseirb.fr](http://www.enseirb.fr) Ecole nationale supérieure d'électronique,  
informatique et radiocommunications de bordeaux
- [www.abcelectronique.com](http://www.abcelectronique.com) site généraliste sur l'électronique
- <http://savannah.gnu.org/projects/m68hc11> GNU Development Chain for  
68HC11/68HC12

# **Annexes**

## Annexe 1

### « Les trois lois de la robotique »

**Première loi :**

« Un robot ne peut porter atteinte à un être humain ni, restant passif, laisser cet être humain exposé au danger. »

**Deuxième loi :**

« un robot doit obéir aux ordres donnés par les êtres humains, sauf si de tels ordres sont en contradiction avec la première loi. »

**Troisième loi :**

« un robot doit protéger son existence dans la mesure où cette protection n'est pas en contradiction avec la première ou la deuxième loi. »

*Manuel de la robotique*, 58<sup>ème</sup> édition, 2052 apr. J.-C.

(ISAAC ASIMOV, *I ROBOT*, 1950)



## Annexe 3

### THE L297 STEPPER MOTOR CONTROLLER

The L297 integrates all the control circuitry required to control bipolar and unipolar stepper motors. Used with a dual bridge driver such as the L298N forms a complete microprocessor-to-bipolar stepper motor interface. Unipolar stepper motor can be driven with an L297 plus a quad darlington array. This note describes the operation of the circuit and shows how it is used.

The L297 Stepper Motor Controller is primarily intended for use with an L298N or L298E bridge driver in stepper motor driving applications.

It receives control signals from the system's controller, usually a microcomputer chip, and provides all the necessary drive signals for the power stage. Additionally, it includes two PWM chopper circuits to regulate the current in the motor windings.

With a suitable power actuator the L297 drives two phase bipolar permanent magnet motors, four phase unipolar permanent magnet motors and four phase variable reluctance motors. Moreover, it handles normal, wave drive and half step drive modes. (This is all explained in the section "Stepper Motor Basics").

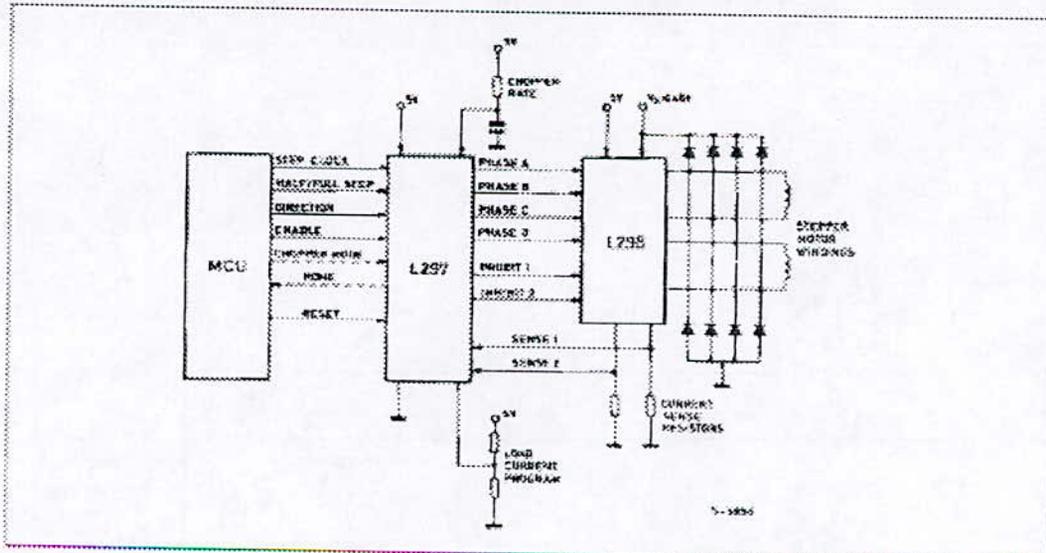
Two versions of the device are available: the regular

L297 and a special version called L297A. The L297A incorporates a step pulse doubler and is designed specifically for floppy-disk head positioning applications.

#### ADVANTAGES

The L297 + driver combination has many advantages: very few components are required (so assembly costs are low, reliability high and little space required), software development is simplified and the burden on the micro is reduced. Further, the choice of a two-chip approach gives a high degree of flexibility—the L298N can be used on its own for DC motors and the L297 can be used with any power stage, including discrete power devices (it provides 20mA drive for this purpose).

**Figure 1:** In this typical configuration an L297 stepper motor controller and L298 dual bridge driver combine to form a complete microprocessor to bipolar stepper motor interface.



## APPLICATION NOTE

For bipolar motors with winding currents up to 2A the L297 should be used with the L296N; for winding currents up to 1A the L293E is recommended (the L292 will also be useful if the chopper isn't needed). Higher currents are obtained with power transistors or darlings and for unipolar motors a darlington array such as the ULN2075B is suggested. The block diagram, figure 1, shows a typical system.

Applications of the L297 can be found almost everywhere ... printers (carriage position, daisy position, paper feed, ribbon feed), typewriters, plotters, numerically controlled machines, robots, floppy disk drives, electronic sewing machines, cash registers, photocopiers, telex machines, electronic carburetors, telecopiers, photographic equipment, paper tape readers, optical character recognisers, electric valves and so on.

The L297 is made with SGS' analog/digital compatible I<sup>2</sup>L technology (like Zodiac) and is assembled in a 20-pin plastic DIP. A 5V supply is used and all signal lines are TTL/CMOS compatible or open collector transistors. High density is one of the key features of the technology so the L297 die is very compact.

## THE L298N AND L293E

Since the L297 is normally used with an L296N or L293E bridge driver a brief review of these devices will make the rest of this note easier to follow.

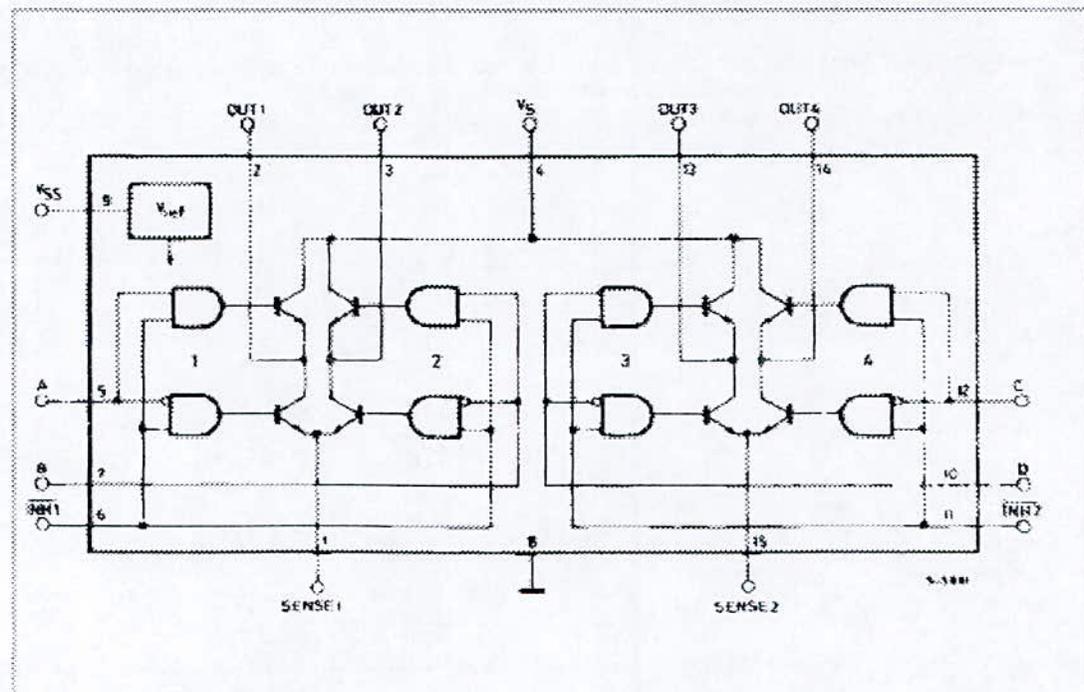
The L298N and L293E contain two bridge driver stages, each controlled by two TTL-level logic inputs and a TTL-level enable input. In addition, the emitter connections of the lower transistors are brought out to external terminals to allow the connection of current sensing resistors (figure 2).

For the L298N SGS' innovative ion-implanted high voltage/high current technology is used, allowing it to handle effective powers up to 160W (46V supply, 2A per bridge). A separate 5V logic supply input is provided to reduce dissipation and to allow direct connection to the L297 or other control logic.

In this note the pins of the L298N are labelled with the pin names of the corresponding L297 terminals to avoid unnecessary confusion.

The L298N is supplied in a 15-lead Multiwatt plastic power package. It's smaller brother, the functionally identical L293E, is packaged in a Powerdip - a copper frame DIP that uses the four center pins to conduct heat to the circuit board copper.

**Figure 2 :** The L298N contains two bridge drivers (four push/pull stages) each controlled by two logic inputs and an enable input. External emitter connections are provided for current sense resistors. The L293E has external connections for all four emitters.



## STEPPER MOTOR BASICS

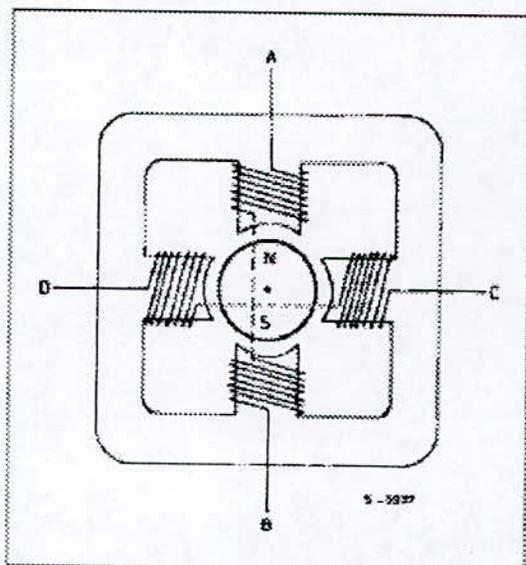
There are two basic types of stepper motor in common use: permanent magnet and variable reluctance. Permanent magnet motors are divided into bipolar and unipolar types.

### BIPOLAR MOTORS

Simplified to the bare essentials, a bipolar permanent magnet motor consists of a rotating permanent magnet surrounded by stator poles carrying the windings (figure 3). Bidirectional drive current is used and the motor is stepped by switching the windings in sequence.

For a motor of this type there are three possible drive sequences.

**Figure 3:** Greatly simplified, a bipolar permanent magnet stepper motor consists of a rotating magnet surrounded by stator poles as shown.



The first is to energize the windings in the sequence AB/CD:BA/DC (BA means that the winding AB is energized but in the opposite sense). This sequence is known as "one phase on" full step or wave drive

mode. Only one phase is energized at any given moment (figure 4a).

The second possibility is to energize both phases together, so that the rotor always aligns itself between two pole positions. Called "two-phase-on" full step, this mode is the normal drive sequence for a bipolar motor and gives the highest torque (figure 4b).

The third option is to energize one phase, then two, then one, etc., so that the motor moves in half step increments. This sequence, known as half step mode, halves the effective step angle of the motor but gives a less regular torque (figure 4c).

For rotation in the opposite direction (counter-clockwise) the same three sequences are used, except of course that the order is reversed.

As shown in these diagrams the motor would have a step angle of 90°. Real motors have multiple poles to reduce the step angle to a few degrees but the number of windings and the drive sequences are unchanged. A typical bipolar stepper motor is shown in figure 5.

### UNIPOLAR MOTORS

A unipolar permanent magnet motor is identical to the bipolar machine described above except that bifilar windings are used to reverse the stator flux, rather than bidirectional drive (figure 6).

This motor is driven in exactly the same way as a bipolar motor except that the bridge drivers are replaced by simple unipolar stages - four darlington's or a quad darlington array. Clearly, unipolar motors are more expensive because they have twice as many windings. Moreover, unipolar motors give less torque for a given motor size because the windings are made with thinner wire. In the past unipolar motors were attractive to designers because they simplify the driver stage. Now that monolithic push pull drivers like the L298N are available bipolar motors are becoming more popular.

All permanent magnet motors suffer from the counter EMF generated by the rotor, which limits the rotation speed. When very high slewing speeds are necessary a variable reluctance motor is used.

APPLICATION NOTE

Figure 4 : The three drive sequences for a two phase bipolar stepper motor. Clockwise rotation is shown.

Figure 4a : Wave drive (one phase on).

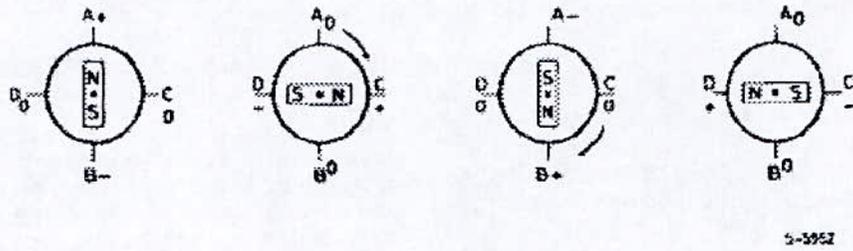


Figure 4b : Two phase on drive.

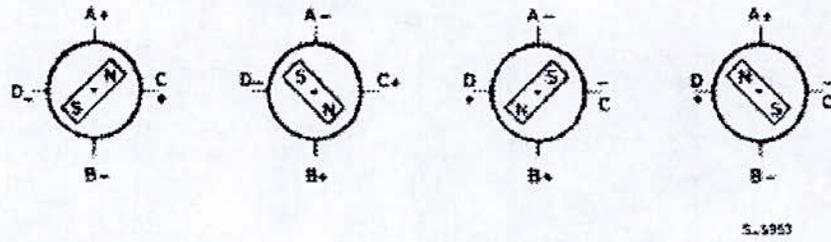


Figure 4c : Half step drive.

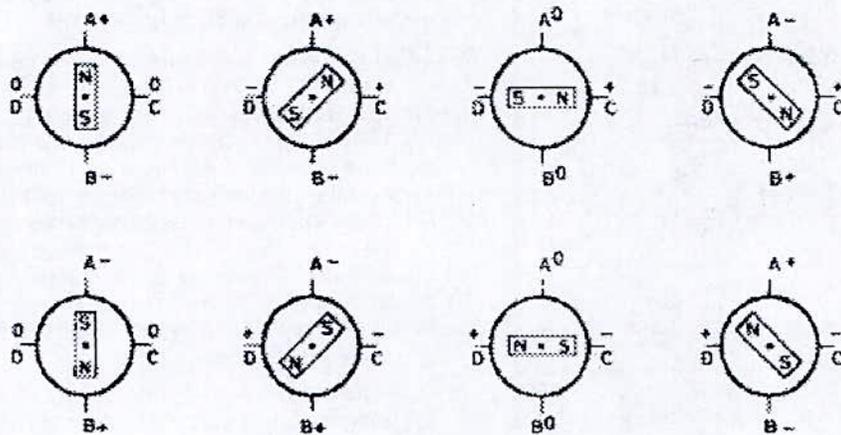


Figure 5 : A real motor. Multiple poles are normally employed to reduce the step angle to a practical value. The principle of operation and drive sequences remain the same.

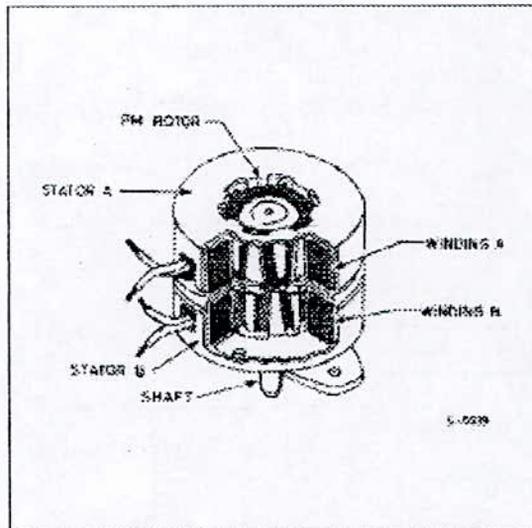
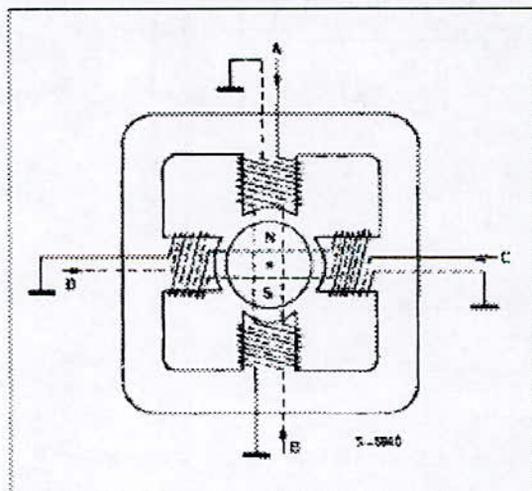


Figure 6 : A unipolar PM motor uses bifilar windings to reverse the flux in each phase.



#### VARIABLE RELUCTANCE MOTORS

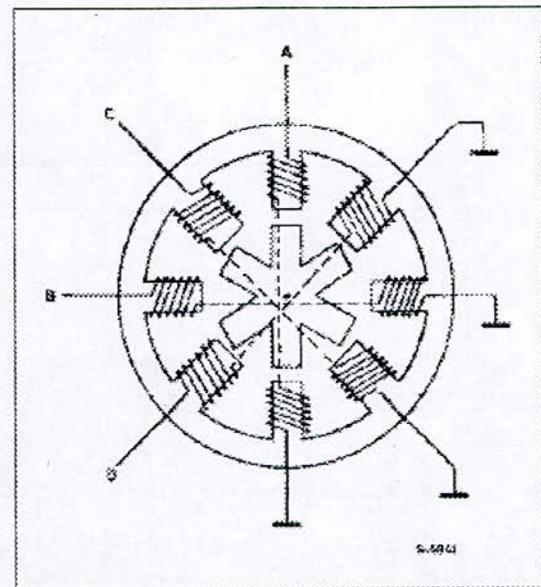
A variable reluctance motor has a non-magnetized soft iron rotor with fewer poles than the stator (figure 7). Unipolar drive is used and the motor is stepped by energizing stator pole pairs to align the rotor with the pole pieces of the energized winding.

Once again three different phase sequences can be used. The wave drive sequence is A/C/B/D; two-

phase-on is AC/CB/BD/DA and the half step sequence is A/AC/C/BC/B/BD/D/DA. Note that the step angle for the motor shown above is 15°, not 45°.

As before, practical motors normally employ multiple poles to give a much smaller step angle. This does not, however, affect the principle of operation of the drive sequences.

Figure 7 : A variable reluctance motor has a soft iron rotor with fewer poles than the stator. The step angle is 15° for this motor.



#### GENERATING THE PHASE SEQUENCES

The heart of the L297 block diagram, figure 8, is a block called the translator which generates suitable phase sequences for half step, one-phase-on full step and two-phase-on full step operation. This block is controlled by two mode inputs – direction (CW/CCW) and HALF/FULL – and a step clock which advances the translator from one step to the next.

Four outputs are provided by the translator for subsequent processing by the output logic block which implements the inhibit and chopper functions.

Internally the translator consists of a 3-bit counter plus some combinational logic which generates a basic eight-step gray code sequence as shown in figure 9. All three drive sequences can be generated easily from this master sequence. This state sequence corresponds directly to half step mode, selected by a high level on the HALF/FULL input.

## APPLICATION NOTE

The output waveforms for this sequence are shown in figure 10.

Note that two other signals,  $\overline{INH1}$  and  $\overline{INH2}$  are generated in this sequence. The purpose of these signals is explained a little further on.

The full step modes are both obtained by skipping alternate states in the eight-step sequence. What happens is that the step clock bypasses the first stage of the 3-bit counter in the translator. The least significant bit of this counter is not affected therefore

the sequence generated depends on the state of the translator when full step mode is selected (the HALF/FULL input brought low).

If full step mode is selected when the translator is at any odd-numbered state we get the two-phase-on full step sequence shown in figure 11.

By contrast, one-phase-on full step mode is obtained by selecting full step mode when the translator is at an even-numbered state (figure 12).

Figure 8 : The L297 contains translator (phase sequence generator), a dual PWM chopper and output control logic.

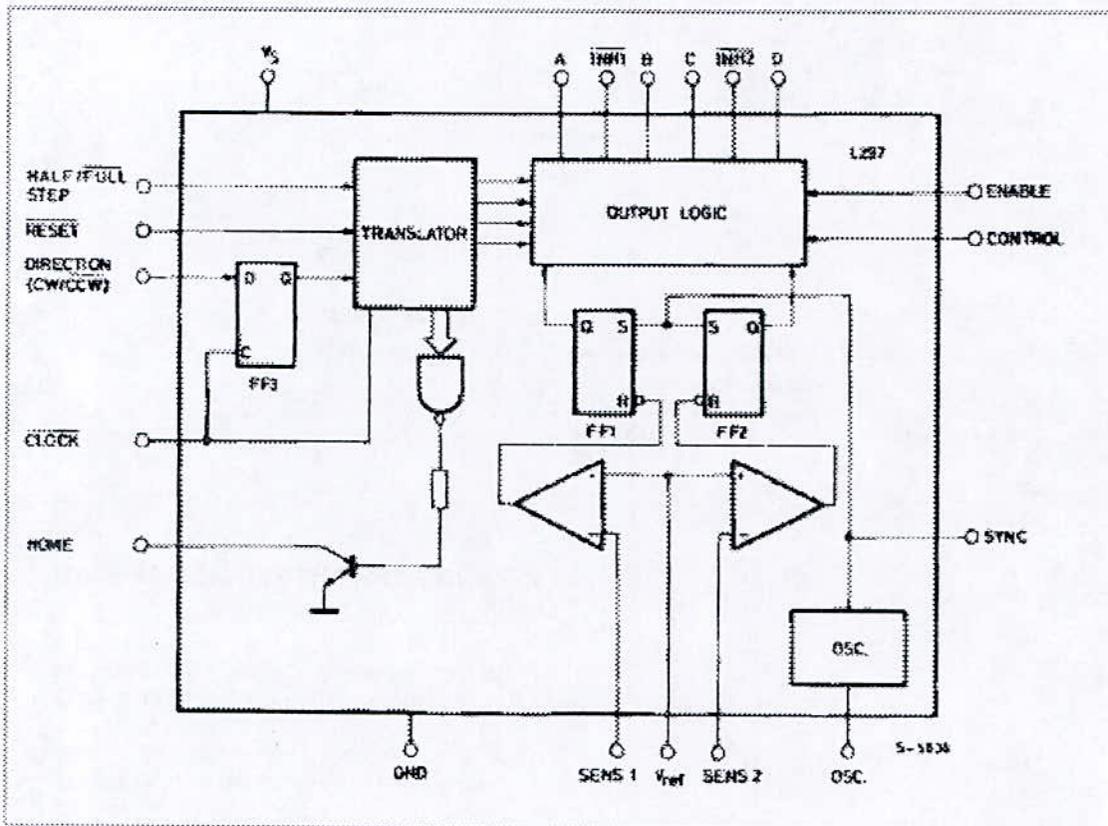


Figure 9 : The eight step master sequence of the translator. This corresponds to half step mode. Clockwise rotation is indicated.

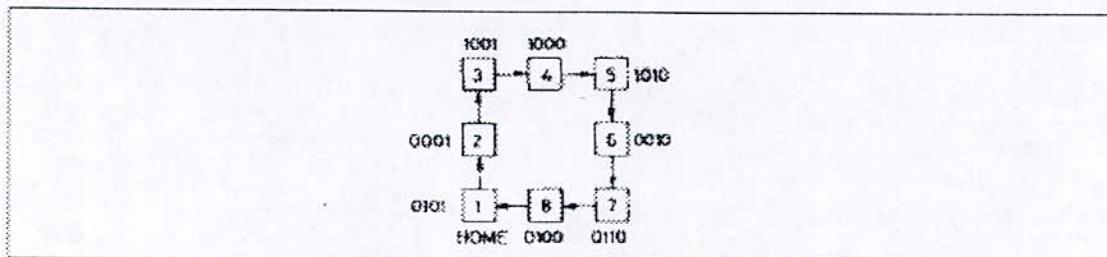


Figure f0 : The output waveforms corresponding to the half step sequence. The chopper action is not shown.

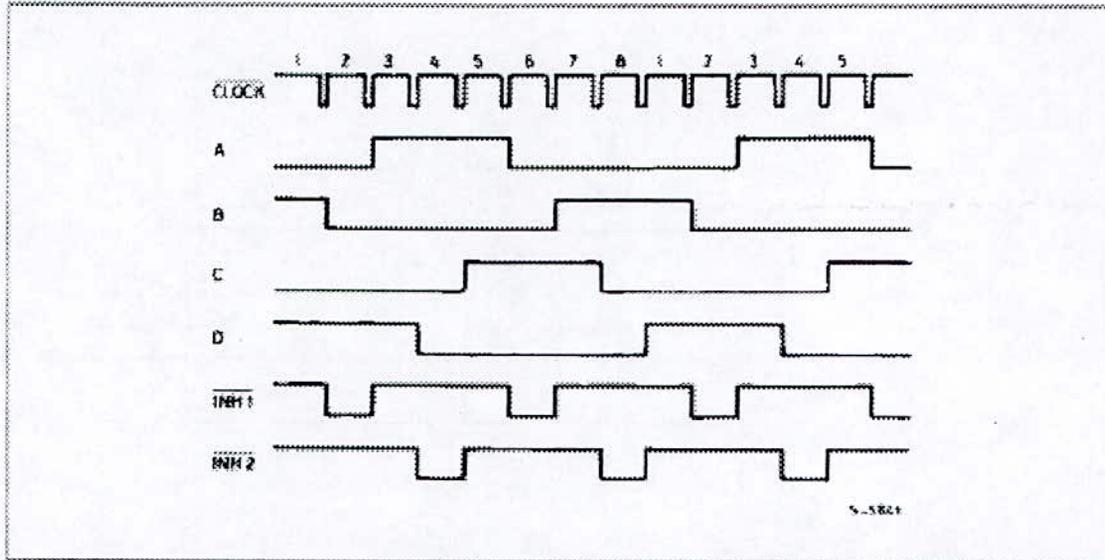
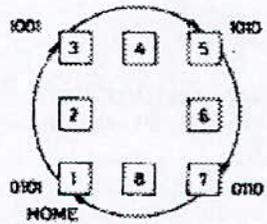
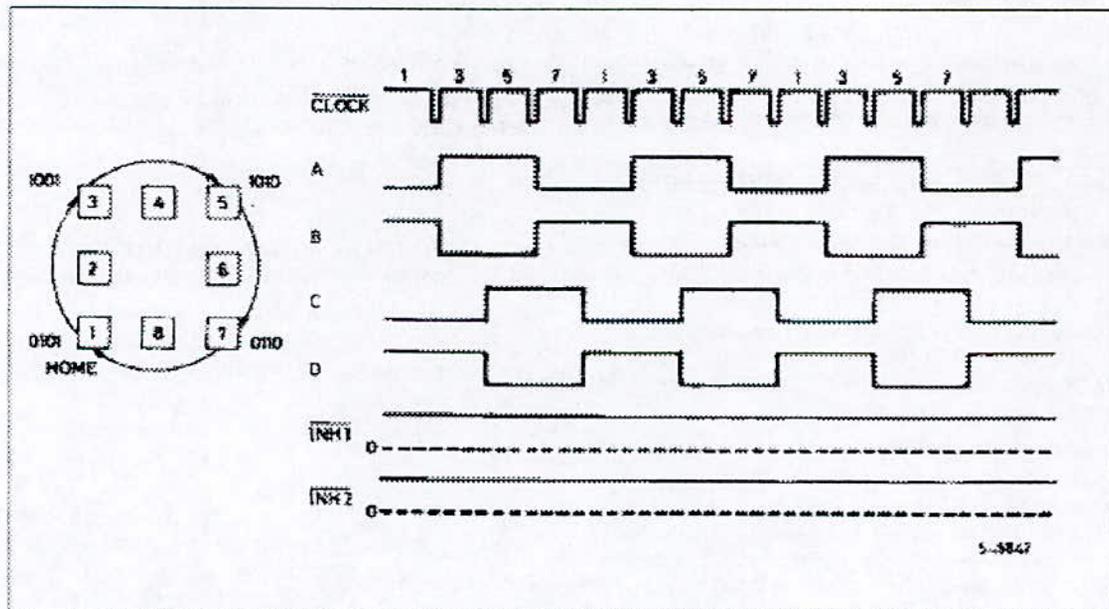
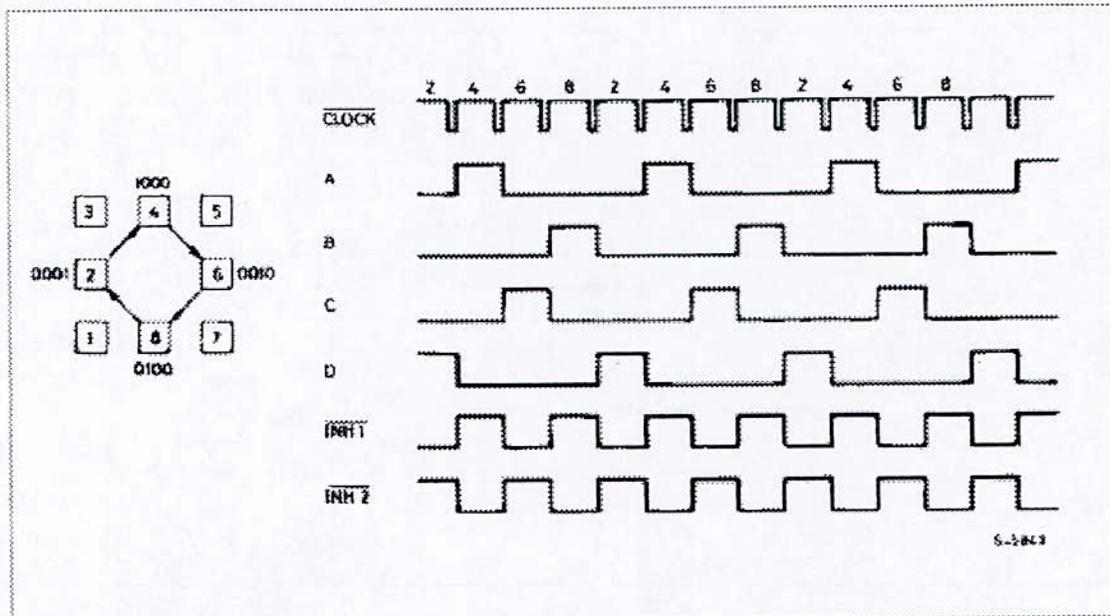


Figure f1 : State sequence and output waveforms for the two phase on sequence.  $\overline{\text{INH1}}$  and  $\overline{\text{INH2}}$  remain high throughout.



## APPLICATION NOTE

Figure 12 : State Sequence and Output Waveforms for Wave Drive (one phase on).



### $\overline{\text{INH1}}$ AND $\overline{\text{INH2}}$

In half step and one-phase-on full step modes two other signals are generated:  $\overline{\text{INH1}}$  and  $\overline{\text{INH2}}$ . These are inhibit signals which are coupled to the L298N's enable inputs and serve to speed the current decay when a winding is switched off.

Since both windings are energized continuously in two-phase-on full step mode no winding is ever switched off and these signals are not generated.

To see what these signals do let's look at one half of the L298N connected to the first phase of a two-phase bipolar motor (figure 13). Remember that the L298N's A and B inputs determine which transistor in each push/pull pair will be on.  $\overline{\text{INH1}}$ , on the other hand, turns off all four transistors.

Assume that A is high, B low and current flowing through Q1, Q4 and the motor winding. If A is now brought low the current would recirculate through D2, Q4 and  $R_s$ , giving a slow decay and increased dissipation in  $R_s$ . If, on the other hand, A is brought low and  $\overline{\text{INH1}}$  is activated, all four transistors are turned off. The current recirculates in this case from ground to  $V_s$  via D2 and D3, giving a faster decay thus allowing faster operation of the motor. Also, since the recirculation current does not flow through  $R_s$ , a less expensive resistor can be used.

Exactly the same thing happens with the second winding, the other half of the L298 and the signals C, D and  $\overline{\text{INH2}}$ .

The  $\overline{\text{INH1}}$  and  $\overline{\text{INH2}}$  signals are generated by OR functions:

$$A + B = \overline{\text{INH1}} \quad C + D = \overline{\text{INH2}}$$

However, the output logic is more complex because inhibit lines are also used by the dropper, as we will see further on.

### OTHER SIGNALS

Two other signals are connected to the translator block: the RESET input and the HOME output

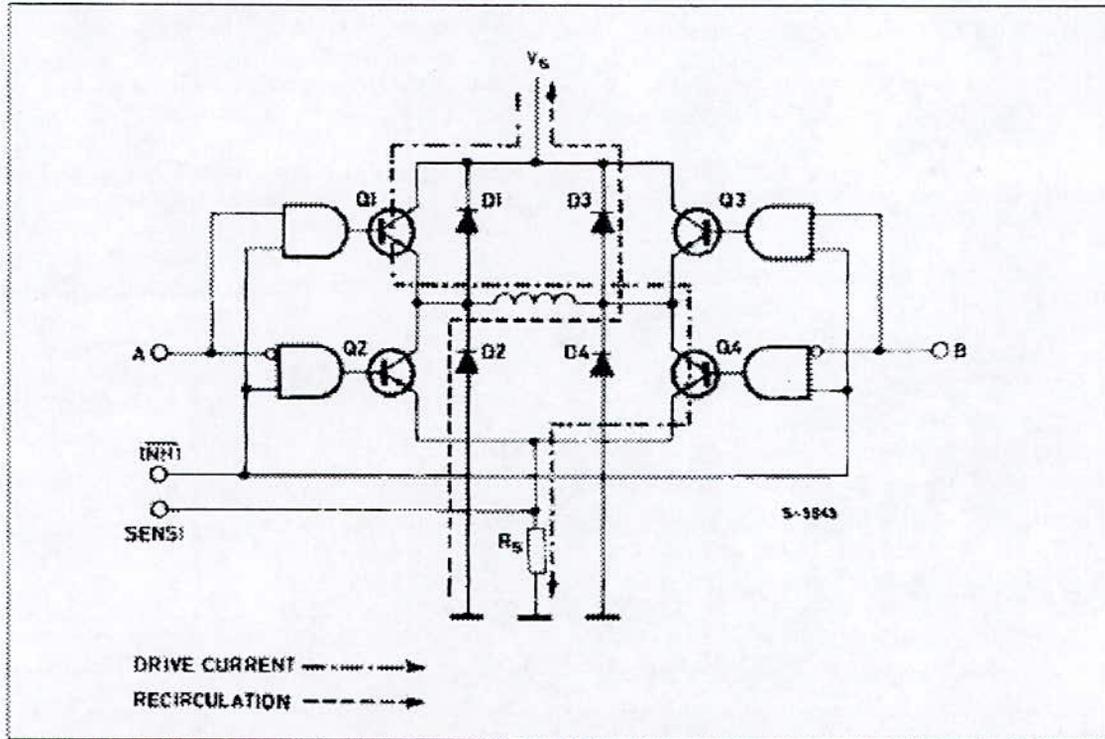
RESET is an asynchronous reset input which restores the translator block to the home position (state 1, ABCD = 0101). The HOME output (open collector) signals this condition and is intended to be ANDed with the output of a mechanical home position sensor.

Finally, there is an ENABLE input connected to the output logic. A low level on this input brings  $\overline{\text{INH1}}$ ,  $\overline{\text{INH2}}$ , A, B, C and D low. This input is useful to disable the motor driver when the system is initialized.

### LOAD CURRENT REGULATION

Some form of load current control is essential to obtain good speed and torque characteristics. There are several ways in which this can be done – switching the supply between two voltages, pulse rate modulation, chopping or pulse width modulation chopping.

Figure 13 : When a winding is switched off the inhibit input is activated to speed current decay. If this were not done the current would recirculate through D2 and Q4 in this example. Dissipation in  $R_s$  is also reduced.

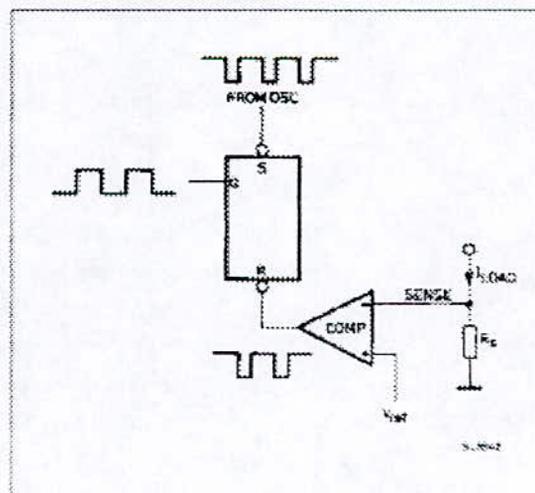


The L297 provides load current control in the form of two PWM choppers, one for each phase of a bipolar motor or one for each pair of windings for a unipolar motor. (In a unipolar motor the A and B windings are never energized together so they can share a chopper; the same applies to C and D).

Each chopper consists of a comparator, a flip flop and an external sensing resistor. A common on chip oscillator supplies pulses at the chopper rate to both choppers.

In each chopper (figure 14) the flip flop is set by each pulse from the oscillator, enabling the output and allowing the load current to increase. As it increases the voltage across the sensing resistor increases, and when this voltage reaches  $V_{ref}$  the flip flop is reset, disabling the output until the next oscillator pulse arrives. The output of this circuit (the flip flop's Q output) is therefore a constant rate PWM signal. Note that  $V_{ref}$  determines the peak load current.

Figure 14 : Each chopper circuit consists of a comparator, flip flop and external sense resistor. A common oscillator clocks both circuits.



## APPLICATION NOTE

### PHASE CHOPPING AND INHIBIT CHOPPING

The chopper can act on either the phase lines (ABCD) or on the inhibit lines INH1 and INH2. An input named CONTROL decides which. Inhibit chopping is used for unipolar motors but you can choose between phase chopping and inhibit chopping for bipolar motors. The reasons for this choice are best explained with another example.

First let's examine the situation when the phase lines are chopped.

As before, we are driving a two phase bipolar motor and A is high, B low (figure 15). Current therefore flows through Q1, winding, Q4 and  $R_s$ . When the voltage across  $R_s$  reaches  $V_{ref}$  the chopper brings B high to switch off the winding.

The energy stored in the winding is dissipated by current recirculating through Q1 and D3. Current decay through this path is rather slow because the volt-

age on the winding is low ( $V_{CEsat Q1} + V_{D3}$ ) (figure 16).

Why is B pulled high, why push A low? The reason is to avoid the current decaying through  $R_s$ . Since the current recirculates in the upper half of the bridge, current only flows in the sensing resistor when the winding is driven. Less power is therefore dissipated in  $R_s$  and we can get away with a cheaper resistor.

This explains why phase chopping is not suitable for unipolar motors: when the A winding is driven the chopper acts on the B winding. Clearly, this is no use at all for a variable reluctance motor and would be slow and inefficient for a bifilar wound permanent magnet motor.

The alternative is to tie the CONTROL input to ground so that the chopper acts on INH1 and INH2. Looking at the same example, A is high and B low. Q1 and Q4 are therefore conducting and current flows through Q1, the winding, Q4 and  $R_s$ . (figure 17).

**Figure 15:** Phase Chopping. In this example the current X is interrupted by activating B, giving the recirculation path Y. The alternative, de-activating A, would give the recirculation path Z, increasing dissipation in  $R_s$ .

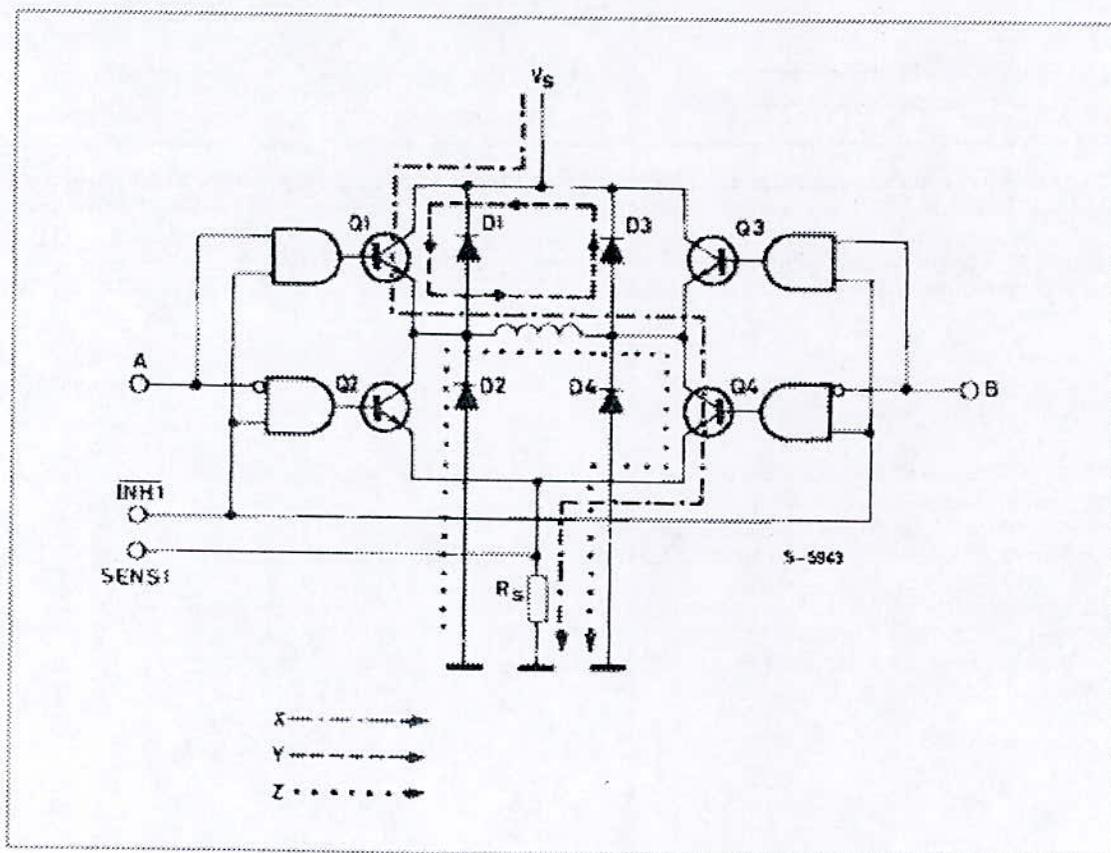


Figure 16 : Phase Chopping Waveforms. The example shows AB winding energized with A positive with respect to B. Control is high.

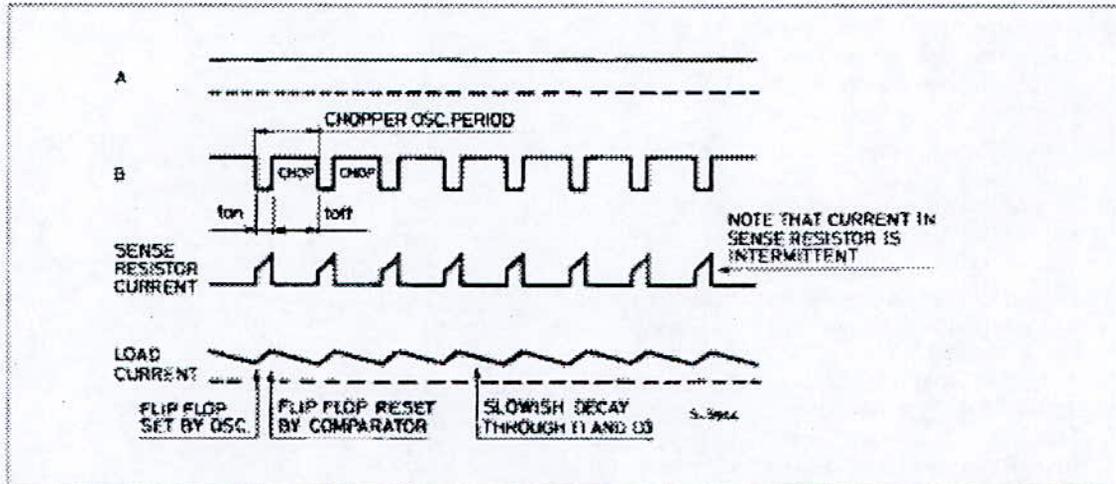
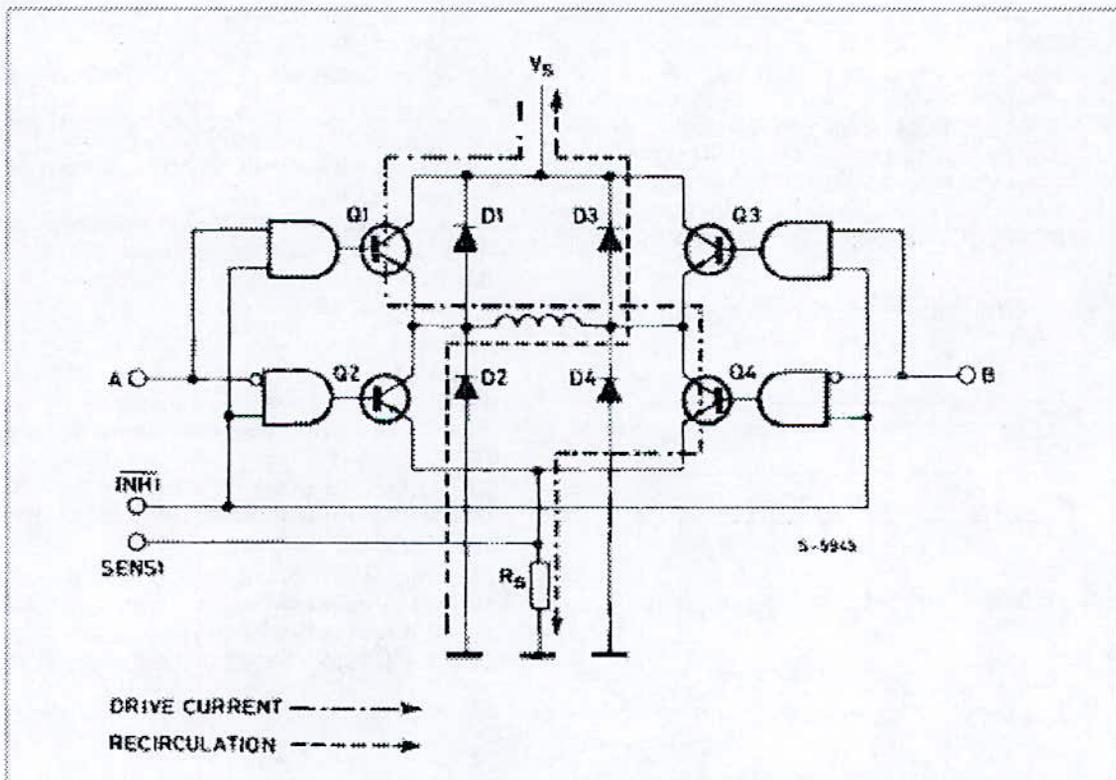


Figure 17 : Inhibit Chopping. The drive current (Q1, winding, Q4) in this case is interrupted by activating INHT. The decay path through D2 and D3 is faster than the path Y of Figure 15.



## APPLICATION NOTE

In this case when the voltage across  $R_S$  reaches  $V_{REF}$  the chopper flip flop is reset and INH1 activated (brought low). INH1, remember, turns off all four transistors therefore the current recirculates from ground, through D2, the winding and D3 to  $V_S$ . Discharged across the supply, which can be up to 46V, the current decays very rapidly (figure 18).

The usefulness of this second faster decay option is fairly obvious: it allows fast operation with bipolar motors and it is the only choice for unipolar motors. But why do we offer the slower alternative, phase chopping?

The answer is that we might be obliged to use a low chopper rate with a motor that does not store much energy in the windings. If the decay is very fast the average motor current may be too low to give on useful torque. Low chopper rates may, for example, be imposed if there is a larger motor in the same system. To avoid switching noise on the ground plane all drivers should be synchronized and the chopper rate is therefore determined by the largest motor in the system.

Multiple L297s are synchronized easily using the SYNC pin. This pin is the squarewave output of the on-chip oscillator and the clock input for the choppers. The first L297 is fitted with the oscillator components and outputs a squarewave signal on this pin (figure 19). Subsequent L297s do not need the oscillator components and use SYNC as a clock input. An external clock may also be injected at this terminal if an L297 must be synchronized to other system components.

Figure 18 : Inhibit Chopper Waveforms. Winding AB is energized and CONTROL is low.

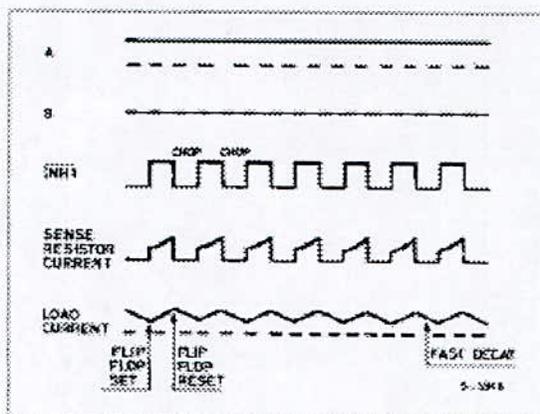
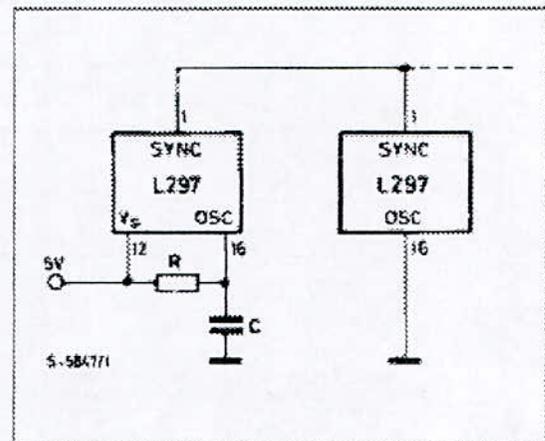


Figure 19 : The Chopper oscillator of multiple L297s are synchronized by connecting the SYNC Inputs together.



### THE L297A

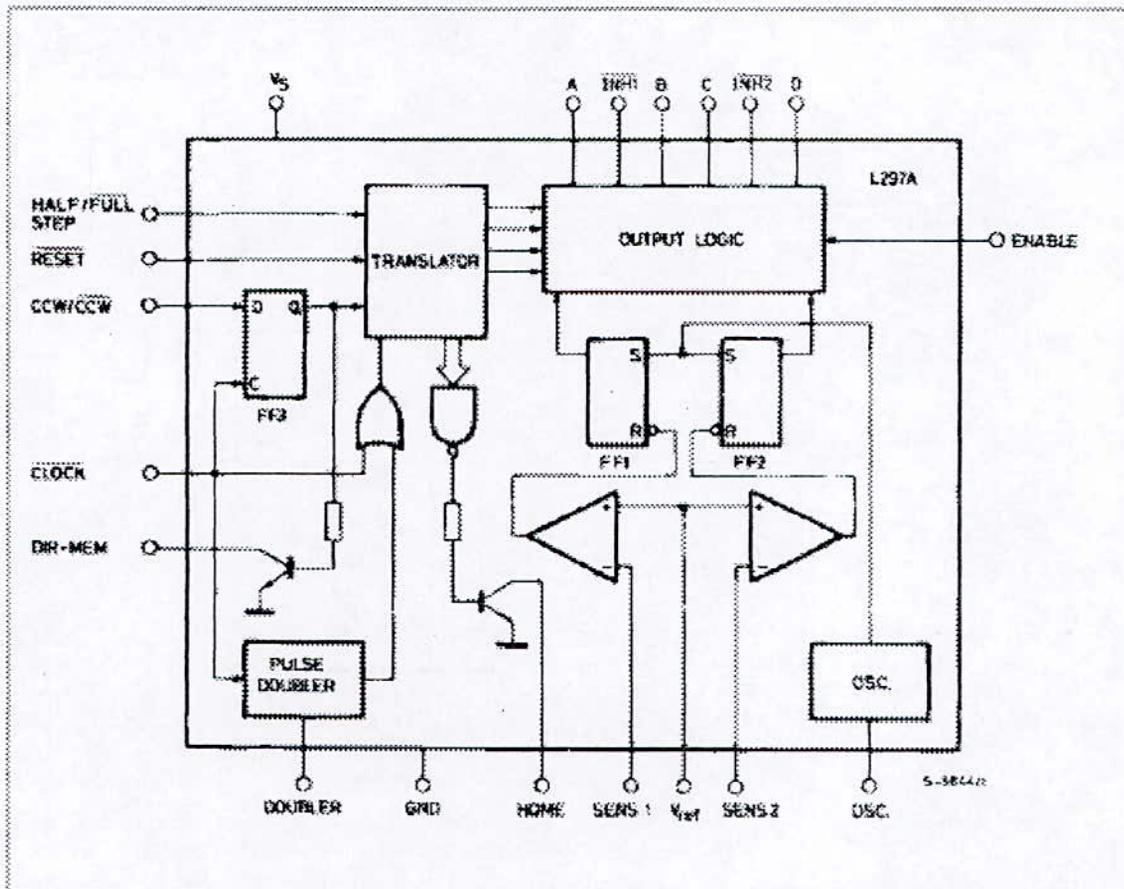
The L297A is a special version of the L297 developed originally for head positioning in floppy disk drives. It can, however, be used in other applications.

Compared to the standard L297 the difference is the addition of a pulse doubler on the step clock input and the availability of the output of the direction flip flop (block diagram, figure 20). To add these functions while keeping the low-cost 20-pin package the CONTROL and SYNC pins are not available on this version (they are not needed anyway). The chopper acts on the ABCD phase lines.

The pulse doubler generates a ghost pulse internally for each input clock pulse. Consequently the translator moves two steps for each input pulse. An external RC network sets the delay time between the input pulse and ghost pulse and should be chosen so that the ghost pulses fall roughly halfway between input pulses, allowing time for the motor to step.

This feature is used to improve positioning accuracy. Since the angular position error of a stepper motor is noncumulative (it cancels out to zero every four steps in a four step sequence motor) accuracy is improved by stepping two of four steps at a time.

Figure 20 : The L297A, includes a clock pulse doubler and provides an output from the direction flip flop (DIR - MEM).



#### APPLICATION HINTS

Bipolar motors can be driven with an L297, an L298N or L293E bridge driver and very few external components (figure 21). Together these two chips form a complete microprocessor-to-stepper motor interface. With an L298N this configuration drives motors with winding currents up to 2A; for motors up to 1A per winding and L293E is used. If the PWM choppers are not required an L293 could also be used (it doesn't have the external emitter connections for sensing resistors) but the L297 is underutilized. If very high powers are required the bridge driver is replaced by an equivalent circuit made with discrete transistors. For currents to 3.5A two L298N's with paralleled outputs may be used.

For unipolar motors the best choice is a quad darlington array. The L702B can be used if the choppers are not required but an ULN2075E is preferred.

This quad darlington has external emitter connections which are connected to sensing resistors (figure 22). Since the chopper acts on the inhibit lines, four AND gates must be added in this application.

Also shown in the schematic are the protection diodes.

In all applications where the choppers are not used it is important to remember that the sense inputs must be grounded and  $V_{REF}$  connected either to  $V_s$  or any potential between  $V_s$  and ground.

The chopper oscillator frequency is determined by the RC network on pin 16. The frequency is roughly  $1/0.7 RC$  and R must be more than 10 k $\Omega$ . When the L297A's pulse doubler is used, the delay time is determined by the network  $R_d C_d$  and is approximately  $0.75 R_d C_d$ .  $R_d$  should be in the range 3 k $\Omega$  to 100 k $\Omega$  (figure 23).

## APPLICATION NOTE

Figure 21 : This typical application shows an L297 and L298N driving a Bipolar Stepper Motor with phase currents up to 2A.

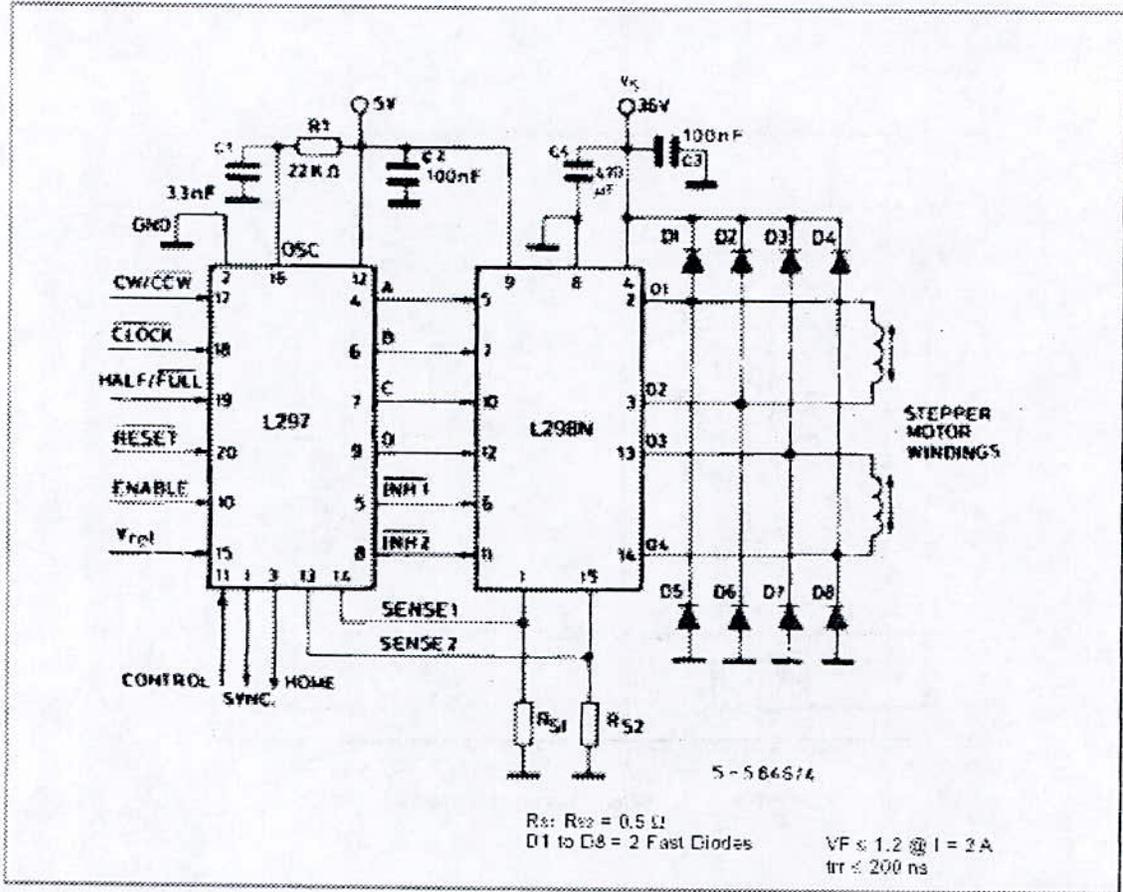


Figure 22 : For Unipolar Motors a Quad Darlington Array is coupled to the L297. Inhibit chopping is used so the four AND gates must be added.

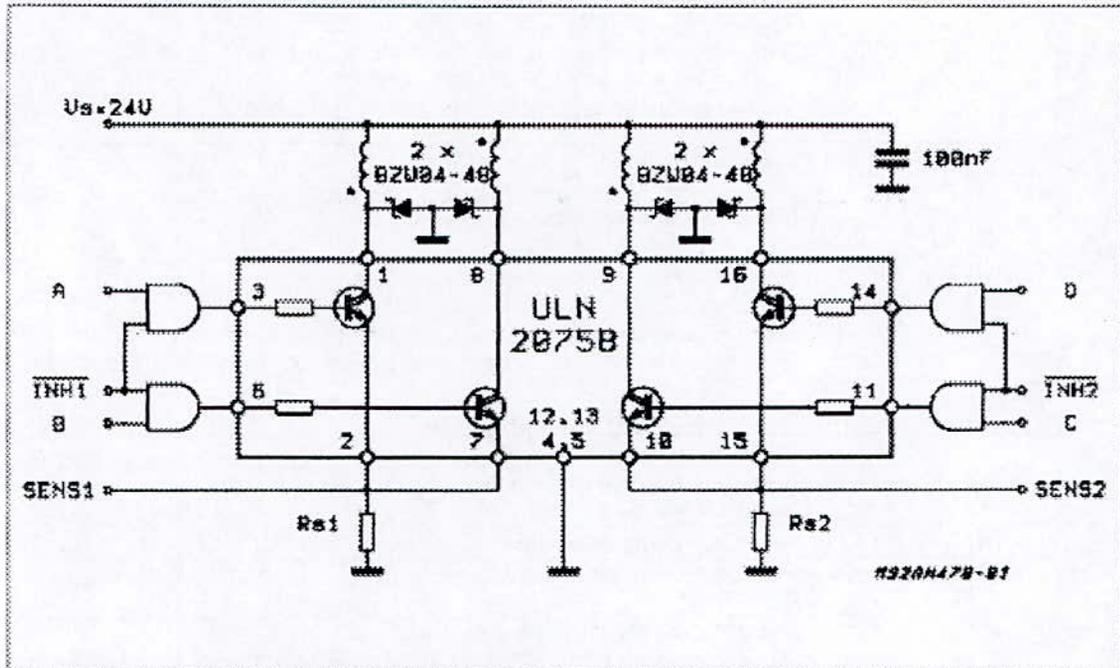
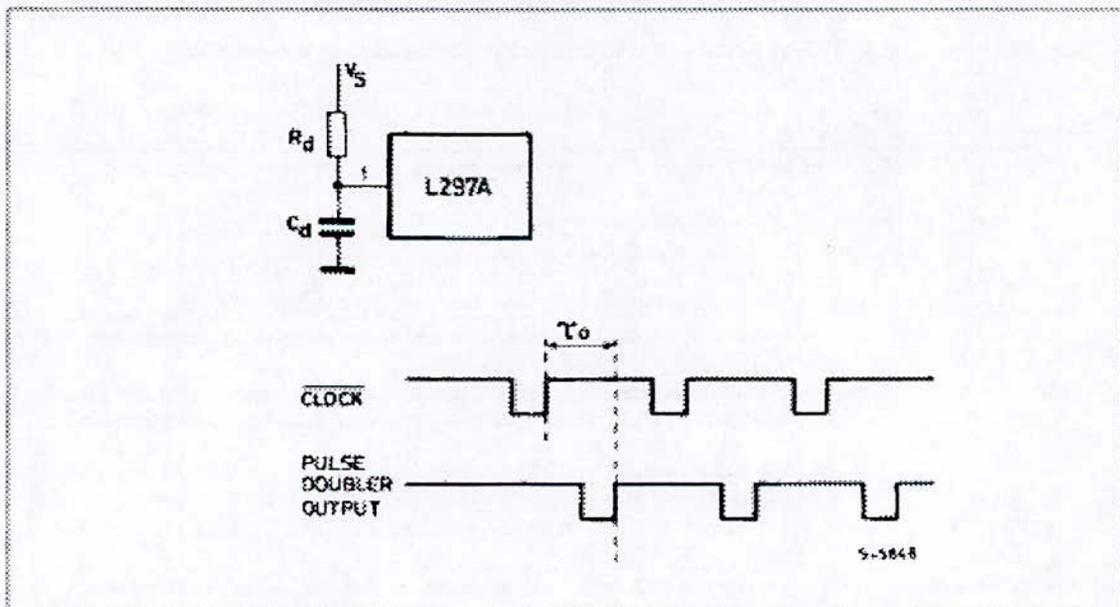


Figure 23 : The Clock pulse doubler inserts a ghost pulse  $t_0$  seconds after the Input clock pulse.  $R_d C_d$  is chosen to give a delay of approximately half the Input clock period.

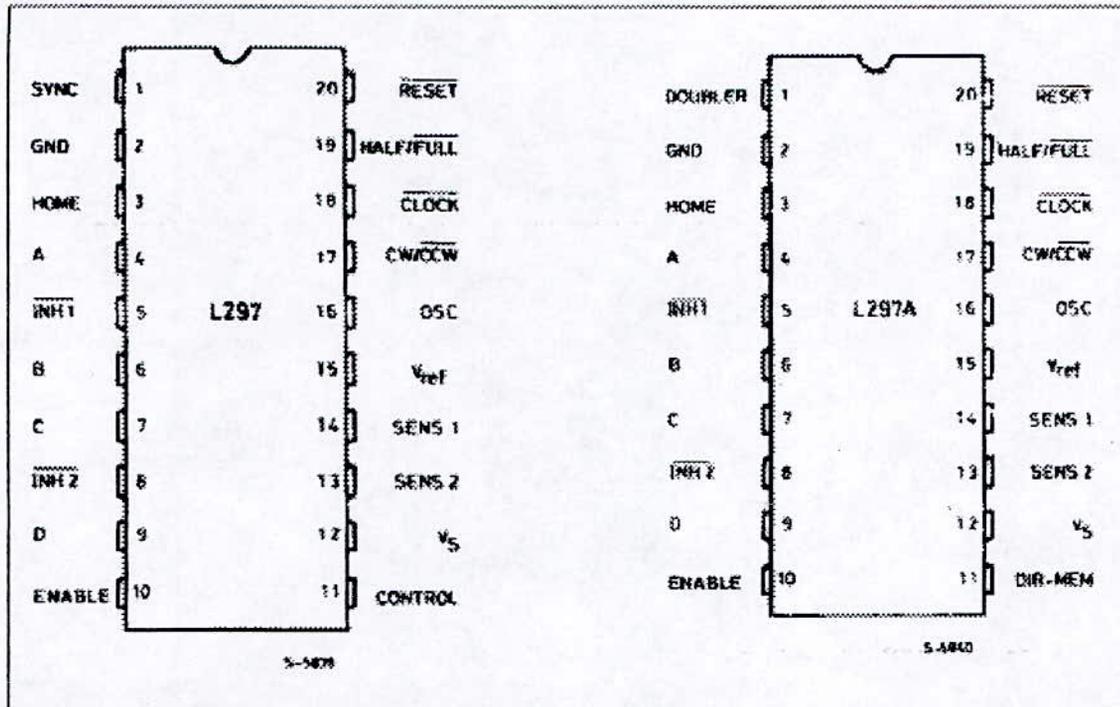


## APPLICATION NOTE

### PIN FUNCTIONS - L297

N°	NAME	FUNCTION
1	SYNC	Output of the on-chip chopper oscillator. The SYNC connections of all L297s to be synchronized are connected together and the oscillator components are omitted on all but one. If an external clock source is used it is injected at this terminal.
2	GND	Ground connection.
3	HOME	Open collector output that indicates when the L297 is in its initial state (ABCD = 0101). The transistor is open when this signal is active.
4	A	Motor phase A drive signal for power stage.
5	INH1	Active low inhibit control for driver stage of A and B phases. When a bipolar bridge is used this signal can be used to ensure fast decay of load current when a winding is de-energized. Also used by chopper to regulate load current if CONTROL input is low.
6	B	Motor phase B drive signal for power stage.
7	C	Motor phase C drive signal for power stage.
8	INH2	Active low inhibit control for drive stages of C and D phases. Same functions as INH1.
9	D	Motor phase D drive signal for power stage.
10	ENABLE	Chip enable input. When low (inactive) INH1, INH2, A, B, C and D are brought low.
11	CONTROL	Control input that defines action of chopper. When low chopper acts on INH1 and INH2; when high chopper acts on phase lines ABCD.
12	V <sub>s</sub>	5V supply input.
13	SENS <sub>2</sub>	Input for load current sense voltage from power stages of phases C and D.
14	SENS <sub>1</sub>	Input for load current sense voltage from power stages of phases A and B.
15	V <sub>ref</sub>	Reference voltage for chopper circuit. A voltage applied to this pin determines the peak load current.
16	OSC	An RC network (R to V <sub>CC</sub> , C to ground) connected to this terminal determines the chopper rate. This terminal is connected to ground on all but one device in synchronized multi-L297 configurations. $f = 1/0.69 RC$
17	CW/CCW	Clockwise/counterclockwise direction control input. Physical direction of motor rotation also depends on connection of windings. Synchronized internally therefore direction can be changed at any time.
18	CLDCK	Step clock. An active low pulse on this input advances the motor one increment. The step occurs on the rising edge of this signal.
19	HALF/FULL	Half/full step select input. When high selects half step operation, when low selects full step operation. One-phase-on full step mode is obtained by selecting FULL when the L297's translator is at an even-numbered state. Two-phase-on full step mode is set by selecting FULL when the translator is at an odd numbered position. (The home position is designate state 1).
20	RESET	Reset input. An active low pulse on this input restores the translator to the home position (state 1, ABCD = 0101).
PIN FUNCTIONS - L297A (Pin function of the L297A are identical to those of the L297 except for pins 1 and 11)		
1	DOUBLER	An RC network connected to this pin determines the delay between an input clock pulse and the corresponding ghost pulse.
11	DIR-MEM	Direction Memory. Inverted output of the direction flip flop. Open collector output.

Figure 24 : Pin connections.



## APPLICATION NOTE

---

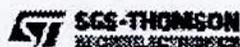
Information furnished is believed to be accurate and reliable. However, SGS-THOMSON Microelectronics assumes no responsibility for the consequences of use of such information nor for any infringement of patents or other rights of third parties which may result from its use. No license is granted by implication or otherwise under any patent or patent rights of SGS-THOMSON Microelectronics. Specifications mentioned in this publication are subject to change without notice. This publication supersedes and replaces all information previously supplied. SGS-THOMSON Microelectronics products are not authorized for use as critical components in life support devices or systems without express written approval of SGS-THOMSON Microelectronics.

© 1995 SGS-THOMSON Microelectronics - All Rights Reserved

SGS-THOMSON Microelectronics GROUP OF COMPANIES

Australia - Brazil - France - Germany - Hong Kong - Italy - Japan - Korea - Malaysia - Malta - Morocco - The Netherlands - Singapore - Spain - Sweden - Switzerland - Taiwan - Thailand - United Kingdom - U.S.A.

18/18



## Annexe 4



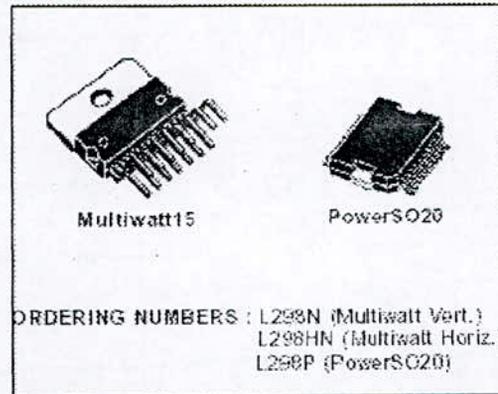
L298

### DUAL FULL-BRIDGE DRIVER

- OPERATING SUPPLY VOLTAGE UP TO 46 V
- TOTAL DC CURRENT UP TO 4 A
- LOW SATURATION VOLTAGE
- OVERTEMPERATURE PROTECTION
- LOGICAL "0" INPUT VOLTAGE UP TO 1.5 V (HIGH NOISE IMMUNITY)

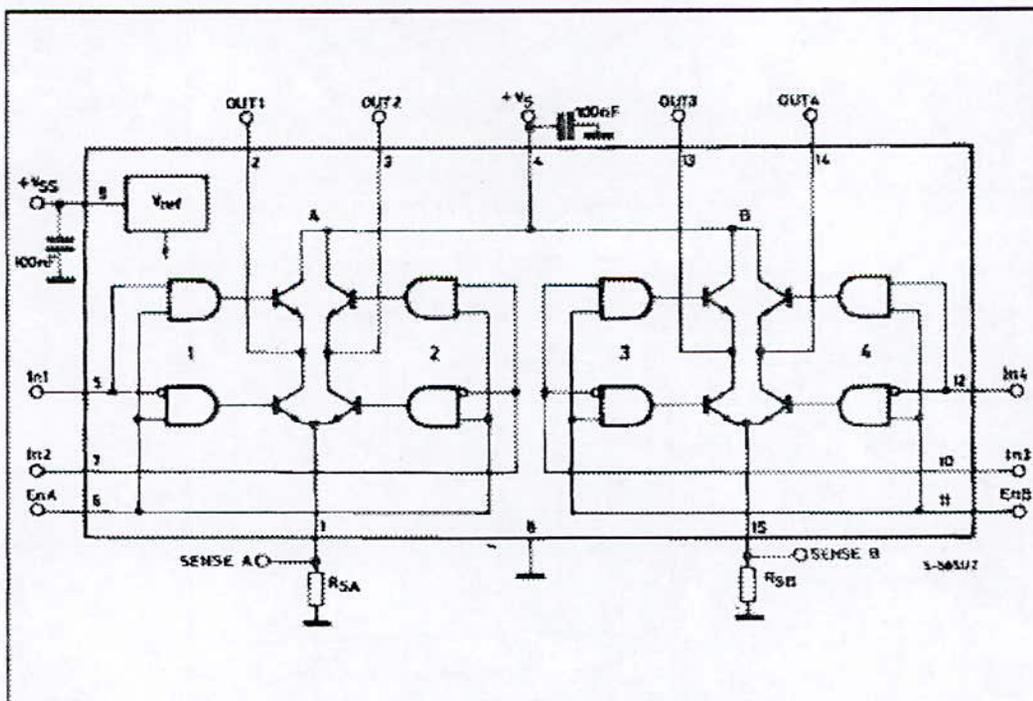
#### DESCRIPTION

The L298 is an integrated monolithic circuit in a 15-lead Multiwatt and PowerSO20 packages. It is a high voltage, high current dual full-bridge driver designed to accept standard TTL logic levels and drive inductive loads such as relays, solenoids, DC and stepping motors. Two enable inputs are provided to enable or disable the device independently of the input signals. The emitters of the lower transistors of each bridge are connected together and the corresponding external terminal can be used for the connection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.



nection of an external sensing resistor. An additional supply input is provided so that the logic works at a lower voltage.

#### BLOCK DIAGRAM



ELECTRICAL CHARACTERISTICS (continued)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
$T_1 (V_0)$	Source Current Turn-off Delay	$0.5V_i$ to $0.9I_L$ (2); (4)		1.5		$\mu s$
$T_2 (V_0)$	Source Current Fall Time	$0.9I_L$ to $0.1I_L$ (2); (4)		0.2		$\mu s$
$T_3 (V_0)$	Source Current Turn-on Delay	$0.5V_i$ to $0.1I_L$ (2); (4)		2		$\mu s$
$T_4 (V_0)$	Source Current Rise Time	$0.1I_L$ to $0.9I_L$ (2); (4)		0.7		$\mu s$
$T_5 (V_0)$	Sink Current Turn-off Delay	$0.5V_i$ to $0.9I_L$ (3); (4)		0.7		$\mu s$
$T_6 (V_0)$	Sink Current Fall Time	$0.9I_L$ to $0.1I_L$ (3); (4)		0.25		$\mu s$
$T_7 (V_0)$	Sink Current Turn-on Delay	$0.5V_i$ to $0.9I_L$ (3); (4)		1.5		$\mu s$
$T_8 (V_0)$	Sink Current Rise Time	$0.1I_L$ to $0.9I_L$ (3); (4)		0.2		$\mu s$
$f_c (V_0)$	Commutation Frequency	$I_L = 2A$		25	40	KHz
$T_1 (V_{en})$	Source Current Turn-off Delay	$0.5V_{en}$ to $0.9I_L$ (2); (4)		3		$\mu s$
$T_2 (V_{en})$	Source Current Fall Time	$0.9I_L$ to $0.1I_L$ (2); (4)		1		$\mu s$
$T_3 (V_{en})$	Source Current Turn-on Delay	$0.5V_{en}$ to $0.1I_L$ (2); (4)		0.3		$\mu s$
$T_4 (V_{en})$	Source Current Rise Time	$0.1I_L$ to $0.9I_L$ (2); (4)		0.4		$\mu s$
$T_5 (V_{en})$	Sink Current Turn-off Delay	$0.5V_{en}$ to $0.9I_L$ (3); (4)		2.2		$\mu s$
$T_6 (V_{en})$	Sink Current Fall Time	$0.9I_L$ to $0.1I_L$ (3); (4)		0.35		$\mu s$
$T_7 (V_{en})$	Sink Current Turn-on Delay	$0.5V_{en}$ to $0.9I_L$ (3); (4)		0.25		$\mu s$
$T_8 (V_{en})$	Sink Current Rise Time	$0.1I_L$ to $0.9I_L$ (3); (4)		0.1		$\mu s$

- 1) Sensing voltage can be  $-1V$  for  $t_r < 50\mu s$ ; in steady state  $V_{sens}$  min  $-0.5V$ .
- 2) See fig. 2.
- 3) See fig. 4.
- 4) The load must be a pure resistor.

Figure 1 : Typical Saturation Voltage vs. Output Current

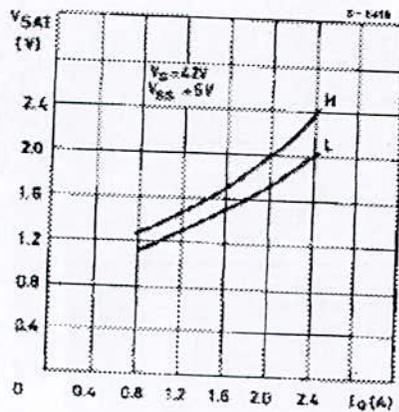
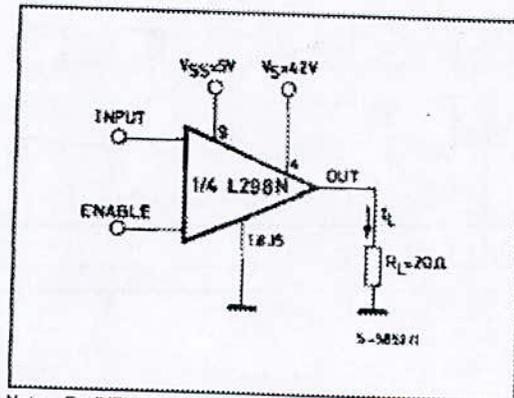


Figure 2 : Switching Times Test Circuits.



Notes : For INPUT Switching, set EN = H  
For ENABLE Switching set IN = H

## PIN FUNCTIONS (refer to the block diagram)

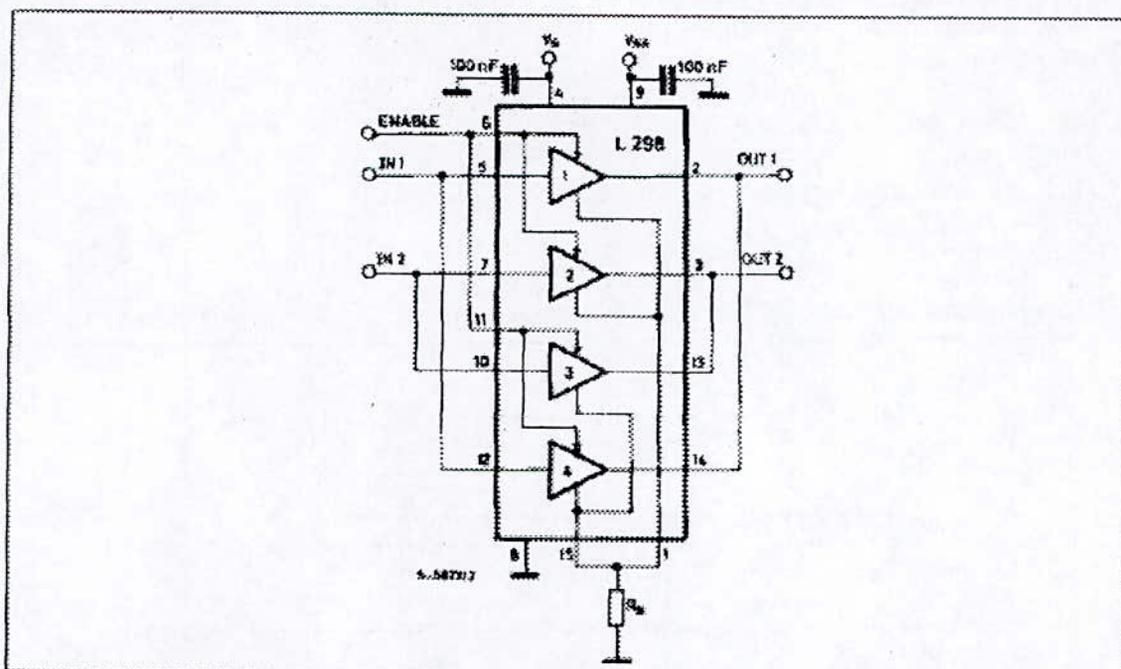
MW. 15	PowerSO	Name	Function
1;15	2;19	Sense A; Sense B	Between this pin and ground is connected the sense resistor to control the current of the load.
2;3	4;5	Out 1; Out 2	Outputs of the Bridge A: the current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 1.
4	6	V <sub>S</sub>	Supply Voltage for the Power Output Stages. A non-inductive 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
5;7	7;9	Input 1; Input 2	TTL Compatible Inputs of the Bridge A.
8;11	8;14	Enable A; Enable B	TTL Compatible Enable Input: the L state disables the bridge A (enable A) and/or the bridge B (enable B).
8	1;10;11;20	GND	Ground.
9	12	VSS	Supply Voltage for the Logic Blocks. A 100nF capacitor must be connected between this pin and ground.
10; 12	13;15	Input 3; Input 4	TTL Compatible Inputs of the Bridge B.
13; 14	16;17	Out 3; Out 4	Outputs of the Bridge B. The current that flows through the load connected between these two pins is monitored at pin 15.
-	3;18	N.C.	Not Connected

ELECTRICAL CHARACTERISTICS (V<sub>S</sub> = 42V; V<sub>SS</sub> = 5V; T<sub>J</sub> = 25°C; unless otherwise specified)

Symbol	Parameter	Test Conditions	Min.	Typ.	Max.	Unit
V <sub>S</sub>	Supply Voltage (pin 4)	Operative Condition	V <sub>OH</sub> +2.5		46	V
V <sub>SS</sub>	Logic Supply Voltage (pin 9)		4.5	5	7	V
I <sub>S</sub>	Quiescent Supply Current (pin 4)	V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0 V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H		13 50	22 70	mA mA
I <sub>SS</sub>	Quiescent Current from V <sub>SS</sub> (pin 9)	V <sub>en</sub> = L V <sub>I</sub> = X			4	mA
		V <sub>en</sub> = H; I <sub>L</sub> = 0 V <sub>I</sub> = L V <sub>I</sub> = H		24 7	36 12	mA mA
		V <sub>en</sub> = L V <sub>I</sub> = X			6	mA
V <sub>L</sub>	Input Low Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		-0.3		1.5	V
V <sub>H</sub>	Input High Voltage (pins 5, 7, 10, 12)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>L</sub>	Low Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = L			-10	μA
I <sub>H</sub>	High Voltage Input Current (pins 5, 7, 10, 12)	V <sub>I</sub> = H × V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>en</sub> = L	Enable Low Voltage (pins 8, 11)		-0.3		1.5	V
V <sub>en</sub> = H	Enable High Voltage (pins 8, 11)		2.3		V <sub>SS</sub>	V
I <sub>en</sub> = L	Low Voltage Enable Current (pins 8, 11)	V <sub>en</sub> = L			-10	μA
I <sub>en</sub> = H	High Voltage Enable Current (pins 8, 11)	V <sub>en</sub> = H × V <sub>SS</sub> - 0.6V		30	100	μA
V <sub>CEsat(H)</sub>	Source Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A I <sub>L</sub> = 2A	0.95	1.35 2	1.7 2.7	V V
V <sub>CEsat(L)</sub>	Sink Saturation Voltage	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	0.85	1.2 1.7	1.6 2.3	V V
V <sub>CEsat</sub>	Total Drop	I <sub>L</sub> = 1A (5) I <sub>L</sub> = 2A (5)	1.80		3.2 4.9	V V
V <sub>sense</sub>	Sensing Voltage (pins 1, 15)		-1 (1)		2	V



Figure 7 : For higher currents, outputs can be paralleled. Take care to parallel channel 1 with channel 4 and channel 2 with channel 3.



## APPLICATION INFORMATION (Refer to the block diagram)

### 1.1. POWER OUTPUT STAGE

The L298 integrates two power outputs stages (A; B). The power output stage is a bridge configuration and its outputs can drive an inductive load in common or differential mode, depending on the state of the inputs. The current that flows through the load comes out from the bridge at the sense output: an external resistor ( $R_{SA}$ ;  $R_{SB}$ ) allows to detect the intensity of this current.

### 1.2. INPUT STAGE

Each bridge is driven by means of four gates the input of which are  $IN1$ ;  $IN2$ ;  $EN_A$  and  $IN3$ ;  $IN4$ ;  $EN_B$ . The  $IN$  inputs set the bridge state when The  $EN$  input is high; a low state of the  $EN$  input inhibits the bridge. All the inputs are TTL compatible.

## 2. SUGGESTIONS

A non inductive capacitor, usually of 100 nF, must be foreseen between both  $V_S$  and  $V_{SS}$ , to ground, as near as possible to GND pin. When the large capacitor of the power supply is too far from the IC, a second smaller one must be foreseen near the L298.

The sense resistor, not of a wire wound type, must be grounded near the negative pole of  $V_S$  that must be near the GND pin of the I.C.

Each input must be connected to the source of the driving signals by means of a very short path.

Turn-On and Turn-Off: Before to Turn-ON the Supply Voltage and before to Turn it OFF, the Enable input must be driven to the Low state.

## 3. APPLICATIONS

Fig 6 shows a bidirectional DC motor control Schematic Diagram for which only one bridge is needed. The external bridge of diodes D1 to D4 is made by four fast recovery elements ( $t_{rr} < 200$  nsec) that must be chosen of a VF as low as possible at the worst case of the load current.

The sense output voltage can be used to control the current amplitude by chopping the inputs, or to provide overcurrent protection by switching low the enable input.

The brake function (Fast motor stop) requires that the Absolute Maximum Rating of 2 Amps must never be overcome.

When the repetitive peak current needed from the load is higher than 2 Amps, a paralleled configuration can be chosen (See Fig.7).

An external bridge of diodes are required when inductive loads are driven and when the inputs of the IC are chopped; Schottky diodes would be preferred.

This solution can drive until 9 Amps In DC operation and until 3.5 Amps of a repetitive peak current.

On Fig 8 it is shown the driving of a two phase bipolar stepper motor; the needed signals to drive the inputs of the L298 are generated in this example, from the IC L297.

Fig 9 shows an example of P.C.B. designed for the application of Fig 8.

Figure 8 : Two Phase Bipolar Stepper Motor Circuit.

This circuit drives bipolar stepper motors with winding currents up to 2 A. The diodes are fast 2 A types.

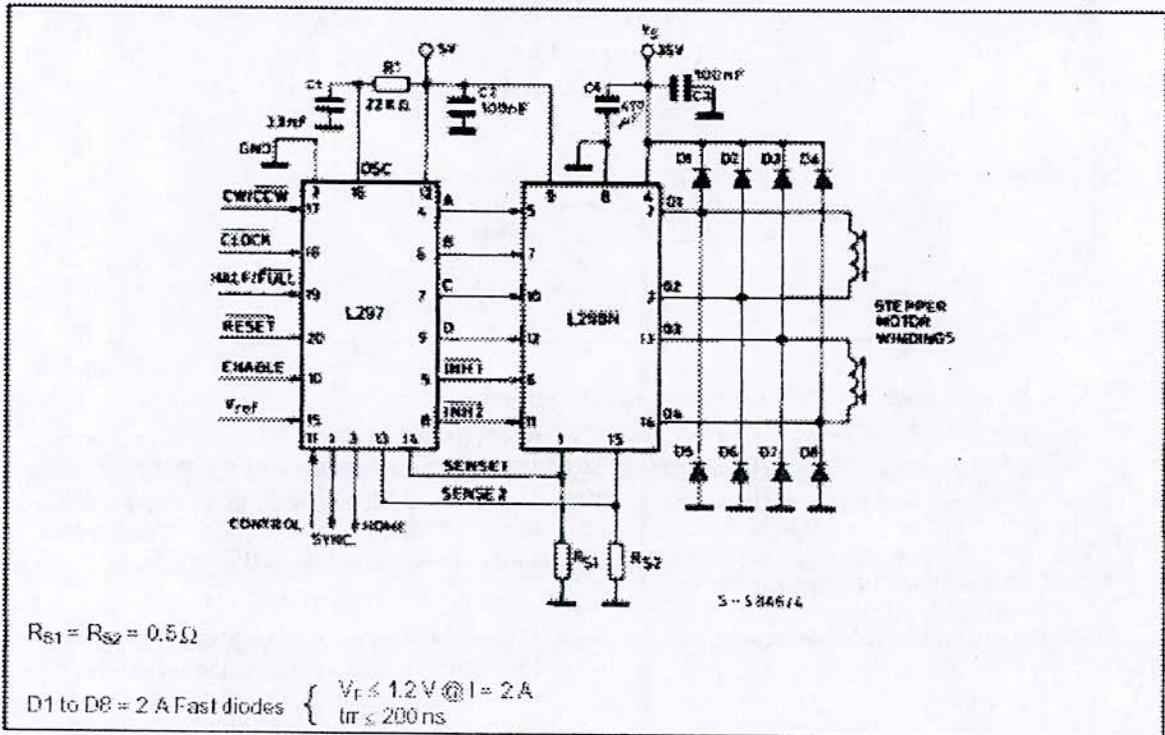
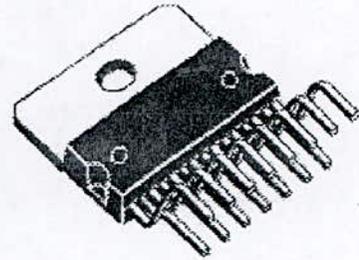


Fig 10 shows a second two phase bipolar stepper motor control circuit where the current is controlled by the I.C. L6506.

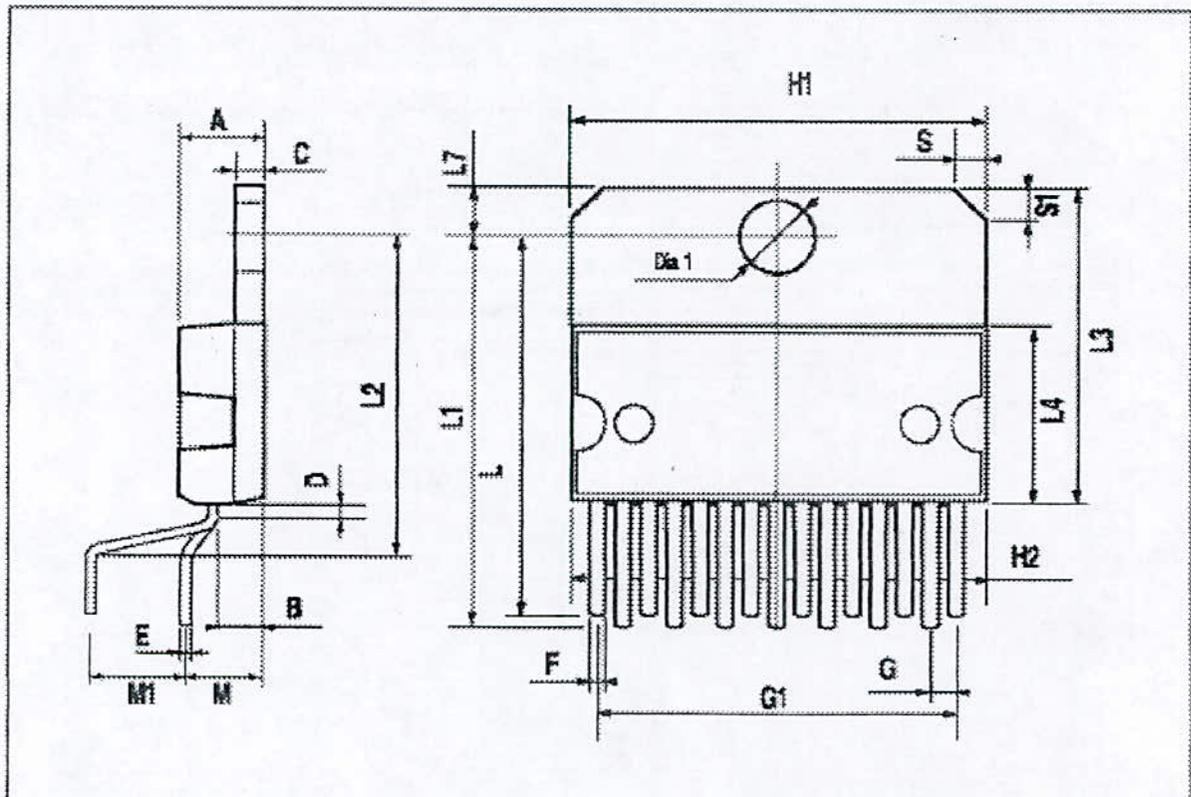


DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
D		1			0.039	
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.02	1.27	1.52	0.040	0.050	0.060
G1	17.53	17.78	18.03	0.690	0.700	0.710
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L	21.9	22.2	22.5	0.862	0.874	0.886
L1	21.7	22.1	22.5	0.854	0.870	0.886
L2	17.65		18.1	0.695		0.713
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
M	4.25	4.55	4.85	0.167	0.179	0.191
M1	4.63	5.08	5.53	0.182	0.200	0.218
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

### OUTLINE AND MECHANICAL DATA

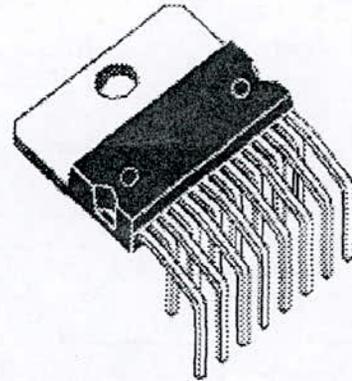


Multiwatt15 V

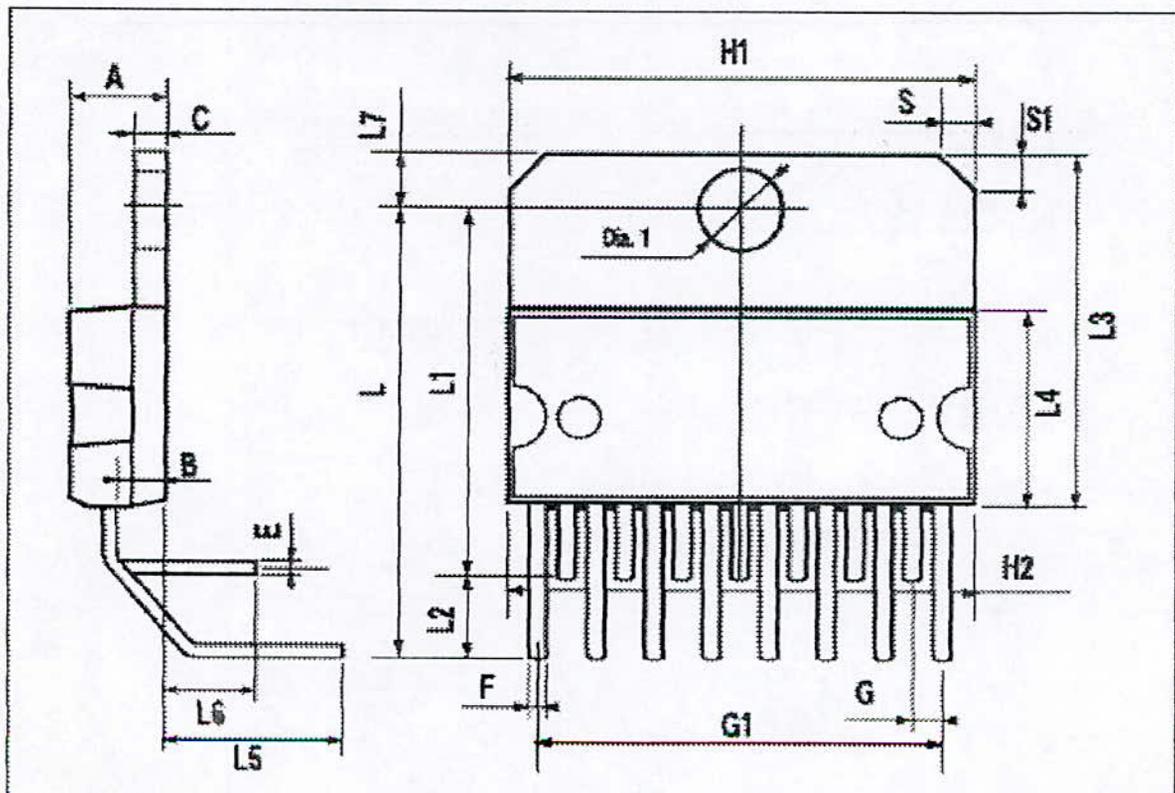


DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			5			0.197
B			2.65			0.104
C			1.6			0.063
E	0.49		0.55	0.019		0.022
F	0.66		0.75	0.026		0.030
G	1.14	1.27	1.4	0.045	0.050	0.055
G1	17.57	17.78	17.91	0.692	0.700	0.705
H1	19.6			0.772		
H2			20.2			0.795
L		20.57			0.810	
L1		18.03			0.710	
L2		2.54			0.100	
L3	17.25	17.5	17.75	0.679	0.689	0.699
L4	10.3	10.7	10.9	0.406	0.421	0.429
L5		5.28			0.208	
L6		2.38			0.094	
L7	2.65		2.9	0.104		0.114
S	1.9		2.6	0.075		0.102
S1	1.9		2.6	0.075		0.102
Dia1	3.65		3.85	0.144		0.152

### OUTLINE AND MECHANICAL DATA



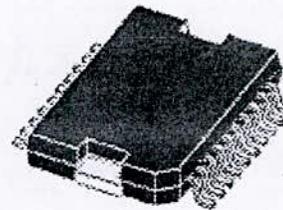
Multiwatt15 H



DIM.	mm			inch		
	MIN.	TYP.	MAX.	MIN.	TYP.	MAX.
A			3.6			0.142
a1	0.1		0.3	0.004		0.012
a2			3.3			0.130
a3	0		0.1	0.000		0.004
b	0.4		0.53	0.016		0.021
c	0.23		0.32	0.009		0.013
D (1)	15.8		16	0.622		0.630
D1	9.4		9.8	0.370		0.386
E	13.9		14.5	0.547		0.570
e		1.27			0.050	
e3		11.43			0.450	
E1 (1)	10.9		11.1	0.429		0.437
E2			2.9			0.114
E3	5.8		6.2	0.228		0.244
G	0		0.1	0.000		0.004
H	15.5		15.9	0.610		0.626
h			1.1			0.043
L	0.8		1.1	0.031		0.043
N	10° (max.)					
S	8° (max.)					
T		10			0.394	

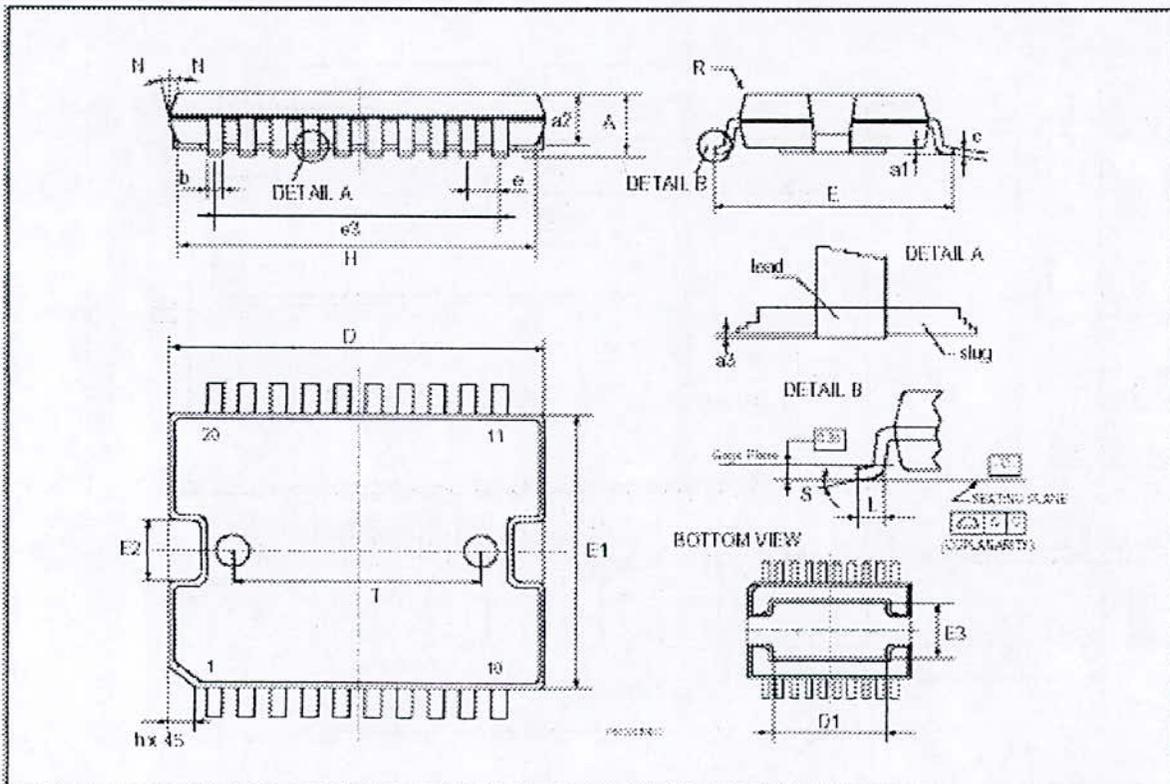
(1) 'D' and 'E' do not include mold flash or protrusions.  
 - Mold flash or protrusions shall not exceed 0.15 mm (0.006").  
 - Critical dimensions: "E", "G" and "a3"

OUTLINE AND MECHANICAL DATA



JEDEC MO-166

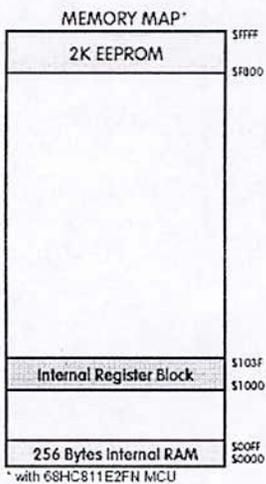
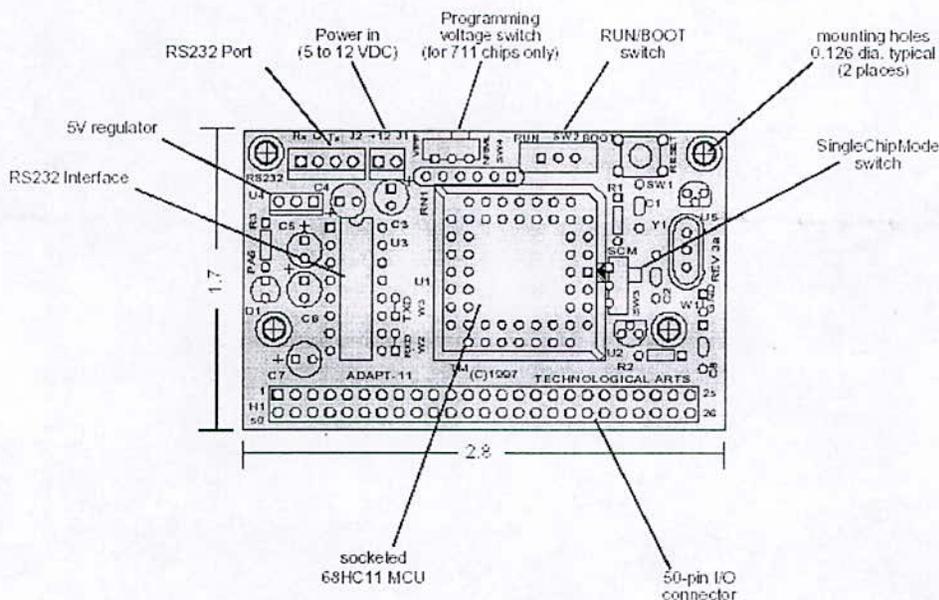
PowerSO20



# Annexe 5

## Adapt11 Module Mechanical Data and Pin Configuration

Dimensions in inches



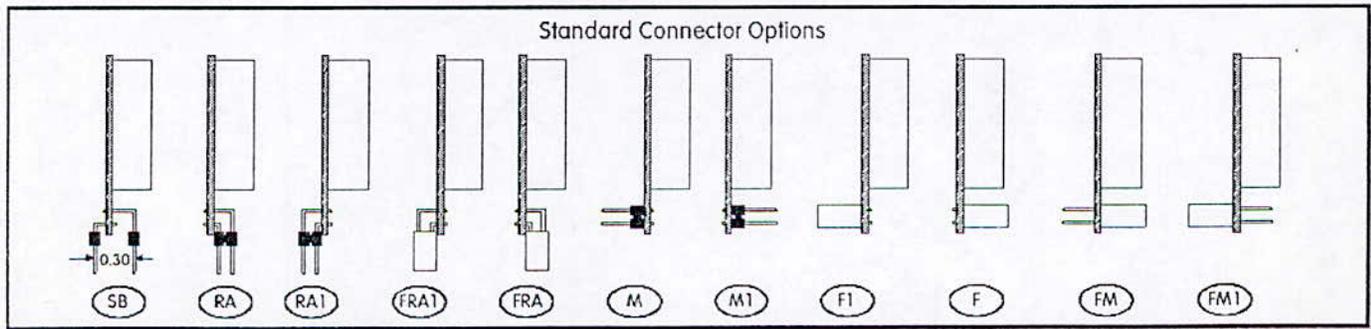
### Pin Assignments

PIN #	NAME	PIN #	NAME
1	PD2/MISO	50	GROUND
2	PD3/MOSI	49	GROUND
3	PD4/SCK	48	PD0/RXD
4	PD5/SS*	47	+5V
5	PD1/TXD	46	IRQ*
6	PA7/PA1/OC1	45	XIRQ*
7	PA6/OC2/OC1	44	RESET*
8	PA5/OC3/OC1	43	STRB
9	PA4/OC4/OC1	42	PC7 (ADDR7/DATA7)
10	PA3/IC4/OC5/OC1	41	PC6 (ADDR6/DATA6)
11	PA2/IC1	40	PC5 (ADDR5/DATA5)
12	PA1/IC2	39	PC4 (ADDR4/DATA4)
13	PA0/IC3	38	PC3 (ADDR3/DATA3)
14	PB7 (A1 5)	37	PC2 (ADDR2/DATA2)
15	PB6 (A1 4)	36	PC1 (ADDR1/DATA1)
16	PB5 (A1 3)	35	PC0 (ADDR0/DATA0)
17	PB4 (A1 2)	34	STRB
18	PB3 (A1 1)	33	E
19	PB2 (A1 0)	32	STRA
20	PB1 (A0 9)	31	VR1
21	PB0 (A0 8)	30	VRH
22	PE0/AN0	29	PE4/AN4
23	PE1/AN1	28	PE5/AN5
24	PE2/AN2	27	PE6/AN6
25	PE3/AN3	26	PE7/AN7

Order Codes:  
Module:  
AD11M-    
Starter Package:  
AD11SP1-  

\*NOTE: Starter Packages include ADAPT11M-SB module fully populated with 68HC811E2FN and serial cable, manual, documentation, and disk with assembler, BASIC, C, PCBug11, download utilities, example programs, and more. Alternative connectors available-- specify desired option.

### Standard Connector Options



## Annexe 6



# TSOP17..

Vishay Telefunken

## Photo Modules for PCM Remote Control Systems

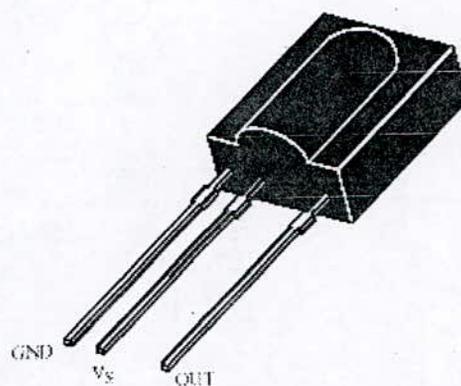
Available types for different carrier frequencies

Type	$f_0$	Type	$f_0$
TSOP1720	20 kHz	TSOP1733	33 kHz
TSOP1730	30 kHz	TSOP1737	36.7 kHz
TSOP1738	38 kHz	TSOP1740	40 kHz
TSOP1756	56 kHz		

### Description

The TSOP17... series are miniaturized receivers for infrared remote control systems. PIN diode and preamplifier are assembled on lead frame, the epoxy package is designed as IR filter.

The demodulated output signal can directly be decoded by a microprocessor. TSOP17.. is the standard IR remote control receiver series, supporting all major transmission codes.

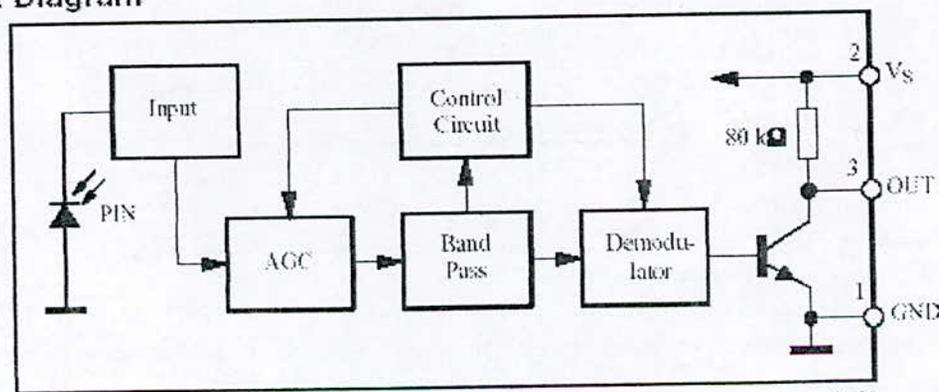


04 8201

### Features

- Photo detector and preamplifier in one package
- Internal filter for PCM frequency
- Improved shielding against electrical field disturbance
- TTL and CMOS compatibility
- Output active low
- Low power consumption
- High immunity against ambient light
- Continuous data transmission possible (up to 2400 bps)
- Suitable burst length  $\geq 10$  cycles/burst

### Block Diagram



04 8201

# TSOP17..

Vishay Telefunken



## Absolute Maximum Ratings

$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

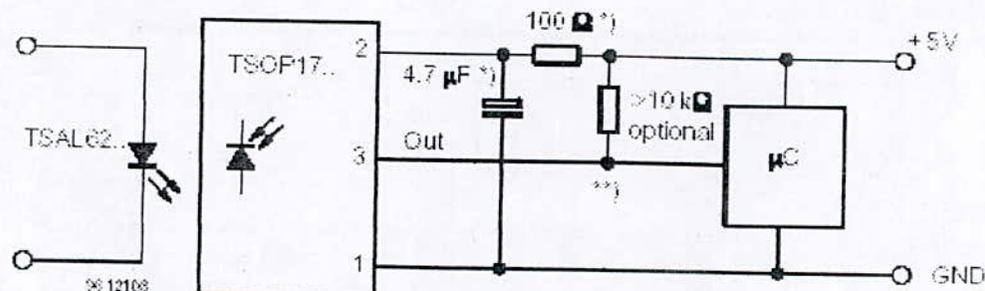
Parameter	Test Conditions	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	(Pin 2)	$V_S$	-0.3...6.0	V
Supply Current	(Pin 2)	$I_S$	5	mA
Output Voltage	(Pin 3)	$V_O$	-0.3...6.0	V
Output Current	(Pin 3)	$I_O$	5	mA
Junction Temperature		$T_j$	100	$^{\circ}\text{C}$
Storage Temperature Range		$T_{sta}$	-25...+85	$^{\circ}\text{C}$
Operating Temperature Range		$T_{amb}$	-25...+85	$^{\circ}\text{C}$
Power Consumption	( $T_{amb} \leq 85^{\circ}\text{C}$ )	$P_{tot}$	50	mW
Soldering Temperature	$t \leq 10$ s, 1 mm from case	$T_{sd}$	260	$^{\circ}\text{C}$

## Basic Characteristics

$T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$

Parameter	Test Conditions	Symbol	Min	Typ	Max	Unit
Supply Current (Pin 2)	$V_S = 5\text{ V}, E_y = 0$	$I_{SD}$	0.4	0.6	1.5	mA
	$V_S = 5\text{ V}, E_y = 40\text{ klx, sunlight}$	$I_{SH}$		1.0		mA
Supply Voltage (Pin 2)		$V_S$	4.5		5.5	V
Transmission Distance	$E_y = 0$ , test signal see fig.7, IR diode TSAL6200, $I_F = 400\text{ mA}$	$d$		35		m
Output Voltage Low (Pin 3)	$I_{OSL} = 0.5\text{ mA}, E_e = 0.7\text{ mW/m}^2$ , $f = f_0, t_{pV}/T = 0.4$	$V_{OSL}$			250	mv
Irradiance (30 – 40 kHz)	Pulse width tolerance: $t_{pi} - 5/f_0 < t_{po} < t_{pi} + 5/f_0$ , test signal (see fig.7)	$E_e\text{ min}$		0.35	0.5	$\text{mW/m}^2$
Irradiance (56 kHz)	Pulse width tolerance: $t_{pi} - 5/f_0 < t_{po} < t_{pi} + 5/f_0$ , test signal (see fig.7)	$E_e\text{ min}$		0.4	0.6	$\text{mW/m}^2$
Irradiance	$t_{pi} - 5/f_0 < t_{po} < t_{pi} + 5/f_0$	$E_e\text{ max}$	30			$\text{W/m}^2$
Directivity	Angle of half transmission distance	$\theta_{1/2}$		$\pm 45$		deg

## Application Circuit



<sup>\*)</sup> recommended to suppress power supply disturbances

<sup>\*\*)</sup> The output voltage should not be held continuously at a voltage below 3.3V by the external circuit.

## Suitable Data Format

The circuit of the TSOP17.. is designed in that way that unexpected output pulses due to noise or disturbance signals are avoided. A bandpassfilter, an integrator stage and an automatic gain control are used to suppress such disturbances.

The distinguishing mark between data signal and disturbance signal are carrier frequency, burst length and duty cycle.

The data signal should fulfill the following condition:

- Carrier frequency should be close to center frequency of the bandpass (e.g. 38kHz).
- Burst length should be 10 cycles/burst or longer.
- After each burst which is between 10 cycles and 70 cycles a gap time of at least 14 cycles is necessary.
- For each burst which is longer than 1.8ms a corresponding gap time is necessary at some time in the data stream. This gap time should have at least some length as the burst.
- Up to 1400 shortbursts per second can be received continuously.

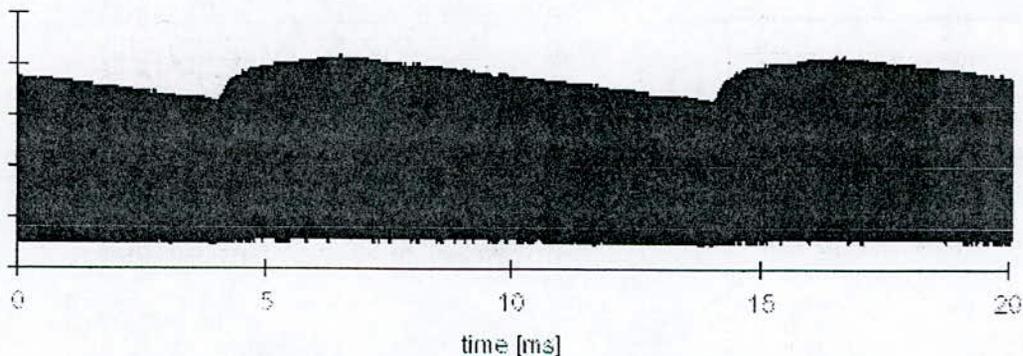
Some examples for suitable data format are:

NEC Code, Toshiba Micom Format, Sharp Code, RC5 Code, RC6 Code, R-2000 Code, Sony Format (SIRCS).

When a disturbance signal is applied to the TSOP17.. it can still receive the data signal. However the sensitivity is reduced to that level that no unexpected pulses will occur.

Some examples for such disturbance signals which are suppressed by the TSOP17.. are:

- DC light (e.g. from tungsten bulb or sunlight)
- Continuous signal at 38kHz or at any other frequency
- Signals from fluorescent lamps with electronic ballast (an example of the signal modulation is in the figure below).



IR Signal from Fluorescent Lamp with low Modulation



Typical Characteristics ( $T_{amb} = 25^{\circ}\text{C}$  unless otherwise specified)

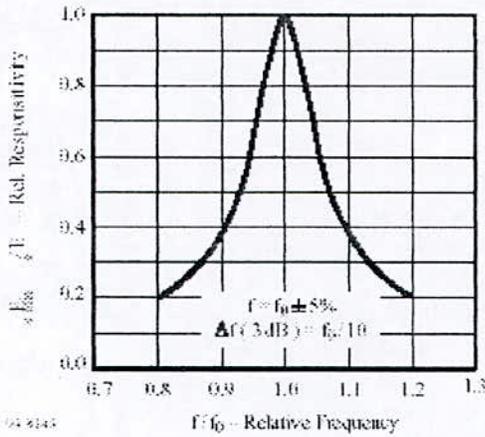


Figure 1. Frequency Dependence of Responsivity

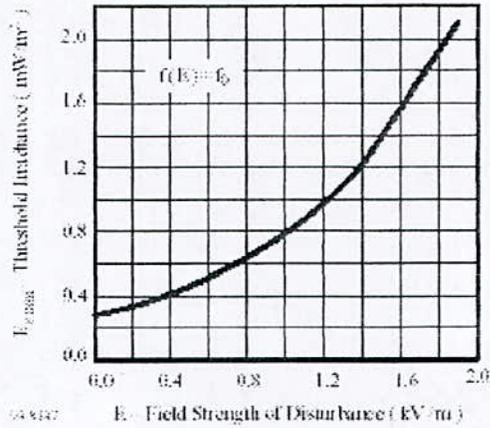


Figure 4. Sensitivity vs. Electric Field Disturbances

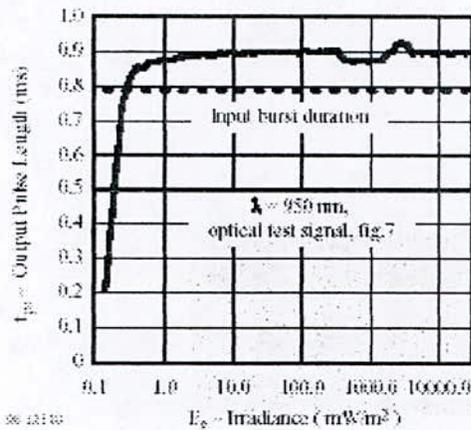


Figure 2. Sensitivity in Dark Ambient

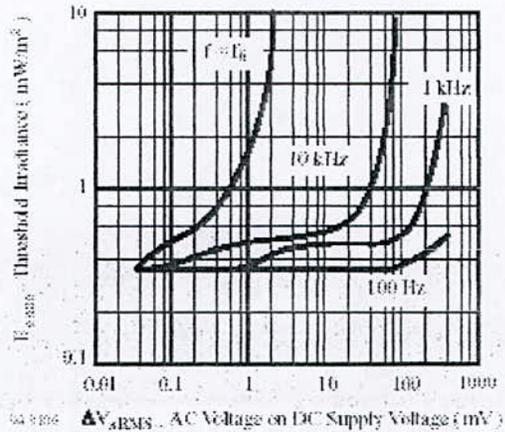


Figure 5. Sensitivity vs. Supply Voltage Disturbances

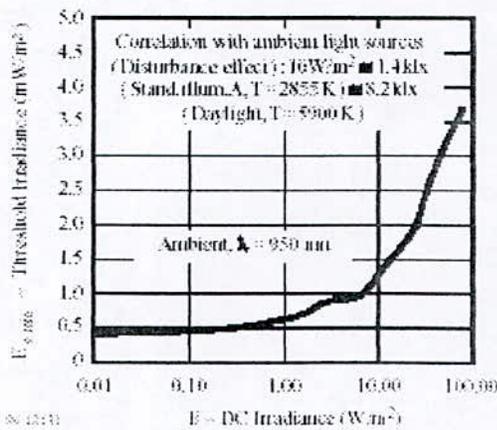


Figure 3. Sensitivity in Bright Ambient

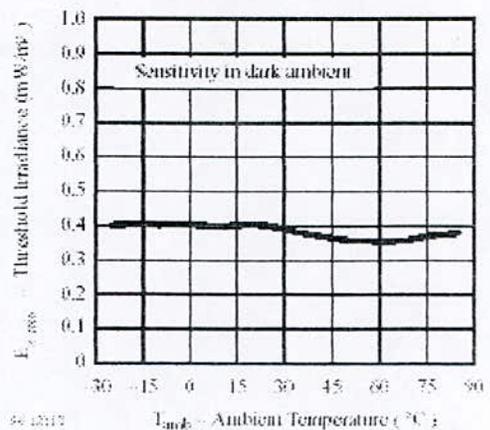


Figure 6. Sensitivity vs. Ambient Temperature

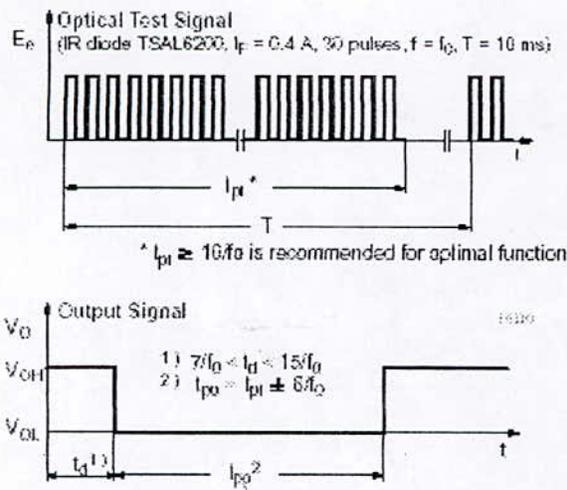


Figure 7. Output Function

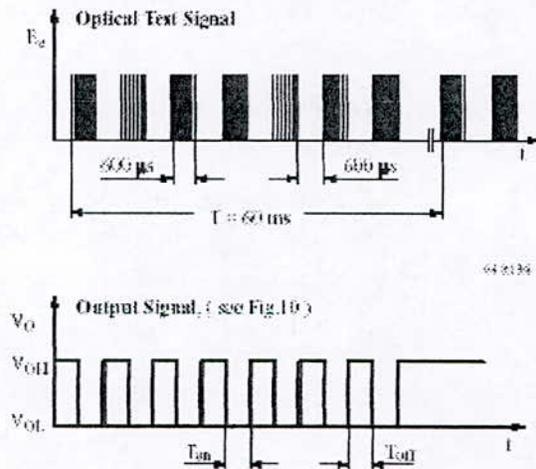


Figure 8. Output Function

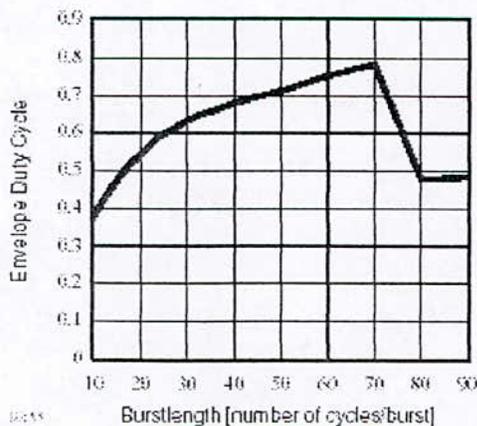


Figure 9. Max. Envelope Duty Cycle vs. Burstlength

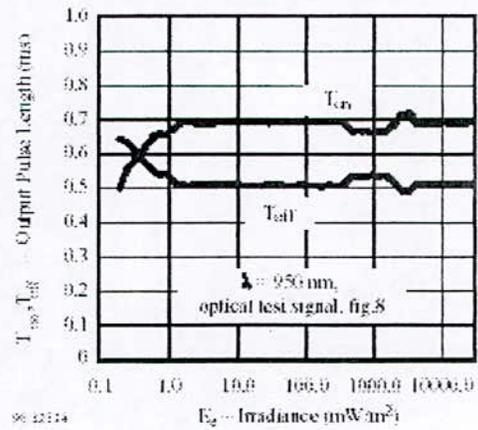


Figure 10. Output Pulse Diagram

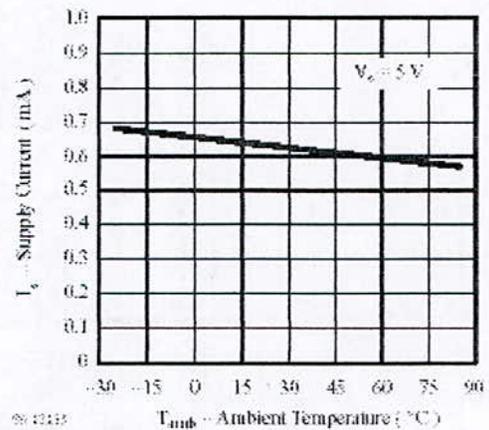


Figure 11. Supply Current vs. Ambient Temperature

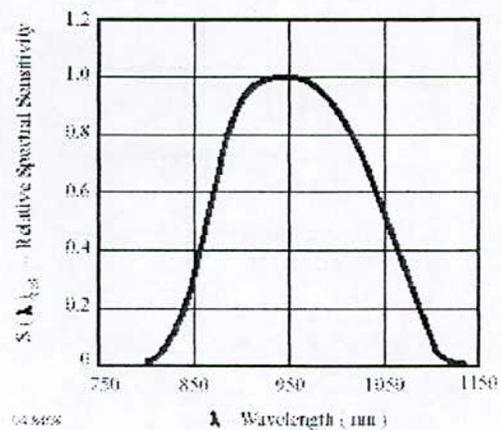


Figure 12. Relative Spectral Sensitivity vs. Wavelength

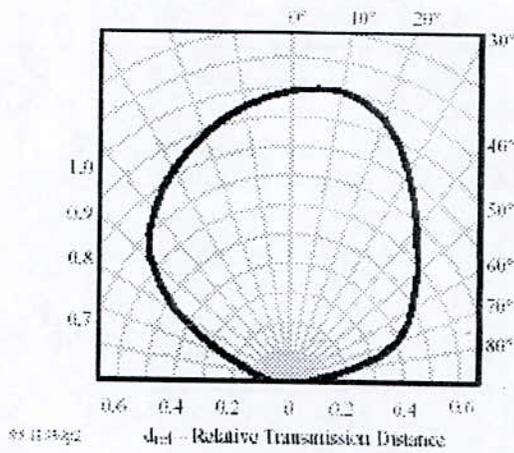


Figure 13. Vertical Directivity  $\phi_y$

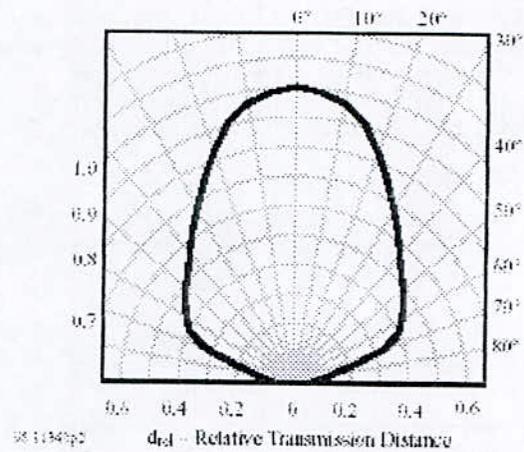
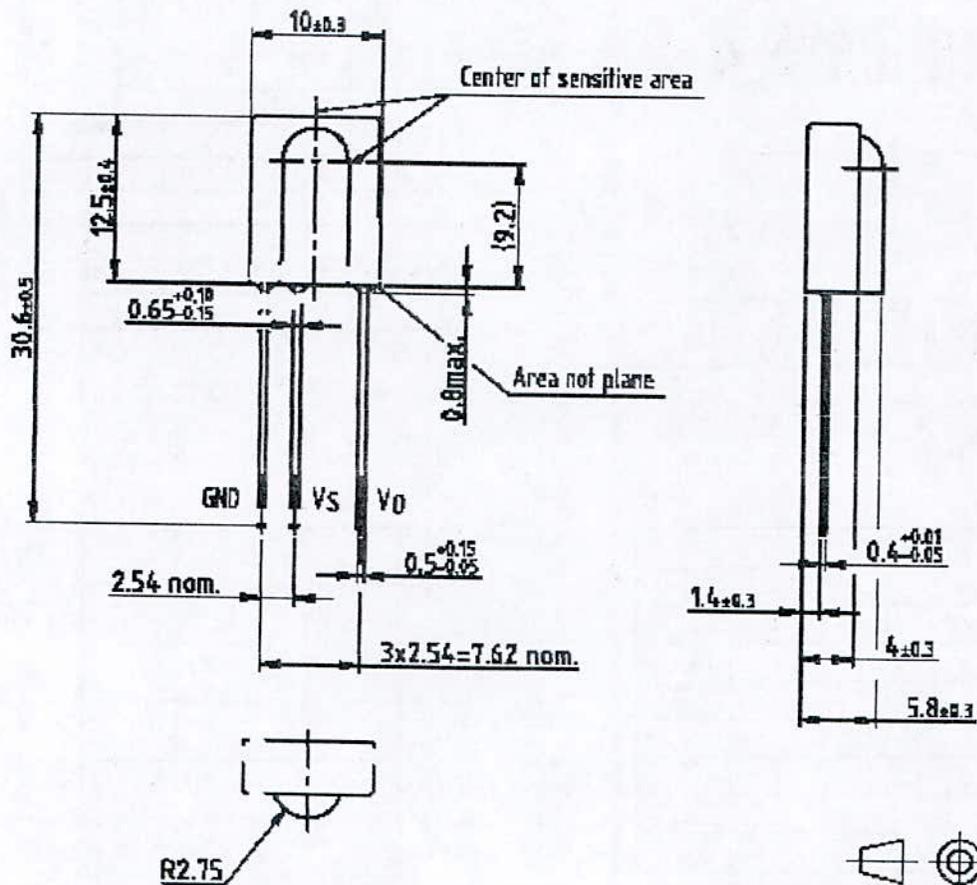


Figure 14. Horizontal Directivity  $\phi_x$

Dimensions in mm



Technical drawings according to DIN specifications



## Ozone Depleting Substances Policy Statement

It is the policy of Vishay Semiconductor GmbH to

1. Meet all present and future national and international statutory requirements.
2. Regularly and continuously improve the performance of our products, processes, distribution and operating systems with respect to their impact on the health and safety of our employees and the public, as well as their impact on the environment.

It is particular concern to control or eliminate releases of those substances into the atmosphere which are known as ozone depleting substances (ODSs).

The Montreal Protocol (1987) and its London Amendments (1990) intend to severely restrict the use of ODSs and forbid their use within the next ten years. Various national and international initiatives are pressing for an earlier ban on these substances.

Vishay Semiconductor GmbH has been able to use its policy of continuous improvements to eliminate the use of ODSs listed in the following documents.

1. Annex A, B and list of transitional substances of the Montreal Protocol and the London Amendments respectively
2. Class I and II ozone depleting substances in the Clean Air Act Amendments of 1990 by the Environmental Protection Agency (EPA) in the USA
3. Council Decision 88/540/EEC and 91/690/EEC Annex A, B and C (transitional substances) respectively.

Vishay Semiconductor GmbH can certify that our semiconductors are not manufactured with ozone depleting substances and do not contain such substances.

We reserve the right to make changes to improve technical design and may do so without further notice. Parameters can vary in different applications. All operating parameters must be validated for each customer application by the customer. Should the buyer use Vishay-Telefunken products for any unintended or unauthorized application, the buyer shall indemnify Vishay-Telefunken against all claims, costs, damages, and expenses, arising out of, directly or indirectly, any claim of personal damage, injury or death associated with such unintended or unauthorized use.

Vishay Semiconductor GmbH, P.O.B. 3535, D-74025 Heilbronn, Germany  
Telephone: 49 (0)7131 67 2831, Fax number: 49 (0)7131 67 2423

## Annexe 7

```
*****
* TABLE DES EQUIVALENCES **
*****
PORTC EQU $03
PORTB EQU $04
DDRC EQU $07
TCTL1 EQU $20
TFLG1 EQU $23
TMSK1 EQU $22
TOC2 EQU $18
CFORC EQU $0B
TMSK2 EQU $24
FREQ EQU $07E8

*****
* PROGRAMME PRINCIPAL **
*****
        ORG $F800           ;ENTREE DU PROGRAMME
        RESET LDS #$00FF   ;INIT PILE
        LDX #$1000

*****
* PROGRAMME INITIALISATION OUTPUT COMPARE 2 *****
*****

        BSET $00,x,$20
        LDD #FREQ
        STD TOC2,x
        LDAA #$00
        STAA CFORC,x
        LDAA #$00
        STAA TMSK2,x
        LDAA #%01000000    ;OM2 = 0 , OL2 = 1
        STAA TCTL1,x      ;TOGGLE PA6 A CHAQUE COMPARAISON
        LDAA #%01000000
        STAA TMSK1,x      ;VALIDE INTERRUPTION OC2

*****
* FIN INITIALISATION OUTPUT COMPARE2 *****
*****
        CLI                 ;VALIDE INTERRUPTIONS CPU
        BRA *

*****
* SOUS-PROGRAMME D'INTERRUPTION TOC2 **
*****
INTOC2  LDD #FREQ          ;CHARGE TEMPS BAS
        ADDD TOC2,x        ;ADITIONNE A TOC2 1/350
        STD TOC2,x         ;STOCHE DANS TOC2
        BSET $23,X,$40     ;RESET OC2F
        RTI                ;RETOUR

*****
* TABLE DES VECTEURS **
*****
        ORG $FFE6
        FDB INTOC2        ;INTERRUPTION TOC2
        END
```

Programme Output Compare 2

\*\*\*\*\*  
 \* TABLE DES EQUIVALENCES \*  
 \*\*\*\*\*

PORTA EQU \$00  
 PORTC EQU \$03  
 PORTB EQU \$04  
 DDRC EQU \$07  
 TCTL1 EQU \$20  
 TFLG1 EQU \$23  
 TMSK1 EQU \$22  
 TOC2 EQU \$18  
 TOC3 EQU \$1A  
 CFORC EQU \$0B  
 TMSK2 EQU \$24  
 FREQ EQU \$0FD0  
 TAMPON EQU \$0060  
 TAMPON1 EQU \$0061  
 SPEED EQU \$1388

\*\*\*\*\*  
 \* TABLE DES VARIABLES \*  
 \*\*\*\*\*

\*\*\*\*\*  
 \* PROGRAMME PRINCIPAL \*  
 \*\*\*\*\*

ORG \$F800 ;ENTREE DU PROGRAMME  
 RESET LDS #\$00FF ;INIT PILE  
 LDX #\$1000

\*\*\*\*\*  
 \* PROGRAMME INITIALISATION INPUT CAPTURE \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

LDD #FREQ  
 STD TOC2,x  
 LDD #SPEED  
 STD TOC3,x  
 LDAA #\$00  
 STAA CFORC,x  
 LDAA #\$00  
 STAA TMSK2,x  
 LDAA #%01000000  
 STAA TCTL1,x  
 LDAA #%01000000  
 STAA TMSK1,x  
 LDAA #\$00  
 STAA DDRC,x  
 CLR TAMPON  
 CLR TAMPON1

\*\*\*\*\*  
 \* FIN INITIALISATION INPUT CAPTURE \*\*\*\*\*  
 \*\*\*\*\*

CLI ;VALIDE INTERRUPTIONS CPU  
 BRA \*

\*\*\*\*\*  
 \* SOUS-PROGRAMME D'INTERRUPTION TOC2 \*  
 \*\*\*\*\*

INTOC2 LDD #FREQ ;CHARGE TEMPS BAS  
 ADDD TOC2,x ;ADITIONNE A TOC2 1/350  
 STD TOC2,x ;STOCKE DANS TOC2

```

        LDAA  #%01000000
        ANDA  PORTA,x
        BEQ  ETAT_BAS ; J'ai généré l'état bas

ETAT_HAUT  LDAB  #%01000000 ; Sinon j'ai généré l'état haut : je teste si j'ai reçu l'état haut

        ANDB  PORTC,x
        BEQ  SORTIEH ; Je n'ai pas reçu l'état haut
        INC  TAMPON
        CLRA
        CMPA  TAMPON1
        BNE  SORTIE
        BRA  SORTIEH

ETAT_BAS  CLRA
        CMPA  TAMPON
        BEQ  SORTIEH ; Je ne suis pas passé par l'état 1
        LDAB  #%01000000 ; je teste si j'ai reçu l'état bas
        ANDB  PORTC,x
        BNE  SORTIEH ; Je n'ai pas reçu l'état bas
        CLR  TAMPON
        INC  TAMPON1
        LDAA  #%01000000 ; ARRET moteurs
        STAA  TCTL1,x
        LDAA  #%01000000
        STAA  TMSK1,x
        BRA  SORTIE

SORTIEH   CLR  TAMPON1
        LDAA  #%01010000 ; marche moteurs
        STAA  TCTL1,x
        LDAA  #%01100000
        STAA  TMSK1,x

SORTIE    BSET  $23,X,#$40 ;RESET OC2F
        RTI ;RETOUR

*****
* SOUS-PROGRAMME D'INTERRUPTION TOC3 *
*****
INTOC3    LDD  #SPEED ;CHARGE TEMPS BAS
        ADDD  TOC3,x ;ADITIONNE A TOC3 1/350
        STD  TOC3,x ;STOCKE DANS TOC3
        BSET  $23,X,#$20 ;RESET OC3F
        RTI ;RETOUR

*****
* TABLE DES VECTEURS *
*****
        ORG  $FFE6
        FDB  INTOC2 ;INTERRUPTION TOC2
        ORG  $FFE4
        FDB  INTOC3 ;INTERRUPTION TOC3
        END

```

### Programme marche avant-stop détection