



Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur

Spécialité : Électronique

Option : Informatique industrielle

Réalisé par : Faiza KHELIL

Système robotisé pour l'assistance à la mobilité : conception et intégration

Soutenu publiquement, le : 23/06/2026, devant le jury composé de :

Dr.BEKKADOUR Okkacha	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
Mm BEREKSI REGUIG Nassima	MCB	ESSA. Tlemcen	Directrice
M BOUKLI HACENE Fazil	MAA	ESSA. Tlemcen	Co-Directeur
Mm BENAHMED Nadia	Professeur	ESSA. Tlemcen	Examineur1
M BEREKSI REGUIG Mohammed Anes	MCA	Université de Tlemcen U.A.B.T	Examineur 2

Année universitaire : 2025–2026

Dédicaces

Je dédie ce travail

A ma chère mère, pour sa présence auprès de moi tout au long de mon existence, pour ses sacrifices quotidiens, pour la patience dont elle fait usage pour m'accompagner dans les moments importants.

A mon chère père, pour vouloir mon bien tout au long de sa vie.

Je demande à Dieu Tout-Puissant de vous accorder une grande miséricorde et de nous réunir au Paradis, insha'Allah.

A mes chères soeurs, pour tous l'amour et le réconfort qu'elles m'apportent, pour leur encouragements et leur conseils qui ont été un soutien moral bienveillant. Que Dieu vous bénisse et vous protège toujours.

A tous les membres de ma famille, pour leur amour, leur soutien inconditionnel et leurs prières qui ont été déterminants pour ma réussite.

A toutes ces personnes, je vous suis infiniment reconnaissante pour tout ce que vous avez fait pour moi.

A mes amis, leur soutien, leur amitié et leurs encouragements ont été essentiels tout au long de ce parcours. Je vous suis profondément reconnaissante pour votre présence et votre aide constante.

Faiza KHELIL

Remerciements

J'exprime toute ma gratitude à Dieu Tout-Puissant de m'avoir apporté toute la patience et le courage nécessaire pour la réalisation de ce modeste travail.

Toute ma sincère reconnaissance à ma famille, particulièrement à mes parents à mes soeurs pour leur soutien significatif et leur encouragement tout au long de mon parcours.

Je remercie, sincèrement mon encadrante Mm. BEREKSI REGUIG Nassima pour son encadrement tout au long de ce projet, ses conseils éclairés et son soutien constant jusqu'à la fin de mon parcours. Ses orientations ont été primordiales pour surmonter les défis techniques rencontrés.

J'exprime également mes remerciements à mon encadrant M. BOUKLI HACENE Fazil pour son soutien constructif et son engagement dans la réussite de ce travail.

Je suis profondément honorée par la participation du Dr. BEKKADOUR Okkacha, qui a présidé ce mémoire et a honoré notre jury de sa présence.

J'exprime mes sincères remerciements à Mm BENAHMED Nadia et à M. BEREKSI REGUIG Mohammed Anes pour avoir accepté d'examiner ce mémoire et pour leurs observations pertinentes et constructives.

J'exprime mes grands remerciements envers M. ADJIM Ramz-eddine Abderrezak ingénieur de FABLAB dans l'Ecole Supérieur en Sciences Appliquées de Tlemcen, pour sa contribution nécessaire dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à remercier chaleureusement mes proches, mes camarades et toutes les personnes qui ont contribué de près de ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur soutien et leur présence ont été grandement appréciés.

الملخص

تتناول هذه الأطروحة تصميم وبناء منصة متحركة ذاتية القيادة رباعية العجلات، يتم التحكم بها بواسطة إشارات تخطيط الدماغ الكهربائي بهدف مساعدة الأشخاص ذوي الإعاقة الحركية على التنقل. تُستخلص أوامر الملاحة من خلال رصد رمشات العين، وتُترجم إلى تعليمات السرعة، ثم تُرسل إلى نظام القيادة، مما يُمكن من التحكم في المنصة دون أي تدخل جسدي مباشر. تؤكد عمليات التحقق الجزئية التي أجريت على الأنظمة الفرعية المختلفة - دقة مستشعر الموجات فوق الصوتية، واتساق السرعات المحسوبة من النموذج الحركي العكسي، وتزامن المحركات، واستجابة قطع الأمان - جدوى النهج المعتمد ومثانة البنية المقترحة. وبذلك، يُشكل هذا العمل أساساً وظيفياً متيناً لتطوير نظام روبوتي ذاتي التحكم عن طريق التفكير، مما يفتح آفاقاً ملموسة للمساعدة في التنقل وتحسين جودة حياة الأشخاص ذوي الإعاقة.

الكلمات المفتاحية: الروبوتات المتحركة، التحكم بواسطة تخطيط كهربية الدماغ، اكتشاف العوائق.

Abstract This research paper presents the design and implementation of an autonomous mobile platform with four wheels, controlled by electroencephalographic (EEG) signals, intended to assist the mobility of people with physical disabilities.

Navigation commands are extracted by blink detection, translated into speed instructions and transmitted to the drivetrain, thus enabling control of the platform without any direct physical interaction.

The partial validations performed on the various subsystems ultrasonic sensor accuracy, consistency of velocities calculated from the inverse kinetic model, motor synchronization, and safety cutoff responsiveness confirm the feasibility of the adopted approach and the robustness of the proposed architecture. This work thus constitutes a solid functional basis for the future development of an autonomous robotic system controlled by thought, opening up concrete prospects for mobility assistance and quality of life for people with disabilities.

Keywords : Mobile robotics, EEG control, obstacle detection.

Résumé Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'une plateforme mobile autonome à quatre roues, commandée par des signaux électroencéphalographiques (EEG), destinée à l'assistance à la mobilité des personnes atteintes de handicap physique.

Les commandes de navigation sont extraites par détection de clignements d'œil, traduites en consignes de vitesses et transmises à la chaîne cinématique, permettant ainsi le contrôle de la plateforme sans aucune interaction physique directe.

Les validations partielles réalisées sur les différents sous-systèmes — précision du capteur ultrason, cohérence des vitesses calculées à partir du modèle cinétique inverse, synchronisation des moteurs et réactivité de la coupure de sécurité — confirment la faisabilité de l'approche adoptée et la robustesse de l'architecture proposée. Ce travail constitue ainsi une base fonctionnelle solide pour le développement futur d'un système robotisé autonome contrôlé par la pensée, ouvrant des perspectives concrètes en matière d'assistance à la mobilité et de qualité de vie pour les personnes en situation d'handicap.

Mots-clés : Robotique mobile, commande EEG, détection d'obstacle.

Sommaire

Sommaire	7
Liste des acronymes	9
Liste des figures	11
Introduction générale	12
1 Etat de l’art de la robotique mobile	14
1.1 Concepts et définition	14
1.2 Classification des robots mobiles	17
1.3 Domaine d’utilisation des robots mobiles	18
1.3.1 Logistique et Entrepôts (Supply Chain)	19
1.3.2 Industrie Manufacturière (Industrie 4.0)	19
1.3.3 Militaire	19
1.3.4 Santé et Hôpitaux	20
1.3.5 Loisir	20
1.3.6 L’exploration Spaciale	20
1.4 Recherches et travaux actuels	21
1.4.1 Autonomie et Navigation Intelligente	21
1.4.2 Capteurs et Perception Avancés	21
1.4.3 Flexibilité et Mobilité	22
1.4.4 Sécurité et Collaboration	22
1.4.5 Types de Mobilité	22
1.5 Conclusion	22
2 Description générale du matériel utilisé	24
2.1 Introduction	24
2.2 Structure mécanique	24
2.2.1 Boitier	24
2.2.2 Roue motrice	26

	Spécifications géométriques et massiques	27
2.3	Structure électrique	28
2.3.1	Carte contrôleur pilote de moteur : L298N à deux entrées d'activation	28
	A. Composants essentiels du module L298N	29
	1. Le circuit intégré L298N	29
	2. Dissipateur thermique	29
	3. Régulateur de tension 7805	29
	4. Cavalier d'activation du régulateur 5V	29
	B. Caractéristiques du circuit intégré L298N	30
	C. Principe de fonctionnement du module L298N	31
	Les ponts en H	31
	Le pilotage PWM	33
	D. Table de vérité du L298N	34
2.3.2	Actionneur électrique	34
	A. Fonctionnement de moteur :	35
	a. Loi de la force électromotrice	36
	b. L'équation électrique globale du moteur	36
	B. Caractéristiques spécifiques de ce moteur	37
	C. Utilisation	37
2.3.3	Capteur d'ultrason	38
2.3.4	Power bank	38
2.3.5	Alimentation externe	39
	A. Spécifications techniques du chargeur	41
	B. Compatibilité de tension avec la carte L298N	42
	C. Calcul de la consommation en courant des quatre moteurs	42
	D. Calcul de l'autonomie	42
	E. Capacité de décharge de la batterie (Taux C)	43
2.4	Partie Informatique	43
2.4.1	Unité de traitement et commande	43
	A. L'architecture du Raspberry pi 5	44
	a. Processeur BCM2712	44
	b. Contrôleur d'E/S Raspberry Pi RP1	45

	c. Gestion de l'alimentation IC	46
	d. Broches GPIO	47
	B. Configuration du bootloader	48
	C. Installation de l'OS	50
2.4.2	Le microcontrôleur Arduino Mega	50
	1. Liaison avec le pilote de moteur L298N (Action- nement)	51
	A. Broches Digitales standards (IN1, IN2, IN3, IN4)	51
	B. Broches PWM (ENA, ENB)	51
	2. Liaison avec le capteur à ultrasons (Sécurité réflexe)	51
	A. La broche Trigger (Sortie digitale)	52
	B. La broche Echo (Entrée digitale)	52
	3. Liaison série matérielle avec le Raspberry Pi 5	52
2.5	Conclusion	52
3	Modélisation de la plateforme mobile à quatre roues	53
3.1	Introduction	53
	3.1.1 Définition des variables cinématiques	53
	3.1.2 Relations entre vitesses linéaires et angulaires	54
	3.1.3 Le modèle géométrique directe :	56
	Matrice de rotation du repère global $\mathcal{R}_0$ au repère local $\mathcal{R}_c$	56
	3.1.4 Modèle géométrique inverse :	57
	3.1.5 L'hypothèse de roulement sans glissement	57
3.2	La modélisation géométrique	57
3.3	La modélisation cinématique	58
	3.3.1 Le modèle cinématique direct :	59
	Matrice Jacobienne dans le modèle cinématique di- rect :	59
	3.3.2 Le modèle Cinématique Inverse (MCI) :	60
	Structure de la matrice Jacobienne inverse	60
	3.3.3 Le cercle de rotation et le centre instantanée de ro- tation :	60
3.4	Conclusion :	63

4	Interprétation des résultats	64
4.1	Introduction	64
4.2	Conception et programmation	64
4.2.1	Architecture matérielle générale	64
4.2.2	Architecture logicielle générale	66
4.2.3	Environnement et outils de développement	68
4.3	Principe de mouvement du robot à quatre roues	69
4.3.1	Validation du système de détection	71
4.4	Test de validation du système	73
4.5	Limites et travaux en cours	76
4.6	Conclusion	76
	Conclusion générale et perspectives	77

Liste des acronymes

EEG Electroencéphalogramme

ICM Interface Cerveau Machine

R.U.R Rossum's Universal Robots

SRI Stanford Research Institute

AGV Automated Guided Vehicle

AMR Autonomous Mobile Robot

UAV Unmanned Aerial Vehicle

ROV Remotely Operated Vehicle

LIDAR Light Detection And Ranging

IA Intelligence Artificielle

CC Courant Continu

TT Tout Terrain

FCEM Force Contre Electro-Motrice

PWM Pulse Width Modulation

RPM Revolution Per Minute

RPi Raspberry pi

OS Operating System

GPIO General Purpose Input/Output

LED Light Emitting Diode

PD Power Delivery

I²C Inter Integrated Circuit

SPI Serial Peripheral Interface

UART Universal Asynchronous Receiver Transmitter

IDE Integrated Development Environment

CIR Centre Instantanée de Rotation

Liste des figures

1.1	Le bras articulé Unimate	15
1.2	Le schéma de fonctionnement d'Unimate	15
1.3	La tortue conçu par Mr Grey WALTER	16
1.4	Shakey avec composants étiquetés en anglais	16
1.5	Genghis, L'hexapode	17
1.6	MiR500 améliorent la logistique des entrepôts de l'usine pharmaceutique de Novo Nordisk en Chine	19
1.7	Les robots mobiles rationalisent la logistique interne chez HIPRA	19
1.8	Robot militaire	20
1.9	Robots livreurs pour libérer du temps aux soignants des hôpitaux de Nantes et de Cholet	20
1.10	Robot basketteur de Toyota CUE 6 réalisant le plus grand tir du basketball	20
1.11	Premier rover autonome lunaire Lunokhod 1 (1970), the Memorial Museum of Cosmonautics/Astronautics	21
2.1	Autodesk Fusion pour l'usage personnel	25
2.2	La conception en 3D du boîtier sous le logiciel Fusion	25
2.3	La conception en 3D des supports de fixation des moteurs sous le logiciel Fusion	26
2.4	La conception en 3D du couvercle sous le logiciel Fusion	26
2.5	Les dimensions de la roue	27
2.6	Vue des deux faces du contrôleur mini-L298N	28
2.7	Composants stratégiques du module L298N	30
2.8	Vue en 2D, vue en 3D et broches du circuit intégré L298N	30
2.9	Le schéma fonctionnel du circuit intégré L298N	32
2.10	Les deux états possible d'un pont en H	32

2.11	Signaux PWM et tensions moyennes	33
2.12	Table de vérité de L298N	34
2.13	Les dimensions du moteur CC	35
2.14	Le moteur CC type TT à réducteur	35
2.15	Les dimensions du capteur ultrason "HC-SR04"	38
2.16	Vue des deux faces du capteur ultrason	38
2.17	L'emballage du Power bank	39
2.18	Le power bank	39
2.19	Batterie Lipo Zop Power de 5200mah 11.1v 35C 3S	40
2.20	La charge de la batterie LiPo en utilisant le chargeur HTRC T240	41
2.21	Le niveau de charge des trois cellules de la batterie dans l'afficheur du chargeur HTRC T240	41
2.22	Le diagramme de charge de la batterie dans l'afficheur du chargeur HTRC T240	41
2.23	La carte raspberry pi 5	44
2.24	Adaptateur Secteur de la carte RPi	44
2.25	Processeur BCM2712	45
2.26	Contrôleur d'E/S Raspberry Pi RP1	46
2.27	Gestion de l'alimentation IC	46
2.28	Broches GPIO du raspberry pi 5	47
2.29	L'architecture du raspberry pi 5	48
2.30	Raspberry pi Imager format executable	48
2.31	L'interface de raspberry pi Imager	48
2.32	Démarrage du Raspberry Pi	50
2.33	Brochage et caractéristiques techniques de la carte Arduino MEGA	51
3.1	Modélisation cinématique combinée : Châssis quadricycle et profil des vitesses linéaires	55
3.2	Schéma du robot quadricycle relié au repère R_c en deux dimensions	58
3.3	Représentation si $\vec{v}$ positif, ω anti-horaire	61
3.4	Représentation si $\vec{v}$ positif, ω horaire	62
3.5	Représentation si $\vec{v}$ négatif, ω horaire	62

3.6	Représentation si $\vec{v}$ négatif, ω anti-horaire	63
4.1	La plateforme mobile obtenue	65
4.2	Schéma synoptique de fonctionnement du robot	67
4.3	L'installation de la bibliothèque Adafruit Motor Shield library	69
4.4	Organigramme de fonctionnement du capteur ultrason HC-SR04	72
4.5	Détection d'obstacle de la plateforme	73
4.6	Organigramme de commande par clin d'oeil et détection d'obstacle	75

Introduction générale

L'évolution rapide de la Robotique et de la navigation mobile autonome a ouvert de nouvelles perspectives dans de nombreux secteurs, notamment celui de l'assistance médicale des personnes handicapées. L'automatisation et l'autonomie de ses robots sont aujourd'hui au cœur des avancées technologiques, permettant d'améliorer leur capacité à interagir avec leur environnement de manière intelligente. Ce projet s'inscrit dans ce contexte d'innovation en explorant l'application d'une plateforme mobile pour la navigation autonome et la détection des obstacles. L'objectif principal de ce travail est de concevoir et de développer une plateforme robotique mobile intelligente commandée par des signaux électroencéphalographiques (EEG).

Cette plateforme repose sur l'acquisition et l'analyse de l'activité cérébrale de l'utilisateur afin de générer des commandes de navigation permettant le contrôle du système sans avoir besoin à une interaction physique directe associée à des capacités de détection et d'évitement d'obstacles. Elle est en mesure d'interagir de manière sûre avec son environnement et d'adapter son comportement aux situations rencontrées. Cette solution s'appuie sur les principes des interfaces cerveau-machine (ICM), une technologie permettant de traduire l'activité cérébrale en commandes exploitables par un dispositif externe.

Ce projet vise à proposer une solution d'assistance à la mobilité destinée aux personnes atteintes d'un handicap physique, afin de renforcer leur autonomie, leur confort et leur sécurité dans les activités quotidiennes. Le principal atout est de permettre à des patients souffrant de paralysie de se déplacer grâce à un système robotisé autonome capable d'interagir de manière fiable avec son environnement extérieur. Ce travail ouvre également des perspectives dans le domaine de la santé mobile, en assurant des déplacements assistés à la fois sûrs et efficaces.

Dans cette situation, les robots mobiles qui peuvent détecter des obstacles apparaissent comme des outils prometteurs pour le développement d'un fauteuil roulant autonome.

Ce mémoire s'attache à la définition de ce mode de commande, et a prouvé l'intérêt de son utilisation.

ce manuscrit est structuré en quatre chapitres complémentaires. Le premier chapitre repose sur l'état de l'art de la robotique mobile. Le chapitre suivant présente une description générale du matériel utilisé dans le développement d'une plateforme mobile à quatre roues. Ensuite, un chapitre sur la modélisation de la plateforme mobile à quatre roues comporte l'étude du comportement de ce robot en se basant sur des calculs mathématiques. Le chapitre final porte sur les résultats de l'étude pour la commande de la plateforme mobile à quatre roues.

Chapitre 1

Etat de l'art de la robotique mobile

Introduction

Les robots mobiles sont des machines automatisées conçues pour effectuer des tâches de manière autonome. Ils peuvent soit suivre des commandes humaines, se déplacer de manière autonome, percevoir leur environnement et exécuter des tâches, soit exécuter des séquences préprogrammées contrôlées par un logiciel. Par rapport aux robots fixes traditionnels, les robots mobiles sont plus intelligents et plus adaptables. Aujourd'hui, les robots mobiles sont de plus en plus populaires dans divers secteurs commerciaux. Ils sont utilisés pour assister ou remplacer le travail humain, et peuvent même effectuer des tâches impossibles ou dangereuses pour l'homme. Les robots mobiles sont désormais omniprésents dans les usines, les entrepôts logistiques, les hôtels, les hôpitaux, les fermes, les supermarchés, les ports et les chantiers de construction.

1.1 Concepts et définition

Le mot "robot" est apparu pour la première fois en 1920 dans la pièce de théâtre de science-fiction R.U.R. (Rossum's Universal Robots) de l'écrivain tchèque Karel Čapek [1]. Issu du tchèque *robota* (« travail forcé, corvée »), ce terme désignait des androïdes biologiques créés pour remplacer l'homme dans les tâches pénibles. Les débuts de la robotique fût dans une chaîne d'assemblage industriel.

Unimate (Figure 1.1) est le premier véritable robot industriel programmable qui a été inventé par George DEVOL en 1954- breveté en 1961 et développé avec Joseph Engelberger, considéré comme le « père de la ro-

botique ».

La tâche de ce "bras articulé" consistait à saisir des pièces de métal chaudes (moulées sous pression) pour les déplacer et les empiler et a été installé dans une usine de General Motors en New Jersey(Figure 1.2).

Donc cette machine a servi pour exécuter des tâches répétitives, pénibles et dangereuses pour les opérateurs humains , notamment en raison de la chaleur intense, des fumées toxiques et du risque de blessure lors de la manipulation des métaux.l'Unimate a prouvé la viabilité de l'automatisation, ouvrant la voie à la robotique industrielle moderne.

Une telle révolution technologique a néanmoins présenté des faiblesses techniques et opérationnelles inhérentes à sa nature de "pionnier".

Même si ce système arrivait à suivre une séquence de mouvements enregistrée, il est dans l'incapacité à interagir avec son environnement.En absence de capteurs, il travaillait "à l'aveugle" et ne peut pas adapter ses mouvements suivant les informations variables au cours du temps. C'est ce qui fait de lui un esclave artificiel de faible adaptabilité et parfois peu fiable.

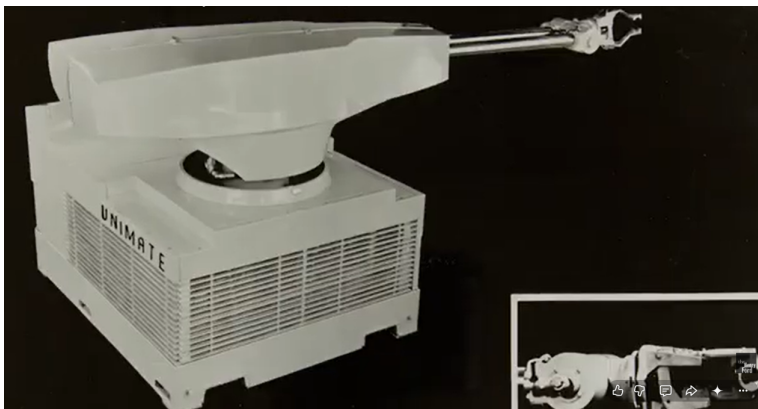


FIGURE 1.1 – Le bras articulé Unimate, [2].

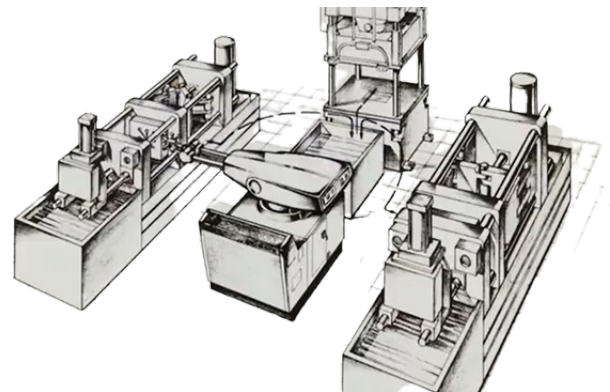


FIGURE 1.2 – Le schéma de fonctionnement d'Unimate,[2].

La Tortue appelée Cora(figure 1.3) construite par Grey Walter dans les années 1950 , est l'un des premiers robots mobiles autonomes.

En utilisant que quelques composants analogiques, dont des tubes à vide, il se dirige vers une lumière qui marque un but, et s'arrête face à des obstacles et de recharge ses batteries lorsqu'il arrive dans sa niche.

Toutes ces fonctions sont réalisées dans un environnement entièrement préparé, mais restent des fonctions de base qui sont toujours des sujets de recherche et de développement technologiques pour les rendre de plus en

plus génériques et robustes.



FIGURE 1.3 – La tortue conçu par Mr Grey WALTER, [3]

En 1960, le concept du robot mobile se concretise et cela grâce à la réalisation du projet Shakey (de 1966 à 1972) développé au SRI International à Menlo Park, il est considéré comme le tout premier robot mobile généraliste capable de raisonner sur ses actions (figure 1.4).

Il pouvait analyser son environnement, planifier des déplacements et déplacer des objets, bien que très lentement.

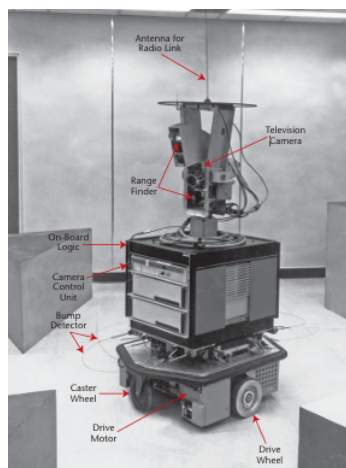


FIGURE 1.4 – Shakey avec composants étiquetés en anglais, [4]

Ensuite, le robot Genghis, conçu par Rodney Brooks au MIT à la fin des années 1980, est un robot hexapode (à six pattes) emblématique, il est équipé de six capteurs pyroélectriques pour la détection de la faune et utilise douze moteurs pour actionner ses six pattes indépendantes.



FIGURE 1.5 – Genghis, L'hexapode,[5]

Un **robot mobile** est donc un système mécanique, électronique et informatique qui agit physiquement dans son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné . Cette machine polyvalente est capable de s'adapter à certaines variations de ses conditions de fonctionnement. Elle est dotée de fonction de perception, de décision et d'action. Ainsi, le robot devrait être capable d'effectuer, de différentes manières, des tâches diverses et d'accomplir correctement sa propre tâche, même s'il rencontre de nouvelles situations inopinées.

1.2 Classification des robots mobiles

Les robots mobiles se classent principalement selon leur système de locomotion, leur environnement (terrestre, aérien, aquatique), leur autonomie (AGV guidés, AMR autonomes) et leur application. Ils se distinguent par des structures à roues (classiques, omnidirectionnelles) ou à pattes (humanoïdes, quadrupèdes), adaptées aux terrains plats ou accidentés.

On cible notre classification sur le système de locomotion et on distingue :
Robots à roues : Les plus courants en intérieur (usines, bureaux). Il est inclut les modèles différentiels, tricycles, ou omnidirectionnels (roues mécanum).

Robots à pattes : Utilisés pour les terrains accidentés (quadrupèdes, hexapodes) ou les environnements humains (humanoïdes).

Robots à chenilles : Conçus pour franchir des obstacles difficiles en extérieur.

Robots volants (Drones/UAV) : Multirotors, avions, ou dirigeables.

Robots marins (AUV/ROV) : Véhicules sous-marins ou de surface.

Les robots mobiles à quatre roues offrent une excellente stabilité, une forte capacité de charge et une grande efficacité énergétique sur surfaces planes,

ce qui les rend idéaux pour l'industrie, la logistique et l'entrepôt. Cependant, ils manquent de mobilité sur les terrains très accidentés et sont souvent non-holonomes (sauf roues spéciales), limitant leur agilité.

Avantages :

Stabilité élevée : La base à quatre points d'appui assure une meilleure assise par rapport aux robots à deux ou trois roues.

Déplacement simple : Le système de locomotion à roues est facile à concevoir, contrôler et programmer.

Vitesse de déplacement : Les robots à roues peuvent se déplacer rapidement sur des surfaces planes avec une faible consommation d'énergie.

Maintenance facile : Les composants mécaniques sont simples à remplacer et à entretenir.

Forte capacité de charge : La répartition du poids sur quatre roues permet de transporter des charges plus importantes.

Inconvénients :

Difficulté sur terrains irréguliers : Les robots à quatre roues ont des difficultés à franchir les escaliers, les obstacles élevés, et les terrains accidentés.

Sensibilité au glissement : Sur des surfaces glissantes ou sableuses, les roues peuvent perdre l'adhérence.

Rayon de braquage : Certains robots à quatre roues nécessitent plus d'espace pour tourner.

Dépendance à la qualité du sol : Leur efficacité diminue fortement sur les terrains non plats.

1.3 Domaine d'utilisation des robots mobiles

Le déploiement des robots mobiles, en particulier les robots mobiles autonomes (AMR), est principalement structuré autour de plusieurs secteurs clés, visant à automatiser les tâches de transport et de logistique dans des environnements dynamiques.

1.3.1 Logistique et Entrepôts (Supply Chain)

C'est l'un des domaines les plus courants, où les robots déplacent des marchandises, des colis en se déplaçant d'un point à un autre d'une manière structurée pour éviter les collisions accidentelles.



FIGURE 1.6 – MiR500 améliorent la logistique des entrepôts de l'usine pharmaceutique de Novo Nordisk en Chine,[6]

1.3.2 Industrie Manufacturière (Industrie 4.0)

Ils sont utilisés pour le transport interne de pièces entre les postes de travail, l'alimentation des machines de production, et la manutention de matériaux.



FIGURE 1.7 – Les robots mobiles rationalisent la logistique interne chez HIPRA, [7]

1.3.3 Militaire

Ces outils (drones de poche, robots terrestres légers) réduisent les risques pour les soldats en inspectant des zones dangereuses comme des bâtiments ou des tunnels.



FIGURE 1.8 – Robot militaire

1.3.4 Santé et Hôpitaux

Déploiement pour le transport de repas, de linge, de médicaments ou de déchets, permettant de libérer le personnel soignant de ces tâches.



FIGURE 1.9 – Robots livreurs pour libérer du temps aux soignants des hôpitaux de Nantes et de Cholet, [8]

1.3.5 Loisir

L'aspirateur domestique est de plus en plus présent dans les maisons. Comme il existe un humanoïde qui arrive à lancer le ballon dans le panier de basketball.



FIGURE 1.10 – Robot basketteur de Toyota CUE 6 réalisant le plus grand tir du basketball, [9]

1.3.6 L'exploration Spaciale

Les robots autonomes sont essentiels pour les futures missions sur Mars et au-delà, où l'intervention humaine est impossible en temps réel. Le premier robot mobile spatial est Lunokhod 1, envoyé par l'Union Soviétique et posé sur la Lune le 17 novembre 1970. Il s'agit du tout premier rover

à avoir parcouru la surface d'un astre extraterrestre, contrôlé à distance depuis la Terre, bien avant les rovers martiens de la NASA.

Ces engins, souvent appelés « rovers » ou astromobiles, sont conçus pour explorer la surface de planètes ou de lunes, s'éloignant de leur atterrisseur pour analyser le terrain.



FIGURE 1.11 – Premier rover autonome lunaire Lunokhod 1 (1970), the Memorial Museum of Cosmonautics/Astronautics, [10]Photographie de Jason Eppink, 2013

1.4 Recherches et travaux actuels

Les robots mobiles actuels, notamment les AMR (Autonomous Mobile Robots), se caractérisent par une autonomie décisionnelle élevée, une navigation intelligente en temps réel, et une grande flexibilité sans infrastructure dédiée. Ils intègrent l'IA, des capteurs avancés (LiDAR, caméras) pour éviter les obstacles, et travaillent souvent en collaboration avec l'homme. Voici les caractéristiques principales des robots mobiles actuels :

1.4.1 Autonomie et Navigation Intelligente

Contrairement aux anciens AGV (guidés par des rails), les AMR modernes cartographient leur environnement et déterminent le meilleur trajet en temps réel. Ils peuvent contourner des obstacles inattendus.

1.4.2 Capteurs et Perception Avancés

Ils utilisent des caméras, des radars, des lidars et des capteurs à ultrasons pour une perception à 360° de leur environnement.

1.4.3 Flexibilité et Mobilité

Ils sont faciles à déployer et à reprogrammer, s'adaptant rapidement aux changements de flux logistiques. Les roues omnidirectionnelles (type Mecanum) leur permettent de se déplacer dans des espaces étroits.

1.4.4 Sécurité et Collaboration

Ils sont conçus pour travailler en toute sécurité aux côtés des humains (robots collaboratifs), grâce à des systèmes d'arrêt d'urgence et de détection de personnes.

1.4.5 Types de Mobilité

La majorité utilise des roues (unicycle, différentiel, tricycles), mais des formes humanoïdes ou à pattes se développent pour des terrains irréguliers.

Ils sont largement utilisés dans la logistique, l'industrie (transport de charges), la santé, et le nettoyage.

1.5 Conclusion

Ce chapitre est principalement dédié à la découverte de la robotique mobile et leur application dans des domaines exigeants et risqués. Chaque type de robot possède des caractéristiques spécifiques adaptées à sa fonction : mobilité, autonomie, précision, capacité de détection, intelligence décisionnelle ou encore résistance aux conditions extrêmes. Ces caractéristiques permettent aux robots d'accomplir leurs missions de manière adéquate et performante selon les besoins du domaine concerné. En combinant de manière homogène plusieurs disciplines telles que l'informatique, la mécanique, l'électronique et l'intelligence artificielle, la maîtrise de la robotique mobile constitue un défi scientifique et technologique majeur, offrant des

solutions performantes à de nombreux problèmes tout en exigeant le respect de certaines limites techniques, humaines et éthiques.

Chapitre 2

Description générale du matériel utilisé

2.1 Introduction

La réalisation de cette plateforme mobile repose sur la mobilité du système et l'interaction avec l'espace qui l'en-tour pour le rendre autonome. L'architecture mise en place dans ce travail se base sur deux axes complémentaires : partie matérielle et partie logicielle.

2.2 Structure mécanique

La structure mécanique définit le support qui porte l'ensemble des composants. Les principales pièces formant le boîtier ont été réalisées par impression 3D pour une réalisation sur-mesure et homogène.

2.2.1 Boîtier

Autodesk Fusion (anciennement Fusion 360) est une référence incontournable pour la conception de pièces 3D. Ce logiciel cloud de pointe combine la CAO (conception assistée par ordinateur), la FAO (fabrication assistée par ordinateur), la simulation 3D et la conception des circuits imprimés au sein d'une plateforme unique.

Il est particulièrement plébiscité pour les projets d'ingénierie mécanique, le design de produits, et la préparation de modèles pour l'impression 3D. Il est tout à fait plausible d'utiliser la version gratuite d'Autodesk Fusion en 2026 pour un usage personnel [11]. Il existe aussi une vidéo qui explique par étapes le bon déroulement de l'installation [12].



FIGURE 2.1 – Autodesk Fusion pour l'usage personnel

Cet outil sera utilisé pour la modélisation 3D CAO de plusieurs pièces de notre plateforme. Ils sont optimisés pour être fabriqués via impression 3D en plastique de type PLA.

- Boîtier(figure 2.2) : La structure possède une base rectangulaire et arrondie aux deux bords avant. On a rajouté un compartiment central surélevé parfaitement dimensionné pour loger de façon stable une batterie externe.

La face avant comporte deux percages circulaires côte à côte. Cette découpe est spécifiquement conçue pour encastrer les deux "yeux" (l'émetteur et le récepteur) du capteur de distance à ultrasons (HC-SR04).

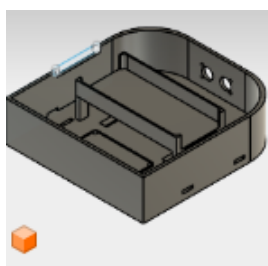


FIGURE 2.2 – La conception en 3D du boîtier sous le logiciel Fusion

- Support moteur(figure 2.3) : Cette modélisation regroupe quatre supports de fixation en U, spécialement conçus pour immobiliser des moteurs à courant continu à engrenages de type TT .

Chaque patte verticale intègre un percage circulaire débouchant. Ces trous sont idéalement positionnés pour s'aligner avec les percages d'usine présents sur le corps des moteurs TT.

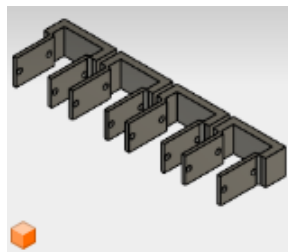


FIGURE 2.3 – La conception en 3D des supports de fixation des moteurs sous le logiciel Fusion

- Couvercle (figure 2.4) : La plaque supérieure amovible, conçue spécifiquement pour servir de couvercle de protection au boîtier en adoptant exactement la même silhouette que le bac inférieur, combinant une base rectangulaire et deux angles arrondis à l'avant . Cela garantit une fermeture et un ajustement esthétique parfait du châssis.

La caractéristique principale de cette pièce est sa structure supérieure entièrement perforée d'une matrice régulière de trous circulaires. Les multiples ouvertures permettent une circulation naturelle de l'air . C'est un choix de conception indispensable pour évacuer la chaleur dégagée par le raspberry pi .

Ces perforations régulières peuvent également servir de points de fixation universels pour visser ou clipser des composants additionnels en hauteur (des LED de statut ou des antennes de communication).

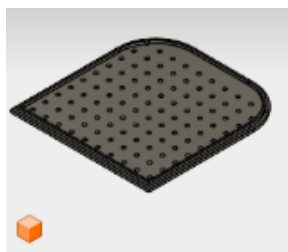


FIGURE 2.4 – La conception en 3D du couvercle sous le logiciel Fusion

A la fin de l'impression de toute les pièces, il reste l'assemblage pour obtenir une plateforme compacte.

2.2.2 Roue motrice

Il s'agit d'une roue motrice standard pour robotique mobile légère, ce mode de déplacement offre d'excellentes performances en termes de vitesse et d'accélération, bien qu'il nécessite un environnement de configuration relativement plane. En pratique, la classification des roues repose sur trois

architectures principales :

Les roues fixes : L'axe de rotation est fixe par rapport au châssis et traverse le centre géométrique de la roue.

Les roues orientables centrées : L'axe d'orientation est perpendiculaire au sol et intersecte le centre de la roue, permettant de modifier la direction du vecteur vitesse.

Les roues folles (ou castor wheels) : Caractérisées par un axe d'orientation vertical décentré par rapport au plan de la roue. Ce décalage géométrique permet un auto-alignement passif suivant la trajectoire du robot.

Dans le cadre de ce projet, le choix s'est porté sur des roues fixes. Sur le plan technologique, cette solution simplifie considérablement la commande des actionneurs, minimise les pertes énergétiques par frottement et optimise la vitesse de pointe du véhicule.

Spécifications géométriques et massiques

L'analyse dimensionnelle directe de la roue(figure 2.5) fournit les caractéristiques suivantes[13] :

Diamètre extérieur : 68,4 mm. Ce diamètre détermine la distance parcourue par tour (≈ 215 mm/tr), paramètre clé pour l'odométrie et le calcul de la vitesse linéaire du robot.

Largeur de la bande de roulement (W) : 28,2 mm. Cette largeur offre une surface de contact optimisée pour maximiser la stabilité latérale et la répartition de la pression au sol.

Masse totale (m) : 27,95 g. Une faible masse limite l'inertie de rotation (J), réduisant le couple nécessaire au démarrage et au freinage des moteurs.



FIGURE 2.5 – Les dimensions de la roue,[13]

L'architecture de la plateforme mobile intègre quatre roues motrices. Cette configuration synchrone implique l'utilisation d'un système de motorisation indépendant, associant un actionneur dédié (moteur à courant continu) à chaque roue pour assurer la propulsion et la direction par différentiel de vitesse.

2.3 Structure électrique

La partie électrique de la plateforme mobile se structure sur quatre blocs principaux à savoir : la source d'énergie, la puissance(actionneur) et les capteurs.

Dans la chaîne d'énergie, le système de commande n'entre pas en contact direct avec les actionneurs. Le préactionneur fait office de passerelle en traitant le signal de commande faible en puissance pour distribuer moduler l'énergie de puissance vers les systèmes commandés. Nous aurons besoin d'un des préactionneurs qui existe dans le marché appelé pilote de moteur ou variateur de vitesse pour un contrôle précis de vitesse et sens.

2.3.1 Carte contrôleur pilote de moteur : L298N à deux entrées d'activation

Le module L298N présenté dans la figure 2.6 , est une carte de développement permettant le pilotage de moteur à courant continu ou d'un moteur pas-à pas.

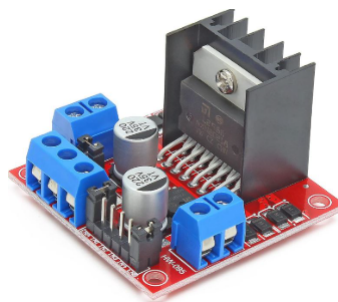


FIGURE 2.6 – Vue des deux faces du contrôleur L298N,[14]

Le composant essentiel constituant cette carte est le circuit intégré L298N de chez STMicroelectronics distingué par la version du boîtier Multiwatt15 monté en transversale(perpendiculairement à la longueur de la carte) et dispose d'un dissipateur thermique.

A. Composants essentiels du module L298N

1. Le circuit intégré L298N Il comprend :

- Double pont en H(H-bridge) capable d'inverser le sens de rotation de deux moteurs à courant continu et de contrôler sa vitesse depuis un microcontrôleur ;
- Deux broches d'activation pour la commande logique ;
- Un courant allant jusqu'à 2A par canal.

2. Dissipateur thermique La puce L298N utilise une technologie de transistors bipolaires qui provoque une chute de tension interne significative (générant beaucoup de chaleur). Ce dissipateur évacue les calories dans l'air pour éviter la surchauffe et la destruction du circuit lors du pilotage de charges lourdes.

3. Régulateur de tension 7805 Il abaisse la tension d'alimentation principale (11,1 V de l'alimentation) pour générer une tension stable de 5 V. Cette tension stabilisée alimente la logique interne de la puce L298N et peut également servir à alimenter l'Arduino Mega connecté.

4. Cavalier d'activation du régulateur 5V Il active ou désactive le régulateur 7805 décrit ci-dessus.

Si la batterie fournit entre 7 V et 12 V, il est conseillé de garder ce cavalier permettant le régulateur interne de créer le 5 V qui alimente la commande logique.

Si la tension de la batterie dépasse 12 V, il faut alors retirer le cavalier et amener une source externe de 5 V sur la carte pour alimenter la logique.

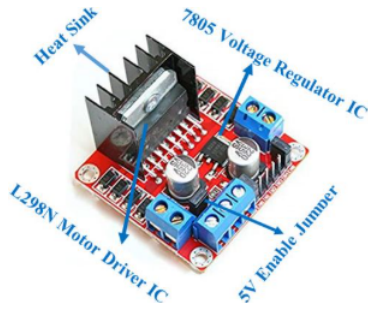


FIGURE 2.7 – Composants stratégiques du module L298N

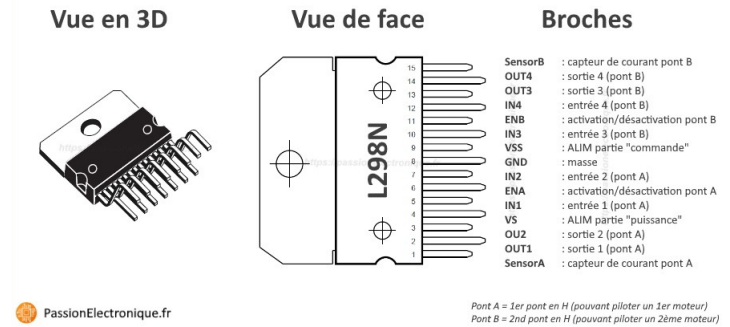


FIGURE 2.8 – Vue en 2D, vue en 3D et broches du circuit intégré L298N,[15]

B. Caractéristiques du circuit intégré L298N

En passant en revue le datasheet du L298N, on analyse les principales caractéristiques du circuit intégré fourni par le fabricant STMicroelectronics selon la figure 2.8 .

- Partie puissance-broche V_S : L'alimentation de puissance est primordiale pour pouvoir alimenter les moteurs. Celle-ci est notée " V_S " sur la documentation constructeur.

Sa valeur pratique doit dépasser la tension de fonctionnement du moteur car il faut prendre en compte la chute de tension engendrée par les ponts en H du L298N. A ce sujet , la chute de tension d'un pont en H(représenté par V_{CEsat} peut aller de 1.8 à 4.9V dans le pire des cas (pour une intensité maximale de 2A pour éviter de sous-alimenter les moteurs.

La tension d'alimentation de puissance V_S doit être à minima égale à la tension envoyé sur les entrées(commande) $V + 2.5V$ et ne pas dépasser 46V [16].

- Alimentation partie commande- broche V_{SS} : C'est l'alimentation dédiée à alimenter la logique de commande interne à ce circuit intégré. car les transistors de puissances sont commandés via un dispositif logique interne, nécessitant une alimentation plus basse. La tension de commande V_{ss} devra être comprise entre 4,5 et 7V (typiquement : 5V [16].) Il ne faut pas confondre cette alimentation "secondaire" du L298N, indispensable pour faire fonctionner les circuits internes du L298N, avec la tension à fournir sur ses "entrées de commande".
- Tension de pilotage des ponts-broches ENA, ENB, IN1, IN2, IN3, et

IN4 : Les ponts en H du L298N sont pilotés via :

- Les entrées ENA et ENB, pour activer/désactiver les ponts (avec un signal PWM) ;
- Les entrées IN1, IN2, IN3, et IN4, pour choisir le sens de passage du courant, dans les moteurs. Au niveau de la tension applicable sur ces broches, celle-ci doit être comprise : Entre -0,3 et 1.5V [16], pour un état bas (équivalent à l'envoi d'un 0 logique) ; Entre 2,3 et VSS [16], pour un état haut (équivalent à l'envoi d'un 1 logique).

C. Principe de fonctionnement du module L298N

Le fonctionnement du L298N repose sur deux aspects :

D'une part pouvoir tourner les moteurs dans un sens ou dans un autre ce qui est permis par le principe du "Ponts en H" ;

Et d'autre part, pouvoir contrôler la vitesse de rotation d'un moteur grâce à un signal PWM envoyé sur sa broche de commande.

Les ponts en H Dans ce module est intégré deux pont en H qui sont en réalité une structure électronique formée de quatre transistors bipolaires, disposés visuellement en lettre "H" qu'on trouve en interne dans le L298N qu'on détecte dans la figure 2.9.

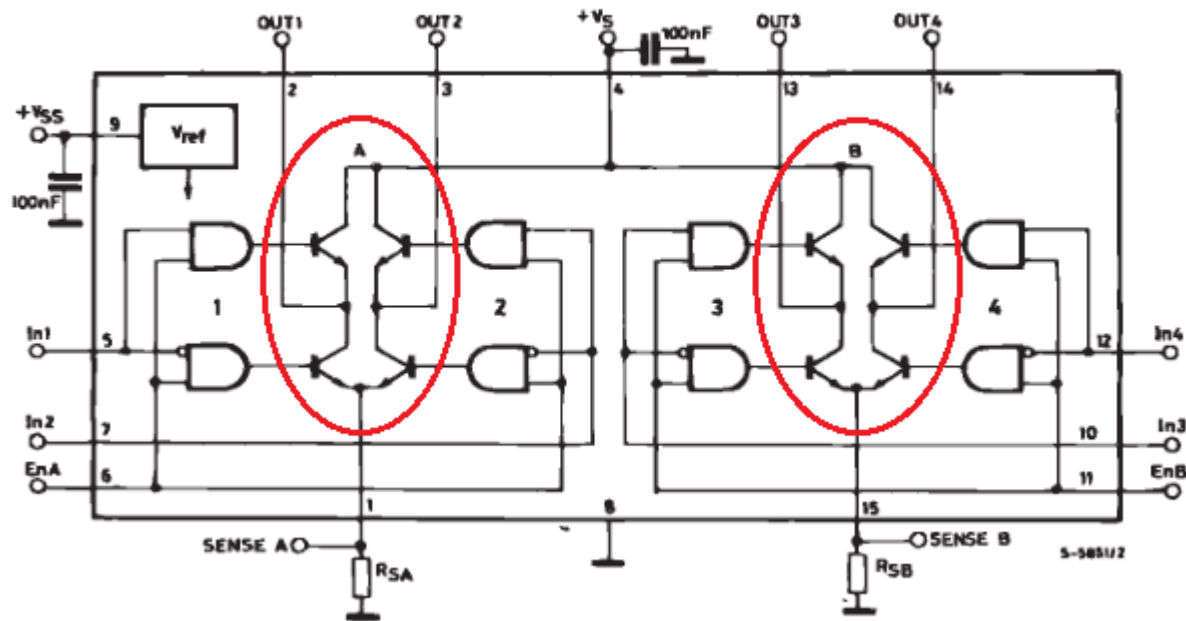


FIGURE 2.9 – Le schéma fonctionnel du circuit intégré L298N,[16]

En activant les transistors deux par deux ceux en diagonale, on contrôle le sens du passage du courant dans la charge, branchée au milieu du H. C'est ce chagement de direction du courant qui fait tourner les moteurs à courant continu en marche avant ou en marche arrière comme il est illustré dans la figure 2.10.

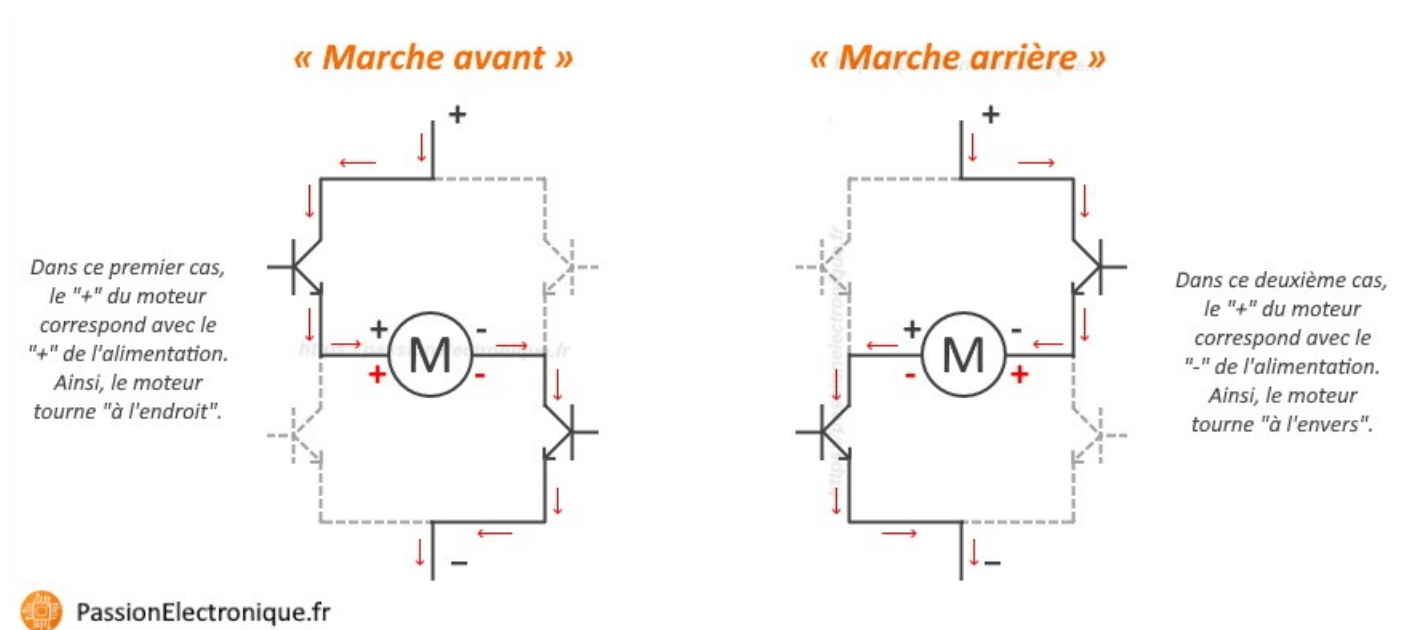


FIGURE 2.10 – Les deux états possible d'un pont en H, [15]

Le pilotage PWM Le pilotage des moteurs via un signal à rapport cyclique variable (PWM) rend possible la variation de vitesse des moteurs.

La vitesse d'un moteur à courant continu est proportionnelle à sa tension d'alimentation, ou plus exactement, à sa tension moyenne V_{moy} .

La tension moyenne V_{moy} s'exprime selon le rapport cyclique α et la tension d'alimentation V_{cc} :

$$V_{\text{moy}} = \alpha \cdot V_{\text{cc}} \quad (2.1)$$

Ainsi, la variation de la tension moyenne fournie à un moteur induit la variation de sa vitesse de rotation . Et pour faire varier une tension moyenne, rien de tel que la modulation en largeur d'impulsion. Le PWM est un signal rectangulaire de fréquence fixe et de rapport cyclique variable. La tension moyenne de ce signal est trouvée en multipliant la tension maximale(alimentation) au rapport cyclique comme illustré dans la figure 2.11 :

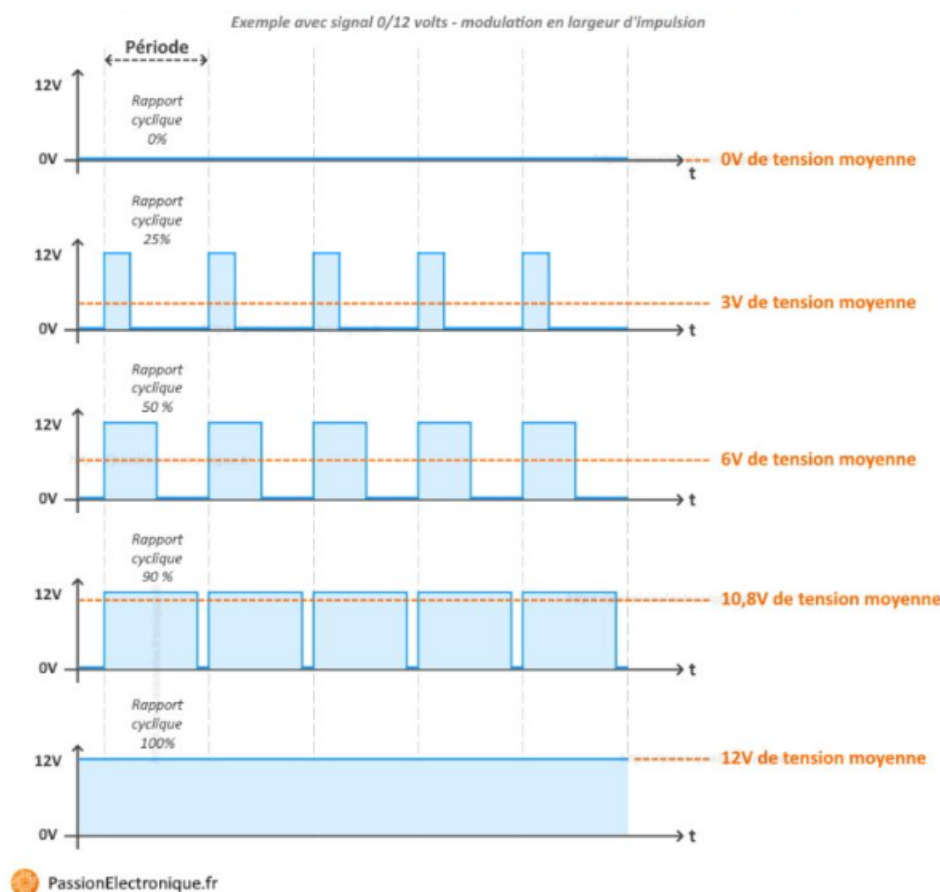


FIGURE 2.11 – Signaux PWM et tensions moyennes , [15]

Donc, pour faire varier la vitesse d'un moteur CC, il suffit d'envoyer un signal PWM au L298N. Ainsi, chaque pont en H hachera la tension d'alimentation des moteurs à ce rythme, et la vitesse de rotation des moteurs

sera parfaitement contrôlée.

Bienévidemment, comme le L298N possède 2 ponts en H, il faudra fournir deux signaux PWM pour contrôler 2 moteurs électriques, indépendamment d'un de l'autre.

D. Table de vérité du L298N

: Suivant comment alimenter chacune des 6 broches ENA,IN1,IN2,ENB,IN3,IN4 (à l'état bas, ou à l'état haut), le comportement des moteurs branchés sur le L298N sera modifié en conséquence. Voici d'ailleurs tous les cas possibles, pour le pont A (ENA/IN1/IN2) et le pont B (ENB/IN3/IN4) .

Entrées de sélection			
ENA	IN1	IN2	Résultat, en sortie
ENB	IN3	IN4	Résultat, en sortie
L	X	X	Moteur en roue libre (à l'arrêt, sans frein)
H	L	L	Blocage du moteur (arrêt rapide, freinage fort)
	L	H	Marche arrière
	H	L	Marche avant
	H	H	Blocage du moteur (arrêt rapide, freinage fort)

X = peu importe
L = état bas (0V, par exemple)
H = état haut (+5V, par exemple)

PassionElectronique.fr

FIGURE 2.12 – Table de vérité de L298N,[16]

Les entrées ENA et ENB peuvent recevoir une tension fixe soit 0 ou $+V_{SS}$ et le moteur sera respectivement à l'arrêt ou tournant à fond. Pour donner une vitesse variable aux moteurs, on va plutôt envoyer un signal PWM sur ces entrées ENA/ENB. Pour chaque combine ENA-IN1-IN2 ou ENB-IN3-IN4 sélectionnée dans la table de vérité ci-dessus(figure 2.12), on obtient une manipulation pour les moteurs.

2.3.2 Actionneur électrique

L'actionneur électrique est un composant clé de systèmes automatisés qui convertit la source d'énergie électrique en un mouvement mécanique. Dans le cadre de notre plateforme mobile, cette fonction de conversion est

assurée par des moteurs CC de type TT (figure 2.13 et 2.14). Ce choix d'actionneur s'explique par :

- La capacité de contrôle en vitesse et en direction suffisante pour la mobilité de la plateforme ;
- La capacité à fournir un couple adapté à la locomotion de la plateforme ;
- Alimenté à travers un pilote de moteurs tel que L298N , ce moteur permet de réaliser les différentes manœuvres de déplacement, de virage et de freinage indispensables à l'évolution de la plateforme dans son environnement.



FIGURE 2.13 – Les dimensions du moteur CC, [17]

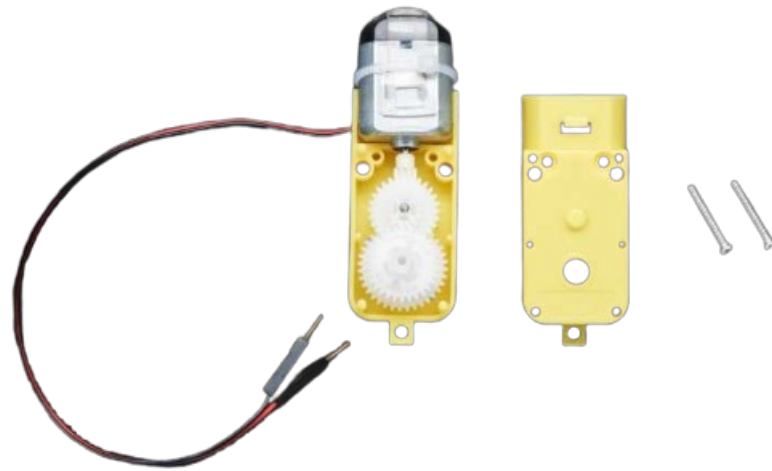


FIGURE 2.14 – Le moteur CC type TT à réducteur

A. Fonctionnement de moteur :

Le fonctionnement d'un moteur à courant continu repose sur la conversion d'énergie électrique en énergie mécanique grâce à l'interaction de champs magnétiques et de courants électriques.

Lorsqu'un courant électrique traverse les conducteurs du rotor (partie tournante) plongés dans le champ magnétique du stator (partie fixe), il subit une force mécanique appelée **force de Lorentz**. C'est cette force qui met le moteur en mouvement et crée le couple moteur.

Dès que le rotor commence à tourner dans le champ magnétique, un phénomène d'induction électromagnétique se produit (Loi de Lenz-Faraday). Les conducteurs du rotor coupent les lignes du flux magnétique, ce qui génère une tension interne appelée **Force Électromotrice** (FEM), souvent notée E (ou FCEM) [18].

a. Loi de la force électromotrice

$$E = k \cdot \Phi \cdot \Omega \quad (2.2)$$

Où :

E est la force électromotrice en V

k est une constante de fabrication propre au moteur

Φ est le flux magnétique en Webers

Ω est la vitesse de rotation du moteur en rad/s

La FEM est directement proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur. Plus le moteur tourne vite, plus la FEM augmente.

b. L'équation électrique globale du moteur

$$U = E + (R \cdot I) \quad (2.3)$$

U : est la tension appliquée aux bornes du moteur (contrôlée par exemple par PWM)

R est la résistance interne du bobinage en Ω)

I le courant qui traverse le moteur en A

En combinant la loi 2.2 et l'équation 2.3, on obtient la formule de la vitesse de rotation :

$$\Omega = \frac{U - R \cdot I}{k \cdot \Phi} \quad (2.4)$$

À vide (sans charge), le courant I est très faible. Le terme $R \cdot I$ devient négligeable et pour des conditions d'excitations fixées, le flux Φ est constant [18]. La formule se simplifie : $\Omega \approx \frac{U}{K}$ en posant $K = k \cdot \Phi$. La vitesse est alors purement proportionnelle à la tension d'alimentation U . C'est pourquoi faire varier la tension (via la PWM) fait varier directement la vitesse.

En charge (effort mécanique), le moteur doit forcer, le courant I augmente pour fournir le couple nécessaire. Le terme $(R \cdot I)$ grandit, ce qui fait baisser la FEM (E). Par conséquent, à tension U constante, la vitesse Ω diminue légèrement sous l'effet de l'effort.

Il s'agit d'un petit moteur CC à balais associé à un réducteur en plastique qui permet de réduire la vitesse de rotation tout en augmentant considérablement le couple.

B. Caractéristiques spécifiques de ce moteur

- Tension nominale : 3 V à 12 V CC (utilisation optimale entre 6 V et 9 V).
- Vitesse de rotation :
 - A 3V : ~ 90 tr/min (RPM)
 - A 6V : ~ 200 tr/min (RPM)
- Consommation : De 70 mA à vide à plus de 250 mA en charge (selon la tension).
- Courant de décrochage (blocage) : ~ 1 A (à 6V)
- Couple et vitesse : Grâce au réducteur (souvent avec un rapport de 1 :48), il offre une vitesse réduite mais un couple suffisant pour déplacer de petites charges.
- Contrôle : Nécessite un module de contrôle de puissance (pilote de moteur, ex : L298N) pour être piloté par un microcontrôleur.

C. Utilisation

Les moteurs CC (à courant continu) à balais sans fer se retrouvent dans une large gamme de produits et d'applications, tels que des produits médicaux, de robotique, d'automatisation en usine, de sécurité et d'accès, d'aviation et d'aéronautique [19].

Robots mobiles autonomes : Propulsion de petits robots à roues (deux ou quatre roues motrices) pour des voitures intelligentes ou des robots suiveurs de ligne.

Robots mobiles autonomes : Propulsion de petits robots à roues (deux ou quatre roues motrices) pour des voitures intelligentes ou des robots suiveurs de ligne.

Maquettisme : Motorisation de portes automatisées de maquettes ou de petits véhicules télécommandés.

Une fois la plateforme mobile dans le terrain, elle est confrontée aux obstacles matériels qui peuvent endommager sa carrosserie et faire diminuer ses

performances à court terme. L'élément indispensable qui permet à celle-ci d'avancer en toute sécurité est un capteur. On utilise fréquemment des capteurs externes pour permettre au robot mobile d'analyser son environnement en toute autonomie et à partir des données capturées le robot pourra agir au préalable. Pour ce qui est de la plateforme mobile, nous optons pour un capteur de proximité pour arriver à détecter les obstacles en cours du chemin et à les éviter. La détection d'obstacle, le freinage et l'arrêt d'urgence sont primordiaux pour garantir la sûreté et réduire les risques souvent improbable pour un système mobile.

2.3.3 Capteur d'ultrason

Le capteur à ultrason est le plus utilisé pour la mesure de distance qui sépare le robot d'un quelconque objet se trouvant jusqu'à 5 mètres sur son chemin. Ce composant fonctionne comme un télémètre en mesurant la distance entre deux points en émettant des ondes sonores à haute fréquence et en chronométrant le temps qu'elles mettent pour faire l'aller-retour après avoir rebondi sur un obstacle.



FIGURE 2.15 – Les dimensions du capteur ultrason "HC-SR04", [20].

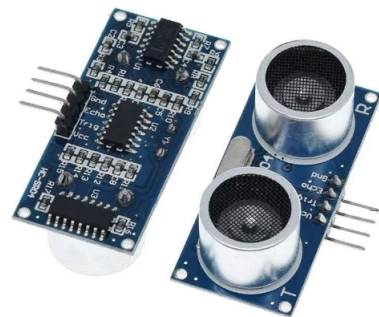


FIGURE 2.16 – Vue des deux faces du capteur ultrason, [20].

2.3.4 Power bank

Pour faire fonctionner le raspberry pi 5 dans notre plateforme mobile, nous avons choisi le power bank au lieu de l'adaptateur original de la carte. Une power bank est un dispositif de stockage d'énergie électrique pour alimenter des appareils électroniques en déplacement, sans avoir besoin d'une prise de courant murale. Elle se charge au préalable via une prise secteur. Une fois pleine, elle délivre l'énergie via ses ports universels. Le modèle de power bank utilisé est le power bank Hoco J101A.



FIGURE 2.17 – L’emballage du Power bank, [21].



FIGURE 2.18 – Le power bank ,[21].

Ses trois ports de sorties(USB-A x2, Type-C) permettent de recharger plusieurs appareils simultanément, tout en maintenant une efficacité maximale. Le port d’entrée Micro-USB est utilisé exclusivement pour recharger la batterie externe elle-même. Le Raspberry Pi 5 demande une alimentation stricte de 5V avec un courant pouvant atteindre 5A (soit 25W). Le protocole PD 3.0 permet cette négociation. Sa batterie lithium-polymère est protégée par un boîtier en ABS et polycarbonate ignifugé, garantissant une excellente résistance aux chocs et à la chaleur. L’indicateur LED intelligent, avec une lumière verte pour la charge rapide, permet de suivre le niveau de l’énergie restante visuellement [22].

Le L298N nécessite **deux alimentations distinctes** pour le bon fonctionnement de la commande des moteurs.

2.3.5 Alimentation externe

L’utilisation d’une alimentation externe et rechargeable garantit l’autonomie et l’efficacité en matière d’énergie d’alimentation. Une batterie Lithium-polymère est utilisée dans divers appareils grâce à leur haute densité énergétique, leur légèreté et leur flexibilité [23]. Parmi elles, la batterie LiPo 11,1 V est une option courante.



FIGURE 2.19 – Batterie Lipo Zop Power de 5200mah 11.1v 35C 3S

Elle se compose de trois cellules de 3.7V connectées en série, ce qui donne une tension nominale totale de 11.1 V.

Pour charger la batterie LiPo, il faut un chargeur d'équilibrage dédié aux batteries au lithium. On a utilisé le chargeur HTRC T240 qui est un chargeur/déchargeur à double canal doté d'un écran tactile HTRC T240 DUO (figure 2.20).



FIGURE 2.20 – La charge de la batterie LiPo en utilisant le chargeur HTRC T240



FIGURE 2.21 – Le niveau de charge des trois cellules de la batterie dans l'afficheur du chargeur HTRC T240



FIGURE 2.22 – Le diagramme de charge de la batterie dans l'afficheur du chargeur HTRC T240

A. Spécifications techniques du chargeur

- Deux Canaux Indépendants : Permet de charger simultanément deux batteries différentes avec des réglages distincts [24].
- Compatibilité des Batteries [24] : LiPo / LiIon / LiFe / LiHV : 1 à 6 cellules.
NiMH / NiCd : 1 à 15 éléments.

— Dimension : 145x105x64mm [24].

B. Compatibilité de tension avec la carte L298N

La carte d'extension L298N est conçue pour fournir des courants bidirectionnels à des tensions allant de 5V à 35V. La batterie LiPo 11.1V (3S) se situe parfaitement dans cette plage, offrant une tension de fonctionnement nominale stable de 11,1V sans risque de surcharge ou de sous-alimentation du circuit.

C. Calcul de la consommation en courant des quatre moteurs

Le module L298N utilise un double pont en H robuste, capable de piloter des moteurs jusqu'à 2 A par canal. Pour connecter quatre moteurs, ces derniers sont branchés par paire en parallèle sur chaque canal.

Chaque moteur possède un courant de fonctionnement en charge de 500 mA. La puce L298N consomme également un courant maximal de 36 mA pour sa propre logique de commande. La consommation totale théorique du système s'élève donc à :

$$\text{Consommation totale} = (4 \times 500 \text{ mA}) + 36 \text{ mA} = 2036 \text{ mA} \quad (2.5)$$

Cette valeur de 2,036 A reste bien en dessous de la capacité maximale du L298N (2 A par canal, soit 4 A au total) et de la capacité de décharge de la batterie.

D. Calcul de l'autonomie

La formule théorique pour calculer l'autonomie du système est la suivante :

$$\text{Autonomie (h)} = \frac{\text{Capacité de la batterie (mAh)}}{\text{Consommation totale (mA)}} \quad (2.6)$$

Avec une batterie de 5200 mAh et une consommation globale de 2036 mA :

$$\text{Autonomie théorique} = \frac{5200}{2036} \approx 2,55 \text{ heures} \quad (2.7)$$

En pratique, afin de préserver la durée de vie de la batterie LiPo et d'éviter une décharge profonde critique, on applique un coefficient de sécurité

de fonctionnement de 80 % :

$$\text{Autonomie réelle} = \frac{5200 \times 0,80}{2036} \approx 2,04 \text{ heures} \quad (2.8)$$

Le robot dispose ainsi d'une autonomie réelle d'environ 2 heures et 2 minutes en fonctionnement continu.

E. Capacité de décharge de la batterie (Taux C)

La batterie choisie possède un taux de décharge de 35C, ce qui signifie qu'elle peut fournir en continu un courant égal à 35 fois sa capacité nominale.

$$\text{Courant maximal disponible} = 5,2 \text{ A} \times 35 = 182 \text{ A} \quad (2.9)$$

Ce courant maximal disponible de 182 A dépasse très largement les besoins de notre système (2,036 A). La batterie ne subira donc aucun stress thermique ou électrique durant l'utilisation.

Avec sa configuration 3S (11,1 V) et sa capacité de 5200 mAh, cette batterie offre une densité d'énergie élevée, un cycle de vie prolongé et des performances stables, ce qui la rend parfaitement adaptée à notre projet de robotique.

L'architecture matérielle comportant la gestion de la puissance, le stockage de l'énergie et la précision des capteurs assure la robustesse matérielle de la plateforme mobile. Elle nécessite néanmoins une unité de contrôle et de prise de décision. C'est ici qu'intervient la partie informatique de la commande.

2.4 Partie Informatique

Cette partie de la conception concerne principalement l'unité de traitement dont le rôle est d'interpréter les données entrants et envoyer des directives de fonctionnement.

2.4.1 Unité de traitement et commande

Le raspberry pi 5 est un micro-ordinateur monocarte connue pour être proche du PC, idéal pour la robotique mobile grâce à sa puissance de calcul

élevée, son support d'intelligence artificielle, sa compatibilité avec ROS2 et son port PCIe permettant un stockage ultra-rapide. Il gère le traitement lourd et la commande en temps réel tout en restant compact.

- **Partie matérielle :** Équipé d'un processeur quadricœur Arm Cortex-A76 à 2,4 GHz, il est 2 à 3 fois plus performant que le Raspberry Pi 4. Il intègre la puce RP1, un contrôleur I/O multifonction sur mesure qui garantit une communication stable avec les capteurs et les moteurs via le port GPIO.

Les modules Wi-Fi et Bluetooth Low Energy (BLE) permettent de contrôler le robot à distance ou de l'intégrer dans un écosystème IoT.

L'alimentation est le point clé pour un robot mobile. Le Raspberry Pi 5 demande un courant de 5 V / 5 A (25 W) pour exploiter son plein potentiel en branchant l'adaptateur au connecteur USB-C.

Cette version du raspberry pi offre une prise en charge d'affichage impressionnante grâce à ses deux sorties Micro-HDMI, chacune capable de diffuser en 4K à 60 Hz.

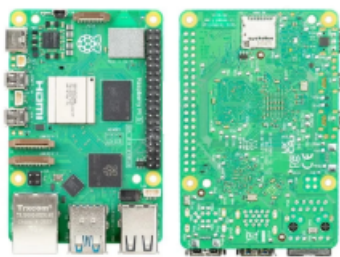


FIGURE 2.23 – La carte raspberry pi 5, [25]



FIGURE 2.24 – Adaptateur Secteur de la carte RPi , [26]

A. L'architecture du Raspberry pi 5

La nouvelle version du raspberry pi conserve la taille compacte des modèles précédents avec des améliorations dans la conception.

Les nouveautés apportés au raspberry pi 5 sont :

a. Processeur BCM2712 BCM2712 est un nouveau processeur d'application (AP) de 16 nanomètres de Broadcom, dérivé du BCM2711 AP de

28 nanomètres qui alimente le Raspberry Pi 4, ciblant des améliorations architecturales grâce au processeur quad-core Arm Cortex-A76 64 bits cadencé à 2,4 GHz, avec des caches L2 de 512 Ko par cœur et un cache L3 partagé de 2 Mo [27].

La combinaison d'un cœur plus récent et d'une fréquence d'horloge plus élevée garantit la vitesse d'exécution du CPU plus rapide ajouté à cela une consommation d'énergie plus faible[27].



FIGURE 2.25 – Processeur BCM2712,[27]

b. Contrôleur d'E/S Raspberry Pi RP1 Les fonctions d'E/S sont déchargées vers un contrôleur d'E/S séparé. Le RP1 est le contrôleur d'E/S disponible seulement sur le Raspberry Pi 5. Il offre deux interfaces USB 3.0 et deux interfaces USB 2.0 ; un contrôleur Ethernet Gigabit ; deux transmetteurs MIPI à quatre voies pour la caméra et l'affichage ; une sortie vidéo analogique ; des E/S générales à 3,3 V (GPIO) ; et la collection habituelle d'interfaces à faible vitesse multiplexées par GPIO (UART, SPI, I2C, I2S et PWM)[27].

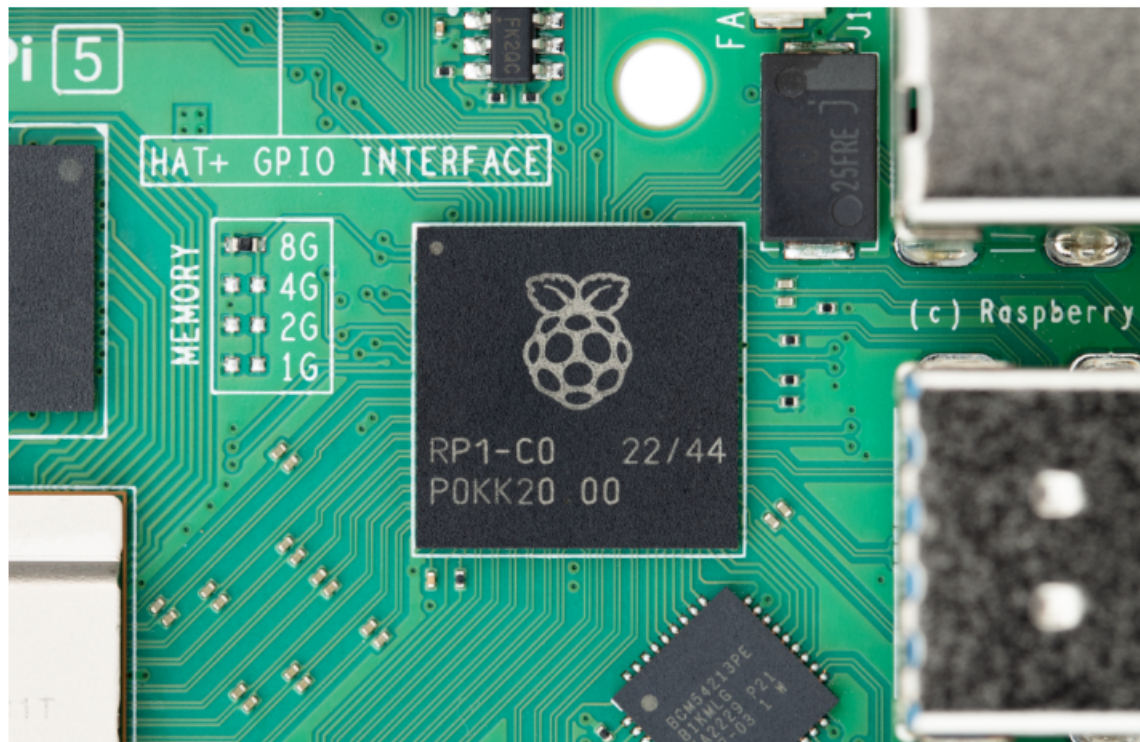


FIGURE 2.26 – Contrôleur d'E/S Raspberry Pi RP1,[27]

c. **Gestion de l'alimentation IC** BCM2712 et RP1 sont pris en charge par le troisième nouveau composant, le circuit intégré de gestion de l'alimentation (PMIC) Renesas DA9091 "Gilmour". Il s'occupe de l'alimentation requise par la carte, capable de fournir 20 ampères de courant pour alimenter les cœurs Cortex-A76 et d'autres logiques numériques dans BCM2712 [27].

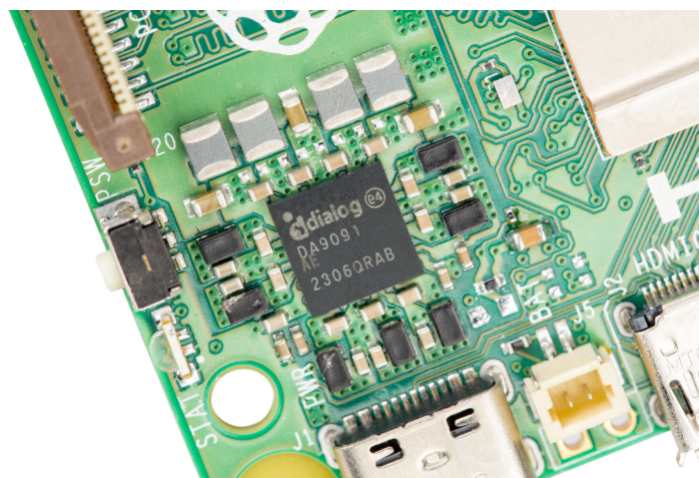


FIGURE 2.27 – Gestion de l'alimentation IC,[27]

L'interface de communication qui permet au raspberry pi d'interagir avec l'environnement extérieur à travers des capteurs et actionneurs est

appelée GPIO.

d. Broches GPIO Le port GPIO d'entrée sortie comporte 40 broches avec une utilisation spécifique pour chaque broche. Le schéma ci-dessous (2.28) montre le rôle de chaque broches ainsi que les protocoles qu'elles supportent.



FIGURE 2.28 – Broches GPIO du raspberry pi 5

On distingue 7 types de broches et usages qu'on peut en faire :

Alimentation : 3,3V ou 5V ;

Ground : masse 0V ;

GPIO : port standard d'entrée/sortie ;

SDA/SCL : lignes de données et d'horloge respectivement, spécifique du bus I²C ;

TXD/RXD : lignes de données de transmission et reception du protocole UART ;

MOSI/MISO/CEX/SCLK : lignes de données, ligne d'activation et l'horloge de synchronisation pour la transmission de données, utilisées dans le bus SPI ;

PWM : le signal de sortie à rapport cyclique.

En mode sortie, la tension fournie par une broche est de 3,3V et en mode entrée une broche ne tolérera qu'une tension maximum de 3,3V. Seules les deux broches d'arrivée de courant (en rouge) fournissent une tension de 5V.

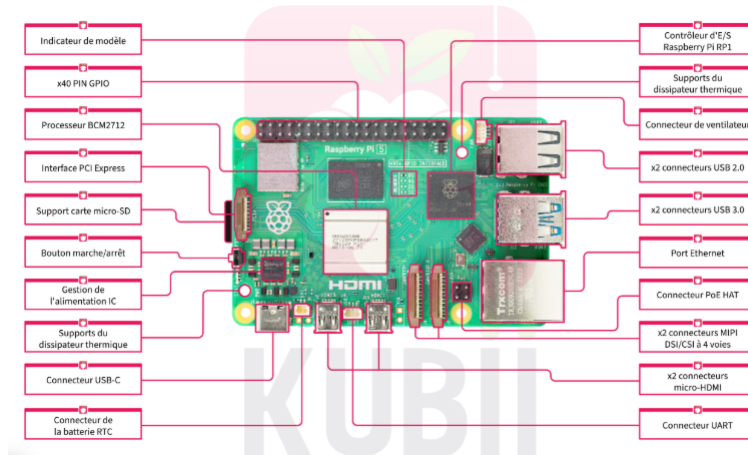


FIGURE 2.29 – L'architecture du raspberry pi 5

- Partie logicielle : Le système d'exploitation Raspberry pi OS (64 bits) utilisé pour cette carte est installé à l'aide de l'outil Raspberry pi Imager



FIGURE 2.30 – Raspberry pi Imager format exécutable

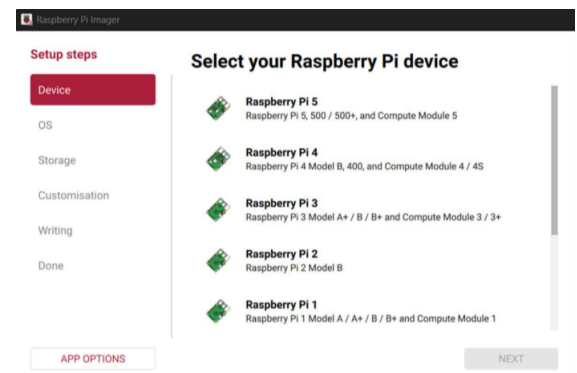


FIGURE 2.31 – L'interface de raspberry pi Imager

Etapes d'installation du système d'exploitation sur la carte micro SD

La taille de la carte doit être adaptée à la taille de l'OS. Pour l'installation de l'OS, on procède aux étapes suivantes :

B. Configuration du bootloader

Télécharger et ouvrir le Raspberry pi Imager sur l'ordinateur (disponible sur le site officiel de Raspberry Pi). Une fois l'interface apparaît comme la figure 2.5, il faut suivre la configuration pour installer le bootloader sur la carte SD. sur **Choose OS** (Choisir l'OS), faire défiler la liste et sélectionnez **Misc utility images** (Images utilitaires diverses) et retrouver **Bootloader**.

Sélectionner le type de démarrage souhaité (par exemple **SD card Boot** pour forcer le démarrage sur carte SD.

Insérer une carte MicroSD dans l'ordinateur et sélectionner votre carte MicroSD sur **Choose Storage** (Choisir le stockage) et terminer en cliquant sur **Write** pour flasher la carte.

Une fois l'opération terminée, on insère cette carte MicroSD dans le lecteur du RPi et la branche. Il faut la laisser allumer pendant quelques minutes le temps que la LED clignote en vert pour indiquer que la mise à jour s'effectue, puis la débrancher, retirer la carte avec le bootloader configuré.

Un *bootloader* est le premier programme informatique exécuté lors du démarrage d'un appareil informatique. Son rôle fondamental est de préparer le matériel et de charger le système d'exploitation dans la mémoire vive (RAM) pour le lancer.

Contrairement aux ordinateurs classiques, le processeur principal (ARM) du Raspberry Pi n'est pas le premier à se réveiller. Le processeur graphique (GPU) s'active en premier, lit la puce de mémoire contenant le bootloader, et initialise les composants[28].

Le bootloader analyse les supports de stockage pour trouver les fichiers de démarrage. Sur les modèles récents, il gère l'ordre de priorité (ex : démarrer en priorité sur la carte MicroSD, puis sur un disque SSD connecté en USB, ou via le réseau)[28].

Une fois l'emplacement trouvé, il charge le noyau du système (comme Linux) en mémoire RAM, configure les paramètres de base, puis réveille le processeur principal pour qu'il prenne le relais[28].

Sur les anciennes versions du Raspberry Pi, le bootloader était figé dans la mémoire morte (ROM). Pour les modèles récents Raspberry Pi 4, 5 et versions ultérieures, il est stocké sur une puce EEPROM modifiable, ce qui permet de le mettre à jour pour débloquent de nouvelles fonctionnalités (comme le démarrage direct depuis un disque dur USB).

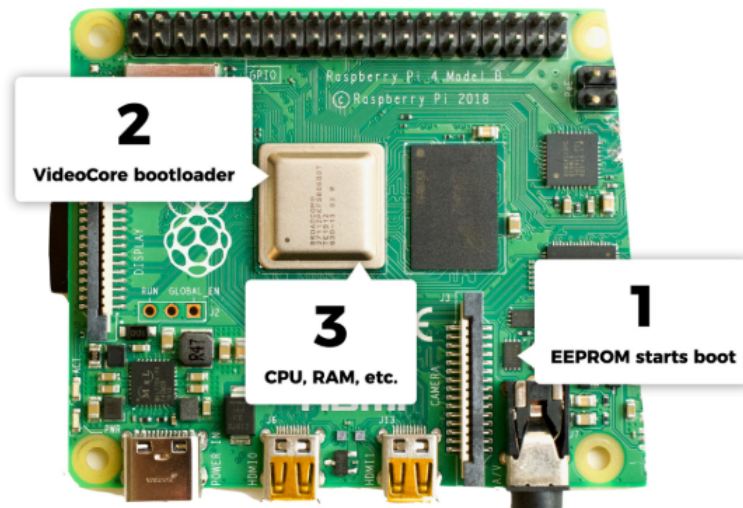


FIGURE 2.32 – Démarrage du Raspberry Pi,[28]

C. Installation de l'OS

Une fois le Bootloader à jour vient l'étape d'installation de l'OS. Pour cela , on lance à nouveau Raspberry pi Imager sur l'ordinateur. Sélectionner l'appareil Raspberry pi 5 dans notre cas, ensuite l'OS recommandé ici Raspberry pi OS(64-bits). Sélectionner la carte MicroSD utilisé auparavant. Avant d'écrire l'image, un menu de personnalisation va apparaitre pour faire entrer des données concernant le nom d'hôte, le mot de passe, ou la configuration du Wi-Fi et SSH. En cliquant **Write**, on lance l'écriture de l'image et la vérification. A la fin de cette opération, on récupère la carte MicroSD pour l'insérer dans le RPi. Une fois alimentée, la carte est censé démarrer normalement

2.4.2 Le microcontrôleur Arduino Mega

Dans cette architecture robotique, l'Arduino Mega 2560 est configuré comme un microcontrôleur de bas niveau . Contrairement au Raspberry Pi 5 qui assure la gestion logicielle globale de haut niveau, l'Arduino Mega gère l'exécution des tâches en temps réel strict sans système d'exploitation, garantissant une réactivité immédiate pour le pilotage des moteurs et la sécurité périphérique.

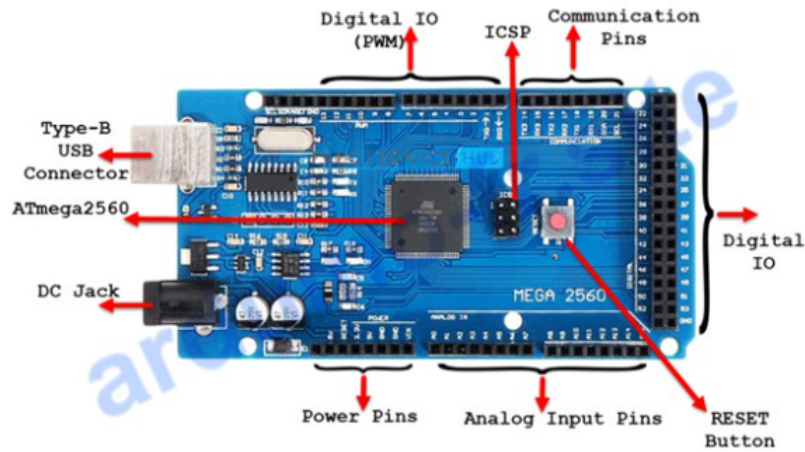


FIGURE 2.33 – Brochage et caractéristiques techniques de la carte Arduino MEGA,[29]

1. Liaison avec le pilote de moteur L298N (Actionnement)

L'Arduino Mega pilote le module L298N en convertissant les ordres de trajectoire en signaux électriques via deux types de broches :

A. Broches Digitales standards (IN1, IN2, IN3, IN4) : Ces broches basculent à l'état logique haut (5V) ou bas (0V) pour commander les ponts de diodes du L298N. Elles déterminent le sens de rotation (marche avant, marche arrière ou freinage magnétique) des deux paires de moteurs connectées en parallèle.

B. Broches PWM (ENA, ENB) : En exploitant ses minuteries matérielles internes, l'Arduino Mega génère des signaux à modulation d'impulsion sur une plage numérique de 0 à 255. Ces broches régulent la tension moyenne envoyée aux moteurs, permettant un contrôle précis et fluide de la vitesse du robot.

2. Liaison avec le capteur à ultrasons (Sécurité réflexe)

La sécurité amont contre l'évitement d'obstacles est directement dévolue à l'Arduino Mega pour éviter la latence d'un traitement logiciel déporté. Le capteur de distance à ultrasons type HC-SR04 est interfacé via deux broches dédiées :

A. La broche Trigger (Sortie digitale) : L'Arduino émet une impulsion brève de $10\mu\text{s}$ pour déclencher la salve d'ultrasons.

B. La broche Echo (Entrée digitale) : L'Arduino utilise la fonction d'interruption ou de lecture temporelle (*pulseIn*) pour mesurer la durée de l'impulsion de retour. Le microcontrôleur convertit instantanément ce temps de vol en distance (cm).

3. Liaison série matérielle avec le Raspberry Pi 5

La communication bidirectionnelle entre le processeur de haut niveau et le contrôleur de bas niveau est matérialisée par une liaison série filaire robuste.

L'interconnexion utilisé est un câble physique USB Type-C (côté Raspberry Pi 5) vers USB Type-B (côté Arduino Mega).

2.5 Conclusion

Les équipements mécaniques, électriques et informatiques détaillés dans ce chapitre sont la base de la réalisation de la plateforme censé être mobile et autonome en temps réel. La section suivante sera consacrée à la modélisation de ce système.

Chapitre 3

Modélisation de la plateforme mobile à quatre roues

3.1 Introduction

Parmi tous les robots mobiles introduits dans la section 1.2, cette étude cible le robots à quatre roues. Pour procéder à la commande d'un système supposé :

rigide c'est-à-dire non articulé, où la direction sera gérée numériquement en variant la vitesse et le sens de rotation de chaque roue.

L'étape de la modélisation permet de traduire le comportement physique du robot dans un langage mathématique abstrait, rendant possible sa simulation et son contrôle et se subdivise en deux parties : la modélisation géométrique et la modélisation cinématique.

Ce système sera capable de se déplacer sur le plan et aura donc trois degrés de liberté ; deux translations et une rotation.

3.1.1 Définition des variables cinématiques

Les vecteurs de vitesse intervenant dans les modèles direct et inverse se définissent comme suit :

- **Le vecteur des vitesses opérationnelles** ($\dot{X}$) : Il décrit le mouvement général de la plateforme mobile dans le repère global $\mathcal{R}_0$. Il est composé des vitesses de translation linéaire suivant les axes X et Y ,

ainsi que de la vitesse angulaire de rotation :

$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Où v_x et v_y représentent les projections de v_c sur les axes du repère R_c , exprimées en mètres par seconde (m/s) v_y est désignée comme la vitesse de glissement latéral. et la vitesse angulaire $\omega = \dot{\theta}$ en radians par seconde (rad/s).

- **Le vecteur des vitesses articulaires (Q)** : Il regroupe les vitesses angulaires de rotation des roues motrices gauche (ω_g) et droite (ω_d), exprimées en rad/s :

$$Q = \begin{bmatrix} \omega_g \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

De plus, sachant que la vitesse linéaire d'une roue est liée à sa vitesse angulaire par son rayon comme suit :

$$R = \frac{v}{\omega} \quad (3.3)$$

3.1.2 Relations entre vitesses linéaires et angulaires

Dans le repère local lié au robot $\mathcal{R}_c$, le mouvement rectiligne ou curviligne est directement gouverné par les vitesses linéaires de chaque flanc du châssis. Si l'on note v_g la vitesse linéaire du côté gauche et v_d la vitesse linéaire du côté droit (en m/s) comme sur la figure 3.1, les variables cinématiques globales au centre de gravité (CG) s'expriment par les relations suivantes :

$$v = \frac{v_d + v_g}{2} \quad (3.4)$$

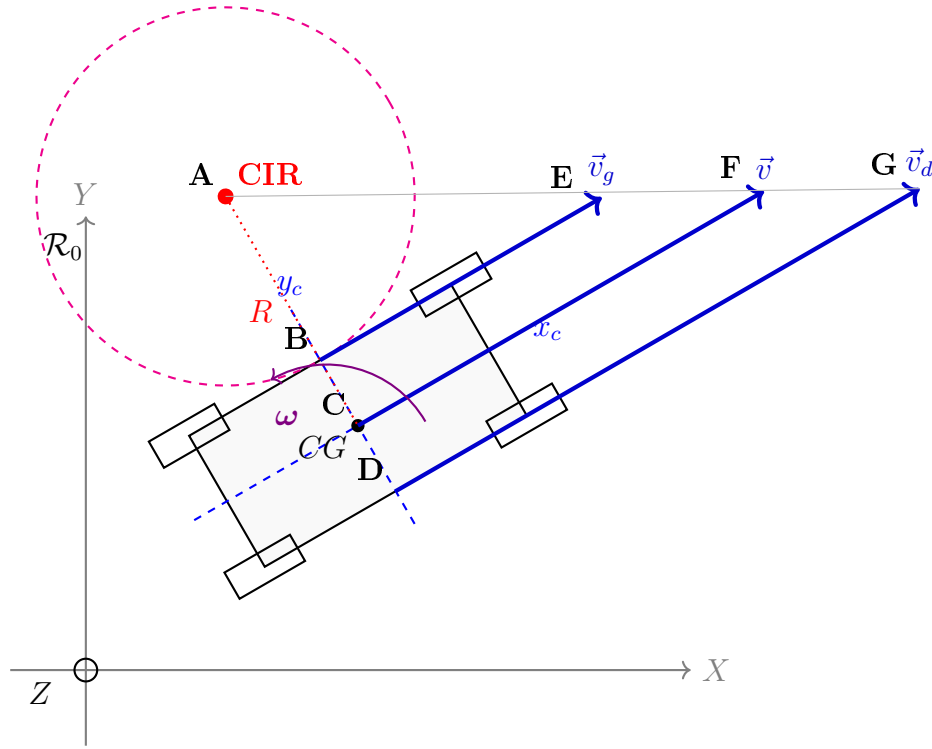


FIGURE 3.1 – Modélisation cinématique combinée : Châssis quadricycle et profil des vitesses linéaires

Suivant la figure(3.1), pour les triangles ACF et ACG s'appliquent la loi Thalès de la manière suivante :

$$\frac{R}{v} = \frac{R + L}{v_d} \quad (3.5)$$

$$R \cdot v_d = R \cdot v + v \cdot L \quad (3.6)$$

$$R = \frac{L \cdot v}{v_d - v} \quad (3.7)$$

En utilisant l'équation (3.3) :

$$\omega = v \cdot R \omega = \frac{v_d - v}{L} \quad (3.8)$$

En remplaçant v par l'équation (3.4) correspondante, on obtient :

$$\omega = \frac{v_d - v_g}{2L} \quad (3.9)$$

Le but est d'extraire l'équation qui régit v_d et v_g à appliquer respectivement sur les deux roues de droite et ceux de gauche. A partir de l'équations 3.4 décrit précédemment :

$$v_d = 2 \cdot v - v_g \quad (3.10)$$

Cette équation remplacée dans l'équation 3.9 nous donne :

$$\omega = \frac{2 \times v - 2 \cdot v_g}{2 \times L} \quad (3.11)$$

On cherche à obtenir v_g comme suit :

$$v_g = v - L \cdot \omega \quad (3.12)$$

De la même structure de calcul, on obtient v_d :

$$v_d = v + L \cdot \omega \quad (3.13)$$

Pour passer aux vitesses de rotation ω_g et ω_d :

Comme $v_{\text{roue}} = R \cdot \omega_{\text{roue}}$, il suffit de diviser par le rayon de la roue R pour obtenir les formules finales dont :

$$\omega_g = \frac{v - \omega \cdot L}{R} \quad (3.14)$$

$$\omega_d = \frac{v + \omega \cdot L}{R} \quad (3.15)$$

Les équations de v_d , v_g , ω_d et ω_g vont nous servir à commander la plateforme mobile d'une manière plus structurée en l'intégrant dans notre programme python.

3.1.3 Le modèle géométrique directe :

L'orientation du repère mobile $\mathcal{R}_c$ lié au quadricycle par rapport au repère fixe global $\mathcal{R}_0$ est définie par l'angle de direction θ . La matrice de rotation standard exprimant le passage de $\mathcal{R}_0$ à $\mathcal{R}_c$ autour de l'axe commun Z est notée R_0^1 et s'écrit :

$$R_0^1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Matrice de rotation du repère global $\mathcal{R}_0$ au repère local $\mathcal{R}_c$

Cette matrice permet de projeter un vecteur de coordonnées locales $[x_c, y_c]^T$ (mesurées dans le repère du robot) vers le repère global $[X, Y]^T$ selon la relation géométrique suivante :

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

3.1.4 Modèle géométrique inverse :

Inversement, si l'on souhaite projeter des composantes mondiales dans le repère propre au robot (pour le calcul des erreurs de suivi par exemple), on utilise la matrice de rotation inverse (qui est égale à sa transposée, $R_1^0 = (R_0^1)^T$:

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

3.1.5 L'hypothèse de roulement sans glissement

Ce robot est non holonome ce qui veut dire qui ne dérape pas latéralement [30]) . c'est ce qu'on appelle la contrainte de roulement sans glissement et on met la vitesse latérale $v_y=0$ et on obtient :

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix}$$

3.2 La modélisation géométrique

Elle se concentre sur les relations de position et d'orientation du châssis par rapport à un repère fixe.

Le repère de référence : On définit un repère fixe $\mathcal{R}_0 : (X, Y, Z)$ (repère terrestre) et un repère lié au châssis $\mathcal{R}_c : (x_c, y_c, z_c)$ située au centre de masse CG du châssis (figure 3.2).

Les coordonnées : La position du châssis rigide dans un plan horizontal se définit par ses coordonnées x_c, y_c et son orientation (le cap ou lacet, noté θ) par rapport à $\mathcal{R}_0$.

Il faut noter que la dimension entre les deux roues sur la largeur du quadricycle est indiquée par $2L$ en mètre et le rayon de la roue indiquée par R est en mètre.

La pose du châssis : Elle s'exprime par le vecteur d'état général dans l'es-

pace opérationnel : $X = \begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix}$

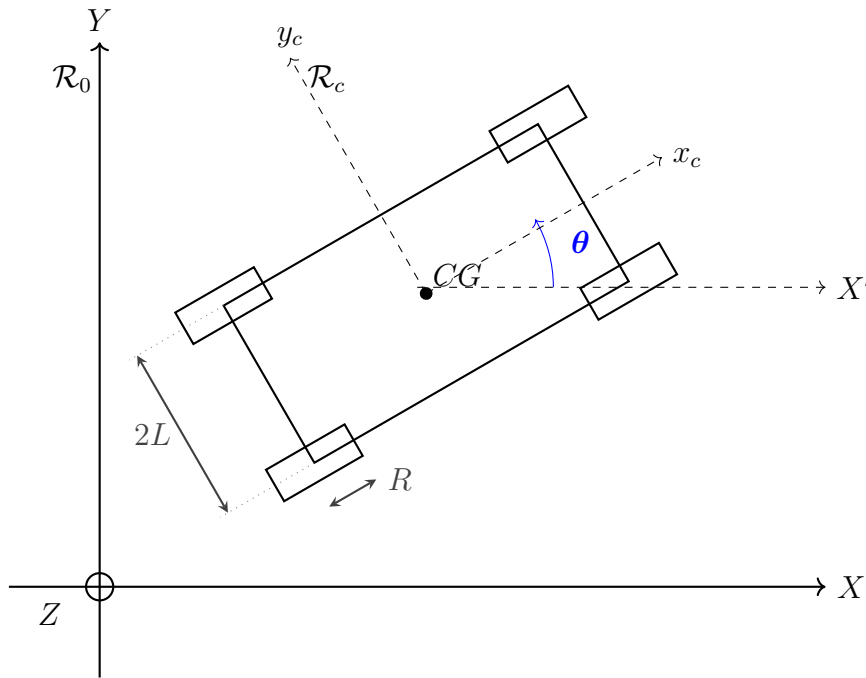


FIGURE 3.2 – Schéma du robot quadricycle relié au repère R_c en deux dimensions

3.3 La modélisation cinématique

c'est une représentation mathématique qui décrit la vitesse du système en fonctions du temps. Elle se base sur la géométrie des liaisons (pivot pour les roues) et sur l'hypothèse qu'il n'y a pas de glissement latéral.

Modèle cinématique direct (MCD) : Il permet de calculer la vitesse du châssis en fonction des vitesses articulaires (ex : vitesse de rotation des roues gauche et droite ω_g, ω_d) à l'aide d'une matrice Jacobienne $J : \dot{X} = J \cdot Q$

Modèle cinématique inverse (MCI) : À l'inverse, il permet de déterminer les vitesses que doivent avoir les roues pour atteindre une vitesse globale

du châssis désirée : $Q = J^{-1} \cdot \dot{X}$

3.3.1 Le modèle cinématique direct :

Dans le cas d'un fonctionnement **bidirectionnel**, le robot peut traduire et tourner simultanément. Le vecteur des vitesses opérationnelles locales du châssis possède deux composantes indépendantes : la vitesse linéaire longitudinale v et la vitesse angulaire de rotation du châssis ω .

Le modèle cinématique direct relie ces vitesses aux vitesses angulaires des roues gauche (ω_g) et droite (ω_d) à l'aide de la matrice Jacobienne directe J :

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} \omega_g \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Matrice Jacobienne dans le modèle cinématique direct :

Les vitesses linéaires aux points de contact des roues gauche (v_g) et droite (v_d) dépendent uniquement de leur vitesse angulaire respective (ω_g, ω_d) et de leur rayon r :

$$v_g = R \cdot \omega_g \quad (3.20)$$

$$v_d = R \cdot \omega_d \quad (3.21)$$

$$(3.22)$$

La vitesse linéaire v au centre géométrique du robot (CG) correspond à la moyenne algébrique des vitesses linéaires des deux côtés :

$$v = \frac{v_d + v_g}{2} \quad (3.23)$$

En remplaçant v_g et v_d par leurs expressions en fonction de ω , on obtient :

$$v = \frac{R \cdot \omega_d + R \cdot \omega_g}{2} = \frac{R}{2} \omega_g + \frac{R}{2} \omega_d \quad (3.24)$$

Ensuite, l'équation 3.9 nous sera utile pour déterminer ω en fonction des vitesses ω_d et ω_g . Il suffit de remplacer les équations 3.22

$$\omega = \frac{R \cdot \omega_d}{2L} - \frac{R \cdot \omega_g}{2L} \quad (3.25)$$

En prenant en compte ces deux équations 3.24 et 3.25, la matrice Jacobienne J est une matrice de dimension 2×2 qui s'écrit :

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ -\frac{r}{2L} & \frac{r}{2L} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \omega_g \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

3.3.2 Le modèle Cinématique Inverse (MCI) :

Contrairement au cas unidirectionnel où le robot était contraint sur une ligne droite ($\omega = 0$), le passage à un modèle **bidirectionnel** réintroduit la rotation du châssis. Le système passe alors d'un seul degré de liberté à **deux degrés de liberté opérationnels** : la vitesse linéaire de translation v et la vitesse angulaire de rotation ω .

Pour générer cette rotation $\omega \neq 0$, les roues gauches et droites ne peuvent plus tourner à la même vitesse. Le vecteur des vitesses articulaires ne se réduit plus à une seule variable commune, mais doit piloter de manière indépendante deux composantes distinctes :

$$\dot{q} = \begin{bmatrix} \omega_g \\ \omega_d \end{bmatrix} \quad \text{avec} \quad \omega_g \neq \omega_d \quad (3.27)$$

Structure de la matrice Jacobienne inverse

L'expression du Modèle Cinématique Inverse (MCI) réintègre la géométrie du châssis (la demi-largeur L). La matrice Jacobienne inverse J^{-1} est sous la forme d'une matrice carrée 2×2 :

$$\begin{bmatrix} \omega_g \\ \omega_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R} & -\frac{L}{R} \\ \frac{1}{R} & \frac{L}{R} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Cette écriture matricielle prouve que la vitesse angulaire ω est une variable d'entrée fondamentale. C'est elle qui crée le différentiel de vitesse entre la gauche et la droite ($\omega_d - \omega_g = \frac{2L}{r}\omega$) nécessaire pour amorcer un virage.

3.3.3 Le cercle de rotation et le centre instantané de rotation :

En mécanique, il existe un point unique autour du quelle tourne la roue (l'unicycle) dans le plan. Il s'agit du centre instantané de rotation (CIR).

Ce même point est le centre d'un cercle tangent au vecteur $\vec{v}$ du quadricycle.

La position du CIR détermine la position du cercle de rotation pour guider le quadricycle dans la direction souhaitée. Pour cela, on étudie le signe de R suivant l'équation 3.3 en classant les cas dans le tableau suivant :

v positive, ω anti-horaire	R positive	CIR à gauche, le sens anti-horaire du cercle	Figure 3.3
v positive, ω horaire	R négatif	CIR à droite, le sens horaire du cercle	Figure 3.4
v négative, ω horaire	R positif	CIR à gauche, le sens horaire du cercle	Figure 3.5
v négative, ω anti-horaire	R négatif	CIR à droite, le sens anti-horaire du cercle	Figure 3.6

TABLE 3.1 – La direction du quadricycle suivant le cercle de rotation par rapport au sens de la vitesse linéaire et la vitesse angulaire

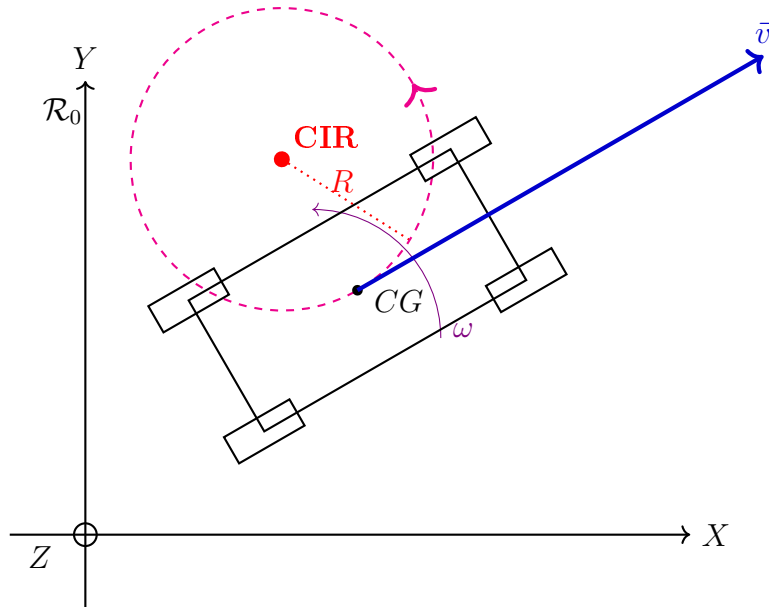


FIGURE 3.3 – Représentation si $\vec{v}$ positif, ω anti-horaire

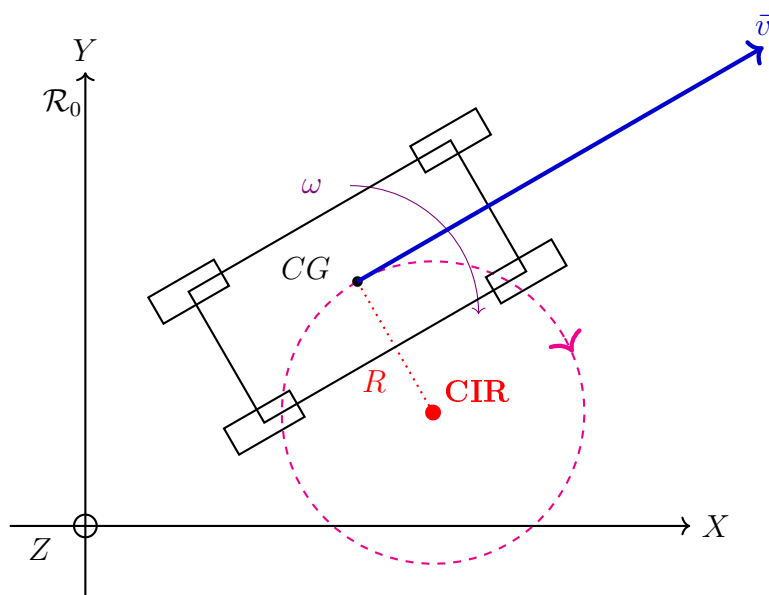


FIGURE 3.4 – Représentation si $\vec{v}$ positif, ω horaire

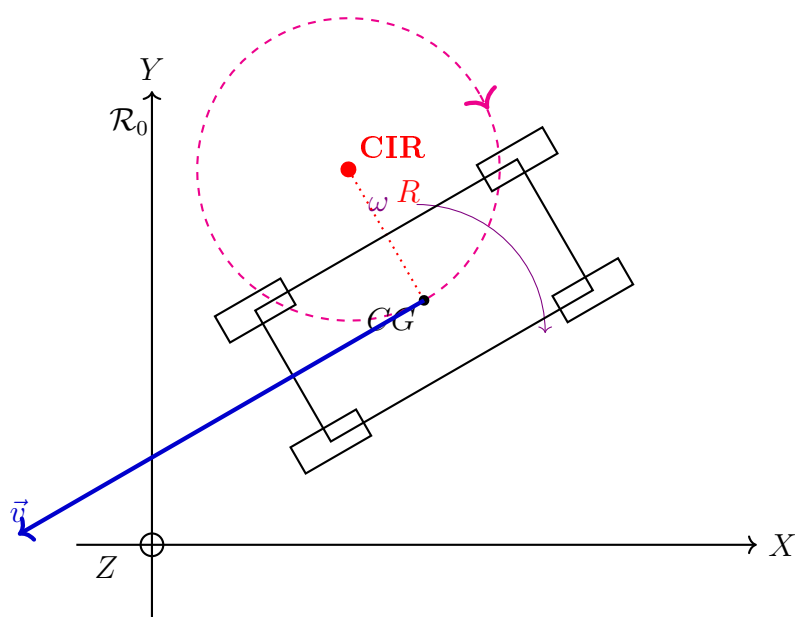
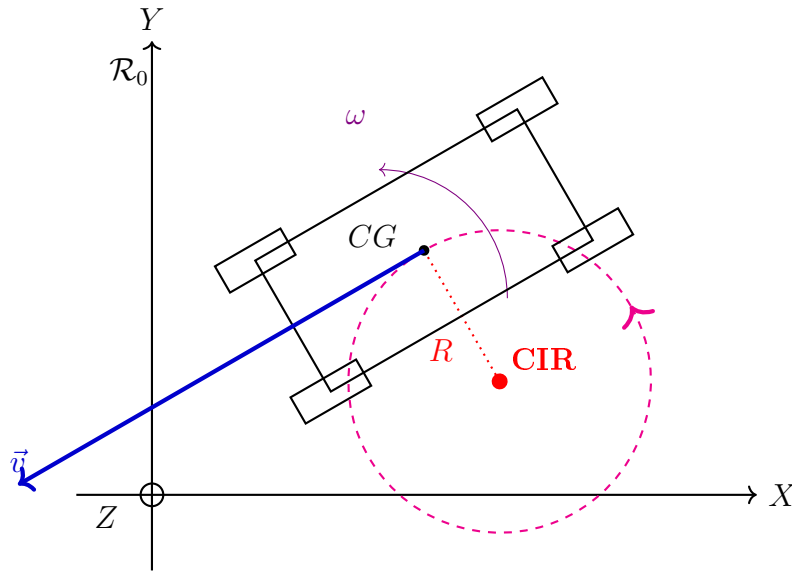


FIGURE 3.5 – Représentation si $\vec{v}$ négatif, ω horaire

FIGURE 3.6 – Représentation si $\vec{v}$ négatif, ω anti-horaire

3.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la modélisation mathématique de notre plateforme mobile. L'étude du modèle géométrique et cinématique d'un robot quadricycle opérant en mode bidirectionnel sous l'hypothèse de roulement sans glissement nous ramène au choix d'une trajectoire rectiligne se déplaçant en surface ce qui réduit le système mécanique à **deux degré de liberté**. A partir du centre instantanée de rotation, il est plus facile de guider le quadricycle sur le plan.

Dans le chapitre suivant, nous allons approfondir l'aspect de la réalisation de ce projet. Nous présenterons en détail la commande en EEG de la plateforme pour une mobilité autonome.

Chapitre 4

Interprétation des résultats

4.1 Introduction

Les chapitres précédents ont portés sur les fondements matérielles et mathématiques adéquates pour l'obtention de la plateforme mobile à quatre roues. Ce chapitre se consacre à la phase de mise en oeuvre du projet suivant une architecture matérielle réalisable et l'architecture logicielle correspondante. Il comporte l'intégration du modèle cinématique obtenu et une commande fonctionnelle de cette plateforme . Il sera finalisé par la présentation des résultats expérimentaux lors des essais physiques de la plateforme.

L'intérêt est de vérifier que l'ensemble matériel et logiciel répond au cahier de charge fixé dans l'introduction générale, à savoir piloter la plateforme à l'aide de ces signaux EEG, tout en garantissant une détection et un évitement fiable des obstacles .

4.2 Conception et programmation

La conception d'un tel système repose d'abord sur une architecture matérielle qui répond directement au besoins primaires.

4.2.1 Architecture matérielle générale

La plateforme contient les éléments matérielles décrits précédemment dans le chapitre 2. Le montage réalisé est présenté dans la figure 4.1. Le châssis comporte quatre roues reliées aux quatre moteurs respectives. Le placement des moteurs se trouve dans les quatre coins du châssis pour assurer



FIGURE 4.1 – La plateforme mobile obtenue

la stabilité de la plateforme et la dispersion homogène du poids. Ces actionneurs sont fixés à l'aide de deux vis sur les supports et sont positionnés à l'extérieur pour augmenter l'espace à l'intérieur du boîtier qui contient le reste du matériel.

Les deux bornes de chaque moteur sont allongées avec des fils conductrices introduits à l'intérieur du boîtier pour être branchés au pilote des moteurs L298N disposant de deux borniers (un pour deux moteurs en parallèle) et le cinquième pour recevoir les deux bornes d'alimentation.

Le fonctionnement des actionneurs moteurs se divise en deux parties dont une partie logique et une partie puissance. Les ordres de la partie logique sont exécutés physiquement en fournissant le courant et la tension nécessaires aux actionneurs. La liaison entre ces deux tâches est assurée par le pilote de moteurs communément appelé préactionneur. C'est un circuit intermédiaire qui adapte les faibles signaux logiques d'un microcontrôleur pour piloter les transistors de puissance qui contrôlent indépendamment la direction et la vitesse des moteurs. À ce sujet, on a opté pour une carte d'extension L298N pour le pilotage de moteurs compatible au microcon-

trolleur Arduino Mega. Une LED s'allume lorsque le module est alimenté .

Concernant l'alimentation de ce niveau, la batterie externe rechargeable est brochée sur le bornier prévue , et intégrant au milieu un interrupteur pour faciliter la gestion de l'alimentation .

En ce qui concerne le capteur ultra-son, ses broches sont câblées au niveau des pin digitaux de l'arduino mega suivant la figure .

Le système de commande est composé du module d'acquisition, circuit de conditionnement et la carte raspberry pi 5.

Pour compléter l'architecture matérielle de la plateforme, on présente l'architecture logicielle qui l'accompagne.

4.2.2 Architecture logicielle générale

Le programme de commande est répartie en deux segments ,celle pour la commande des moteurs développé en C++ sur Arduino IDE et exécuté sur l'arduino et l'autre pour la commande EEG développé en Python sur l'interpréteur Thonny et exécuté sur le Raspberry pi 5. Cette approche en deux niveaux apporte une solution matérielle embarquée. Les principales étapes de fonctionnement sont :

- **L'acquisition et traitement du signal EEG**, analysé et traduit en une commande de bas niveau (avancer, tourner à gauche, tourner à droite, arrêt) ;
- La **détection d'obstacles**, basé sur le capteur ultrason HC-SR04, en mesurant en continu la distance entre la plateforme et un obstacle éventuel ;
- La gestion de **sécurité et d'arbitrage**, qui compare la commande EEG reçue à l'état du capteur de proximité et décide de la commande finale à exécuter ;
- La **commande cinématique**, qui transforme la commande finale (translation v et rotation ω) en vitesses angulaires des roues ω_g et ω_d à l'aide du modèle cinématique inverse établi au chapitre 3 ;
- Le **pilotage des moteurs**, qui convertit ces vitesses en signaux PWM

et en états logiques.

La figure 4.2 présente l'organigramme du flux d'information en partant des capteurs (EEG, ultrason) vers l'unité de décision, pour arriver aux actionneurs.

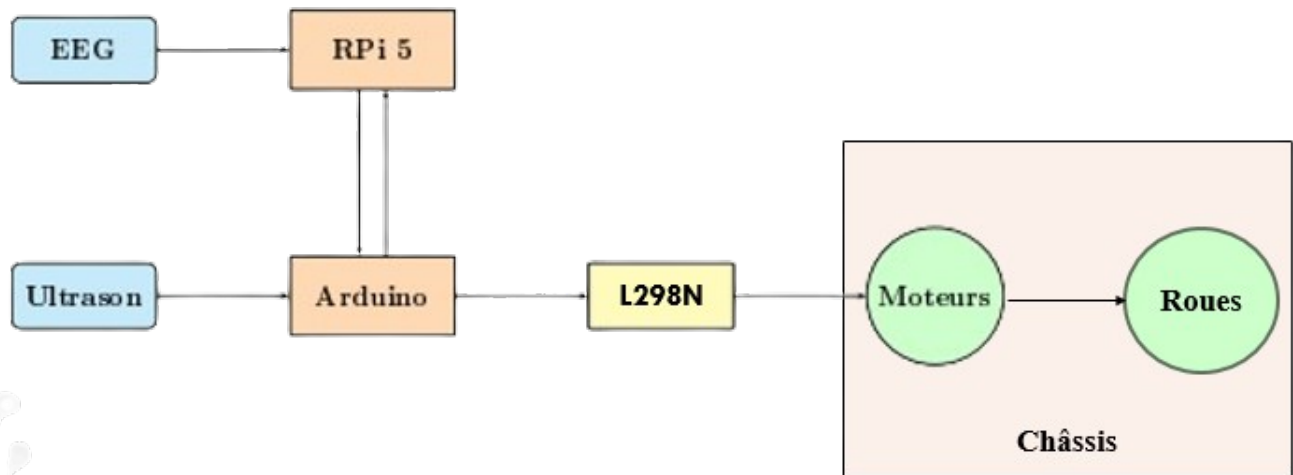


FIGURE 4.2 – Schéma synoptique de fonctionnement du robot

Les signaux EEG de commande sont acquis pour être traités et exploités par le raspberry pi 5 .

Le capteur de distance mesure la proximité des obstacles en temps réel. Il est directement relié à l'Arduino pour garantir une réactivité immédiate (arrêt d'urgence) sans dépendre des temps de traitement du Raspberry Pi. Il dispose d'une grande puissance de calcul, indispensable pour traiter les algorithmes lourds d'analyse des signaux EEG. Il communique de manière bidirectionnelle avec l'Arduino. Il lui envoie les ordres de déplacement en interprétant les signaux EEG et reçoit en retour l'état du robot.

On utilise l'arduino comme contrôleur bas niveau pour recevoir en même temps les données de sécurité du capteur ultrason et les commandes du Raspberry Pi par communication série . Un câble USB Type-C vers Type-B assure une double fonction stratégique : il encapsule le protocole de communication UART via le convertisseur USB-Série intégré de la carte Mega, tout en permettant au Raspberry Pi 5 de fournir (si nécessaire) une alimentation électrique stabilisée à l'Arduino.

Le Raspberry Pi 5 transmet les commandes de déplacement de haut niveau décodées à partir de l'analyse des signaux EEG en trames de chaînes de caractères.

L'Arduino renvoie l'état de la plateforme(avance, recule, arrêt).

Si un obstacle est détecté, Le système effectue un arrêt d'urgence sans prendre en considération la commande EEG.

Le pilote de moteur L298N reçoit ces signaux de commande logiques de l'Arduino (faible courant) et les convertit en une puissance électrique élevée en utilisant la batterie 3S pour alimenter les moteurs.

Les moteurs transforment l'énergie électrique régulée par le L298N en énergie mécanique (rotation). Cette force motrice est transmise aux roues pour déplacer physiquement le châssis de la plateforme.

4.2.3 Environnement et outils de développement

Pour la commande logique des moteurs, la programmation en langage C++ via le microcontrôleur Arduino Mega est idéale offrant une puissance de calcul élevée, une grande capacité de mémoire et une efficacité dans les projets de robotique.

Ce microcontrôleur est programmé simplement en C/C++ dans le logiciel Arduino IDE en sélectionnant le bon port de communication et le type de carte correspondant. Cet environnement sert de pont entre l'ordinateur et le microcontrôleur, permettant d'écrire, de compiler pour détecter les erreurs de syntaxe et convertit ensuite en langage machine et de téléverser le code compilé directement dans la mémoire de la carte via le câble USB. Cet éditeur intègre l'outil Gestionnaire de bibliothèques open source qui permet de rechercher, télécharger, installer et mettre à jour des milliers de bibliothèques communautaires sans quitter le logiciel.

La bibliothèque **AFMotor** est utilisée pour contrôler efficacement les moteurs via le shield moteur L293D basé sur la version V1 d'Adafruit.

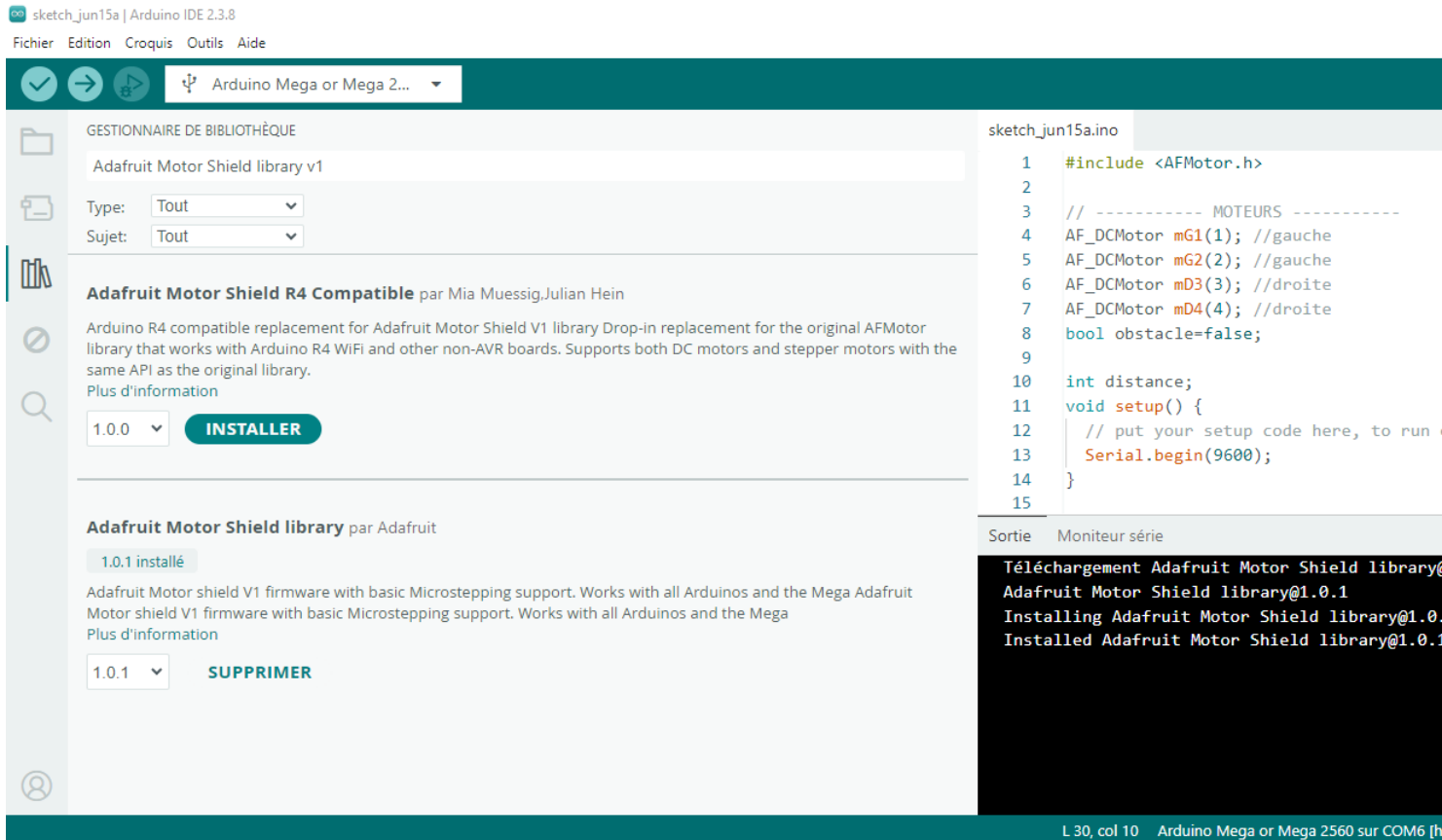


FIGURE 4.3 – L’installation de la bibliothèque Adafruit Motor Shield library

4.3 Principe de mouvement du robot à quatre roues

La plateforme adopte une commande différentielle. Les quatres roues sont fixes, regroupées en deux côté et chacune est entraînée par un moteur à courant continu. La différence de vitesses entre les deux côtés détermine la direction de mouvement de la plateforme sans glissement latéral conformément à l’hypothèse.

On retrouve sept états de mouvement suivant cette architecture :

- Avance rectiligne : si $v_g > 0$, $v_d > 0$ et $v_g = v_d$;
- Recule rectiligne : si $v_g < 0$, $v_d < 0$ et $v_g = v_d$;
- Virage à gauche : si $v_g < v_d$;
- Virage à droite : si $v_g > v_d$;
- Pivot à gauche : si $v_g = v_d$ et $\vec{v}_g = -\vec{v}_d$;
- Pivot à droite : si $v_d = v_g$ et $\vec{v}_d = -\vec{v}_g$;
- Arrêt : si $v_d = v_g = 0$;

L'information sur la vitesse linéaire v et la vitesse angulaire ω représente la consigne pour diriger la plateforme, suivant l'étude démonstrative dans le chapitre 3 (Tableau 3.1).

ω_g et ω_d sont calculée via le modèle cinématique inverse pour être normaliser en rapport cyclique PWM à partir de l'équation 2.1 Le pilotage par Modulation de Largeur d'Impulsion (PWM) permet de faire varier la tension moyenne V_{moy} appliquée aux bornes du moteur à partir d'une tension d'alimentation fixe V_{max} et d'un rapport cyclique $\alpha \in [0, 1]$:

$$V_{\text{moy}} = \alpha \cdot V_{\text{max}} \quad (4.1)$$

Pour un moteur à courant continu idéal, en négligeant la résistance interne de l'induit et les frottements (fonctionnement à vide), la tension moyenne appliquée est directement proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor ω_{moteur} via la constante de force contre-électromotrice K_e :

$$V_{\text{moy}} = K_e \cdot \omega_{\text{moteur}} \quad (4.2)$$

Le moteur est couplé à la roue par l'intermédiaire d'un réducteur mécanique de rapport r . La relation entre la vitesse du moteur et celle de la roue s'exprime par :

$$\omega_{\text{roue}} = \frac{\omega_{\text{moteur}}}{r} \implies \omega_{\text{moteur}} = r \cdot \omega_{\text{roue}} \quad (4.3)$$

En substituant l'équation 4.3 dans l'équation 4.2, on obtient l'expression de la tension en fonction de la vitesse de la roue :

$$V_{\text{moy}} = K_e \cdot r \cdot \omega_{\text{roue}} \quad (4.4)$$

La vitesse maximale de la roue, notée ω_{max} , est atteinte lorsque la tension moyenne est maximale, c'est-à-dire lorsque le rapport cyclique est égal à son maximum ($\alpha = 1$). L'équation 4.1 devient alors $V_{\text{moy}} = V_{\text{max}}$.

En appliquant cette condition à l'équation 4.4, on isole ω_{max} :

$$V_{\text{max}} = K_e \cdot r \cdot \omega_{\text{max}} \quad (4.5)$$

En égalisant les deux expressions de la tension moyenne V_{moy} issues des équations 4.4 et 4.5, nous obtenons :

$$\alpha \cdot V_{\text{max}} = K_e \cdot r \cdot \omega_{\text{roue}} \quad (4.6)$$

En isolant le rapport cyclique α :

$$\alpha = \frac{K_e \cdot r \cdot \omega_{\text{roue}}}{V_{\text{max}}} \quad (4.7)$$

En injectant l'expression de v_{max} établie à l'équation 4.5, la relation se simplifie par le rapport des vitesses :

$$\alpha = \frac{\omega_{\text{roue}}}{\omega_{\text{max}}} \quad (4.8)$$

Le rapport cyclique α matériel devant strictement être une grandeur positive ($\alpha \geq 0$) alors que la roue peut tourner en sens inverse ($\omega_{\text{roue}} < 0$), on applique la valeur absolue à la vitesse de consigne :

$$\alpha = \frac{|\omega_{\text{roue}}|}{\omega_{\text{max}}} \quad (4.9)$$

où α se trouve entre 0 et 1 .

Le signe de ω_g détermine le sens de IN1/IN2 et le signe de ω_d détermine le sens de IN3/IN4.

Donc , la vitesse est interprété en PWM (rapport cyclique) et le sens du mouvement sur IN1-IN4 au niveau du pilote de moteurs L298N.

Pour garantir une vérification d'obstacle d'une manière sécurisé, il faut que (v, ω) soient nul si un obstacle est détecté.

4.3.1 Validation du système de détection

Le capteur ultrason HC-SR04 émet une impulsion sonore à 40 kHz sur la broche **TRIG** et reçoit l'écho sur la broche **ECHO**. La durée Δt de l'état haut sur ECHO est convertie en distance par la relation :

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2} \quad \text{avec } c = 343 \text{ m/s}$$

permettant de détecter les obstacles en ligne droite figure 4.4.

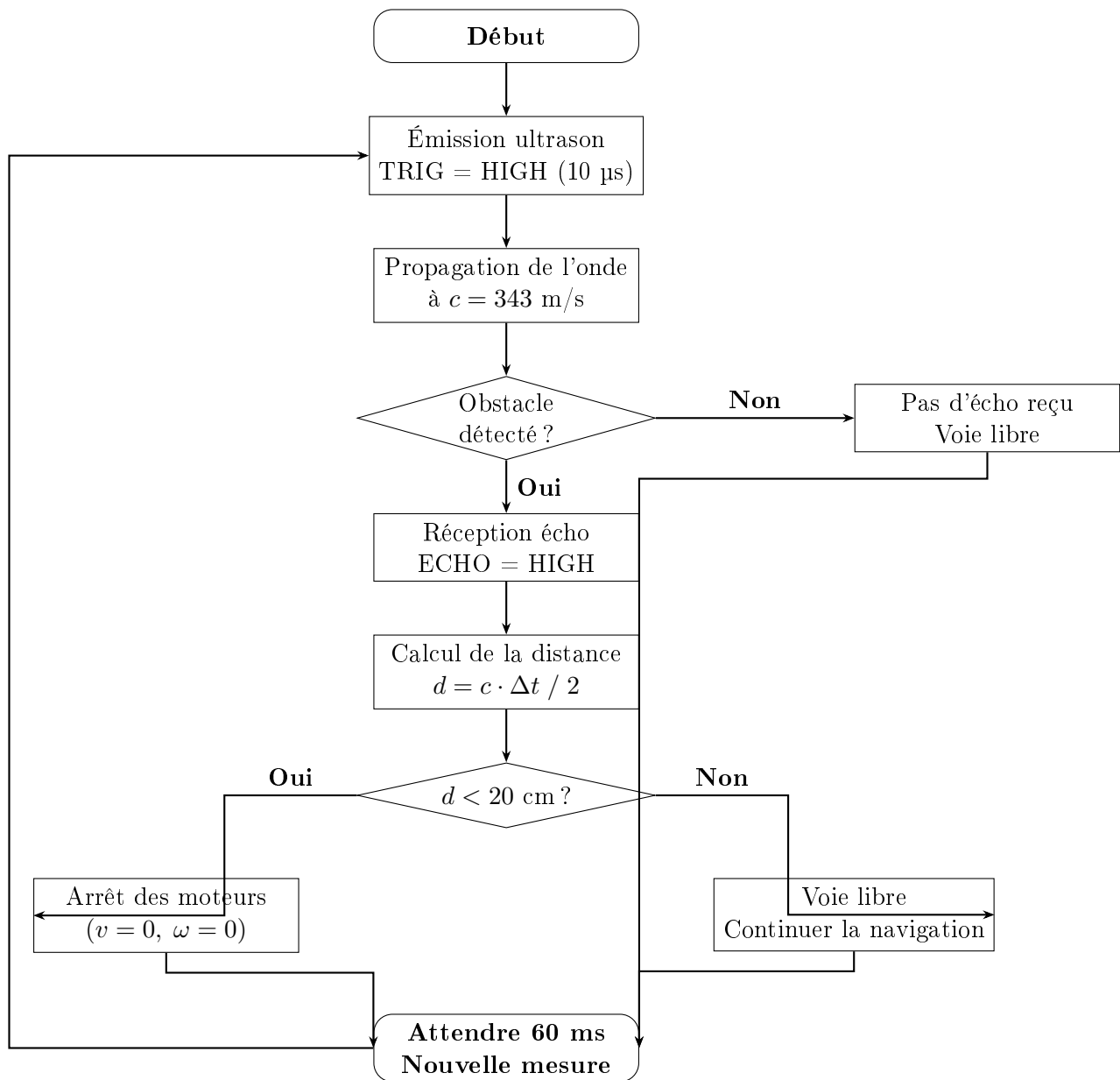


FIGURE 4.4 – Organigramme de fonctionnement du capteur ultrason HC-SR04

Les essais réalisés sur le capteur HC-SR04 comme sur la figure 4.5 ont confirmé la fiabilité de la mesure de distance et approuvés l'arrêt sans entrer en contact avec l'obstacle et marche arrière pour le contourner.



FIGURE 4.5 – Détection d'obstacle de la plateforme

4.4 Test de validation du système

Le test consiste à piloter la plateforme par EEG à l'aide de clignements d'oeil et en présence d'un obstacle intentionnel sur la trajectoire.

L'objectif est de vérifier le bon enchaînement des fonctions : réception de la commande EEG , génération des signaux PWM, et arrêt automatique à l'approche de l'obstacle suivant l'organigramme présent dans la figure 4.6. À la mise sous tension, le robot s'initialise et entre immédiatement dans un état d'arrêt en attente. Il ne bouge pas et reste immobile jusqu'à recevoir une commande valide. Cela garantit qu'aucun mouvement involontaire ne se produit au démarrage.

Il ne fait rien tant que l'utilisateur ne cligne pas. C'est une boucle d'attente active.

Il passe à l'étape suivante : identifier l'œil qui a cligné.

Le système analyse quel œil a cligné :

le robot avance en ligne droite si il détecte un clin d'oeil gauche. Ce clin d'œil agit comme une commande "marche avant".

si c'est un clignement droit, le robot recule en ligne droite. Ce clin d'œil agit comme une commande "marche arrière".

Pendant tout déplacement (avance ou recul), le capteur de proximité du robot (ultrason) analyse l'environnement en continu. Si un obstacle est détecté, le robot déclenche un arrêt d'urgence immédiat, indépendamment de la commande en cours. Il retourne ensuite en état d'attente et attend

un nouveau clin d'œil. Cela protège le robot et son environnement contre les collisions. Sinon, il continue son déplacement et passe à la vérification du clin d'œil.

Après chaque déplacement sans obstacle, le système vérifie à nouveau si un clin d'œil est émis et le robot réinterprète la direction en conséquence sinon, il repasse en attente d'un nouveau clin d'œil. Lorsqu'une séquence complète s'est déroulée, le cycle se termine jusqu'à FIN puis repart automatiquement vers DÉMARRER. Le robot recommence un nouveau cycle de surveillance sans intervention humaine supplémentaire, assurant un fonctionnement continu en boucle.

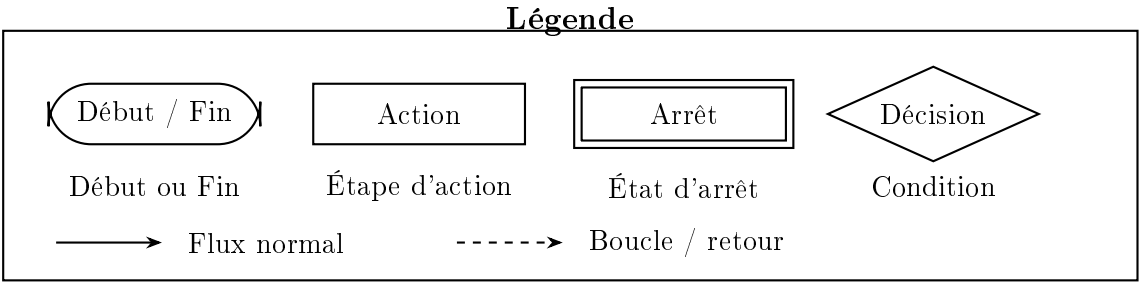
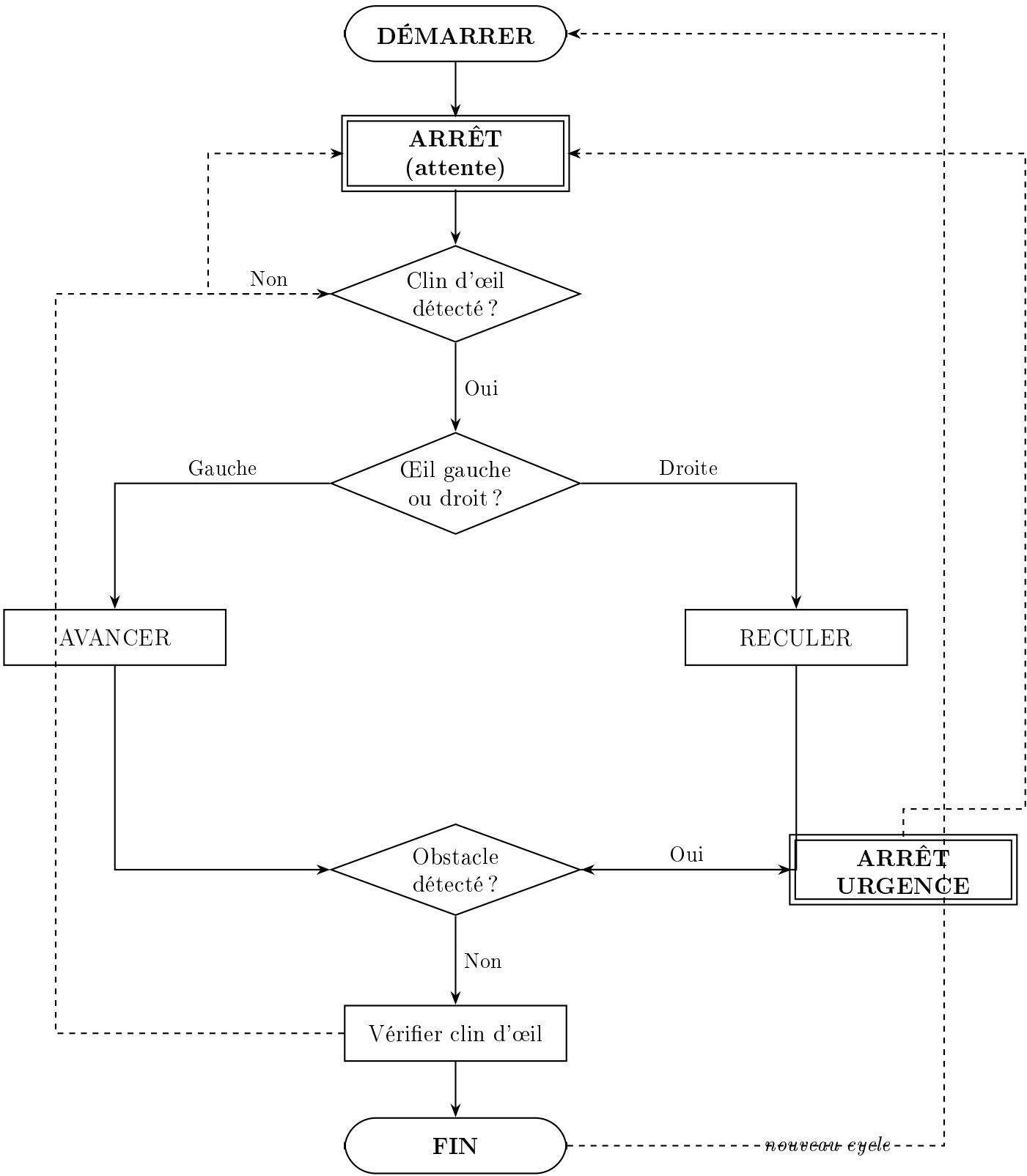


FIGURE 4.6 – Organigramme de commande par clin d'oeil et détection d'obstacle

4.5 Limites et travaux en cours

En raison de contraintes de temps, les essais complets de mobilité autonome commandée par EEG sur trajectoire libre n'ont pas encore pu être finalisés. L'intégration de la consigne des vitesses avec une commande EEG robuste feront l'objet de mesures complémentaires. Néanmoins, les validations partielles réalisées sur chaque sous-système notamment la commande EEG et la détection d'obstacle confirment la cohérence de l'architecture proposée et sa capacité à répondre au cahier des charges initial.

4.6 Conclusion

Ce chapitre a présenté l'intégralité de la chaîne de commande de la plateforme mobile à quatre roues, depuis la génération des consignes de mouvement jusqu'à l'actionnement des moteurs, en couvrant cinq aspects complémentaires :

- Les étapes de mouvement différentiel du robot quadricycle et leur traduction en consignes (v, ω) .
- L'intégration du Modèle Cinématique Inverse directement dans le code Python du Raspberry Pi 5, reliant les équations théoriques du Chapitre 3 aux signaux réels PWM et logiques du module L298N.
- La chaîne de détection d'obstacles par HC-SR04, avec un protocole de mesure fiable et une stratégie d'évitement automatique en cinq étapes.
- La chaîne de commande EEG basique.
- L'architecture répartie Raspberry Pi 5 / Arduino Mega, où l'Arduino Mega garantit la sécurité par coupure matérielle déterministe (< 1 ms) et le Raspberry Pi 5 assure l'intelligence décisionnelle, les deux coopérant via le bus UART.

Conclusion générale et perspectives

Ce travail a porté sur la conception et l'intégration d'un système robotisé d'assistance à la mobilité, fondé sur l'utilisation des interfaces cerveau-machine (ICM). L'objectif était de valider la faisabilité d'une plateforme mobile capable d'interpréter les intentions de commande directement issues de l'activité cérébrale de l'utilisateur.

Au terme de cette étude, nous avons développé un prototype de robot mobile exploitant l'acquisition et le traitement de signaux électroencéphalographiques (EEG). Grâce à l'implémentation d'une chaîne de traitement robuste, nous avons réussi à traduire des états mentaux en commandes de navigation cohérentes pour piloter la plateforme. La preuve de concept réalisée démontre que l'utilisation des signaux EEG constitue une interface novatrice et puissante, offrant une autonomie accrue aux personnes souffrant de handicaps moteurs sévères en supprimant le besoin d'interaction physique directe.

Sur le plan technique, nous avons réalisé une plateforme mobile à quatre roues motorisées, modélisée selon une cinématique différentielle. Cette modélisation a permis d'établir les équations de mouvement reliant les vitesses de rotation des roues aux déplacements linéaires et angulaires de la plateforme. La réalisation matérielle a nécessité l'intégration d'une unité de commande (Raspberry Pi), pilotant des moteurs. Le système traduit en temps réel les signaux électroencéphalographiques (EEG) captés et filtrés en commandes motrices exploitables par la plateforme. Au-delà de cette exécution, nous avons intégré des fonctions de navigation autonome, basées sur des capteurs à ultrasons, permettant au système de corriger une commande EEG erronée ou ambiguë et d'assurer l'évitement dynamique d'obstacles. Cette preuve de concept démontre ainsi l'efficacité de la chaîne de traitement, du signal neuronal jusqu'à l'exécution cinématique sécurisée du mouvement.

Ce projet constitue une base technologique prometteuse. Bien que réalisée sur une plateforme mobile réduite, l'architecture logicielle et matérielle développée valide la possibilité d'un pilotage par la pensée pour un fauteuil roulant électrique (FRE), renforçant ainsi l'inclusion et la qualité de vie des utilisateurs.

Les résultats obtenus ouvrent des voies de développement essentielles pour le passage de ce prototype de laboratoire à un outil d'assistance quotidien :

- Optimiser les algorithmes de filtrage et de classification des signaux EEG pour augmenter la précision des commandes et réduire le temps de latence entre l'intention de l'utilisateur et la réaction du robot.
- Développer un système de contrôle hybride combinant l'EEG à d'autres modalités (comme la vision par ordinateur ou la commande vocale) pour sécuriser davantage la navigation dans des environnements complexes.
- Ajouter des fonctionnalités de géolocalisation GPS et une connectivité réseau permettant, en cas de besoin, une assistance à distance ou une sécurisation des déplacements du fauteuil dans des espaces publics.
- Étendre l'usage de l'interface EEG au contrôle d'objets domestiques connectés, transformant ainsi le système de mobilité en une véritable interface de contrôle de l'environnement pour les personnes en perte d'autonomie.

Bibliographie

- [1] *Robot*. URL : <https://elmoukrie.com/robot/>.
- [2] The Henry FORD. *First Industrial Robot Ever Installed on an Assembly Line | Innovation Nation*. <https://www.youtube.com/watch?v=-Xl2c91pWGc&t=5s>. Consulté le 10 mai 2026. 2025.
- [3] *CORA la tortue – Machina Docilis – Grey Walter (Britannique)*. URL : <https://cyberneticzoo.com/cyberneticanimals/cora-cyberneticanimals/cora-the-tortoise-m-docilis/> (visité le 07/06/2026).
- [4] Benjamin KUIPERS et al. « Shakey : From Conception to History ». In : (2015).
- [5] David FILLIAT. *Robotique Mobile*. 2012.
- [6] ZONEINDUSTRIE. *Cinq robots MiR500 améliorent la logistique des entrepôts de l'usine pharmaceutique de Novo Nordisk en Chine*. URL : <https://www.zoneindustrie.com/actualite/Cinq-robots-MiR500-ameliorent-la-logistique-des-entrepots-de-l-usine-pharmaceutique-de-Novo-Nordisk-en-Chine-20309.html> (visité le 13/05/2026).
- [7] Omron Industrial Automation EMEA. *Mobile robots streamline internal logistics at HIPRA*. <https://www.youtube.com/watch?v=9fKPrsU9j0c>. Consulté le 13 mai 2026. 2024.
- [8] CGOS. *Des robots livreurs pour libérer du temps aux soignants des hôpitaux de Nantes et de Cholet*. URL : <https://pm.cgos.info/actualites/1046-des-robots-livreurs-pour-liberer-du-temps-aux-soignants-des-hopitaux-de-nantes-et-de-cholet> (visité le 13/05/2026).
- [9] *Le Parisien, VIDÉO. Robot basketteur de Toyota : derrière les millions pour un tir record, une réelle stratégie*. URL : <https://www.leparisien.fr/high-tech/video-robot-basketteur-de-toyota-derriere-les-millions-pour-un-tir-record-une-reelle-strategie-14-12-2024-ZPF70AD2JZB4ZPNJIY7V5E2WA4.php> (visité le 13/05/2026).
- [10] *1970-1980 Premiers rovers*. URL : <https://atelier-canope-95.canoprof.fr/eleve/Automates%5C%20et%5C%20robots/res/robot.dossierHtml/co/1970rovers.html> (visité le 13/05/2026).
- [11] *Télécharger la version gratuite d'Autodesk Fusion*. URL : <https://www.autodesk.com/fr/products/fusion-360/personal-download> (visité le 17/05/2026).
- [12] Le Bear CNC. *Fusion 360 est-il toujours gratuit en 2026 ? Voici la vérité !* URL : <https://www.youtube.com/watch?v=JCJ87JsqtJ8> (visité le 17/05/2026).
- [13] URL : <https://powertech-dz.org/product/moteur-dc-3v-6v-avec-roue-65-mm-pour-robot-arduino/>.
- [14] URL : <https://powertech-dz.org/product/carte-controleur-de-pilote-de-moteur-1298n/>.
- [15] PASSIONELECTRONIQUE. *Module L298N*. URL : <https://passionelectronique.fr/tutoriel-1298n/> (visité le 05/06/2026).
- [16] *L298N*. 2000. URL : <https://www.alldatasheet.com> (visité le 05/06/2026).
- [17] URL : <https://powertech-dz.org/product/moteur-dc-3v-6v-avec-roue-65-mm-pour-robot-ardui>.

- [18] *Moteurs à courant continu*. URL : <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://nicole.cortial.net/revisions/continu.pdf>.
- [19] *Principes fondamentaux du moteur à courant continu à balais*. URL : <https://www.portescap.com/fr-fr/produits/moteurs-a-courant-continu-a-balais/principes-fondamentaux-du-moteur-a-courant-continu-a-balais>.
- [20] URL : <https://powertech-dz.org/product/35611/>.
- [21] URL : https://www.hoco-algerie.com/produit/power-bank-j101a-astute-22-5w-20000mah/?srsltid=AfmB00oa-UiKBiVDX1493Bx8tevXwqg5wh1NM1pPUm2ez0tg_nb2z9L.
- [22] *HOCO J101A Astute – Power Bank 20 000 mAh 22.5W Compatible*. URL : <https://hoco.dz/produit/hoco-j101a-astute-power-bank-20-000-mah-22-5w-compatible/> (visité le 09/06/2026).
- [23] PKENERGY. *Qu’est-ce qu’une batterie lithium-polymère 11,1 V ?* URL : <https://www.pkenergy.com/news/what-is-11-1v-lithium-polymer-battery/>.
- [24] *T240 DUO Lipo Batterie RC Balance Chargeur/D chargeur*. URL : https://www.dzduino.com/t240-duo-lipo-batterie-rc-balance-chargeur-dechargeur?srsltid=AfmB0orK3py5D5VqBK2Ps5rjk_LeVwky3.
- [25] URL : <https://capmicrodz.com/raspberry-pi-5-8gb-64-bit-quad-core-cortex-a7>.
- [26] URL : https://www.audiophonics.fr/fr/adaptateurs-secteur/raspberry-pi-adaptateur-secteur-alimentation-200-240v-ac-vers-5v-5a-27w-usb-c-noir-p-18439.html?srsltid=AfmB0op_EmlnSLszsiPVUKG4TFDPB3F6lyKdCp-cGap1crzv5GZtrCbs.
- [27] Vandegans VINCENT. *Introduction   Raspberry Pi 5*. 2023. URL : <https://www.raspberrypi-france.fr/introduction-a-raspberry-pi-5/>.
- [28] *THE BOOT ORDER OF THE RASPBERRY PI IS UNUSUAL !* URL : <https://patrickmccanna.net/the-raspberry-pi-boot-order-is-unusual/> (visité le 12/12/2025).
- [29] *Carte Arduino MEGA 2560 caractéristiques, description*. URL : <https://arduino-france.site/description-arduino-mega/>.
- [30] Imed-Eddine GUEBLI. « Navigation et commande d’un robot mobile à 4 roues sous ROS ». Mém. de mast. Université 8 Mai 1945 Guelma, 2020.