



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique Université Abbas Laghrour Khenchela

Département : science et
technologie Filière :
Électrotechnique

Spécialité : Commande électrique - CE -



***Un mémoire déposé pour l'obtention d'un Master – LMD -
En Électrotechnique, spécialité Commande électrique
Mémoire de Master***

Thème :

***Commande d'un véhicule autonome à direction réel
par une crémaillère pour l'évitement des obstacles :
conception et prototype***

Préparer par l'étudiant :

- *Chekrid Ayoub*

Sous la supervision du :

- *Dr. Bouali Lazhar*

Membres du comité de discussion :

<i>Dr.Keziz bouziene</i>	<i>MCA</i>	<i>UNIV-KHENCHELA</i>	<i>Principal</i>
<i>Dr. Bouali Lazhar</i>	<i>MCA</i>	<i>UNIV-KHENCHELA</i>	<i>Superviseur et rapporteur</i>
<i>Pr.Nabil ben hadda</i>	<i>MCA</i>	<i>UNIV-KHENCHELA</i>	<i>Co . encadreur</i>
<i>Dr.Boumaaraf abdelali</i>	<i>MCA</i>	<i>UNIV-KHENCHELA</i>	<i>Membre examineur</i>

Année universitaire : 2025-2026 / 1446-1447



Remerciements

*Je remercie tout d'abord **ALLAH, le Tout-Puissant**, de m'avoir accordé la patience dans les moments difficiles, la force dans les moments de faiblesse et la persévérance nécessaire pour mener ce travail à son terme.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire de fin d'études.

*J'adresse mes sincères remerciements à **Dr. Bouali Lazhar**, mon encadrant, pour sa disponibilité, ses précieux conseils, sa rigueur scientifique et son accompagnement tout au long de ce travail. Sa bienveillance et ses remarques constructives ont largement contribué à l'enrichissement de cette étude.*

*J'exprime également ma profonde reconnaissance à **Pr. Benhadda Nabil**, mon co-encadrant, pour son soutien constant, ses orientations pertinentes, son expertise scientifique et son suivi attentif tout au long de cette recherche.*

*Je remercie également l'ensemble du **corps enseignant du Master Commande Électrique**, ainsi que les membres du jury, pour la qualité des enseignements dispensés, leurs conseils avisés et leur contribution à ma formation académique et scientifique.*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à **ma famille, mes amis et mes collègues** pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements tout au long de mon parcours universitaire.*

À toutes et à tous, j'adresse mes plus vifs remerciements.

Dédicace

À chaque étape importante de notre vie, il est essentiel de prendre un instant pour regarder le chemin parcouru et se souvenir de toutes les personnes qui ont accompagné notre parcours, partageant avec nous les joies comme les épreuves.

À ces êtres chers qui nous ont soutenus sans rien attendre en retour, qui nous ont entourés de leur affection et de leur confiance, faisant de nos réussites leur fierté et de nos difficultés une préoccupation sincère.

Je dédie ce travail en premier lieu à **mes parents**, en témoignage de mon amour, de mon respect et de ma profonde reconnaissance. Merci pour votre soutien indéfectible, votre patience, vos sacrifices et les valeurs que vous m'avez transmises. Vous avez toujours été pour moi un modèle de courage, de persévérance et de générosité. Aucun mot ne saurait exprimer pleinement ma gratitude pour tout ce que vous avez fait pour moi.

À **mes frères**, pour leur présence, leur affection, leurs encouragements et leur soutien constant tout au long de mon parcours. Votre confiance en moi a été une source de motivation permanente.

À **toute ma famille**, pour son soutien moral, ses prières, ses encouragements et son affection. Votre présence à mes côtés a contribué à renforcer ma détermination et ma volonté d'atteindre mes objectifs.

À **mes proches camarades et collègues, Fahloul Kheireddine et Ghedbane Sabir**, pour leur amitié sincère, leur esprit de collaboration, leur soutien moral et les nombreux moments de partage tout au long de ce parcours universitaire. Leur présence et leurs encouragements ont constitué une source supplémentaire de motivation et d'inspiration.

Enfin, à **mes amis, mes collègues et à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin**, pour leur confiance, leurs encouragements et leur bienveillance.

Je vous dédie ce mémoire avec toute ma gratitude et mon affection.

Cette réussite est aussi la vôtre, car sans votre soutien, votre confiance et vos encouragements, ce parcours aurait été bien plus difficile.

Résumé :

Cette étude vise à concevoir et mettre en œuvre un système de commande pour véhicule autonome basé sur deux moteurs à courant continu assurant le déplacement et le guidage via un système de direction réel de type crémaillère, pilotés par un driver L298N sous le contrôle d'un microcontrôleur Arduino Mega 2560, et intégrant deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 dédiés à la détection des obstacles à droite et à gauche afin d'assurer un évitement automatique des obstacles imprévus en temps réel grâce à un traitement des données et une prise de décision adaptée, réduisant ainsi la dépendance à la réaction du conducteur humain et limitant les accidents causés par un temps de réaction tardif.

Mots-clés : Véhicule autonome, évitement d'obstacles, Arduino Mega 2560, moteurs à courant continu, capteurs ultrasoniques HC-SR04, commande L298N

Abstract:

This study aims to design and implement a control system for an autonomous vehicle based on two DC motors providing both propulsion and steering via a real rack-and-pinion steering system, driven by an L298N motor driver under the control of an Arduino Mega 2560 microcontroller, and integrating two HC-SR04 ultrasonic sensors dedicated to obstacle detection on the right and left sides in order to ensure real-time automatic avoidance of unexpected obstacles through data processing and appropriate decision-making, thereby reducing reliance on human driver reaction and minimizing accidents caused by delayed reaction time.

Keywords : Autonomous vehicle, obstacle avoidance, Arduino Mega 2560, DC motors, HC-SR04 ultrasonic sensors, L298N driver control

ملخص :

تهدف هذه الدراسة إلى تصميم وتنفيذ نظام تحكم لمركبة ذاتية الحركة يعتمد على محركين تيار مستمر لتوفير كل من الحركة والتوجيه عبر نظام توجيه حقيقي من نوع الرف المسنن ، ويتم التحكم فيه بواسطة مشغل L298N تحت إشراف متحكم دقيق من نوع Arduino Mega 2560، مع دمج مستشعرين فوق صوتيين HC-SR04 مخصصين لكشف العوائق على الجهتين اليمنى واليسرى، وذلك من أجل تحقيق تقادي تلقائي وفوري للعوائق غير المتوقعة اعتماداً على معالجة البيانات واتخاذ القرار المناسب، مما يقلل من الاعتماد على رد فعل السائق البشري ويحد من الحوادث الناتجة عن تأخر زمن الاستجابة.

الكلمات المفتاحية : مركبة ذاتية القيادة، تجنب العوائق، أردوينو ميجا 2560، محركات التيار المستمر، مستشعرات الموجات فوق الصوتية HC-SR04 ، وحدة التحكم L298N

SOMMAIRE :

Remerciements	I
Dédicace	II
RESUME ET MOTS CLES	III
SOMMAIRE	IV
LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS :	VII
LISTE DES FIGURES	VIII
LISTE DES TABLEAUX	IX
INTRODUCTION GENERALE	01
Chapitre 1 : Description du Système Global	
I.1. Introduction	05
I.2. Architecture générale du véhicule	05
I.3. Rôle du moteur à courant continu	07
I.4. Capteurs ultrasoniques pour l'évitement d'obstacles	08
I.4.1. Caractéristiques	09
I.4.2. Broches de connexion	09
I.5. Microcontrôleur Arduino et communication interne	10
I.5.1. Arduino Mega 2560 Rev 3	10
I.5.2. Caractéristiques techniques de l' Arduino Mega 2560 Rev 3	11
I.5.3. Communication interne du système	12
I.6. Conclusion	12
Chapitre 2 : Étude et Modélisation du Moteur à courant continu	
II.1. Introduction	15
II.2. Définition	15
II.3. Structure du Moteur à courant continu	16

II.4. Principe de fonctionnement	20
II.5. Modèle électromagnétique simplifié	22
II.5.1. Circuit équivalent	22
II.5.2. Équations électriques et mécaniques	23
II.5.3. Modèle du moteur dans le domaine de Laplace	25
II.5.4. Fonction de transfert du moteur à courant continu	25
II.5.5. Schémas blocs	26
II.5.6. Réponse en position du moteur à courant continu	27
II.5.7. Modèle d'état du moteur à courant continu	28
II.5.8. Passage du modèle d'état à la fonction de transfert	29
II.6. Point de fonctionnement	30
II.7. Déplacement angulaire pour la direction	30
II.7.1. Pilotage du L298N	30
II.7.1.1. Commande de sens de rotation (hacheur quatre quadrants)	31
II.7.1.2. Commande MLI (PWM)	33
II.8. Conclusion	34
Chapitre 3 : Conception et Réalisation	
III.1. Introduction	36
III.2. Schéma électrique du prototype	36
III.3. Architecture générale des connexions	38
III.4. Choix des composants	40
III.4.1. Composants requis	40
III.4.1. Carte Arduino Mega 2560	40
III.4.2. Pilote de moteur L298N	41
III.4.3. Moteurs à courant continu	42
III.4.4. Capteurs ultrasoniques HC-SR04	42
III.4.5. Châssis du véhicule	43

III.4.6. Fils de connexion	43
III.4.7. Batterie d'alimentation	44
III.5. Montage et tests individuels	44
III.6. Programmation Arduino	45
III.6.1 IDE Arduino	45
III.6.1.1. Interface du logiciel	46
III.6.1.2. Les étapes de téléchargement du programme	47
III.6.3. Implémentation du Programme Arduino	48
III.6.3.1. Détection obstacle	54
III.6.3.2. Correction de direction	55
III.6.3.3. Mouvement autonome	56
III.7. Conclusion	58
Chapitre 4 : Résultats Expérimentaux	
IV.1. Introduction	61
IV.2. Tests des moteurs à courant continu	61
IV.3. Tests d'évitement d'obstacles	61
IV.4. Scénarios de conduite autonome	62
IV.5. Analyse et discussion des performances	66
IV.6. Conclusion	67
Conclusion et Perspectives	69
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	71

LISTES DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS :

Symboles :

- $U(t)$: tension d'alimentation du moteur (V)
- $I(t)$: courant d'induit (A)
- R : résistance de l'induit (Ω)
- L : inductance de l'induit (H)
- $E(t)$: force contre-électromotrice (V)
- $\Omega(t)$: vitesse angulaire du moteur (rad/s)
- $\theta(t)$: position angulaire (rad)
- $C(t)$: couple électromagnétique (N·m)
- $C_r(t)$: couple résistant (N·m)
- J : moment d'inertie du rotor ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- f : coefficient de frottement visqueux ($\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
- K_e : constante de force contre-électromotrice ($\text{V}\cdot\text{s}/\text{rad}$)
- K_c : constante de couple ($\text{N}\cdot\text{m}/\text{A}$)
- p : variable de Laplace
- ρ : représente la résistivité du matériau conducteur
- S : la section
- L : la longueur totale du conducteur
- $\Phi(t)$: le flux magnétique
- K : représente la constante électromécanique du moteur.
- τ : est la constante de temps électromécanique ;
- τ_e : est la constante de temps électrique ;
- K_0 : est le gain statique du moteur ;
- α : est un coefficient dépendant des paramètres électriques et mécaniques de la machine.

Abréviations :

- ADAS : Système d'aide à la conduite
- MCC : Moteur à Courant Continu
- PWM (MLI) : Pulse Width Modulation (Modulation de Largeur d'Impulsion)
- L298N : Driver de moteurs à double pont en H
- CAN : Convertisseur Analogique-Numérique

LISTE DES FIGURES :

Figure I.1 : Schéma synoptique et fonctionnement du véhicule	06
Figure I.2 : Le mécanisme (pignon–crémaillère)	07
Figure I.3 : Capteur ultrason HC-SR 04	08
Figure I.4 : Chronogramme du capteur ultrason HC-SR04	09
Figure I.5 : carte Arduino Mega 2560 Rev 3	11
Figure II.1 : Transformation de l'énergie dans une machine MCC	16
Figure II.2 : Moteur à courant continue	16
Figure II.3 : Constitution d'un Moteur à courant continu	17
Figure II.4 : Inducteur à aimants permanents et Inducteur bobiné	18
Figure II.5 : conception d'induit	18
Figure II.6 : Le collecteur	19
Figure II.7 : enroulement d'induit	19
Figure II.8 : les balais	20
Figure II.9 : Schéma de principe du moteur MCC	22
Figure II.10 : Circuit équivalent du moteur MCC	23
Figure II.11 : Schéma-blocs tension–vitesse du moteur à courant continu	27
Figure II.12 : Schéma-blocs tension–position du moteur à courant continu	28
Figure II.13 : Schéma de simulation de la MCC	29
Figure II.14 : Le point de fonctionnement d'un moteur à courant continu	30
Figure II.15 : Driver L298N	31
Figure II.16 : schéma électrique d'un hacheur quadrants	32
Figure II.17 : schéma électronique de L298N ponts en H	32
Figure II.18 : Forme de signal MLI avec différent rapport cyclique	33
Figure III.1 : schéma électrique de la commande du véhicule autonome	37
Figure III.2 : connexion de L298N driver	38
Figure III.3 : fils de connexion (Jumper) : mâle-femelle	39

Figure III.4 : cable USB-Type B	39
Figure III.5 : L'interface graphique de l'environnement de développement Arduino IDE	46
Figure III.6 : Barre de boutons Arduino	47
Figure III.7 : Les étapes de téléchargement du code	48
Figure III.8 : schéma électrique de projet réalisé	57
Figure IV.1 : projet réalisé (véhicule autonome éviter les obstacle)	62
Figure IV.2 : mouvement avant de véhicule « essais d'absence d'obstacle »	62
Figure IV.3 : mouvement arrière de véhicule « obstacle droite et gauche »	63
Figure IV.4 : test moteur de guidage « essais d'absence d'obstacle »	63
Figure IV.5 : test moteur de guidage « obstacle droite »	64
Figure IV.6 : test moteur de guidage « obstacle gauche »	65
Figure IV.7 : test moteur de guidage « obstacle droite et gauche »	65

LISTE DES TABLEAUX :

Tableau I.1 : Caractéristiques du capteur ultrason HC-SR04	09
Tableau III.1 : branchement et connexion Arduino / L298N	39
Tableau III.2 : branchement et connexion Capteur HC-SR04 droite	40
Tableau III.3 : branchement et connexion Capteur HC-SR04 gauche	40
Tableau IV.1 : fonctionnement conditionnelle du moteur de guidage 'A'	67
Tableau IV.2 : fonctionnement conditionnelle du moteur de déplacement 'B'	67

INTRODUCTION

GENERALE

Au cours des dernières années, l'évolution rapide des systèmes de transport intelligents a profondément transformé les approches de conception des systèmes de commande embarqués dédiés aux véhicules autonomes [1]. Dans ce contexte, le développement de solutions de contrôle robustes, réactives et intelligentes constitue un axe de recherche majeur en robotique mobile et en ingénierie des systèmes embarqués [2]. Parmi les sous-systèmes critiques impliqués, le système de direction occupe une position centrale, en raison de son rôle déterminant dans la stabilité dynamique du véhicule, la précision du suivi de trajectoire et la sécurité globale du système [3].

La problématique de la sécurité routière renforce davantage l'importance de ces travaux. Selon le rapport de l'Organisation mondiale de la Santé publié en 2023 qui basé sur les statistique de 2021, les accidents de la route sont responsables d'environ 1,19 million de décès chaque année, mettant en évidence l'urgence de développer des systèmes de commande intelligents capables d'assurer une prise de décision fiable dans des environnements complexes, dynamiques et partiellement incertains [4].

Les véhicules autonomes et semi-autonomes modernes reposent aujourd'hui sur des architectures de direction électromécaniques avancées, dans lesquelles les systèmes purement mécaniques sont progressivement remplacés ou assistés par des actionneurs électriques pilotés numériquement [3]. Cette transition technologique s'appuie sur les progrès significatifs réalisés en électronique de puissance, en commande temps réel et en intégration capteurs–actionneurs [2], [5]. Elle permet d'améliorer considérablement la précision du contrôle, la réactivité du système ainsi que sa robustesse face aux perturbations externes. Les principaux acteurs industriels tels que Tesla, Waymo, BYD et Volkswagen ont démontré la maturité de ces approches à travers le déploiement de systèmes avancés d'aide à la conduite (ADAS) et de solutions de conduite autonome intégrée [5].

Dans ce cadre, les architectures de direction assistée basées sur des mécanismes de type crémaillère jouent un rôle fondamental dans la conversion du signal de commande électrique en mouvement mécanique directionnel des roues [3]. Ce choix architectural permet de garantir un compromis optimal entre précision de braquage, robustesse mécanique et adaptabilité aux contraintes des applications automobiles.

Par ailleurs, les systèmes de véhicules autonomes reposent sur une intégration étroite entre capteurs, actionneurs et algorithmes de décision, permettant une perception de l'environnement et une réaction en temps réel [1], [2]. Les fonctions de navigation et d'évitement d'obstacles constituent ainsi des composantes essentielles pour assurer la sécurité et la continuité de fonctionnement du système dans des environnements dynamiques et imprévisibles [6].

Les approches couramment adoptées combinent des capteurs de distance, notamment les capteurs ultrasoniques, avec des architectures de commande embarquées afin de permettre une navigation autonome efficace [6]. Parmi ces dispositifs, le capteur ultrasonique HC-SR04 est largement utilisé en raison de son faible coût, de sa facilité d'intégration et de sa performance satisfaisante dans la détection de proximité en environnements intérieurs et extérieurs [6]. De plus, plusieurs travaux de recherche ont démontré que l'utilisation de capteurs multiples améliore significativement la robustesse des stratégies d'évitement d'obstacles ainsi que la stabilité des trajectoires générées [6], [7].

Dans la présente étude, le système développé repose sur une architecture embarquée intégrant un mécanisme réel de direction de type crémaillère, actionné par des moteurs à courant continu. Ces derniers sont pilotés à l'aide de drivers de puissance tels que le L298N, largement utilisés dans les applications robotiques à faible coût en raison de leur simplicité de commande et de leur efficacité opérationnelle [8]. L'ensemble du système est contrôlé par un microcontrôleur Arduino Mega 2560, assurant l'acquisition des données issues des capteurs et l'exécution en temps réel des algorithmes de commande [7].

Cependant, l'intégration cohérente de ces différents sous-systèmes soulève plusieurs défis techniques, notamment la synchronisation entre capteurs et actionneurs, la gestion des délais de traitement ainsi que la stabilité des décisions de commande en environnement dynamique [2], [7]. Ces problématiques constituent des enjeux majeurs dans le domaine des systèmes embarqués et de la robotique mobile, où les contraintes temporelles et la fiabilité du système sont critiques [1], [2].

Dans ce contexte, ce mémoire propose la conception, la réalisation et la validation expérimentale d'un système de commande pour véhicule autonome basé sur une architecture à deux moteurs à courant continu assurant à la fois la propulsion et le guidage, couplée à un

système de direction mécanique de type crémaillère. Le système développé intègre également deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 positionnés de manière directionnelle (gauche et droite), permettant la détection d'obstacles et la prise de décision en temps réel [6], [7]. Cette architecture vise à garantir une navigation autonome réactive, stable et adaptée aux contraintes des environnements réels [2], [6].

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres principaux, permettant une progression logique depuis le cadre conceptuel jusqu'à la validation expérimentale du système de véhicule autonome proposé.

Le premier chapitre est consacré à la description du système global et détaille l'architecture matérielle du véhicule autonome développé. Il met en évidence les différents sous-systèmes utilisés, notamment les capteurs ultrasoniques, les actionneurs à courant continu, le driver de puissance L298N ainsi que la plateforme de commande embarquée basée sur Arduino Mega 2560.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude et à la modélisation des moteurs à courant continu utilisés dans le système. Il développe les modèles théoriques électromécaniques nécessaires à l'analyse dynamique des actionneurs, constituant la base pour la conception et l'optimisation de la stratégie de commande du système de propulsion et de direction.

Le troisième chapitre présente la conception et la réalisation du système proposé, en décrivant la mise en œuvre pratique du prototype du véhicule autonome, l'intégration matérielle des capteurs et actionneurs, ainsi que l'implémentation des algorithmes de commande sur la plateforme Arduino.

Le quatrième chapitre est consacré aux résultats expérimentaux, où sont présentées et analysées les données issues des tests réalisés afin d'évaluer les performances du système en termes de précision de navigation, de stabilité de trajectoire, de réactivité face aux obstacles et de robustesse globale.

Enfin, la conclusion générale synthétise l'ensemble des résultats obtenus, met en évidence les contributions principales de ce travail et propose des perspectives de recherche futures, notamment en vue de l'amélioration des performances du système et de son extension vers des applications de conduite autonome plus avancées.

CHAPITRE I :
DESCRIPTION DU
SYSTEME GLOBAL

I.1. Introduction :

Les véhicules autonomes constituent une solution de transport moderne offrant un niveau élevé de confort, d'efficacité et de sécurité. Les avancées technologiques récentes dans les domaines de l'électronique embarquée et des systèmes intelligents permettent d'améliorer continuellement leurs performances afin de garantir une meilleure fiabilité et une autonomie accrue. Dans ce contexte, les systèmes de commande en temps réel occupent une place essentielle, notamment pour la détection et l'évitement dynamique des obstacles, contribuant ainsi à la sécurité globale du véhicule. La conception d'un véhicule autonome nécessite ainsi une compréhension approfondie de son architecture matérielle et logicielle, ainsi qu'une coordination efficace entre les capteurs, l'unité de traitement et les actionneurs.

Le système étudié dans ce travail correspond à un prototype de véhicule autonome à échelle réduite, capable d'assurer des fonctions de déplacement et d'évitement d'obstacles en temps réel. Son fonctionnement repose sur l'acquisition d'informations de l'environnement à l'aide de capteurs ultrasoniques HC-SR04, leur traitement par un microcontrôleur embarqué Arduino Mega 2560, puis la génération de signaux de commande destinés aux actionneurs assurant la propulsion et la direction du véhicule. Dans ce cadre, ce chapitre présente une description détaillée du système global proposé, en mettant en évidence son architecture générale ainsi que ses principaux composants et leurs interactions, notamment les capteurs ultrasoniques, les moteurs à courant continu, le driver de puissance L298N et la plateforme Arduino, afin de fournir une vision claire, structurée et technique du fonctionnement du prototype développé.

I.2. Architecture générale du véhicule :

La structure du véhicule repose sur un châssis de forme approximativement plane et rigide, optimisé pour supporter l'ensemble des composants mécaniques et électriques. Les roues avant sont montées sur un système de direction de type crémaillère, assurant le braquage du véhicule. Ce mécanisme convertit le mouvement rotatif d'un moteur à courant continu en un mouvement de translation, permettant ainsi un contrôle précis de l'angle de direction. L'architecture globale repose sur une séparation fonctionnelle claire entre les fonctions de direction et de propulsion, facilitant la modélisation ainsi que la réalisation pratique du système .

Le système de propulsion est assuré par un unique moteur à courant continu entraînant les deux roues arrière via un axe mécanique commun, correspondant à une architecture de type propulsion arrière (RWD). Le contrôle de ce moteur est réalisé à l'aide d'un driver de puissance

de type pont en H (L298N), permettant la gestion bidirectionnelle de la vitesse et du sens de rotation .

Du point de vue de la perception, le véhicule intègre des capteurs ultrasoniques de type HC-SR04 disposés de manière directionnelle afin d'assurer la détection des obstacles dans l'environnement proche. Cette architecture permet une interaction cohérente entre les sous-systèmes de propulsion, de direction et de perception, garantissant ainsi une navigation autonome stable et réactive .

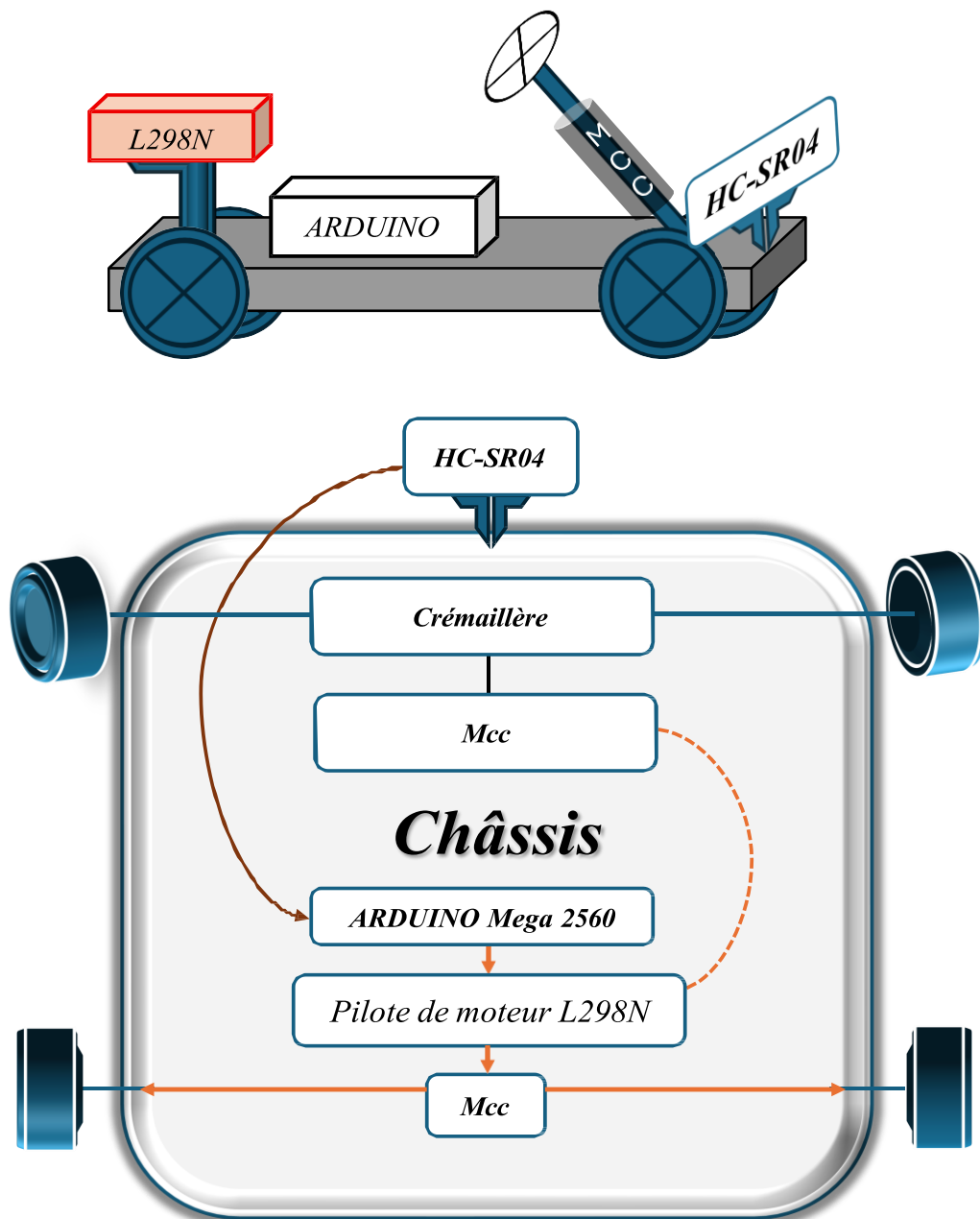


Figure I.1 : Schéma synoptique et fonctionnement du véhicule

I.3. Rôle du moteur à courant continu :

Le moteur à courant continu (DC) constitue l'actionneur principal du système de direction. Il transforme la commande électrique issue de la carte de contrôle en un mouvement rotatif, ensuite converti en déplacement mécanique grâce au mécanisme pignon-crémaillère. Dans cette configuration, la rotation du moteur entraîne un pignon qui transforme le mouvement en déplacement linéaire de la crémaillère, lequel est ensuite converti en angle de braquage des roues directrices. Ainsi, le véhicule est orienté selon une consigne définie à partir des données capteurs et des algorithmes implémentés sur le microcontrôleur (Arduino).

La différence entre l'angle théorique et l'angle réel de braquage provient principalement de plusieurs facteurs, notamment :

- les jeux mécaniques dans le système de direction à crémaillère,
- les pertes et tolérances liées à la transmission mécanique,
- Frottement sec du système de direction

L'étude approfondie de ces paramètres est essentielle afin de garantir un guidage précis, sûr et efficace du véhicule. Elle permet d'optimiser la correspondance entre l'angle de rotation du moteur et l'angle réel de braquage des roues, réduisant ainsi les erreurs lors de l'évitement des obstacles et assurant une réponse fiable du système de commande électronique.

De plus, le moteur de déplacement assure la translation du véhicule vers l'avant et vers l'arrière grâce à un système mécanique de transmission reliant son arbre aux deux roues arrière. La rotation du moteur est ainsi convertie en mouvement de déplacement, permettant au véhicule d'évoluer dans son environnement conformément aux consignes générées par le système de commande.

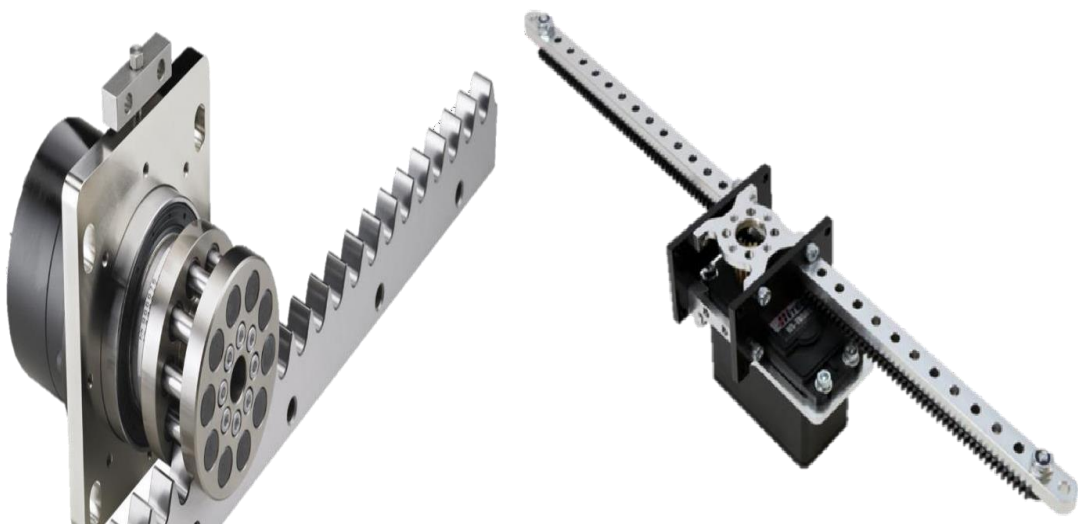


Figure I.2 : Le mécanisme (pignon-crémaillère)

I.4. Capteurs ultrasoniques pour l'évitement d'obstacles :

Ce dispositif électronique c'est le lien de connexion entre l'environnement qui entoure le véhicule et le véhicule lui-même utilisé pour calculer la longueur d'onde sonore se propage en va-et-vient, de sorte qu'elle rebondit lorsqu'elle rencontre l'obstacle (un capteur ultrasonique utilisé pour mesurer la distance entre un obstacle et le capteur). Ils fonctionnent sur le principe de l'émission et de la réception d'ondes ultrasonores de haute fréquence, généralement autour de 40 kHz. [9]

Le capteur émet une impulsion ultrasonique qui se propage dans l'air jusqu'à rencontrer un obstacle. L'onde est alors réfléchi et retournée vers le récepteur du capteur.

La distance entre le capteur et l'obstacle est déterminée à partir du temps de propagation de l'onde, selon la relation : $d = \frac{t}{2} \times v$

Où :

- d: distance à l'obstacle (m)
- v: vitesse du son dans l'air (340 m/s)
- t: temps aller-retour de l'onde (s)

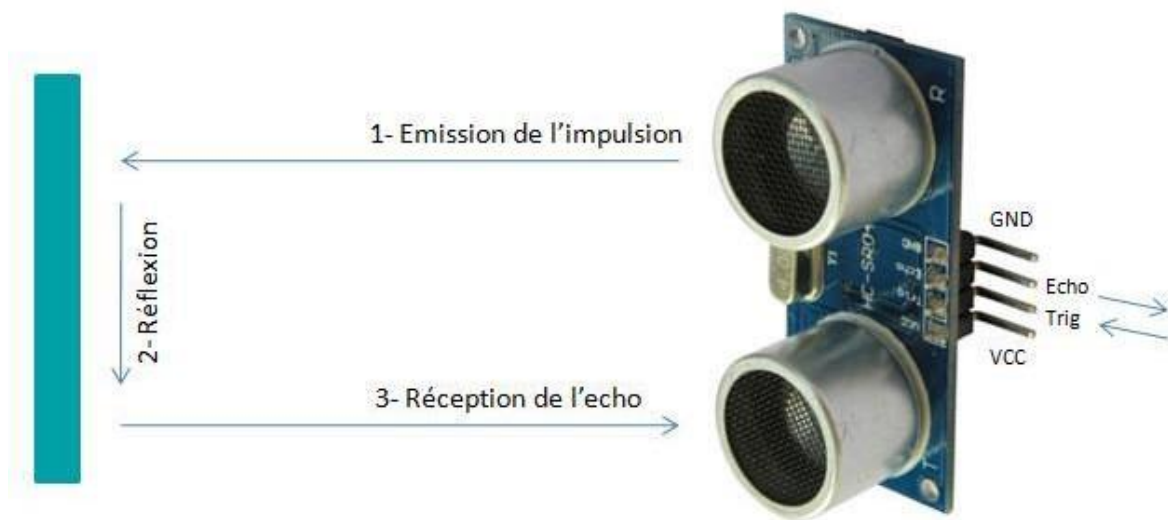


Figure I.3 : Capteur ultrason HC-SR 04

Le capteur ultrasonique est déclenché par une impulsion de commande appliquée sur l'entrée Trigger, dont la durée minimale et optimale est de 10 μ s. Cette impulsion permet d'activer le circuit interne du capteur et de lancer l'émission des ondes ultrasoniques. La durée de cette impulsion n'influence pas la mesure de distance, laquelle dépend uniquement du temps de retour de l'écho. [9,10]

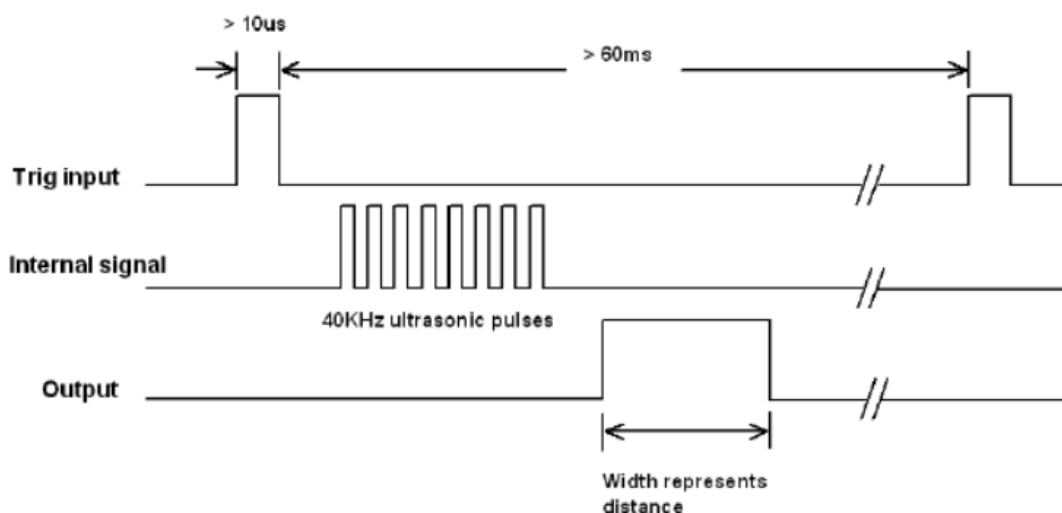


Figure I.4 : Chronogramme du capteur ultrason HC-SR04

I.4.1. Caractéristiques :

Paramètres électriques	Valeur
Tension de fonctionnement	3,3 Vdc ~ 5 Vdc
Courant de repos	< 2 mA
Courant de fonctionnement	15 mA
Fréquence de fonctionnement	40 kHz
Largeur d'impulsion sur l'entrée de Déclenchement	10 µs (Trigger Input Pulse width)
Portée et précision de fonctionnement	2 cm ~ 400 cm ± 3 mm
Sensibilité	-65 dB min
Pression sonore	112 dB
Angle de mesure efficace	15°
Connecteur	Connecteur 4 broches avec pas de 2,54 mm
Dimensions	45 mm × 20 mm × 15 mm
Poids	9 g

Tableau I.1 : Caractéristiques du capteur ultrason HC-SR04 [9]

I.4.2. Broches de connexion :

- **Vcc** : Alimentation +5 V DC
- **Trig** : Entrée de déclenchement de la mesure (Trigger input)
- **Echo** : Sortie de mesure donnée en écho (Echo output)
- **GND** : Masse de l'alimentation

I.5. Microcontrôleur Arduino et communication interne :

Le microcontrôleur constitue l'élément central d'un système embarqué, assurant le traitement des informations issues des capteurs et leur conversion en signaux de commande destinés aux actionneurs, conformément aux algorithmes implémentés dans le programme.

Dans le cadre de ce projet, la carte Arduino Mega 2560 Rev3 est utilisée comme unité principale de commande. Elle est basée sur le microcontrôleur ATmega2560 de la société Atmel. Cette carte s'appuie sur l'environnement de développement intégré (IDE Arduino), permettant la programmation en langage C/C++ de manière simplifiée et accessible, contrairement aux microcontrôleurs traditionnels programmés en langage Assembleur, plus complexe et proche du langage machine.

L'Arduino Mega 2560 Rev3 se distingue par sa grande capacité de traitement, son nombre élevé d'entrées/sorties numériques et analogiques, ainsi que par sa mémoire étendue, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications nécessitant la gestion simultanée de plusieurs capteurs et actionneurs.

Par ailleurs, la plateforme Arduino repose sur une architecture Open Source, bénéficiant d'une large communauté de développeurs et d'utilisateurs. Cette caractéristique favorise l'évolution continue des bibliothèques logicielles, des outils de développement et des solutions matérielles associées, améliorant ainsi sa flexibilité et son intégration dans divers systèmes embarqués.

I.5.1. Arduino Mega 2560 Rev3:

L'Arduino Mega 2560 Rev3 est une carte électronique appartenant à la famille Arduino, basée sur le microcontrôleur ATmega2560 développé par la société Atmel.

Dans le cadre de notre projet, le modèle Arduino Mega 2560 Rev3 a été retenu en raison de sa grande capacité de traitement, de son nombre élevé de broches d'entrée/sortie et de sa mémoire plus importante, permettant une adaptation efficace aux besoins du système embarqué [11].

De plus, ses caractéristiques techniques sont particulièrement adaptées à la réalisation du projet, notamment pour l'acquisition simultanée des données provenant de plusieurs capteurs ultrasoniques ainsi que pour la commande du moteur linéaire circulaire à l'aide de signaux PWM.

I.5.2. Caractéristiques techniques de l' Arduino Mega 2560 Rev 3:

La carte Arduino Mega 2560 Rev3 est basée sur le microcontrôleur ATmega2560 et présente les caractéristiques suivantes [11] :

- 54 broches numériques d'entrée/sortie, dont 15 peuvent être utilisées comme sorties PWM
- 16 entrées analogiques (A0 à A15)
- Oscillateur à quartz de 16 MHz assurant la synchronisation des opérations internes
- Connexion USB (Universal Serial Bus) pour la programmation et la communication avec l'ordinateur
- Connecteur d'alimentation externe
- Connecteur ICSP pour la programmation directe du microcontrôleur
- Bouton de réinitialisation (Reset)
- Mémoire Flash de 256 KB
- SRAM de 8 KB et EEPROM de 4 KB
- Tension de fonctionnement : 5 V
- Tension d'entrée recommandée : 7 à 12 V

Ces caractéristiques font de l'Arduino Mega 2560 Rev3 une solution performante et adaptée aux applications embarquées nécessitant un grand nombre d'entrées/sorties et une gestion simultanée de plusieurs périphériques.

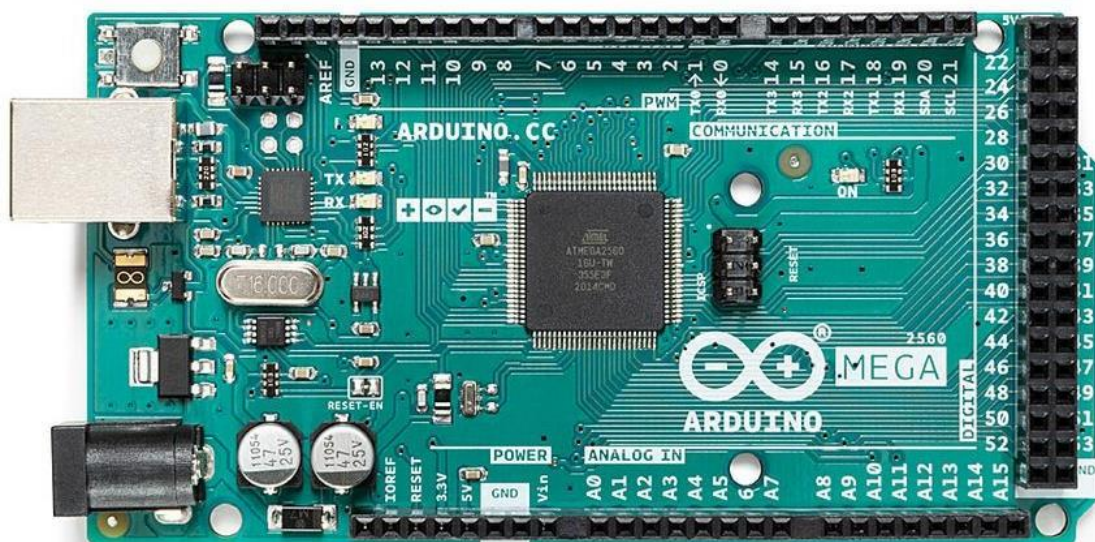


Figure I.5 : carte Arduino Mega 2560 Rev 3

I.5.3. Communication interne du système :

La communication interne du système est assurée par la carte Arduino Mega 2560 Rev3, qui constitue l'unité centrale de traitement et de coordination entre les différents modules du véhicule, notamment les capteurs ultrasoniques et le moteur à courant continu (MCC). Cette architecture repose sur un échange structuré de données permettant la gestion en temps réel des opérations d'acquisition, de traitement et de commande.

L'échange d'informations au sein du système s'effectue à travers trois types principaux de signaux : numériques, analogiques et PWM (Pulse Width Modulation), en fonction de la nature des grandeurs physiques traitées et des exigences de commande.

Les signaux numériques sont utilisés pour l'interfaçage avec les capteurs ultrasoniques, lesquels fonctionnent sur la base d'impulsions logiques de type Trigger/Echo. Ces signaux permettent au microcontrôleur d'estimer les distances en mesurant le temps de propagation des ondes ultrasonores, assurant ainsi la détection d'obstacles et la prise de décision associée.

Les signaux analogiques sont exploités via les entrées analogiques de la carte Arduino Mega 2560 Rev3, connectées à un convertisseur analogique-numérique (CAN) intégré à 10 bits de résolution. Ce mécanisme permet la conversion de grandeurs physiques continues en données numériques exploitables par le microcontrôleur pour les traitements embarqués [11].

En sortie, les signaux PWM générés par certaines broches de la carte sont utilisés pour le pilotage du Moteur à courant continu. La modulation du rapport cyclique permet de contrôler la puissance moyenne appliquée à l'actionneur, assurant ainsi un contrôle précis de la vitesse et de la position du système de direction.

La synchronisation globale des opérations est assurée par l'oscillateur à quartz de 16 MHz intégré au microcontrôleur ATmega2560, garantissant une exécution déterministe des instructions et une gestion temporelle fiable des différentes tâches du système embarqué[11].

Ainsi, cette architecture de communication interne permet d'assurer une interaction efficace entre les capteurs, l'unité de traitement et les actionneurs, garantissant une stabilité de fonctionnement, une réactivité élevée et une précision adaptée aux applications de véhicule autonome.

I.6. conclusion :

Ce premier chapitre a permis de définir l'architecture fonctionnelle du véhicule autonome ainsi que l'interaction entre ses principaux sous-systèmes. L'analyse a mis en évidence le rôle central de la chaîne de commande constituée des capteurs ultrasoniques, de l'unité de traitement basée sur Arduino et des actionneurs assurant la direction et le déplacement du véhicule. Cette organisation hiérarchisée permet la perception de

l'environnement en temps réel, le traitement des données acquises et la génération des signaux de commande adaptés. Ainsi, ce chapitre a posé les bases matérielles et fonctionnelles nécessaires à la mise en œuvre d'un système de guidage automatique cohérent et robuste.

CHAPITRE II :
Étude et Modélisation
du Moteur courant
continu

II.1. Introduction :

Les actionneurs électriques occupent une place essentielle dans les systèmes de commande modernes, notamment dans les véhicules autonomes où la précision, la rapidité et la fiabilité sont indispensables. Parmi eux, le moteur à courant continu (MCC) se distingue par sa simplicité de commande et sa capacité à transformer efficacement l'énergie électrique en mouvement mécanique contrôlé.

Ce chapitre présente une étude du moteur à courant continu utilisé dans le système de direction d'un véhicule autonome. L'objectif est d'analyser sa structure électromécanique, son principe de fonctionnement, ainsi que de développer un modèle électromécanique simplifié permettant d'étudier son comportement dynamique et de concevoir une stratégie de commande adaptée.

Le moteur assure la conversion des signaux électriques issus de l'unité de commande en mouvement mécanique de l'organe de direction, garantissant ainsi un positionnement précis et fiable des roues directrices. Une attention particulière est accordée à la modélisation théorique du MCC, à son interaction avec le microcontrôleur et les capteurs, ainsi qu'aux techniques de commande et de régulation associées.

Cette étude constitue une base fondamentale pour la simulation, l'analyse et l'implémentation du système de direction du véhicule autonome.

II.2. Définition :

Le moteur à courant continu (MCC) est une machine électrique tournante assurant la conversion électromécanique de l'énergie. Son principe de fonctionnement repose sur la transformation de l'énergie électrique fournie par une source d'alimentation en énergie mécanique de rotation disponible sur son arbre de sortie. Cette énergie mécanique constitue l'énergie utile exploitée pour l'entraînement des charges mécaniques.

Les moteurs à courant continu appartiennent à la catégorie des convertisseurs électromécaniques réversibles. En mode moteur, ils convertissent l'énergie électrique absorbée en énergie mécanique, permettant ainsi le démarrage et l'entraînement d'une charge. À l'inverse, lorsqu'ils sont entraînés mécaniquement par une source externe, ils fonctionnent en mode génératrice et convertissent l'énergie mécanique reçue en énergie électrique. Cette propriété de réversibilité constitue l'un des principaux avantages des machines à courant continu dans les applications de commande et d'entraînement électrique [12].



Figure II.1 : Transformation de l'énergie dans une machine MCC

Dans le cadre du présent projet, deux moteurs à courant continu ont été retenus comme actionneurs principaux du prototype. Le premier moteur assure la fonction de propulsion du véhicule, tandis que le second est dédié au mécanisme de guidage permettant la correction de la trajectoire lors de la détection d'obstacles. La Figure (Figure II.2) présente les moteurs à courant continu utilisés dans la réalisation expérimentale du système.



Figure II.2 : Moteur à courant continu

II.3. Structure du Moteur à courant continu :

Tous les moteurs électriques reposent sur le principe physique du couplage magnétique entre deux champs magnétiques. La conversion de l'énergie électrique en énergie mécanique s'effectue à travers cette interaction magnétique entre les circuits concernés. Ainsi, le fonctionnement d'un moteur électrique découle de l'interaction entre deux circuits magnétiques principaux, à savoir le stator (partie fixe) et le rotor (partie mobile)[13].

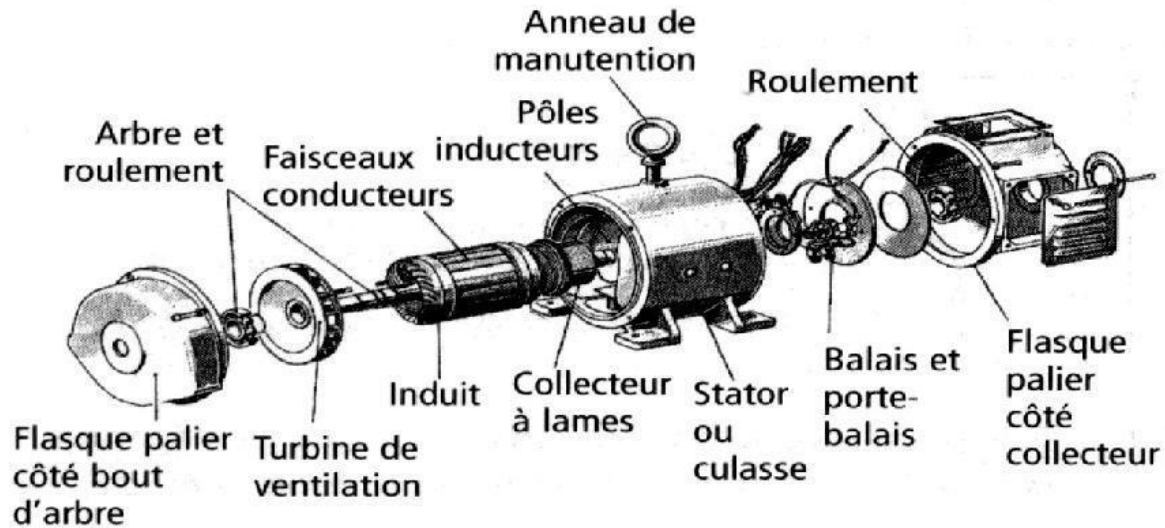


Figure II.3 : Constitution d'un Moteur à courant continu

Le stator ou inducteur :

la partie fixe du moteur à courant continu. Il assure à la fois le support mécanique de l'ensemble de la machine et la création du champ magnétique nécessaire à son fonctionnement. Sa structure est principalement composée d'une carcasse métallique, qui sert de support aux différents éléments internes et permet la fixation du moteur sur son châssis ou sa fondation.

Le stator comprend également les paliers, les flasques de palier ainsi que les porte-balais, qui participent respectivement au guidage de l'arbre de rotation et à l'alimentation électrique de l'induit. Le cœur magnétique du stator est constitué d'un ensemble de pôles principaux réalisés à partir d'un empilement de tôles ferromagnétiques afin de limiter les pertes par courants de Foucault.

Les pôles principaux ont pour fonction de générer le champ magnétique inducteur. Selon la conception du moteur, ce champ peut être produit soit par des aimants permanents, généralement en ferrite ou en matériaux à haute performance magnétique, soit par des enroulements d'excitation en cuivre disposés autour des noyaux polaires. Ces bobinages sont alimentés électriquement afin de créer le flux magnétique nécessaire à l'interaction électromécanique avec l'induit.

Dans les moteurs de moyenne et de forte puissance, plusieurs paires de pôles sont généralement utilisées. Cette configuration permet une meilleure exploitation des matériaux magnétiques, une réduction des dimensions d'encombrement pour une puissance donnée ainsi qu'une amélioration de la répartition du flux magnétique dans l'induit. Par conséquent, les

performances globales du moteur, notamment son rendement et sa densité de puissance, sont optimisées [14].



Figure II.4 : Inducteur à aimants permanents et Inducteur bobiné

Rotor ou Induit :

L'induit constitue la partie mobile (rotor) du moteur à courant continu. Son noyau, généralement réalisé en acier magnétique feuilleté, assure le guidage et la concentration des lignes de flux magnétique afin d'améliorer les performances électromagnétiques de la machine. Les conducteurs de l'enroulement d'induit sont disposés dans des encoches usinées à la périphérie du rotor. Deux conducteurs reliés entre eux forment une spire, tandis que l'ensemble des spires constitue l'enroulement rotorique.

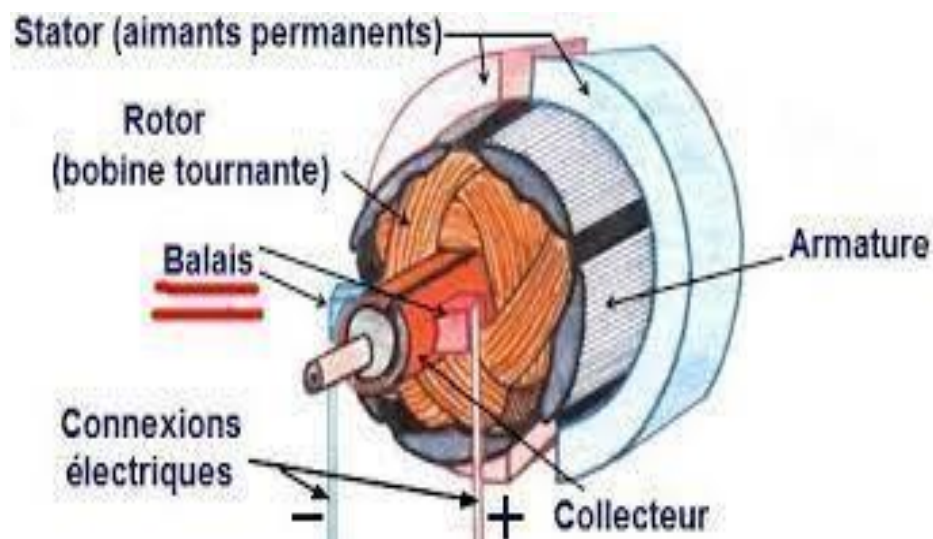


Figure II.5 : conception d'induit

L'induit est composé des éléments principaux suivants :

- **Un circuit magnétique :**

Le circuit magnétique est constitué d'un empilement de tôles d'acier de faible épaisseur (environ 0,5 mm), isolées entre elles afin de réduire les pertes par courants de Foucault. Cette structure feuilletée permet d'optimiser le guidage du flux magnétique et d'améliorer le rendement électromagnétique de la machine.

- **Un collecteur :**

Le collecteur constitue un élément essentiel du moteur à courant continu. Il assure la liaison électrique entre l'enroulement d'induit, situé sur le rotor, et le circuit d'alimentation externe en courant continu. Dans cette configuration, l'enroulement d'excitation est porté par le stator et alimenté en courant continu, tandis que l'enroulement d'induit, placé sur le rotor, est le siège d'une force électromotrice induite de nature alternative lors de la rotation. Le collecteur, monté sur l'arbre du rotor et constitué de lames conductrices isolées les unes des autres, est connecté aux extrémités des sections de l'enroulement d'induit. Associé à un système de balais fixes en contact permanent avec ses lames, il assure la commutation mécanique du courant dans les bobines rotoriques. Cette opération permet de maintenir un couple électromagnétique de sens constant, garantissant ainsi le fonctionnement continu et stable du moteur à courant continu [15].



Figur II.6 : Le collecteur

- **Un enroulement d'induit :**

Enroulement d'induit : Le circuit magnétique du rotor est aménagé à sa surface par des rainures appelées encoches. Ces encoches servent à loger les conducteurs de l'induit. Les conducteurs sont connectés en série afin de former des enroulements répartis sur le rotor. L'ensemble constitue l'enroulement d'induit, conçu pour optimiser la répartition du champ magnétique et la production du couple électromagnétique[16].



Figure II.7 : enroulement d'induit

- Les balais :

Pour assurer la liaison électrique entre l'enroulement d'induit et l'alimentation du moteur, on utilise des balais. Ces éléments assurent le contact glissant avec le collecteur en rotation, permettant ainsi la transmission du courant vers l'induit. Les balais sont généralement constitués de matériaux conducteurs à base de carbone afin de limiter l'usure et les pertes par frottement. Ils sont maintenus en pression constante contre les lames du collecteur et sont logés dans des porte-balais, qui assurent leur guidage et leur maintien mécanique.



Figure II.8 : les balais

II.4. Principe de fonctionnement :

Lorsque l'enroulement d'induit est alimenté en courant continu, il génère, selon le même principe qu'un aimant permanent, un champ magnétique appelé flux d'induit, orienté selon une direction nord-sud. Une bobine mobile est placée sur l'axe de rotation et se trouve immergée dans le champ magnétique créé par l'inducteur.

Chaque conducteur de l'induit, formant une spire, est relié électriquement à des segments du collecteur. L'alimentation en courant continu est assurée par des balais assurant le contact électrique avec le collecteur.

Selon la loi de Laplace, tout conducteur parcouru par un courant et placé dans un champ magnétique est soumis à une force électromagnétique. Les conducteurs situés de part et d'autre de la ligne neutre subissent des forces égales en intensité mais de sens opposés, ce qui engendre un couple électromagnétique responsable de la rotation du moteur [17].

Dans le cas d'un moteur à aimants permanents, le champ magnétique de l'inducteur est constant. En revanche, dans le cas d'un inducteur bobiné, l'application d'une tension d'excitation engendre un courant d'excitation qui crée le champ magnétique inducteur. Par ailleurs, l'application d'une tension à l'induit provoque la circulation d'un courant dans ses conducteurs, générant à son tour un champ magnétique rotorique. L'interaction entre le champ magnétique de l'inducteur et celui de l'induit produit ainsi le couple électromagnétique responsable de la mise en rotation du rotor.

Sous l'effet de ce couple, le rotor se met en mouvement. Il est important de noter que la continuité du couple repose sur un phénomène de commutation assurant l'inversion du courant dans les enroulements de l'induit à chaque demi-tour de l'axe de la machine.

Le principe de fonctionnement des pôles de commutation repose sur cette inversion du courant électrique dans les enroulements de l'armature, nécessaire afin de maintenir un couple de rotation constant. Cette inversion est réalisée grâce au système collecteur-balais. Le collecteur est constitué de plusieurs segments métalliques isolés entre eux, chacun relié à un enroulement de l'induit. Les balais de contact, maintenus en pression contre le collecteur par des ressorts, assurent le transfert du courant entre la partie fixe et la partie tournante de la machine.

Ce dispositif garantit ainsi une commutation correcte du courant dans les enroulements, permettant le maintien d'un couple électromagnétique unidirectionnel et continu [17].

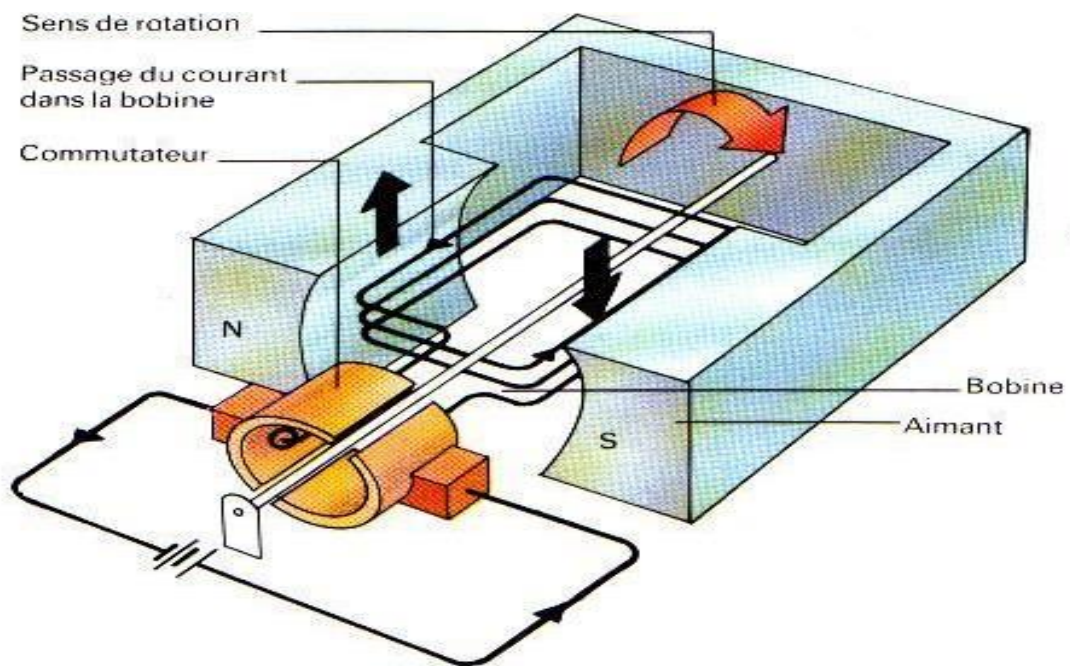


Figure II.9 : Schéma de principe du moteur MCC

II.5. Modèle électromagnétique simplifié :

II.5.1. Circuit équivalent :

Du point de vue électrique, l'induit du moteur à courant continu peut être modélisé par une résistance R , une inductance L et une force contre-électromotrice E montées en série. La résistance R est due aux conducteurs constituant les enroulements du rotor et s'exprime par :

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

Où :

ρ : représente la résistivité du matériau conducteur,

L : la longueur totale du conducteur,

S : sa section

L'inductance L résulte du bobinage de l'induit et traduit sa capacité à s'opposer aux variations du courant. Par ailleurs, la rotation du rotor dans le champ magnétique engendre une force contre-électromotrice E , conformément à la loi de Lenz-Faraday. Cette tension induite s'oppose à la cause qui lui a donné naissance et peut être exprimée par :

$$E = - \frac{d\Phi(t)}{dt}$$

Où :

$\Phi(t)$: désigne le flux magnétique traversant l'enroulement d'induit.

Ainsi, le comportement électrique du moteur peut être représenté par un circuit série composé de la résistance d'induit, de son inductance et de la force contre-électromotrice générée lors du fonctionnement[18].

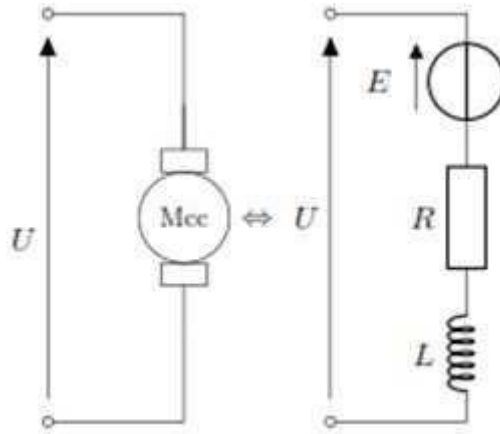


Figure II.10 : Circuit équivalent du moteur MCC

II.5.2. Équations électriques et mécaniques :

a) Équation électrique de l'induit :

En appliquant la loi des mailles au circuit électrique équivalent du moteur à courant continu, la tension d'alimentation est donnée par :

$$U(t) = E(t) + RI(t) + L \frac{dI(t)}{dt}$$

Où :

$U(t)$: est la tension d'alimentation

$E(t)$: la force contre-électromotrice

R : la résistance de l'induit, L son inductance

$I(t)$: le courant d'induit.

En régime permanent, le courant est considéré constant ($\frac{dI(t)}{dt} = 0$). L'équation précédente se simplifie alors sous la forme :

$$U(t) = E(t) + RI(t)$$

b) Force contre-électromotrice :

La rotation de l'induit dans le champ magnétique produit une force contre-électromotrice. Cette tension induite est proportionnelle à la vitesse angulaire du rotor et s'écrit :

$$E(t) = K_e \Omega(t)$$

Où

- K_e : représente la constante électromagnétique du moteur ($V \cdot s/\text{rad}$)
- $\Omega(t)$: la vitesse angulaire du rotor (rad/s).

c) Équation du couple électromagnétique :

Le couple électromagnétique développé par le moteur est directement proportionnel au courant circulant dans l'induit :

$$C(t) = K_e I(t)$$

Où

- K_c : est la constante de couple du moteur ($N \cdot m/A$)

Dans le cas d'un moteur idéal, c'est-à-dire en négligeant les pertes électromécaniques, les constantes électromagnétique et de couple sont égales :

$$K_e = K_c$$

d) Puissances électrique et mécanique :

La puissance mécanique développée par le moteur est définie comme le produit du couple électromagnétique par la vitesse de rotation :

$$P_{em}(t) = C(t)\Omega(t)$$

Par ailleurs, la puissance électrique convertie au niveau de l'induit s'exprime par :

$$P_{em}(t) = E(t)I(t) = U(t)I(t) - RI^2(t)$$

Cette relation montre que la puissance électrique fournie au moteur est partiellement dissipée par effet Joule dans la résistance de l'induit et partiellement convertie en énergie mécanique.

e) Équation mécanique du moteur :

En appliquant le principe fondamental de la dynamique en rotation au rotor du moteur, l'équation mécanique s'écrit :

$$C(t) - C_r(t) - f\Omega(t) = J \frac{d\Omega(t)}{dt}$$

Où :

- $C(t)$ est le couple électromagnétique développé par le moteur ;
- $C_r(t)$ est le couple résistant appliqué à l'arbre ;
- f est le coefficient de frottement visqueux ;
- J représente le moment d'inertie total du rotor ;
- $\Omega(t)$ est la vitesse angulaire du moteur.

Cette équation traduit l'équilibre dynamique entre le couple moteur, les couples résistants et les effets d'inertie et de frottement. Elle constitue, avec les équations électriques précédentes, la base de la modélisation mathématique du moteur à courant continu.

II.5.3. Modèle du moteur dans le domaine de Laplace :

Afin de faciliter l'analyse dynamique et la synthèse des systèmes de commande, les équations du moteur à courant continu sont généralement exprimées dans le domaine de Laplace. En appliquant la transformée de Laplace aux équations électriques et mécaniques précédentes, on obtient :

Équation électrique :

$$U(p) = E(p) + (R + pL)I(p)$$

où $U(p)$, $E(p)$ et $I(p)$: représentent respectivement les transformées de Laplace de la tension d'alimentation, de la force contre-électromotrice et du courant d'induit.

Force contre-électromotrice :

$$E(p) = K_e \Omega(p)$$

Couple électromagnétique :

$$C(p) = K_t I(p)$$

Équation mécanique :

$$C(p) - C_r(p) - f\Omega(p) = Jp\Omega(p)$$

L'ensemble de ces équations constitue le modèle dynamique complet du moteur à courant continu dans le domaine fréquentiel.

II.5.4. Fonction de transfert du moteur à courant continu :

Dans le cas où le couple résistant est négligé ($C_r = 0$), la fonction de transfert reliant la vitesse angulaire du moteur à la tension d'alimentation peut être obtenue à partir des équations précédentes. Elle s'écrit :

$$H_M(p) = \frac{K}{(Jp + f)(R + Lp) + K^2}$$

Où

K : représente la constante électromécanique du moteur.

Cette expression met en évidence l'interaction entre les phénomènes électriques et mécaniques qui gouvernent le comportement dynamique du moteur.

Pour faciliter l'analyse, la fonction de transfert est souvent mise sous sa forme canonique du second ordre :

$$H_M(p) = \frac{K_0}{\tau\tau_e p^2 + (\tau + \alpha\tau_e)p + 1}$$

Avec :

$$\tau = \frac{RJ}{K^2 + Rf}$$
$$\tau_e = \frac{L}{R}$$
$$K_0 = \frac{K}{K^2 + Rf}$$
$$\alpha = \frac{Rf}{K^2 + Rf}$$

Où :

- τ : est la constante de temps électromécanique ;
- τ_e : est la constante de temps électrique ;
- K_0 : est le gain statique du moteur ;
- α : est un coefficient dépendant des paramètres électriques et mécaniques de la machine.

La constante de temps électromécanique τ dépend principalement de l'inertie du rotor. Plus le moment d'inertie J est élevé, plus la réponse mécanique du moteur est lente. La constante de temps électrique τ_e est quant à elle liée aux caractéristiques du circuit d'induit, notamment à sa résistance et à son inductance.

Compte tenu du fait que la dynamique électrique est généralement beaucoup plus rapide que la dynamique mécanique, certaines simplifications permettent d'approcher le comportement du moteur par le produit de deux systèmes du premier ordre :

$$H_M(p) \approx \frac{K_0}{(1 + \tau p)(1 + \tau_e p)}$$

Cette représentation simplifiée est largement utilisée dans les études de commande et de régulation des moteurs à courant continu, car elle permet une analyse plus intuitive de l'influence respective des dynamiques électrique et mécanique sur les performances globales du système [18].

II.5.5. Schémas blocs :

L'utilisation de la transformée de Laplace permet d'établir le modèle mathématique décrivant la réponse en vitesse du moteur à courant continu pour différentes valeurs de la tension d'alimentation. Ce modèle est généralement représenté sous la forme d'un schéma-blocs reliant la tension d'entrée $U(p)$ à la vitesse angulaire $\Omega(p)$

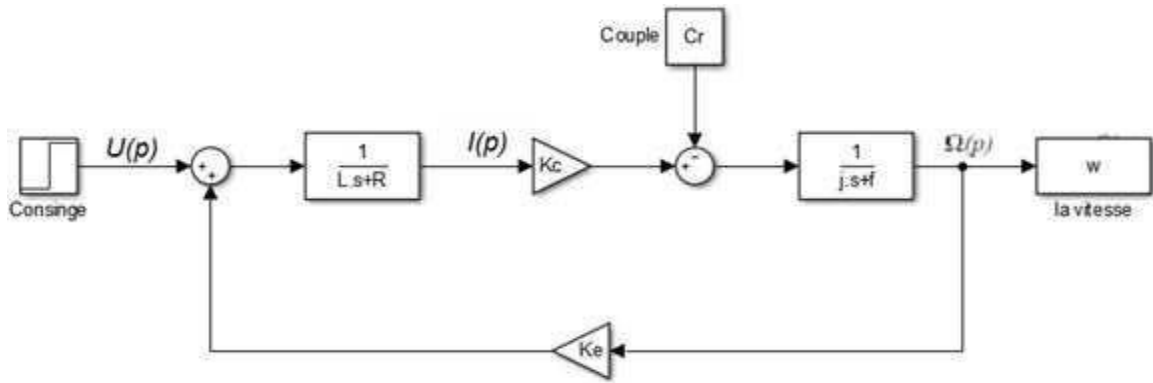


Figure II.11 : Schéma-blocs tension–vitesse du moteur à courant continu

D’après la fonction de transfert obtenue précédemment, le moteur à courant continu est théoriquement modélisé par un système du second ordre. Toutefois, dans la plupart des applications pratiques, l’inductance de l’induit est faible devant sa résistance. La constante de temps électrique devient alors nettement inférieure à la constante de temps électromécanique, ce qui permet de négliger la dynamique électrique. Dans ces conditions, le comportement du moteur peut être assimilé à celui d’un système du premier ordre.

Cette approximation simplifie considérablement l’étude dynamique tout en conservant une précision satisfaisante pour la majorité des applications de commande. Elle met également en évidence une propriété fondamentale du moteur à courant continu : la vitesse de rotation est directement liée à la tension appliquée à ses bornes. Ainsi, toute variation de la tension d’alimentation entraîne une modification correspondante de la vitesse de rotation jusqu’à l’établissement d’un nouveau régime permanent.

Par conséquent, dans la zone de fonctionnement linéaire du moteur, la vitesse angulaire est approximativement proportionnelle à la tension d’entrée, ce qui explique l’utilisation fréquente de la variation de tension comme moyen de commande de la vitesse des moteurs à courant continu [18].

II.5.6. Réponse en position du moteur à courant continu :

Le modèle mathématique de la réponse en position peut également être établi à partir de la fonction de transfert en vitesse. En effet, la position angulaire $\theta(t)$ est obtenue par intégration de la vitesse angulaire $\Omega(t)$. Dans le domaine de Laplace, cette relation s’écrit :

$$\Theta(p) = \frac{\Omega(p)}{p}$$

Par conséquent, la fonction de transfert reliant la position angulaire à la tension d’alimentation s’obtient en ajoutant un intégrateur au modèle de vitesse.

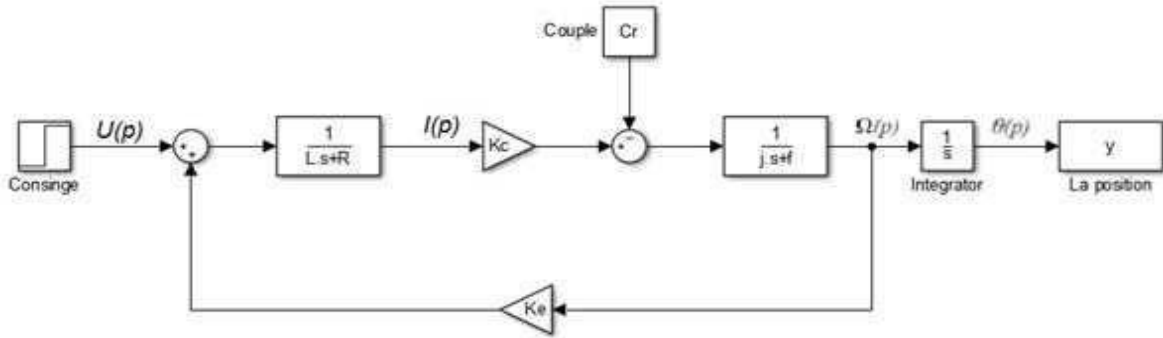


Figure II.12: Schéma-blocs tension–position du moteur à courant continu

Cette représentation montre que le moteur à courant continu se comporte comme un système intégrateur lorsqu'il est considéré du point de vue de la position. Ainsi, une vitesse constante entraîne une augmentation continue de la position angulaire au cours du temps. Cette propriété est largement exploitée dans les systèmes d'asservissement en position, tels que les servomoteurs, les robots industriels et les mécanismes de guidage automatique [18].

II.5.7. Modèle d'état du moteur à courant continu :

Le moteur à courant continu (MCC) peut être représenté par un modèle d'état permettant de décrire son comportement dynamique. Dans cette étude, la tension d'induit u constitue l'entrée du système, tandis que la vitesse angulaire du rotor ω est choisie comme sortie. Deux variables d'état sont définies

$x_1 = \omega$ (vitesse de rotation) et $x_2 = i$ (courant d'induit).

L'équation électrique du moteur s'écrit :

$$Rx_2 + L \frac{dx_2}{dt} - Kx_1 = u$$

L'équation mécanique associée est donnée par :

$$Kx_2 - f x_1 = J \frac{dx_1}{dt}$$

D'où les équations d'état suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= -\frac{f}{J} x_1 + \frac{K}{J} x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\frac{K}{L} x_1 - \frac{R}{L} x_2 + \frac{1}{L} u \end{aligned}$$

Ainsi, la représentation d'état du MCC s'écrit sous forme matricielle :

$$\dot{X} = AX + BU, Y = CX + DU$$

Avec :

$$A = \begin{pmatrix} -\frac{f}{J} & \frac{K}{J} \\ \frac{K}{L} & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}, B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{L} \end{pmatrix}, C = (1 \ 0), D = 0$$

Ce modèle permet de représenter le comportement dynamique du moteur à courant continu en fonction des paramètres électriques et mécaniques. Il constitue une base essentielle pour l'analyse du système et la conception des lois de commande associées [19].

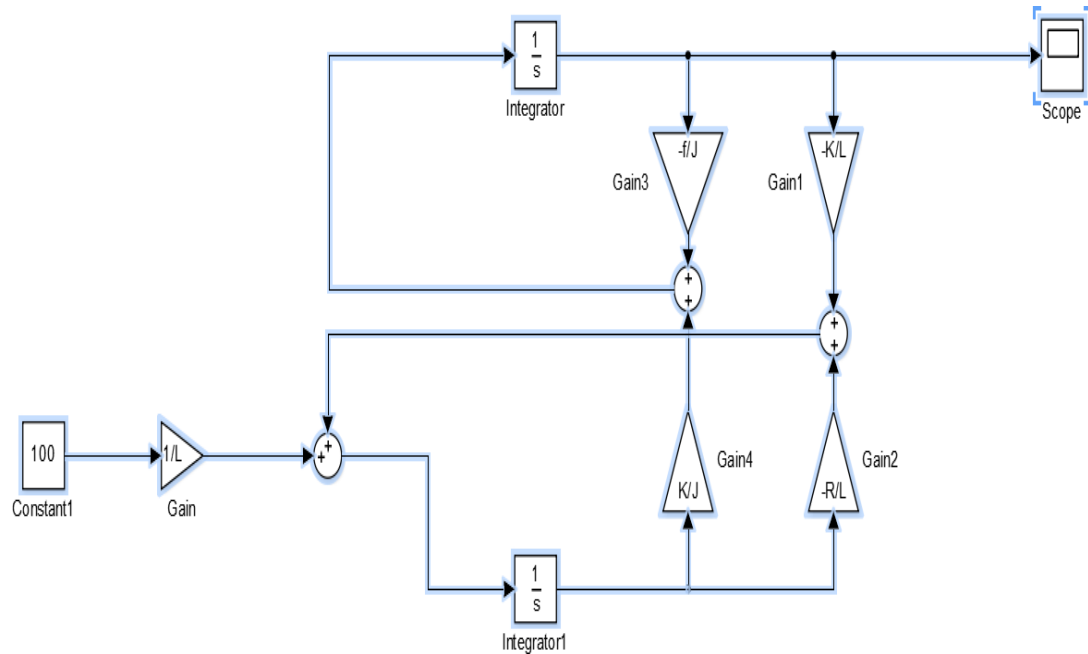


Figure II.13 : Schéma de simulation de la MCC

II.5.8. Passage du modèle d'état à la fonction de transfert :

À partir de la représentation d'état précédente, la fonction de transfert reliant la vitesse angulaire $\Omega(s)$ à la tension d'entrée $U(s)$ est obtenue par la relation :

$$G(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = C(sI - A)^{-1}B + D$$

Après développement mathématique, la fonction de transfert du moteur à courant continu est donnée par :

$$G(s) = \frac{K}{(JL)s^2 + (JR + fL)s + (Rf + K^2)}$$

Cette expression met en évidence un système du second ordre décrivant la dynamique du moteur en fonction des paramètres électriques (R , L) et mécaniques (J , f), ainsi que de la constante de couplage électromécanique K [19].

II.6. Point de fonctionnement :

Le point de fonctionnement P d'un moteur à courant continu est défini comme le point d'équilibre entre le couple utile fourni par le moteur et le couple résistant imposé par la charge. À ce point, les deux couples sont égaux, c'est-à-dire : $T_u = T_r$. Cette condition traduit l'état stationnaire du système, pour lequel la vitesse de rotation se stabilise. Le point de fonctionnement correspond ainsi à l'intersection entre la caractéristique mécanique du moteur et celle de la charge [18].

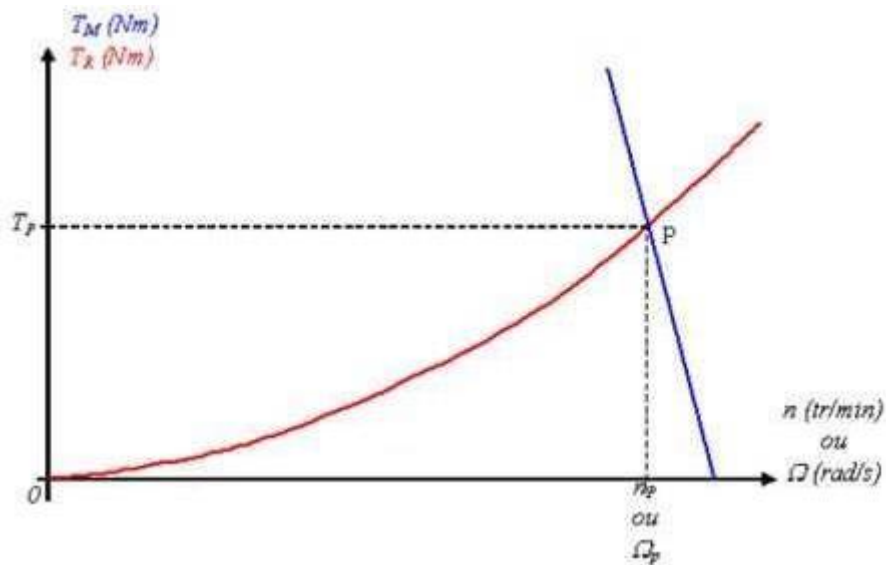


Figure 1.14 : Le point de fonctionnement d'un moteur à courant continu

II.7. Déplacement angulaire pour la direction :

Le déplacement angulaire du système de direction constitue un paramètre fondamental dans le contrôle de la trajectoire d'un véhicule autonome. Il correspond à la rotation de l'organe de direction permettant d'orienter les roues avant afin de modifier la trajectoire du mobile. Ce déplacement est généralement commandé par un actionneur (moteur à courant continu ou servomoteur), dont la position angulaire est ajustée en fonction des informations issues des capteurs. Ainsi, la variation de l'angle de braquage permet d'assurer la correction de direction et le maintien du véhicule sur la trajectoire souhaitée.

II.7.1. Pilotage du L298N :

Le circuit intégré L298N est un pont en H double permettant la commande de deux moteurs à courant continu de manière indépendante. Le pilotage de ce composant s'effectue à l'aide de signaux logiques fournis par une carte de commande (telle qu'un microcontrôleur Arduino), via des broches d'entrée (IN1, IN2, IN3, IN4) et des broches d'activation (ENA, ENB). Les signaux appliqués déterminent le sens de rotation des moteurs, tandis que les entrées

d'activation permettent la modulation de la vitesse par modulation de largeur d'impulsion (PWM). Ainsi, le L298N assure l'interface entre la logique de commande faible puissance et les moteurs nécessitant une alimentation de puissance plus élevée, garantissant un contrôle précis du mouvement du système[20].

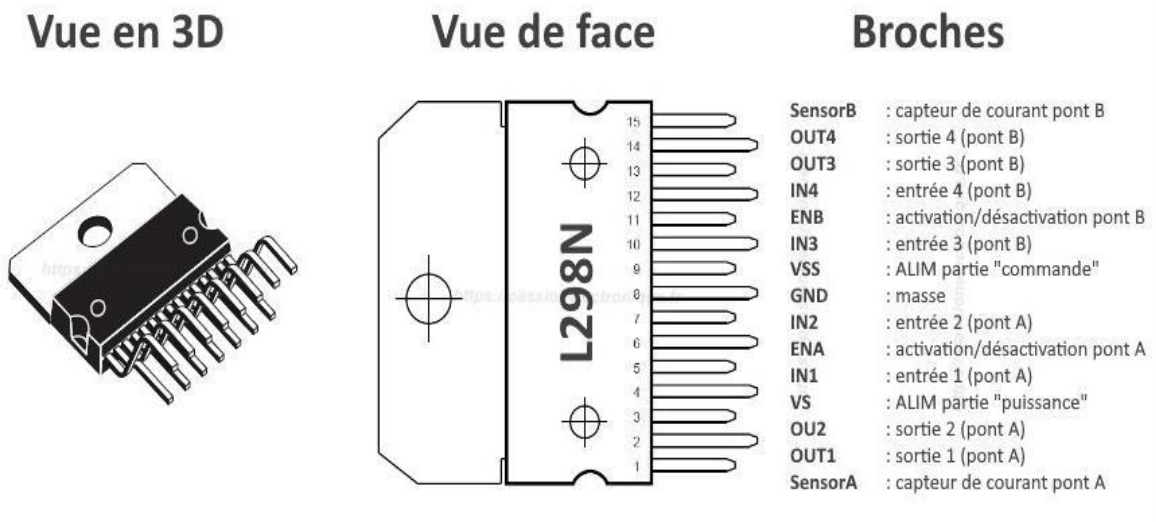


Figure II.15 : Driver L298N

- **OUT1 & OUT2** : sorties connectées au moteur A.
- **OUT3 & OUT4** : sorties connectées au moteur B.
- **VCC** : alimentation de puissance des moteurs (généralement supérieure à 7 V pour un fonctionnement optimal).
- **GND** : masse commune du système.
- **5V** : alimentation de la logique interne du circuit L298N.
- **ENA** : entrée de commande permettant le contrôle de la vitesse du moteur A par modulation PWM.
- **ENB** : entrée de commande permettant le contrôle de la vitesse du moteur B par modulation PWM.
- **IN1 & IN2** : entrées logiques déterminant le sens de rotation du moteur A.
- **IN3 & IN4** : entrées logiques déterminant le sens de rotation du moteur B.

II.7.1.1. Commande de sens de rotation (hacheur quatre quadrants) :

Le driver L298N, basé sur une structure de double pont en H, peut être assimilé à une commande approchée d'un hacheur 4 quadrants. En effet, il permet d'inverser la tension appliquée aux bornes du moteur et de contrôler le sens de circulation du courant, ce qui autorise la marche avant et la marche arrière du moteur à courant continu.

Toutefois, contrairement à un véritable hacheur 4 quadrants réalisé avec des interrupteurs commandés bidirectionnels et permettant la récupération d'énergie, le L298N ne permet pas le fonctionnement en régime générateur avec retour d'énergie vers la source. Il est donc limité à un fonctionnement équivalent à deux quadrants principaux (quadrants I et III), correspondant aux modes moteur en rotation directe et inverse.

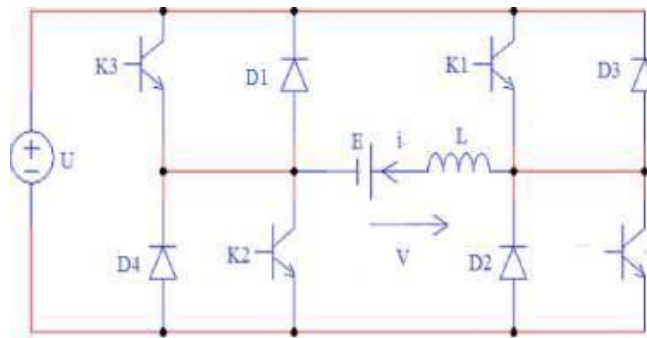


Figure II.16 : schéma électrique d'un hacheur quadrants

La commande du sens de rotation repose sur l'activation combinée des entrées logiques IN1 à IN4, qui permettent d'inverser la polarité appliquée aux bornes du moteur. Ce principe correspond à un fonctionnement en pont en H, assimilable à un hacheur bidirectionnel. Ainsi, le moteur peut fonctionner en marche avant ou en marche arrière selon les combinaisons logiques appliquées aux entrées [20].

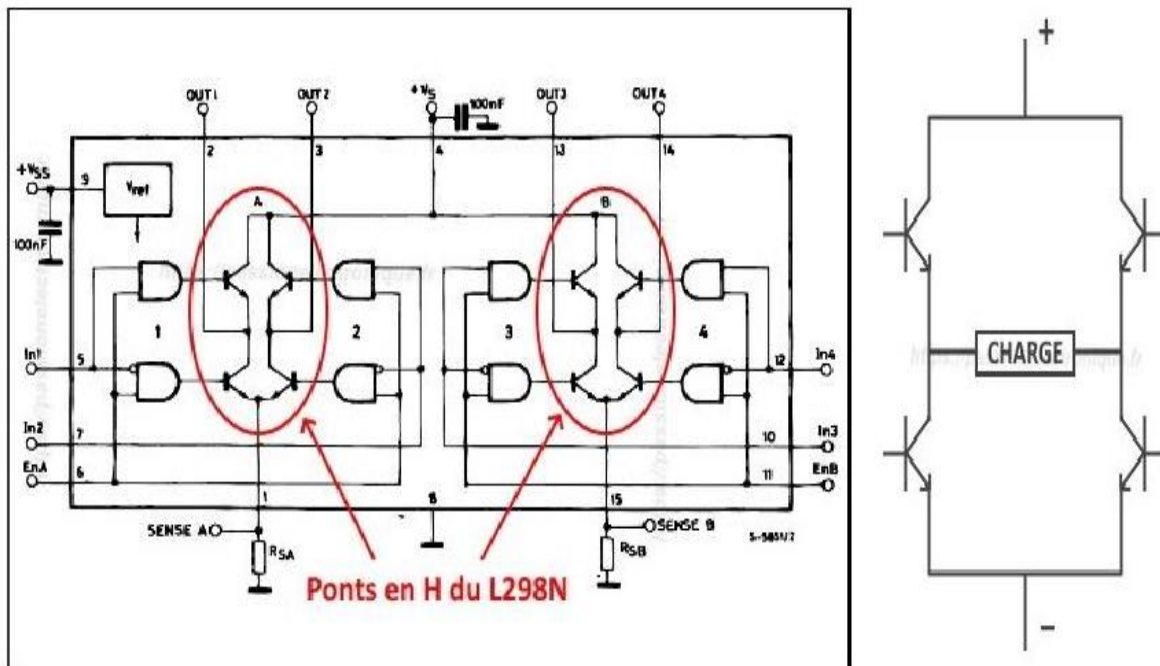


Figure II.17 : schéma électronique de L298N ponts en H

II.7.1.2. Commande MLI (PWM) :

La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion), ou PWM (Pulse Width Modulation), est une technique utilisée pour contrôler la vitesse des moteurs à courant continu via le driver L298N. Elle consiste à faire varier le rapport cyclique d'un signal carré appliqué aux broches d'activation ENA et ENB. En modifiant la durée de l'état haut du signal par rapport à sa période, on ajuste la tension moyenne appliquée au moteur, ce qui permet de contrôler sa vitesse de rotation.

Dans le cas du L298N, les entrées ENA et ENB jouent un rôle essentiel dans la régulation de vitesse des moteurs A et B. Lorsque ces broches reçoivent un signal PWM issu d'un microcontrôleur (par exemple une carte Arduino), le moteur reçoit une alimentation hachée dont la valeur moyenne dépend du rapport cyclique[20].

Ainsi :

- Un rapport cyclique faible entraîne une vitesse réduite du moteur ;
- Un rapport cyclique élevé entraîne une vitesse plus importante ;
- Un rapport cyclique de 100 % correspond à une vitesse maximale.

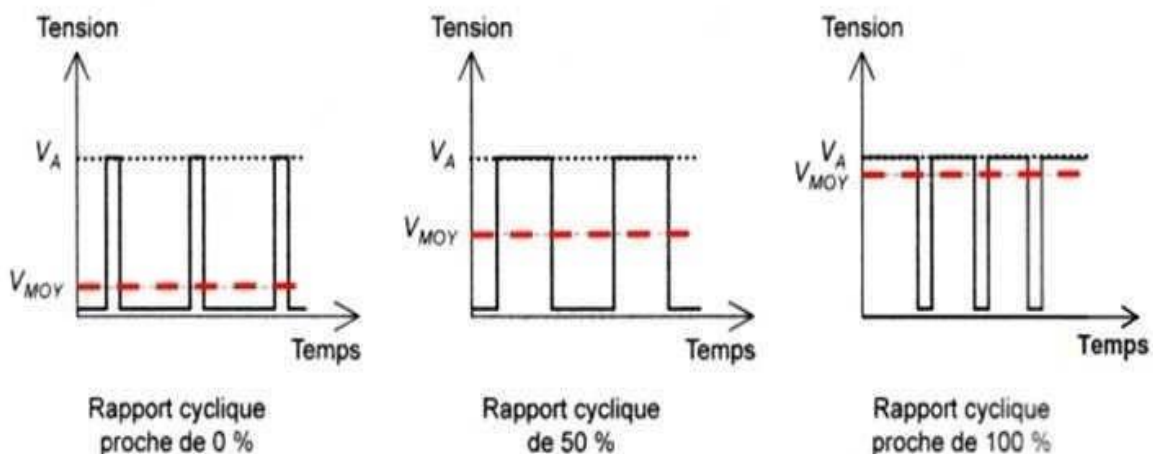


Figure II.18 : Forme de signal MLI avec différent rapport cyclique

Dans la programmation Arduino, la commande PWM est généralement définie par une valeur comprise entre 0 et 255. Cette plage correspond à la résolution du signal PWM :

- 0 correspond à une sortie nulle (0 % de rapport cyclique), donc moteur arrêté ;
- 255 correspond à une sortie maximale (100 % de rapport cyclique), donc fonctionnement à pleine puissance ;
- Les valeurs intermédiaires permettent un contrôle progressif de la vitesse.

Code Arduino :

```
analogWrite(ENA, 255); // vitesse maximale moteur A
analogWrite(ENA, 128); // vitesse moyenne (≈50%)
analogWrite(ENA, 0); // moteur arrêté
```

Cette technique permet un contrôle efficace de la vitesse tout en limitant les pertes énergétiques. Elle est largement utilisée dans les systèmes embarqués et les robots mobiles pour assurer un pilotage précis et dynamique des moteurs à courant continu[20].

II.8. Conclusion :

Ce chapitre a présenté l'étude électromécanique du moteur à courant continu (MCC) ainsi que sa modélisation en vue de son application au système de direction automatique du véhicule. L'approche retenue s'appuie sur une représentation simplifiée du moteur tout en conservant les grandeurs physiques essentielles à l'analyse du comportement dynamique. Les modèles électrique et mécanique établis permettent de décrire avec précision les échanges d'énergie au sein de la machine et son évolution en régime transitoire et permanent. Les équations fondamentales du MCC ont ainsi constitué la base de l'étude de son comportement. En conséquence, ce chapitre a fourni le cadre théorique nécessaire à la compréhension du fonctionnement du moteur à courant continu et à son intégration dans une loi de commande adaptée aux exigences du système embarqué.

CHAPITRE III :
Conception et
Réalisation

III.1. Introduction :

Un véhicule autonome d'évitement d'obstacles est un système mobile intelligent capable de se déplacer dans un environnement tout en détectant et en contournant automatiquement les obstacles. Contrairement aux véhicules suiveurs de ligne, qui suivent une trajectoire prédéfinie, ce type de système exploite des capteurs permettant l'analyse en temps réel de l'environnement et l'adaptation dynamique de la trajectoire.

Dans ce contexte, le système de guidage repose sur une architecture de commande intégrant un moteur à courant continu (DC) associé à un mécanisme pignon-crémaillère, assurant la fonction de direction. Ce dispositif permet la conversion du mouvement rotatif du moteur en déplacement mécanique précis, garantissant une orientation contrôlée du véhicule. Grâce à ce système, le véhicule ajuste sa trajectoire de manière automatique afin d'éviter les obstacles détectés.

Dans ce projet, un véhicule autonome a été conçu et réalisé, intégrant un système de détection d'obstacles et un mécanisme de direction basé sur un moteur DC piloté par une unité de commande électronique de type Arduino.

III.2. Schéma électrique du prototype :

Le système réalisé est composé de plusieurs blocs fonctionnels :

- Unité de traitement : Arduino Mega 2560
- Capteurs : deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 (gauche et droite)
- Actionneur de direction : moteur à courant continu commandant un système de direction réel à crémaillère
- Actionneur de propulsion : moteur à courant continu assurant le déplacement du véhicule
- Alimentation : batteries
- Circuit de commande : driver moteur L298N (pont en H)

Description du fonctionnement global :

1. Les deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 détectent en permanence les obstacles situés à droite et à gauche du véhicule.
2. Les distances mesurées sont transmises à l'Arduino Mega 2560.
3. Le microcontrôleur traite les données acquises et analyse l'environnement en temps réel.
4. Une décision de commande est générée en fonction de la position de l'obstacle (correction de trajectoire vers la gauche ou vers la droite, ou arrêt du véhicule si nécessaire).

5. Le driver L298N pilote les deux moteurs à courant continu selon les ordres de l'Arduino.
6. Le moteur de direction agit sur le système à crémaillère afin d'orienter les roues avant vers l'angle de braquage requis.
7. Le moteur de propulsion assure le déplacement du véhicule tout en adaptant sa trajectoire pour éviter les obstacles détectés.

Le schéma électrique présenté définit le branchement de l'ensemble des dispositifs électroniques retenus après l'étude et la conception du système de commande. Il illustre l'interconnexion entre les différents composants afin de garantir un contrôle efficace du déplacement et du guidage du véhicule. Conformément aux principes de conception des systèmes embarqués [21], l'architecture comprend cinq blocs principaux : la source d'alimentation, le microcontrôleur Arduino Mega 2560, le module driver L298N, les deux moteurs à courant continu dédiés respectivement à la propulsion et à la direction via un mécanisme de crémaillère, ainsi que les deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 utilisés pour la détection des obstacles.

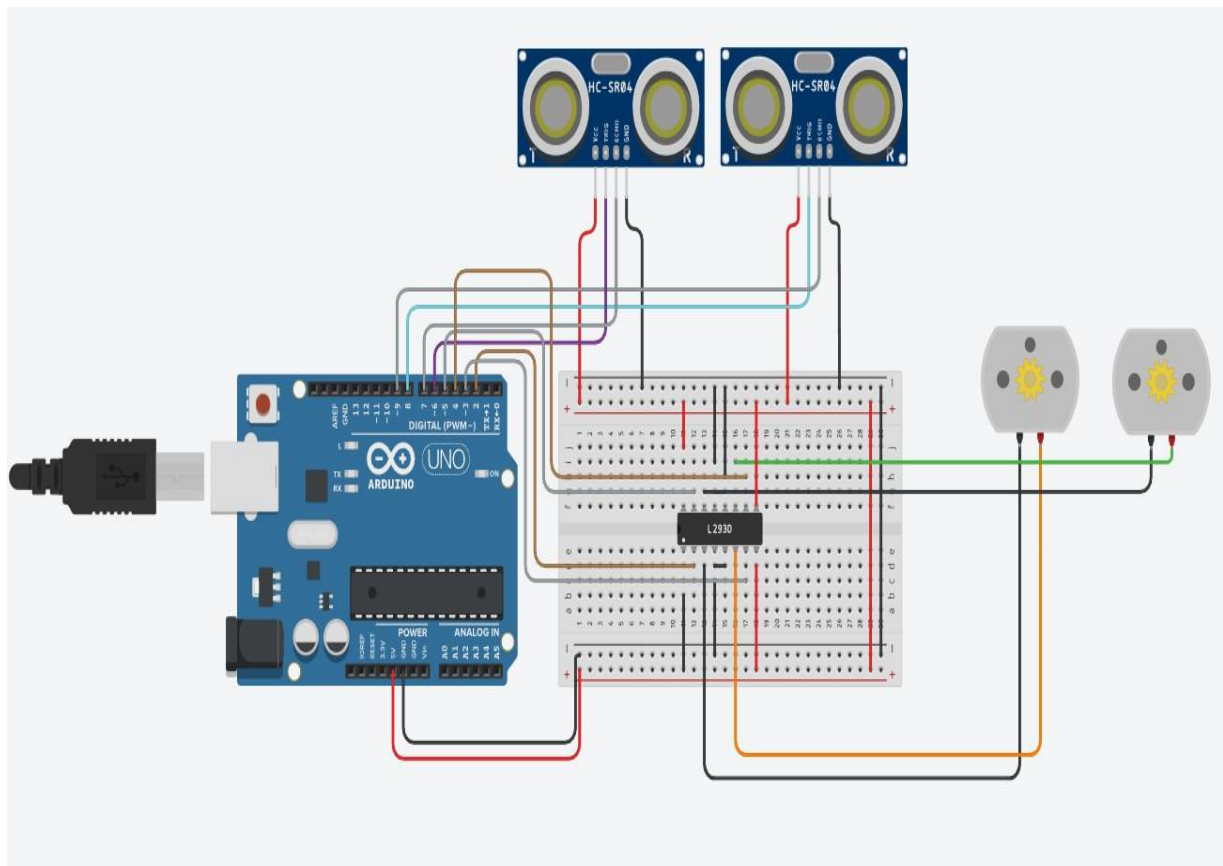


Figure III.1 : schéma électrique de la commande du véhicule autonome

Fonctionnement :

Moteur B (déplacement) : avance en permanence.

Capteur gauche détecte un obstacle à moins de 10 cm → le moteur A (guidage) tourne vers la droite pendant 5 s.

Capteur droit détecte un obstacle à moins de 10 cm → le moteur A tourne vers la gauche pendant 5 s.

Deux obstacles simultanément (< 10 cm à gauche et à droite) :

le moteur B marche en arrière ;

le moteur A tourne en même temps pendant 5 s pour changer de direction

III.3. Architecture générale des connexions :

Les connexions entre blocs :

- alimente directement le driver L298N (broche 5V et broche GND) d'Arduino Mega 2560
- alimente directement les des moteur DC avec le pilote (driver) L298N (broche OUT(1/2) pour le moteur de guidage et OUT(3/4)
- connercter les entrées du driver avec le microcontrôleur 'Arduino Mega 2560' pour la commande à la sense et le marche - arrêt du deux moteurs (IN1/IN2) pour Mcc (A) et (IN3/4) pour Mcc(B)
- L'Arduino génère les signaux logiques PWM sur ses broches numériques et les envoie vers le driver L298N pour commandé la vitesse du deux moteurs

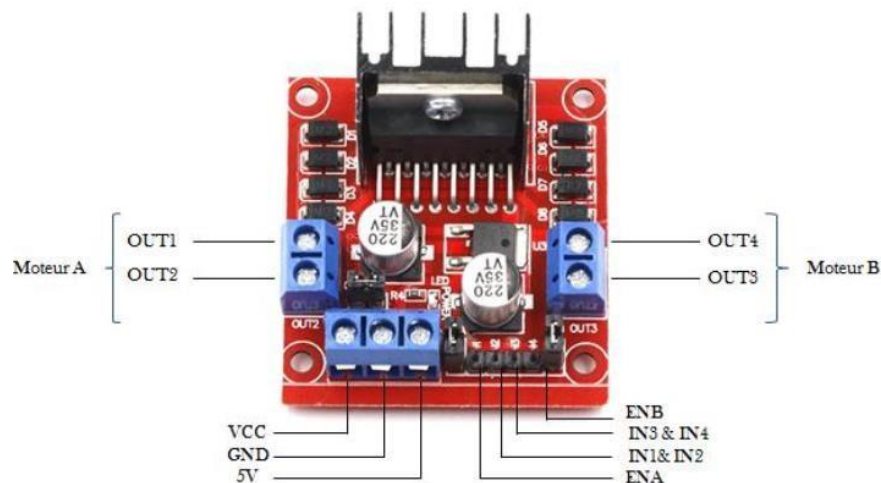


Figure III.2 : connexion de L298N driver

Les deux capteurs HC-SR04 sont connecté à la broche TRIG (sortie Arduino) et ECHO (entrée Arduino) pour la mesure de distance avec des fils de connexion (Jumper) : mâle-femelle

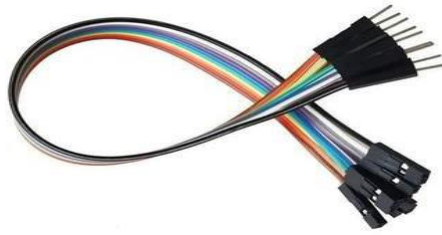


Figure III.3 : fils de connexion (Jumper) : mâle-femelle

- Alimenter l'Arduino avec une source rechargeable de 5V par la connexion du câble USB-Type B



Figure III.4 : câble USB-Type B

Détail des connexions :

- **Arduino → L298N :**

Broche Arduino	Broche L298N	Fonction
Pin 2	IN1	Sens direction (droite)
Pin 3	IN2	Sens direction (gauche)
Pin 4	IN3	Sens de rotation moteur DC (avant)
Pin 5	IN4	Sens de rotation moteur DC (arrière)
Pin 11	EN A	PWM moteur guidage
Pin 10	EN B	PWM moteur déplacement
GND	GND	Masse commune

Tableau III.1 : branchement et connexion Arduino / L298N

- **Connexion du capteur HC-SR04 :**

Capteur détecter l'obstacle droite :

Broche HC-SR04	Connexion	Description
VCC	5V Arduino	Alimentation du capteur
GND	GND Arduino	Masse
TRIG	Pin 8 Arduino	Impulsion de déclenchement (10 μ s)
ECHO	Pin 9 Arduino	Réception du signal de retour

Tableau III.2 : branchement et connexion Capteur HC-SR04 droite

Capteur détecter l'obstacle gauche :

Broche HC-SR04	Connexion	Description
VCC	5V Arduino	Alimentation du capteur
GND	GND Arduino	Masse
TRIG	Pin 6 Arduino	Impulsion de déclenchement (10 μ s)
ECHO	Pin 7 Arduino	Réception du signal de retour

Tableau III.3 : branchement et connexion Capteur HC-SR04 gauche

III.4. Choix des composants :

III.4.1. Composants requis :

Le choix des composants constitue une étape essentielle dans la conception d'un véhicule autonome d'évitement d'obstacles. Chaque élément a été sélectionné en fonction de critères techniques précis tels que la compatibilité avec le système de commande, la facilité d'intégration, la fiabilité, les performances, la consommation énergétique et le coût de réalisation. L'objectif est d'obtenir un prototype capable d'assurer une détection rapide des obstacles, une prise de décision efficace et une correction de trajectoire en temps réel tout en conservant une architecture simple et économique.

III.4.1. Carte Arduino Mega 2560 :

L'Arduino Mega représente l'unité de commande centrale du système. Basée sur le microcontrôleur ATmega2560, elle assure l'acquisition des informations provenant des capteurs ultrasoniques, leur traitement selon l'algorithme de navigation développé, puis la génération des signaux de commande destinés au pilote de moteurs L298N.

Justification du choix :

Le choix de l'Arduino Mega a été motivé par plusieurs avantages techniques. Tout d'abord, cette carte dispose de 54 entrées/sorties numériques et de 16 entrées analogiques, ce qui offre une grande flexibilité pour l'ajout futur de nouveaux capteurs ou actionneurs sans modification majeure de l'architecture matérielle. De plus, sa mémoire Flash de 256 Ko permet d'exécuter des programmes plus complexes que ceux généralement supportés par l'Arduino Uno.

L'Arduino Mega possède également une large communauté d'utilisateurs, une documentation abondante et une compatibilité avec la majorité des bibliothèques logicielles utilisées en robotique mobile. Ces caractéristiques réduisent considérablement le temps de développement et facilitent les opérations de maintenance et d'évolution du système.

Enfin, son coût relativement faible par rapport aux cartes de développement plus avancées constitue un avantage important pour la réalisation d'un prototype expérimental destiné à des travaux académiques ou de recherche.

III.4.2. Pilote de moteur L298N :

Le module L298N constitue l'interface de puissance entre l'Arduino et les moteurs à courant continu. Les sorties de l'Arduino ne pouvant fournir qu'un courant limité, il est nécessaire d'utiliser un circuit intermédiaire capable de délivrer l'énergie requise par les moteurs.

Justification du choix :

Le L298N intègre deux ponts en H indépendants permettant de commander simultanément deux moteurs à courant continu. Cette caractéristique répond parfaitement aux besoins du prototype, où un moteur est affecté à la propulsion du véhicule et un second au système de direction.

Le module permet également de contrôler le sens de rotation des moteurs en modifiant simplement l'état logique de ses entrées de commande. Cette fonctionnalité est indispensable pour réaliser les manœuvres de changement de direction et de marche arrière lors de la détection d'obstacles.

Par ailleurs, la présence des entrées Enable A et Enable B autorise l'utilisation de signaux PWM générés par l'Arduino afin de réguler la vitesse de rotation des moteurs. Cette possibilité offre une meilleure maîtrise des mouvements du véhicule et améliore la précision des manœuvres.

Le faible coût du module, sa robustesse et sa grande disponibilité sur le marché en font également une solution particulièrement adaptée aux applications de robotique mobile éducative et expérimentale.

III.4.3. Moteurs à courant continu

Les moteurs à courant continu constituent les principaux actionneurs du système. Ils convertissent l'énergie électrique fournie par la batterie en énergie mécanique permettant le déplacement et l'orientation du véhicule.

Dans le prototype développé :

- Le moteur B assure la propulsion du véhicule.
- Le moteur A agit sur le mécanisme pignon-crémaillère afin de modifier l'orientation des roues directrices.

Justification du choix :

Les moteurs à courant continu ont été retenus principalement pour leur simplicité de commande. Contrairement aux moteurs pas à pas ou aux servomoteurs industriels, ils ne nécessitent pas d'électronique de contrôle complexe et peuvent être pilotés directement par le module L298N.

Leur temps de réponse rapide permet au système de réagir efficacement lorsqu'un obstacle est détecté à faible distance. Cette caractéristique est particulièrement importante pour garantir la sécurité de déplacement du véhicule.

Les moteurs DC offrent également un rapport puissance/coût intéressant ainsi qu'une maintenance réduite. Leur disponibilité commerciale et leur facilité de remplacement constituent des avantages supplémentaires pour les phases de prototypage et d'expérimentation.

III.4.4. Capteurs ultrasoniques HC-SR04

La détection des obstacles est assurée par deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 positionnés à l'avant du véhicule. Chaque capteur fonctionne selon le principe de l'écholocation : une onde ultrasonique est émise puis réfléchiée par l'obstacle avant d'être reçue par le capteur. La distance est ensuite calculée à partir du temps de propagation de l'onde.

Justification du choix :

Le HC-SR04 présente une plage de mesure comprise approximativement entre 2 cm et 400 cm avec une précision suffisante pour les applications de navigation à courte distance. Cette plage couvre largement les besoins du prototype, dont la distance critique de détection est fixée à environ 10 cm.

L'utilisation de deux capteurs permet d'obtenir des informations distinctes sur les côtés gauche et droit du véhicule. Cette configuration améliore considérablement la capacité de décision du système en lui permettant de déterminer de quel côté se situe l'obstacle et d'adapter sa trajectoire en conséquence.

Comparés à des technologies plus avancées comme les lidars ou les caméras intelligentes, les capteurs ultrasoniques présentent un coût beaucoup plus faible tout en offrant des performances suffisantes pour un système d'évitement d'obstacles à petite échelle. Leur faible consommation électrique contribue également à préserver l'autonomie énergétique du véhicule.

III.4.5. Châssis du véhicule :

Le châssis représente la structure mécanique sur laquelle sont montés l'ensemble des composants électroniques et mécaniques du prototype.

Justification du choix :

Le châssis doit garantir la stabilité du véhicule pendant son déplacement et assurer un positionnement correct des capteurs afin d'obtenir des mesures fiables. Une structure légère réduit l'effort mécanique demandé aux moteurs et limite la consommation énergétique globale du système.

La rigidité du châssis contribue également à diminuer les vibrations susceptibles d'affecter les performances des capteurs ultrasoniques et la précision des manœuvres de direction.

Enfin, sa conception modulaire facilite les opérations d'assemblage, de maintenance et d'évolution du prototype.

III.4.6. Fils de connexion

Les fils de connexion assurent toutes les liaisons électriques du système entre la carte Arduino, les capteurs, le pilote L298N, les moteurs et la batterie.

Justification du choix :

L'utilisation de câbles de type Dupont permet un montage rapide sans opérations de soudure complexes. Cette caractéristique est particulièrement avantageuse lors des phases de test et de validation du prototype.

Ces conducteurs présentent une résistance électrique faible pour les signaux de commande et offrent une bonne fiabilité des connexions lorsqu'ils sont correctement installés. Leur coût

réduit et leur réutilisabilité en font également une solution économique pour les projets expérimentaux.

III.4.7. Batterie d'alimentation

La batterie constitue la source d'énergie du véhicule autonome(5V). Elle fournit l'énergie nécessaire à l'alimentation simultanée des moteurs, du pilote de puissance, des capteurs et de la carte Arduino.

Justification du choix :

L'utilisation d'une batterie rechargeable permet au véhicule de fonctionner de manière totalement autonome sans alimentation externe. Cette autonomie est indispensable pour reproduire les conditions réelles de déplacement d'un système mobile.

La tension nominale choisie doit être compatible avec les caractéristiques électriques des moteurs et du module L298N tout en garantissant une alimentation stable de l'Arduino. Une capacité suffisante est également nécessaire pour éviter les chutes de tension lors des démarrages moteurs, généralement responsables des perturbations électroniques dans les systèmes embarqués.

Le choix d'une batterie rechargeable présente enfin un avantage économique et environnemental grâce à sa longue durée d'utilisation.

III.5. Montage et tests individuels

Le montage du prototype constitue une étape cruciale permettant de valider l'intégration physique et fonctionnelle de l'ensemble des sous-systèmes avant les essais globaux. Il s'agit d'assurer une interconnexion correcte entre la carte de commande, les capteurs, les actionneurs et le système d'alimentation, tout en vérifiant l'absence d'erreurs de câblage ou d'incompatibilités électriques.

Dans un premier temps, les composants sont assemblés de manière modulaire sur une platine de prototypage. La carte Arduino Uno est placée au centre du système afin de faciliter les connexions avec les différents modules.

Les capteurs ultrasoniques HC-SR04 sont positionnés à l'avant du châssis pour garantir une détection optimale des obstacles dans la zone de déplacement. Le module de commande de moteurs L298N est relié aux moteurs à courant continu et assure l'adaptation des signaux logiques en puissance suffisante pour l'entraînement des actionneurs.

Une attention particulière est portée au câblage des broches de commande (IN1, IN2, IN3, IN4), afin de garantir un contrôle indépendant des deux moteurs. L'alimentation est testée séparément pour vérifier la stabilité de la tension fournie et éviter toute chute de tension susceptible d'affecter les performances du système.

Après le montage, des tests individuels sont réalisés sur chaque composant :

- **Test des moteurs DC** : chaque moteur est activé séparément pour vérifier le sens de rotation (avant/arrière) ainsi que la réponse aux signaux de commande.
- **Test du module L298N** : validation de la commande des ponts en H et vérification du basculement des directions des moteurs.
- **Test des capteurs ultrasoniques** : mesure des distances en temps réel afin de confirmer la précision et la stabilité des lectures.
- **Test de la carte Arduino** : exécution de programmes simples (type “blink” et lecture série) pour s’assurer du bon fonctionnement des entrées/sorties.

Ces essais unitaires permettent d’identifier et de corriger les éventuels dysfonctionnements avant l’intégration complète du système. Une fois tous les composants validés individuellement, le prototype est prêt pour les tests d’intégration et les essais en conditions réelles de navigation autonome.

III.6. Programmation Arduino :

Une carte d’acquisition basée sur un microcontrôleur nécessite impérativement une interface de programmation dédiée. Dans ce cadre, la plateforme utilisée repose sur un environnement logiciel associé permettant le développement, la compilation et le transfert des programmes vers la carte.

L’environnement de développement Arduino, de nature open-source, est disponible gratuitement et compatible avec les principaux systèmes d’exploitation (Windows, macOS et Linux), ce qui garantit une grande flexibilité d’utilisation et une accessibilité étendue pour le développement des applications embarquées.

III.6.1 IDE Arduino:

Le logiciel Arduino IDE est un environnement de développement intégré conçu pour faciliter la programmation des cartes Arduino. Développé afin de rendre la programmation plus visuelle, simple et complète, cet environnement offre une interface graphique contenant un éditeur de texte ainsi que l’ensemble des outils nécessaires au développement d’applications embarquées. Il permet notamment d’écrire, d’enregistrer, de compiler, de vérifier et de téléverser les programmes vers la carte Arduino [22].

L’interface de l’IDE Arduino est simple et ergonomique. Elle propose une interface minimale et épurée destinée au développement des programmes pour les cartes Arduino. Le logiciel intègre un éditeur de code avec coloration syntaxique ainsi qu’une barre d’outils permettant un accès rapide aux principales fonctions de programmation. Une barre de menus donne également accès aux fonctionnalités avancées de l’environnement de développement.

Enfin, une console d'exécution permet d'afficher les résultats de la compilation du code source, les informations relative au téléversement du programme ainsi que les éventuels messages d'erreur ou de diagnostic.

III.6.1.1. Interface du logiciel :

a- Parties principales du logiciel :

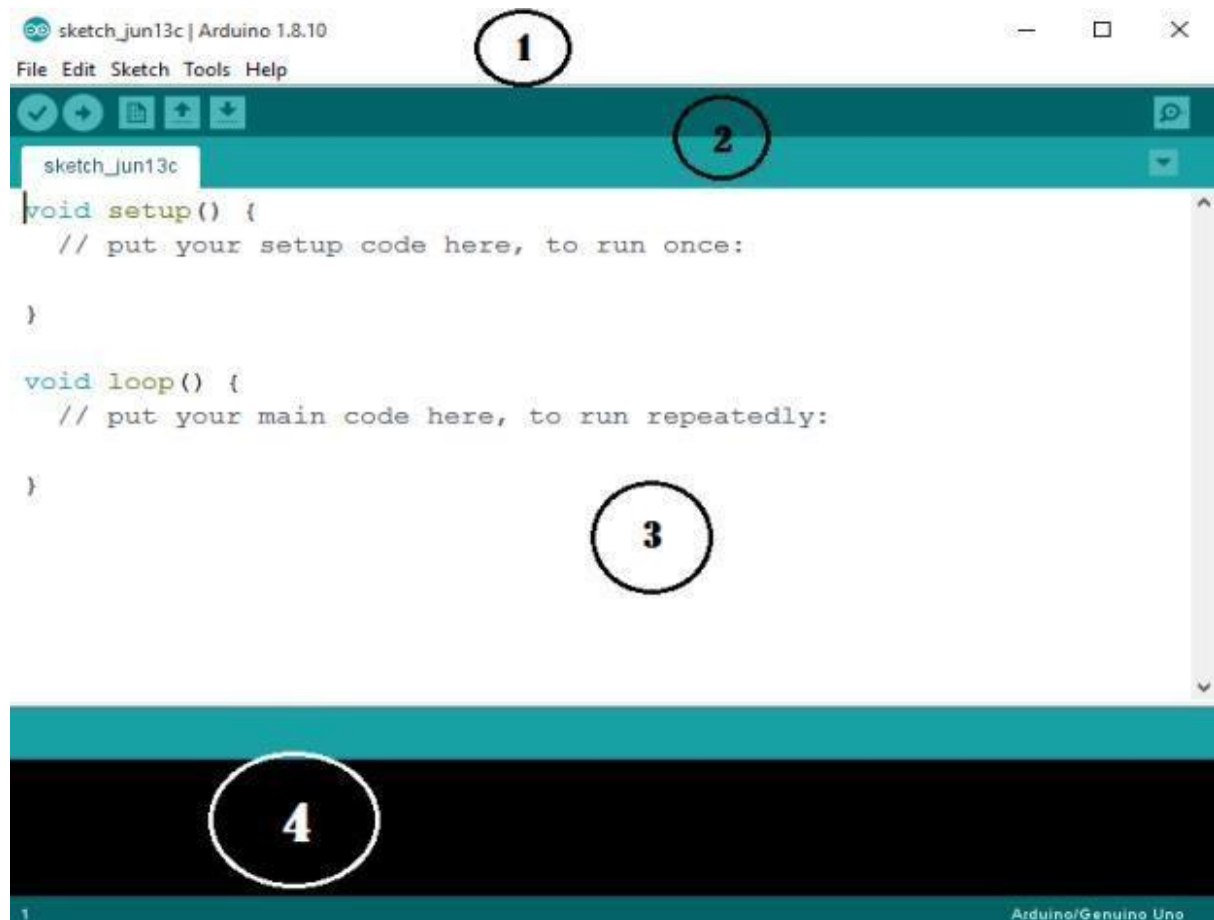


Figure III.5 : L'interface graphique de l'environnement de développement Arduino IDE

- Le cadre 1 regroupe les paramètres de configuration et les fonctionnalités avancées de l'IDE Arduino.
- Le cadre 2 intègre les commandes principales de compilation, de vérification et de téléversement du programme vers la carte Arduino.
- Le cadre 3 constitue l'éditeur de code dédié au développement et à la modification des applications embarquées : (void setup () pour la déclaration des IN et OUT, Void loop() pour les boucle)
- Le cadre 4 correspond à la console de débogage affichant les messages de compilation, les erreurs syntaxiques et les informations de diagnostic du système.

b-Boutons :

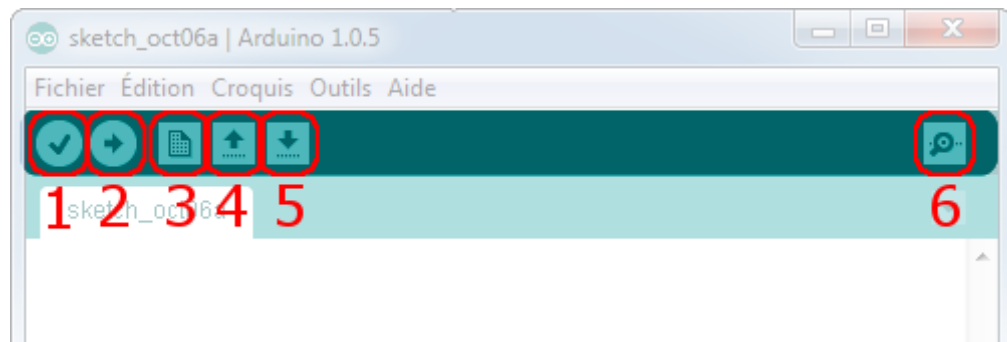


Figure III.6 : Barre de boutons Arduino

- Bouton 1 : Lance la vérification du programme via un module d'analyse syntaxique permettant la détection des erreurs de compilation [23].
- Bouton 2 : Compile et téléverse le programme vers la carte Arduino.
- Bouton 3 : Crée un nouveau fichier de programme.
- Bouton 4 : Ouvre un fichier de programme existant.
- Bouton 5 : Enregistre le fichier courant sur le support de stockage.
- Bouton 6 : Ouvre le moniteur série permettant la communication et l'affichage des données échangées avec la carte microcontrôleur.

III.6.1.2. Les étapes de téléchargement du programme :

Une procédure séquentielle doit être respectée afin de téléverser un programme vers la carte Arduino via l'interface USB.

1. Développement ou ouverture du programme via l'Arduino IDE.
2. Compilation du code afin de vérifier la syntaxe et détecter les erreurs éventuelles.
3. Correction du programme en cas d'anomalies détectées lors de la compilation.
4. Téléversement du code vers la carte microcontrôleur via le port USB.
5. Réalisation du montage électronique associé au système embarqué.
6. Exécution automatique du programme après initialisation de la carte.
7. Alimentation de la carte soit par USB, soit par une source externe
8. . Validation fonctionnelle du système par vérification du bon fonctionnement du montage.



Figure III.7 : Les étapes de téléchargement du code

III.6.3. implémentation du Programme Arduino :

Le système d'évitement d'obstacles repose sur un algorithme de décision déterministe, basé sur l'analyse comparative des distances mesurées par les capteurs, garantissant ainsi une trajectoire non aléatoire et sécurisée. »

Le microcontrôleur analyse en temps réel les distances mesurées par deux capteurs ultrasoniques et applique une loi de décision déterministe afin d'adapter l'angle de braquage du véhicule.

Code :

```
// =====  
// Capteurs ultrason  
// =====  
#define TRIG_G 6  
#define ECHO_G 7
```

```

#define TRIG_D 8
#define ECHO_D 9
// =====
// Moteur A : Guidage (L298N)
// =====
#define A_IN1 2
#define A_IN2 3
#define A_EN 11 // PWM
// =====
// Moteur B : Déplacement (L298N)
// =====
#define B_IN1 4
#define B_IN2 5
#define B_EN 10 // PWM
// =====
// Paramètres
// =====
const int DISTANCE_SECURITE = 10; // cm
const int PWM_GUIDAGE = 160; // puissance moteur A
const int PWM_MARCHE = 180; // puissance moteur B
// -----
// Mesure distance
// -----
int mesurerDistance(int trigPin, int echoPin)
{
    digitalWrite(trigPin, LOW);
    delayMicroseconds(2);

    digitalWrite(trigPin, HIGH);
    delayMicroseconds(10);

    digitalWrite(trigPin, LOW);

```

```

long duree = pulseIn(echoPin, HIGH, 30000);

if (duree == 0)
    return 400;

return duree * 0.034 / 2;
}
// =====
// MOTEUR B : Déplacement (PWM)
// =====

void avancer()
{
    analogWrite(B_EN, PWM_MARCHE);
    digitalWrite(B_IN1, HIGH);
    digitalWrite(B_IN2, LOW);
}

void reculer()
{
    analogWrite(B_EN, PWM_MARCHE);
    digitalWrite(B_IN1, LOW);
    digitalWrite(B_IN2, HIGH);
}

void stopDeplacement()
{
    analogWrite(B_EN, 0);
    digitalWrite(B_IN1, LOW);
    digitalWrite(B_IN2, LOW);
}

// =====

```

```

// MOTEUR A : Guidage (PWM)

// =====

void tournerGauche()
{
    analogWrite(A_EN, PWM_GUIDAGE);
    digitalWrite(A_IN1, HIGH);
    digitalWrite(A_IN2, LOW);
}

void tournerDroite()
{
    analogWrite(A_EN, PWM_GUIDAGE);
    digitalWrite(A_IN1, LOW);
    digitalWrite(A_IN2, HIGH);
}

void stopGuidage()
{
    analogWrite(A_EN, 0);
    digitalWrite(A_IN1, LOW);
    digitalWrite(A_IN2, LOW);
}

// =====

// SETUP

// =====

void setup()
{
    pinMode(TRIG_G, OUTPUT);
    pinMode(ECHO_G, INPUT);

    pinMode(TRIG_D, OUTPUT);
    pinMode(ECHO_D, INPUT);
}

```

```

pinMode(A_IN1, OUTPUT);
pinMode(A_IN2, OUTPUT);
pinMode(A_EN, OUTPUT);

pinMode(B_IN1, OUTPUT);
pinMode(B_IN2, OUTPUT);
pinMode(B_EN, OUTPUT);

Serial.begin(9600);
}
// =====
// LOOP
// =====
void loop()
{
    int distanceG = mesurerDistance(TRIG_G, ECHO_G);
    int distanceD = mesurerDistance(TRIG_D, ECHO_D);

    Serial.print("Gauche = ");
    Serial.print(distanceG);
    Serial.print(" cm | Droite = ");
    Serial.println(distanceD);
    // =====
    // Cas 1 : Deux obstacles
    // =====
    if (distanceG < DISTANCE_SECURITE && distanceD < DISTANCE_SECURITE)
    {
        reculer();
        tournerGauche();
        delay(5000);
        stopDeplacement();
        stopGuidage();
    }
}

```

```

// =====
// Cas 2 : obstacle gauche
// =====
else if (distanceG < DISTANCE_SECURITE)
{
    avancer();
    tournerDroite();

    delay(5000);

    stopDeplacement();
    stopGuidage();
}
// =====
// Cas 3 : obstacle droite
// =====
else if (distanceD < DISTANCE_SECURITE)
{
    avancer();
    tournerGauche();
    delay(5000);
    stopDeplacement();
    stopGuidage();
}
// =====
// Cas 4 : aucun obstacle
// =====
else
{
    avancer();
    stopGuidage();
}
}

```

À partir de votre programme complet, les trois fonctions principales peuvent être extraites et expliquées comme suit :

III.6.3.1. Détection obstacle :

La détection d'obstacle constitue l'étape initiale et déterminante du fonctionnement du système de guidage autonome. Elle repose sur l'utilisation de deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 placés respectivement sur les côtés gauche et droit du véhicule. Ces capteurs émettent des ondes ultrasoniques et mesurent le temps de retour de l'écho après réflexion sur un obstacle. À partir de cette durée, le système calcule la distance entre le véhicule et l'objet détecté dans l'environnement.

Cette phase assure l'acquisition en temps réel des informations relatives à la présence d'obstacles situés sur la trajectoire du véhicule. Lorsque la distance mesurée devient inférieure au seuil défini dans le programme, une condition de sécurité est immédiatement déclenchée, permettant de basculer vers une stratégie de correction de trajectoire. Ainsi, la détection ultrasonique joue un rôle fondamental dans la réactivité globale du système, en transformant une donnée physique continue en une information exploitable par l'algorithme embarqué.

D'un point de vue fonctionnel, cette étape permet d'anticiper le risque de collision avant le contact physique. Elle garantit donc une prise de décision rapide, fiable et adaptée aux contraintes d'un environnement dynamique où les obstacles peuvent apparaître de manière aléatoire. La qualité de cette détection dépend toutefois de plusieurs paramètres, notamment l'alignement du capteur, les caractéristiques de l'objet détecté, la stabilité de l'alimentation et le filtrage éventuel du signal mesuré.

La détection des obstacles est réalisée grâce aux deux capteurs ultrasoniques HC-SR04 placés sur les côtés gauche et droit du véhicule. La fonction `mesurerDistance()` calcule la distance séparant chaque capteur d'un obstacle en utilisant le temps de propagation de l'onde ultrasonique.

Code :

```
int distanceG = mesurerDistance(TRIG_G, ECHO_G);  
int distanceD = mesurerDistance(TRIG_D, ECHO_D);
```

Les distances obtenues sont ensuite comparées à une distance de sécurité fixée à :

```
const int DISTANCE_SECURITE = 10;
```

Si une distance mesurée est inférieure à ce seuil, le système considère qu'un obstacle est présent dans la direction correspondante.

III.6.3.2. Correction de direction :

La correction de direction constitue la phase de commande corrective du système, activée dès la confirmation de la présence d'un obstacle par les capteurs ultrasoniques. Lorsque la distance mesurée devient inférieure au seuil critique défini, la carte Arduino génère les signaux de commande nécessaires afin d'orienter le moteur de guidage dans le sens approprié pour éviter la collision. Cette action se traduit mécaniquement par un ajustement de l'angle de braquage des roues avant à travers le mécanisme de direction.

Le principe de correction repose sur une logique décisionnelle simple, basée sur la comparaison entre les distances mesurées et une valeur seuil prédéfinie. En fonction de la position de l'obstacle (gauche ou droite), le système commande une rotation dans la direction opposée afin de modifier la trajectoire du véhicule et assurer son contournement. Cette stratégie permet une adaptation rapide et continue du comportement du véhicule aux conditions de l'environnement.

Sur le plan électromécanique, le moteur de guidage assure la conversion des signaux électriques en mouvement angulaire contrôlé, garantissant une réponse précise et réactive du système de direction. Cette fonction est essentielle pour obtenir une trajectoire stable, fluide et adaptée aux variations de l'environnement. Ainsi, la correction de direction ne constitue pas uniquement une action mécanique, mais s'inscrit dans une chaîne complète de traitement allant de la perception de l'obstacle jusqu'à l'exécution de la commande de braquage.

La correction de direction est assurée par le moteur A, dédié au guidage du véhicule. Lorsque l'un des capteurs détecte un obstacle, le programme commande une rotation du moteur dans la direction opposée afin d'éviter la collision.

Code :

Obstacle détecté à gauche :

```
else if (distanceG < DISTANCE_SECURITE)
{
    avancer();
    tournerDroite();
    delay(5000);
    stopGuidage();
}
```

Obstacle détecté à droite :

```
else if (distanceD < DISTANCE_SECURITE)
{
    avancer();

    tournerGauche();

    delay(5000);

    stopGuidage();
}
```

Les fonctions utilisées sont :

```
void tournerGauche()
{
    digitalWrite(A_IN1, HIGH);
    digitalWrite(A_IN2, LOW);
}

void tournerDroite()
{
    digitalWrite(A_IN1, LOW);
    digitalWrite(A_IN2, HIGH);
}
```

Cette stratégie permet au véhicule de modifier sa trajectoire afin de contourner les obstacles détectés.

III.6.3.3. Mouvement autonome :

Le mouvement autonome correspond à l'enchaînement global des phases de fonctionnement du prototype, depuis la détection de l'environnement jusqu'à l'exécution de la commande de déplacement. Dans ce mode, le véhicule évolue sans intervention humaine directe, en s'appuyant exclusivement sur les capteurs embarqués, la logique de décision programmée et les actionneurs de propulsion et de direction.

Le système assure d'abord un déplacement en ligne droite lorsque la trajectoire est dégagée. En présence d'un obstacle, il active automatiquement le mécanisme de correction, puis reprend son mouvement selon une nouvelle orientation. Ce comportement séquentiel

permet au véhicule d'adapter sa trajectoire en temps réel et de maintenir un fonctionnement continu dans un environnement potentiellement imprévisible.

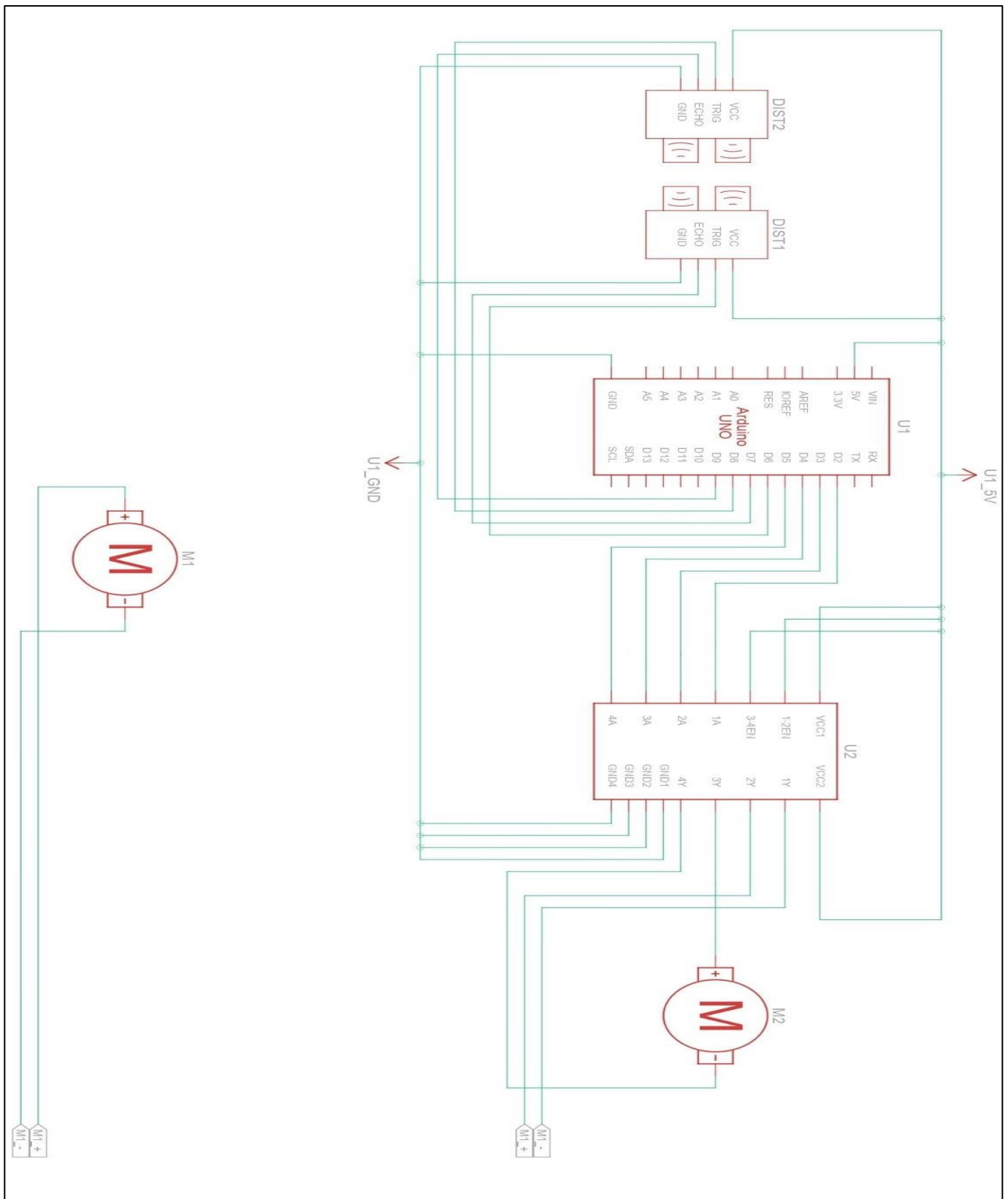


Figure III.8 : schéma électrique de projet réalisé

Le mouvement autonome est implémenté dans la fonction principale `loop()`, qui exécute continuellement les opérations de perception et de commande. Le comportement du véhicule dépend directement des informations fournies par les capteurs.

Le mouvement autonome repose donc sur une coordination rigoureuse entre acquisition, traitement et action. La fiabilité de cette coordination dépend de la rapidité d'exécution du programme, de la qualité des mesures capteurs et de la précision du système d'actionnement. Dans ce cadre, le prototype développé illustre de manière concrète le principe d'un guidage intelligent embarqué, capable d'assurer un déplacement autonome avec évitement d'obstacles.

Code :

```
else
{
    avancer();
    stopGuidage();
}
```

Lorsque les deux capteurs détectent un obstacle, le passage est considéré comme bloqué. Le véhicule effectue alors une marche arrière suivie d'une modification de son orientation afin de rechercher une nouvelle trajectoire libre.

Ainsi, le mouvement autonome repose sur une boucle continue de détection puis décision ensuite action, permettant au véhicule d'adapter son comportement en temps réel aux conditions de son environnement.

III.7. Conclusion :

Ce chapitre a décrit la mise en œuvre concrète du prototype, depuis le schéma électrique jusqu'à l'assemblage mécanique et la programmation embarquée. L'intégration du capteur HC-SR04, du driver L298N, de la carte Arduino et du moteur de direction a permis de matérialiser la chaîne de commande complète du système. Les essais unitaires puis l'intégration globale ont montré l'importance de la qualité des interconnexions, de la stabilité d'alimentation et du paramétrage logiciel pour garantir une exploitation fiable. Cette étape a donc validé la faisabilité expérimentale de la solution proposée et démontré la pertinence de l'architecture retenue.

Chapitre 4 :

Résultats

Expérimentaux

IV.1. Introduction :

Dans ce quatrième chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux obtenus à partir du prototype réalisé afin d'évaluer les performances réelles du système de véhicule autonome. L'objectif principal est de vérifier la validité de l'architecture proposée ainsi que la capacité des capteurs ultrasoniques, des moteurs à courant continu et de la commande embarquée à assurer un déplacement fiable et un évitement efficace des obstacles.

Cette phase expérimentale constitue une étape essentielle de validation du projet, permettant de confronter les résultats théoriques aux comportements observés sur le prototype physique. Les essais réalisés portent notamment sur le fonctionnement des moteurs de déplacement et de direction, la détection des obstacles, ainsi que la réaction du système dans différents scénarios de navigation.

L'analyse des résultats expérimentaux permet d'identifier les performances atteintes, les limites du système ainsi que les principales sources d'erreurs. Ce chapitre met ainsi en évidence l'efficacité globale de la solution développée et propose des pistes d'amélioration.

IV.2. Tests des moteurs à courant continu :

Cette partie présente les essais expérimentaux réalisés sur les moteurs à courant continu afin d'évaluer leur comportement dans le système de déplacement et de direction. Les tests ont permis d'observer la réponse des moteurs aux signaux de commande issus de la carte Arduino via le driver L298N, ainsi que leur capacité à assurer les mouvements de translation et de braquage.

Les résultats montrent que les moteurs assurent un fonctionnement globalement satisfaisant pour l'application visée. Toutefois, certaines variations peuvent être observées en raison des frottements mécaniques, des jeux dans la transmission et des fluctuations de l'alimentation électrique.

IV.3. Tests d'évitement d'obstacles :

Les essais d'évitement d'obstacles ont permis de valider la chaîne de détection et de décision du système. Le capteur ultrasonique HC-SR04 mesure la distance entre le véhicule et l'obstacle, puis la carte Arduino traite les informations et génère les ordres de commande adaptés pour modifier la trajectoire.

Ces tests ont confirmé la capacité du prototype à détecter les obstacles en temps réel et à réagir automatiquement en modifiant la direction ou le sens de déplacement. Les résultats expérimentaux montrent la pertinence de l'architecture retenue pour des environnements simples et dynamiques.

IV.4. Scénarios de conduite autonome :

Afin d'évaluer le système dans des conditions proches d'une utilisation réelle, plusieurs scénarios de conduite autonome ont été réalisés, incluant le déplacement en ligne droite, la détection d'obstacles, la correction de trajectoire et la reprise du mouvement.

Les résultats montrent que le prototype est capable d'enchaîner correctement les différentes étapes de fonctionnement sans intervention extérieure. Cette autonomie met en évidence la bonne coordination entre les capteurs, l'unité de traitement et les actionneurs.



Figure IV.1 : projet réalisé (véhicule autonome éviter les obstacle)

- **Moteur de déplacement :**

Cas 1 : aucune obstacle :

Lorsque les distances mesurées par les capteurs gauche et droit sont supérieures à la distance de sécurité ($D_{sec} = 10 \text{ cm}$), aucun obstacle n'est détecté. Le moteur de déplacement est alors commandé en marche avant afin d'assurer le déplacement normal du véhicule.

Condition logique :

$$D_G > D_{sec} \text{ et } D_D > D_{sec}$$



Figure IV.2 : mouvement avant de véhicule « essais d'absence d'obstacle »

Cas 2 : obstacle droite et gauche :

Lorsqu'un obstacle est détecté uniquement du côté gauche, le véhicule continue son déplacement vers l'avant tout en modifiant sa direction afin d'éviter l'obstacle.

Condition logique :

$$D_G < D_{\text{sec}} \text{ et } D_D > D_{\text{sec}}$$



Figure IV.3 : mouvement arrière de véhicule « obstacle droite et gauche »

- Moteur de guidage :

Cas 1 : aucune obstacle :

Lorsque les distances mesurées par les capteurs gauche et droit sont supérieures à la distance de sécurité ($D_{\text{sec}} = 10 \text{ cm}$), aucune correction de trajectoire n'est nécessaire. Le moteur de guidage reste alors à l'arrêt et les roues conservent leur position de déplacement rectiligne.

Condition logique :

$$D_G > D_{\text{sec}} \text{ et } D_D > D_{\text{sec}}$$

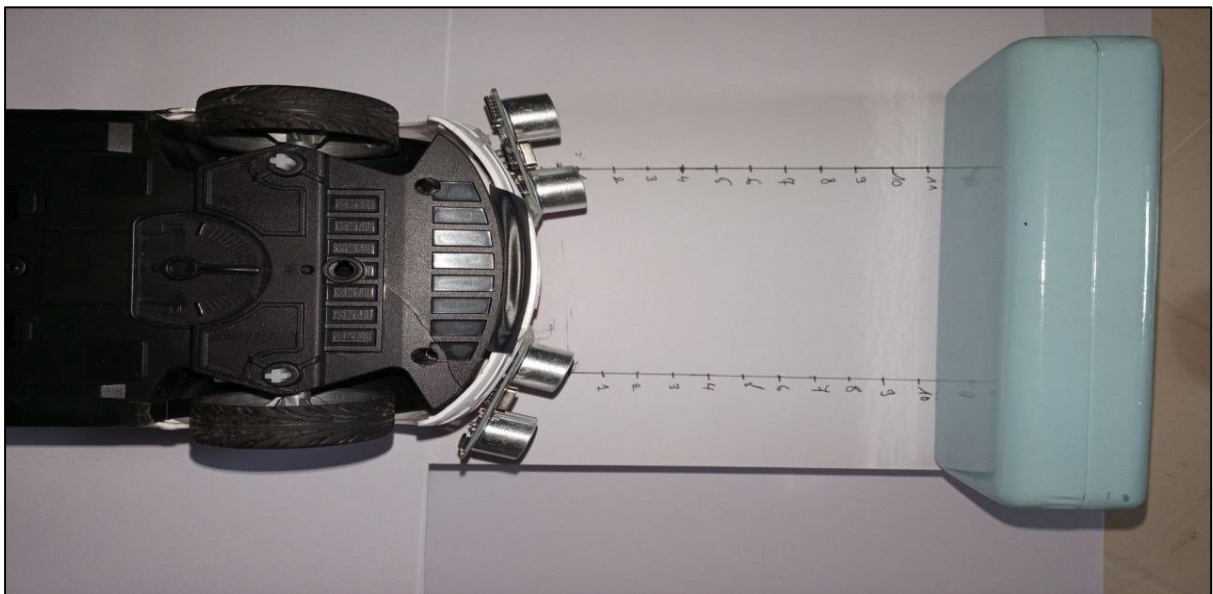


Figure IV.4 : test moteur de guidage « essais d'absence d'obstacle »

Cas 2 : Obstacle à droite :

Lorsqu'un obstacle est détecté du côté droit, le système applique une correction de direction vers la gauche. Le moteur de guidage est alors commandé dans le sens opposé afin de modifier la trajectoire du véhicule.

Condition logique :

$$D_D < D_{sec} \text{ et } D_G > D_{sec}$$

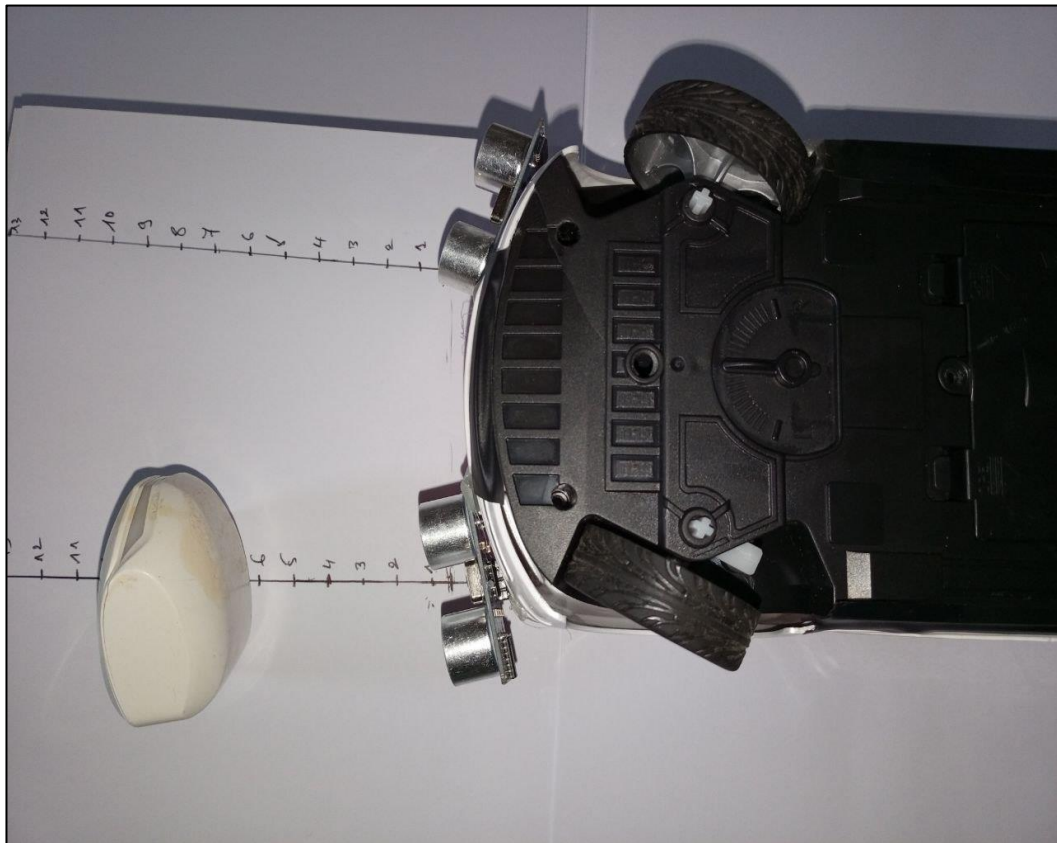


Figure IV.5 : test moteur de guidage « obstacle droite »

Cas 3 : Obstacle gauche :

Lorsqu'un obstacle est détecté du côté gauche, le système génère une correction de direction vers la droite afin d'éviter la collision. Le moteur de guidage est alors commandé dans le sens correspondant au braquage à droite.

Condition logique :

$$D_G < D_{sec} \text{ et } D_D > D_{sec}$$



Figure IV.6 : test moteur de guidage « obstacle gauche »

Cas 4 : obstacle droite et gauche :

Lorsqu'un obstacle est détecté du côté droit, le système applique une correction de direction vers la gauche. Le moteur de guidage est alors commandé dans le sens opposé afin de modifier la trajectoire du véhicule.

Condition logique :

$$D_D < D_{sec} \text{ et } D_G > D_{sec}$$

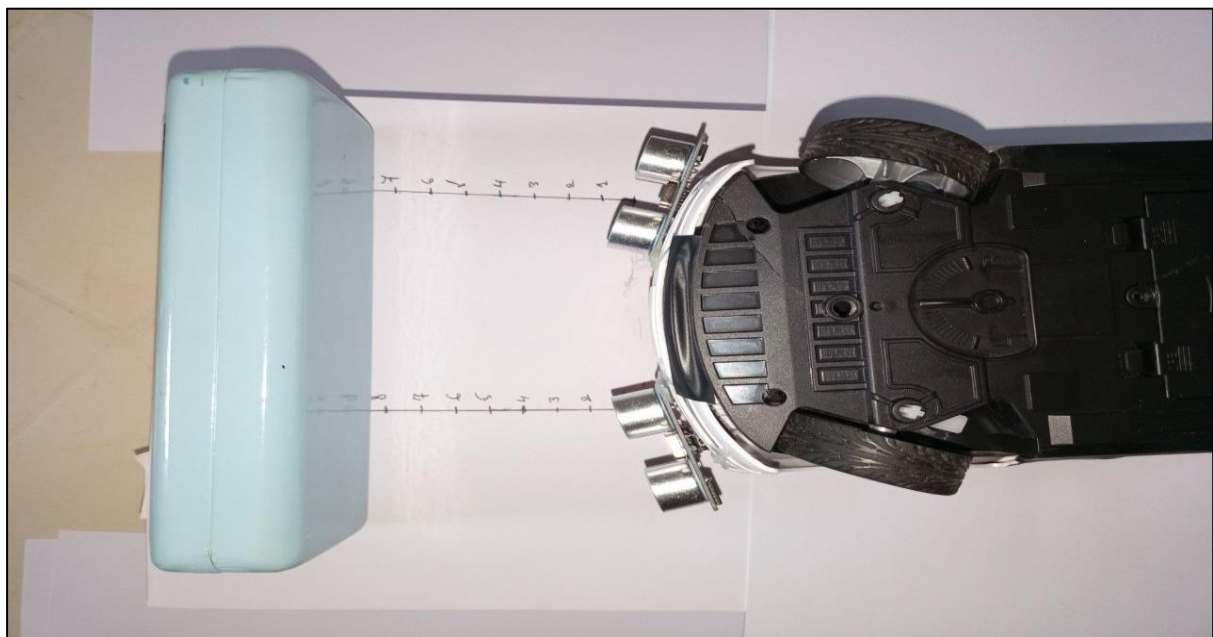


Figure IV.7 : test moteur de guidage « obstacle droite et gauche »

Cas	Distance gauche (D_G)	Distance droite (D_D)	Situation détectée	A_IN1	A_IN2	Action de guidage
1	$(D_G > D_{sec})$	$(D_D > D_{sec})$	Aucun obstacle	0	0	Arrêt
2	$(D_G < D_{sec})$	$(D_D > D_{sec})$	Obstacle à gauche	0	1	Braquage à droite
3	$(D_G > D_{sec})$	$(D_D < D_{sec})$	Obstacle à droite	1	0	Braquage à gauche
4	$(D_G < D_{sec})$	$(D_D < D_{sec})$	Obstacles des deux côtés	1	0	Braquage à gauche

Tableau IV.1 : fonctionnement conditionnelle du moteur de guidage 'A'

Cas	Distance gauche (D_G)	Distance droite (D_D)	Situation détectée	B_IN1	B_IN2	État du moteur de déplacement
1	$(D_G > D_{sec})$	$(D_D > D_{sec})$	Aucun obstacle	1	0	Marche avant
2	$(D_G < D_{sec})$	$(D_D > D_{sec})$	Obstacle à gauche	1	0	Marche avant
3	$(D_G > D_{sec})$	$(D_D < D_{sec})$	Obstacle à droite	1	0	Marche avant
4	$(D_G < D_{sec})$	$(D_D < D_{sec})$	Obstacles des deux côtés	0	1	Marche arrière

Tableau IV.2 : fonctionnement conditionnelle du moteur de déplacement 'B'

IV.5. Analyse et discussion des performances :

L'analyse des résultats expérimentaux montre que le système développé répond globalement aux objectifs fixés. Les performances observées en termes de détection, de réaction et de commande sont satisfaisantes pour une application embarquée à faible coût. Cependant, certaines limitations ont été identifiées, notamment le bruit de mesure des capteurs ultrasoniques, les variations d'alimentation et les imperfections mécaniques du système de

transmission. Ces facteurs influencent légèrement la précision globale, sans empêcher le bon fonctionnement du prototype.

IV.6. Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'évaluation expérimentale des performances du prototype de véhicule autonome. Les essais ont permis d'observer le comportement du système face à la détection d'obstacles, aux changements de direction et au déplacement autonome.

Les résultats obtenus confirment la validité de l'architecture proposée ainsi que l'efficacité de la commande embarquée basée sur Arduino. Malgré certaines limites, le système démontre une bonne capacité d'évitement d'obstacles, ce qui ouvre la voie à des améliorations futures en termes de précision, de robustesse et de stabilité.

***CONCLUSION ET
PERSPECTIVES***

Ce mémoire a été consacré à la conception et à la réalisation d'un véhicule autonome capable de détecter et d'éviter les obstacles de manière automatique. L'objectif principal était de développer un système embarqué simple, fiable et économique intégrant une chaîne complète de perception, de décision et d'action.

Dans un premier temps, l'architecture générale du système a été étudiée afin d'identifier les différents sous-systèmes nécessaires au fonctionnement du véhicule. Cette étude a permis de définir le rôle des capteurs ultrasoniques dans la détection des obstacles, de la carte Arduino Mega 2560 dans le traitement des informations et du système d'actionnement basé sur deux moteurs à courant continu destinés respectivement à la propulsion et à la direction.

Par la suite, une étude du moteur à courant continu a été réalisée afin de comprendre son fonctionnement et d'établir un modèle simplifié décrivant son comportement électromécanique. Cette modélisation a permis de mettre en évidence les relations entre les grandeurs électriques et mécaniques intervenant dans le système de direction.

La phase de conception et de réalisation a conduit à l'intégration des différents composants matériels et logiciels au sein d'un prototype fonctionnel. L'algorithme développé permet d'assurer la détection des obstacles, la prise de décision ainsi que la commande des moteurs à travers le driver L298N. Les essais expérimentaux réalisés ont confirmé la capacité du véhicule à réagir automatiquement aux obstacles détectés et à adapter sa trajectoire en conséquence.

Les résultats obtenus démontrent que l'architecture proposée répond aux objectifs fixés au début du projet. Malgré la simplicité des composants utilisés, le prototype présente un comportement satisfaisant en matière de détection, de guidage et d'évitement d'obstacles. Ce travail constitue ainsi une base intéressante pour le développement de systèmes de navigation autonome plus évolués.

Dans le cadre des travaux futurs, plusieurs améliorations peuvent être envisagées afin d'augmenter les performances, la précision et l'autonomie du système.

Une première perspective consiste à remplacer le mécanisme de direction actuel par un moteur linéaire circulaire, capable de fournir un déplacement plus

précis, plus rapide et avec moins de jeux mécaniques. Cette solution permettrait d'améliorer la qualité du guidage et la précision du braquage dans les applications de conduite autonome.

L'intégration de capteurs plus avancés, tels qu'un LiDAR associé à un système de positionnement GPS, constituerait également une évolution majeure. Le LiDAR permettrait une cartographie tridimensionnelle de l'environnement avec une précision nettement

supérieure aux capteurs ultrasoniques, tandis que le GPS offrirait une localisation globale du véhicule et la possibilité de suivre des itinéraires prédéfinis.

L'ajoute de techniques d'intelligence artificielle (IA) et d'apprentissage automatique représenterait une autre amélioration importante. Ces technologies permettraient au véhicule d'analyser son environnement de manière plus intelligente, d'anticiper certaines situations et d'adapter dynamiquement sa stratégie de navigation en fonction des conditions rencontrées.

Par ailleurs, l'intégration d'un système de reconnaissance des panneaux de signalisation routière à l'aide de caméras et d'algorithmes de vision artificielle permettrait d'étendre les capacités du véhicule à des environnements routiers plus complexes. Le système pourrait ainsi identifier les limitations de vitesse, les interdictions de circulation, les priorités et d'autres informations essentielles à la conduite autonome.

Enfin, une perspective particulièrement innovante réside dans le développement d'un groupe motopropulseur hybride électrique-thermique basé sur une génératrice linéaire. Dans cette architecture, le piston jouerait le rôle de rotor mobile tandis que le cylindre bobiné constituerait le stator. Le mouvement alternatif du piston permettrait de produire directement de l'énergie électrique destinée à alimenter les batteries ou les moteurs de traction. Une telle solution pourrait offrir un rendement énergétique élevé, une réduction du nombre d'éléments mécaniques intermédiaires et une meilleure autonomie du véhicule, tout en ouvrant la voie à une nouvelle génération de systèmes hybrides compacts et performants.

Ainsi, les perspectives présentées montrent que ce projet constitue une étape préliminaire vers la conception de véhicules autonomes plus intelligents, plus performants et davantage adaptés aux exigences des systèmes de transport de

la future.

Références bibliographies :

- [1] : A. Biswas and H. C. Wang, “Autonomous vehicles enabled by the integration of IoT, edge intelligence, 5G, and blockchain,” *Sensors*, vol. 23, no. 4, p. 1963, 2023. <https://doi.org/10.3390/s23041963>
- [2] : J. Fayyad, M. A. Jaradat, D. Gruyer, and H. Najjaran, “Deep learning sensor fusion for autonomous vehicle perception and localization: A review,” *Sensors*, vol. 20, no. 15, p. 4220, 2020. <https://doi.org/10.3390/s20154220>
- [3] : O. Hartono et al., “Design of electric power steering system identification and control for autonomous vehicles based on artificial neural network,” *IEEE Access*, 2024. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3387460>
- [4] : World Health Organization, *Global Status Report on Road Safety 2023*, Geneva: WHO, 2023. ISBN: 9789240086517.
<https://www.who.int/publications/i/item/9789240086517>
- [5] : T. Neumann, “Analysis of advanced driver-assistance systems for safe and comfortable driving of motor vehicles,” *Sensors*, vol. 24, no. 19, p. 6223, 2024. <https://doi.org/10.3390/s24196223>
- [6] : M. S. Mazhar, R. Ahmed, and K. M. Hasan, “Autonomous robot for obstacle avoidance using Arduino and ultrasonic sensor,” *International Journal of Advanced Computer Science and Applications*, vol. 12, no. 7, pp. 45–51, 2021.
- [7] : A. Akintade et al., “Design and implementation of an autonomous mobile robot for obstacle avoidance and path following,” *ResearchSquare*, 2025.
<https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-7856153/v1>
- [8] : A. Patel et al., “DC motor speed control through Arduino and L298N motor driver using PID controller,” *International Journal of Electrical Engineering & Emerging Technology*, vol. 4, no. 2, pp. 21–24, 2021.
- [9] : <https://www.handsontec.com/dataspecs/HC-SR04-Ultrasonic.pdf>
- [10] : <https://www.gotronic.fr/pj2-hc-sr04-utilisation-avec-picaxe-1343.pdf>
- [11] : <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000067-datasheet.pdf>
- [12] : P. Kumar and U. C. Pati, “Arduino and raspberry pi based smart communication and control of home appliance system,” in 2016 Online

International Conference on Green Engineering and Technologies (IC-GET).

IEEE, 2016, pp. 1–6

[13] : A. Dahdouh and M. Boudiaf, Commande en vitesse d'un moteur à courant continu par backstepping, Université de M'sila, Algérie, 2013.

Available: https://www.researchgate.net/publication/292953833_COMMANDE_EN_VITESSE_D%27UN_MOTEUR_A_COURANT_CONTINU_PAR_BACKSTEPPING

[14] : <https://www.elharzli.com/structureMCC.php>

[15] : A. Ivanov Smolenski, Machines électriques, Volume 1, Techniques Soviétiques,

édition de Moscou, Mir, HB N 3592, 1983.

[16] : Gustave monod : (actionneurs machine à courant continu avec balais), science de l'ingénieur terminal S année 2002/2003.

[17] : M. Hadjeras, M. Belbey, "Etude des caractéristiques d'un moteur à c.c à différents types d'excitation", Mémoire de fin d'étude de licence Professionnelle en Electrotechnique Industrielle, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2012.

[18] : [https://www.academia.edu/36696175/Simulation_et_r%C3%A9alisation_de_la_comma](https://www.academia.edu/36696175/Simulation_et_r%C3%A9alisation_de_la_commande_dun_servomoteur_%C3%A0_courant_continu_%C3%A0_base_de_la_carte_Arduino)
[nde_dun_servomoteur_%C3%A0_courant_continu_%C3%A0_base_de_la_carte](https://www.academia.edu/36696175/Simulation_et_r%C3%A9alisation_de_la_commande_dun_servomoteur_%C3%A0_courant_continu_%C3%A0_base_de_la_carte_Arduino)
[Arduino](https://www.academia.edu/36696175/Simulation_et_r%C3%A9alisation_de_la_commande_dun_servomoteur_%C3%A0_courant_continu_%C3%A0_base_de_la_carte_Arduino)

[19] : [https://elearning.univ-](https://elearning.univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/73055/mod_resource/content/1/chapitre%205%20et%20TD%205.pdf)
[mila.dz/a-](https://elearning.univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/73055/mod_resource/content/1/chapitre%205%20et%20TD%205.pdf)
[2023/pluginfile.php/73055/mod_resource/content/1/chapitre%205%20et%20TD%205.pd](https://elearning.univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/73055/mod_resource/content/1/chapitre%205%20et%20TD%205.pdf)
[f](https://elearning.univ-mila.dz/a-2023/pluginfile.php/73055/mod_resource/content/1/chapitre%205%20et%20TD%205.pdf)

[20] : <https://passionelectronique.fr/tutoriel-1298n/>

[21] : G. Gieras, Z. Piech et B. Tomczuk, Linear Synchronous Motors – Transportation and Automation Systems, 2e éd. Boca Raton, FL : CRC Press / Taylor & Francis, 2012.

[22] : Y. Bailly, Initiation à la programmation avec Python et C++. Pearson Education France, 2008.

[23] : Astalaseven, Eskimon et olyte, Arduino pour bien commencer en électronique et en programmation 4/08/20