

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf:...../2025



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Automatique et informatique industrielle

Par: Ben aicha Sami
Henni Achref

Thème

**Conception, réalisation et commande via la technologie Li-Fi
d'un bras manipulateur SCARA.**

Soutenu publiquement, le 24/06/2025. , devant le jury composé de:

M. MOUSSAOUI Abdelkrim	Professeur	Univ. Guelma	Président
M. BABOURI Abdesselam	Professeur	Univ. Guelma	Encadreur
M. CHAABNA Ameer	MCB	Univ. USTHB-Alger	Co-Encadreur
M. CHOUABIA Halim	Dr	Univ. Guelma	Co-Encadreur
M. ELAGGOUNE Hocine	MCB	Univ. Guelma	Examineur
Melle IBTESSAM Khataf	MCB	Univ. Guelma	Représentant Pole Pro

Année Universitaire: 2024/2025

Remerciement

Avant tout, nous remercions « Allah » tout puissant qu'il nous a guidé tout au long de nous vie, qu'il nous a donné courage et patience pour passer tous les moments difficiles, qu'il nous a permis d'achever ce travail et de pouvoir le mettre entre vos mains aujourd'hui. Un travail de recherche, nécessite le concours d'un certain nombre de personnes. Ce mémoire est aujourd'hui l'occasion de remercier toutes les personnes qui ont collaboré à ce travail.

Nous souhaitons remercier vivement en premier lieu notre encadreur Pr.Babouri Abdelsselam pour son excellent encadrement, sa vision objective, tout au long de ce mémoire, ses conseils pertinents avec écoute, amabilité et patience ont permis à notre travail d'aboutir et de voir le jour. Nous espérons que Dieu vous gardera toujours.

Nous sommes extrêmement reconnaissants aux membres du jury Pr. Moussaoui Abdelkrim et Dr.Elaggoune Hocine pour le temps investi dans la lecture de notre thèse.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements au Dr.Chaaban Ameer, qui nous a fourni les moyens qui nous ont permis de mener à bien cette étude, ainsi que pour ses précieux conseils et encouragements.

Notre gratitude, notre profond respect et nos remerciements au Dr.Chouabia Halim pour avoir accepté d'examiner notre travail. Cela a été une grande fierté pour nous d'avoir été formés par un enseignant gentil et franc comme vous.

Enfin, nous remercions chaleureusement tous les enseignants de la faculté des Sciences et Technologie de l'université 08 Mai 1945 de Guelma, de nous avoir transmis leurs savoirs le long de notre cycle universitaire. A toutes et à tous qui, de loin ou de près, ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je tiens en tout premier lieu à remercier Allah.

Je voudrais dédier ce travail :

A ma très chère mère

Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour Exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as Cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance Et même à l'âge adulte.

A mon très cher père

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour vous. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.

A mes très chers frères **Salah** et **Khalil** et à mes deux sœurs
Puisse Dieu vous donne santé, bonheur, courage et surtout réussite

À mes amis, merci pour les bons moments, pour votre aide et vos encouragements.

Ben-aicha Sami

Dédicace

À ma chère famille,

Merci du fond du cœur pour votre amour, votre patience et votre présence constante.

Un grand merci à mes parents, qui ont toujours cru en moi et m'ont soutenu à chaque étape de mon parcours.

À mon frère **Imed**, merci pour ton soutien moral et matériel, tu as toujours été là quand j'en avais besoin.

À mes deux sœurs, ainsi qu'à ma fiancée, merci pour vos mots doux, votre affection et votre présence réconfortante, qui m'ont beaucoup aidé.

À mes amis, merci pour les bons moments, pour votre aide et vos encouragements.

Enfin, merci à toutes les personnes qui m'ont tendu la main, de près ou de loin.

Henni Achref

Résumé

Ce mémoire présente la conception et la réalisation d'un robot SCARA à trois degrés de liberté, capable d'effectuer des opérations de "Pick and Place" en utilisant la communication par lumière visible (VLC). Le système repose sur un microcontrôleur STM32, deux cartes Arduino, et un contrôle PID pour les moteurs. Une carte électronique a été conçue sous KiCad, avec des simulations réalisées sur MATLAB. Ce projet démontre la faisabilité d'un système robotique intelligent, performant et peu coûteux.

Mots-clés : Robot SCARA, Lumière visible (VLC), STM32, Arduino, Moteurs à courant continu, PID, Circuit imprimé (PCB), MATLAB, Modélisation géométrique, Modélisation dynamique, Pick and Place.

Abstract

This thesis presents the design and implementation of a three-degree-of-freedom SCARA robot capable of performing pick-and-place operations using Visible Light Communication (VLC). The system is built around an STM32 microcontroller, two Arduino boards, and PID motor control. A custom PCB was designed using KiCad, and simulations were carried out in MATLAB. This project demonstrates the feasibility of a smart, efficient, and low-cost robotic system.

Keywords : SCARA Robot, Visible Light (VLC), STM32, Arduino, DC Motors, PID, PCB, MATLAB, Geometric Modeling, Dynamic Modeling, Pick and Place.

الملخص

يتناول هذا المشروع تصميم وإنجاز روبوت بثلاث درجات حرية قادر على تنفيذ عمليات الالتقاط والإسقاط باستخدام تقنية الاتصال عبر الضوء المرئي. تم استخدام وحدة تحكم رئيسية، مع وحدتي أردوينو تحكم دقيقة للإرسال والاستقبال. تم التحكم في المحركات باستخدام منظمات لضمان دقة الحركة، كما تم تصميم دائرة إلكترونية خاصة، وتم إجراء المحاكاة على روبوت، يُظهر هذا المشروع إمكانية تطوير أنظمة روبوتية ذكية وفعالة بتكلفة منخفضة.

الكلمات المفتاحية:

الروبوت ، الضوء المرئي ، وحدة تحكم دقيقة ، محركات ، منظمات ، دائرة كهرباء مطبوعة، ماثلاب، النمذجة الهندسية، النمذجة الديناميكية، التقاط وإسقاط.

Sommaire

Résumé.....	I
Abstract	II
الملخص.....	III
LISTE DES FIGURES.....	VIII
Liste des tableaux	XI
Liste d'abréviations.....	XII
 Introduction Générale.....	 1
Chapitre I_Généralité sur les robots.....	2
I.1. Introduction :	3
I.2. Définition	3
I.2.1. Robotique	3
I.2.2. Robot	3
I.3. Typologie des robots :	4
I.3.1 robots mobile	4
I.3.1.1. Robots militaires	4
I.3.1.2. Robots aériens (UAV / Drones)	5
I.3.1.3. Robots sous-marins (AUV)	5
I.3.2. Les robots fixe :	6
I.3.2.1. Robots polaires	6
I.3.2.2. Les robots cylindriques	6
I.3.2.3. Les robots sphériques	7
I.3.2.4. Les robots Cartésiens	7
I.3.2.5. Les robots parallèles	8
I.3.2.6. Les robots SCARA	8
I.4. Domaines d'application de la robotique	9
I.4.1. Robotique industrielle	9
I.4.2. Robotique médicale	9
I.4.3. Robotique humanoïde	10
I.4.4. Robotique spatiale	10
I.4.5. Robotique de défense	10
I.4.6. Robotique de service	10
I.5. Les modes de communication des robots	10
I.5.1. Communication filaire	10
I.5.2. Communication sans fil :	11
I.6. Applications robotiques dans l'industrie 4.0	12
a) Robotique collaborative	12

b) Robotique mobile autonome (AMR)	13
c) Inspection et maintenance prédictive	13
d) Robotique cloud et intégration IoT	14
e) Robotique intelligente avec vision et IA	14
I.7. Conclusion	15
Chapitre II La technologie VLC	16
II.1. Introduction	17
II.2. Définition La communication par lumière visible	17
II.3. Principe de fonctionnement.....	17
II.4. ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION VLC	18
II.4.1. L'émetteur.....	18
II.4.2. Le récepteur.	18
II.4.3. Le canal	19
II.5. Modulations associées aux communications VLC :.....	19
a) La modulation OOK.....	20
b) La modulation VPPM.....	20
c) La modulation OFDM	21
d) La modulation CSK.....	21
II.6. Avantages et inconvénients de la technologie VLC :.....	22
II.6.1. Avantage :	22
II.6.2. Inconvénients :	23
II.7. DOMAINE APPLICATION VLC	23
II.7.1. Indoor	23
II.7.1.1. Li-Fi.....	23
II.7.1.2. Aviation	24
II.7.1.3. Hôpitaux.....	25
II.7.1.4. Industrielle	26
II.7.2. OUTDOOR	27
II.7.2.1. Communications sous-marines :.....	27
II.7.2.2. Véhicule et transport.....	27
II.8. Différence entre VLC et Li-Fi.....	28
II.9. Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi :	28
II.10. Conclusion.....	30
Chapitre III Logiciels et matériels	31
III.1. Introduction	32

III.2. Partie logicielle	32
III.2.1. Conception mécanique	32
III.2.1.1. SOLIDWORKS	32
III.2.1.2. Conception des pièces :	33
III.2.1.3. L'assemblage des pièces :	35
III.2.1.4. Impression 3D des pièces mécaniques	35
III.2.1.5. Composants mécaniques du robot	36
III.2.2. Conception électronique	37
III.2.2.1. KiCad	37
III.2.2.2. Conception du schéma électrique et sélection des composants	37
III.2.2.3. La carte PCB	43
III.2.2.4. Visualisation 3D de la carte	43
III.2.2.5. Fabrication et assemblage de la carte électronique :	44
III.2.3. Programmation et outils de développement	45
III.2.3. 1. STM32CubeIDE	45
III.2. 3.2. Arduino	46
III.2. 3.3. Matlab	46
III.3. Partie Matériel	47
III.3.1. Un microcontrôleur STM32H7	47
III.3.2. Moteurs DC avec encodeurs	48
III.3.3. Partie émetteur	49
• L'Arduino Uno :	49
• LED	50
III.3.4. Partie récepteur :	51
• L'Arduino Mega 2560	51
• Photodiode PD (BPW34)	51
III.3.5. l'électroaimant	52
III.4. Conclusion	53
Chapitre IV _Modélisation et _Implémentation VLC	54
IV.1. Introduction	55
IV.2. Modélisations géométrique et dynamique	55
IV.2.1. Modélisation géométrique	56
IV.2. 1.1. Convention de Denavit-Hartenberg	56
IV. 2.2. Modèle Géométrique directe	56
IV. 2.2.1. Matrices homogènes élémentaires	56
IV. 2.3 Modèle Géométrique inverse	57

IV.3. Modélisation dynamique (formulation d'Euler-Lagrange)	57
IV.3.1. Lagrangien	57
IV.3.1.1. Énergie cinétique	57
IV.3.1.2. Énergie potentielle	58
IV.3.2. Équations d'Euler-Lagrange	58
IV.3.3. Système d'équations du mouvement	58
IV.4. Commande PID du robot SCARA	58
IV.4.1. Schéma bloc de PID	59
IV.4.2. Comparaison des types des correcteurs PID	59
IV.4.3. Principe du PID	59
IV.4.4. Architecture de la commande PID	60
IV.4.5. Réglage des gains PID	60
IV.4.5.1. Méthode empirique.....	60
IV.4.5.2. Méthode de Ziegler-Nichols.....	61
IV.4.5.3. Régulateur PID par la méthode de la réponse indicielle.....	61
IV.5. Simulation du robot SCARA avec commande PID	61
IV.5.1. Objectif de la simulation	61
IV.5.2. Modélisation simplifié du robot SCARA	61
IV.5.3. Commande PID appliquée à chaque axe	61
IV.5.4. Programme MATLAB utilisé	62
IV.5.5. Résultats et discussion	62
IV.6. Mise en œuvre d'un système de commande VLC	64
IV.6.1. Banc d'essai	64
IV.7. Implémentation du robot SCARA	65
IV.7.1. Commande du robot SCARA via la technologie Li-Fi	66
IV.8. Conclusion	67
Conclusion Générale	68
Les références	69

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Robot militaire.

Figure I.2 : Drones.

Figure I.3 : Robot sous-marins (AUV).

Figure I.4 : Robot polaire.

Figure I.5 : Robot cylindrique.

Figure I.6 : Robot sphérique.

Figure I.7 : Robot Cartésien.

Figure I.8 : Robot parallèle.

Figure I.10 : Robot SCARA.

Figure I.11 : des Robots BMW pour l'assemblage automobile.

Figure I.12 : Robotiques Amazon pour la gestion des entrepôts.

Figure I.13 : Exemple robot d'inspection.

Figure I.14 : Plateforme cloud de KUKA.

Figure I.15 : robots de Niryo avec Vision IA.

Figure II.1 : Répartition du spectre électromagnétique et du spectre visible.

Figure II.2 : Le principe de fonctionnement.

Figure II.3: Led.

Figure II.4: photodiode.

Figure II.5 : Configuration de liaison sur VLC : (a) est LOS et (b) est NLOS, T est un émetteur et R est un récepteur.

Figure II.6 : La modulation OOK.

Figure II.7 : La modulation VPPM.

Figure II.8 : Schéma de la modulation OFDM.

Figure II.9 : La modulation CSK.

Figure II.10 : Technologie Li-Fi.

Figure II.11 : L'utilisation de VLC dans les avions.

Figure II.12 : Transmission vidéo avec VLC dans la salle d'opération numérique.

Figure II.13 : (a) Cellule de fabrication utilisée pour les expériences dans l'installation d'essai de robots de BMW ; et (b) la trace du mouvement du bras du robot étudiée.

Figure II.14 : Utilisation de VLC dans la communication sous-marine.

Figure II.15 : Communication de véhicule à véhicule.

Figure III.1 : Interface de SolidWorks.

Figure III.2 : pièce1.

Figure III.3 : pièce2.

Figure III.4 : pièce3.

Figure III.5 : pièce4.

Figure III.6 : pièce5.

Figure III.7 : pièce6.

Figure III.8 : pièce7.

Figure III.9 : Assemblage de bras manipulateur SCARA in SolidWorks.

Figure III.10 : L'impression les pièces in CREALITY.

Figure III.11 : Toutes les pièces nécessaires.

Figure III.12 : Schéma électrique global.

Figure III.13 : Module d'alimentation LM2596S.

Figure III.14 : Commande moteur L298N.

Figure III.15 : Microcontrôleur STM32.

Figure III.16 : Circuit de commande de l'électroaimant.

Figure III.17 : Les connecteurs d'encodeurs.

Figure III.18 : (A) couche supérieure (B) couche inférieure de la carte PCB

Figure III.19 : Visualisation 3D de la carte PCB finale réalisée avec KiCad.

Figure III.20 : carte-réelle.

Figure III.21 : Carte développement ARM STM32H750VBT6.

Figure III.22 : Moteur à courant continu JGA25-370 avec encodeur intégré.

Figure III.23 : Arduino UNO et Genuino UNO.

Figure III.24 : LED.

Figure III.25 : Arduino MEGA 2560 et Genuino MEGA 2560.

Figure III.26 : BPW34 Photodiode.

Figure III.27 : Électro-aimants.

Figure IV. 1 : Structure mécanique du robot SCARA

FigureIV.2 : Schéma représente le bloc de PID en boucle fermé

Figure IV. 3 : Réponse en position de l'axe θ_1

Figure IV. 4 : Réponse en position de l'axe θ_2

Figure IV. 5 : Réponse en position de l'axe d_3

Figure IV.6 : Prototypage de LED à photodiode

Figure IV. 7 : Transmission de message entre deux Pc via VLC

Figure IV. 8 : Prototype réel du robot SCARA imprimé en 3D

Figure IV. 9 : Robot SCARA commande via la technologie Li-Fi

Liste des tableaux

Tableau II.1 : Les caractéristiques de comparaison entre LI-FI et WI-FI.

Tableau.IV.1 : la convention de Denavit-Hartenberg (D-H) du robot SCARA.

Tableau.IV.2 : Comparaison des types des correcteurs PID.

Tableau.IV.3 : Types des correcteurs PID

Liste d'abréviations

UAV: unmanned aerial vehicle.
AUV: Autonomous Underwater Vehicles.
RRT: Rotatif rotatif translation.
RTT: Rotatif translation translation.
TTT: Translation translation translation.
USB: Universal Serial Bus.
CAN: Controller Area Network.
SPI: Serial Peripheral Interface.
I²C: Inter-Integrated Circuit.
Wi-Fi: wireless fidelity.
IoT: Internet des objets.
AMR: Robotique mobile autonome.
IA: Intelligence artificielle.
VLC: communication par la lumière visible
LED: Light Emitting Diode.
LD: Laser Diodes.
FOV: Field of View.
LOS: Line Of Sight.
NLOS: Non Line Of Sight.
OOK: On-OFF Keying.
VPPM: Variable Pulse Position Modulation.
PPM: Pulse Position Modulation.
PWM: Pulse width modulation.
OFDM: Orthogonal Frequency Division Multiplexing.
CSK: Color Shift Keying.
Li-Fi: Light Fidelity.
RVB: Rouge vert bleu.
RF: Radiofréquence.
ITS: système de transport intelligent.
V2V: véhicule à véhicule.
I2V: infrastructure-véhicule.

PCB: Printed Circuit Board.

SMD: Surface Mount Device.

HAL: Hardware Abstraction Layer.

LL: Low Layer.

PID: Proportionnelle-Intégrale-Dérivée.

D-H: Denavit-Hartenberg

Introduction Générale

L'évolution rapide des technologies numériques et des systèmes automatisés a profondément transformé les paradigmes industriels, scientifiques et sociaux de notre époque. Dans ce contexte de transformation technologique, la robotique s'impose comme un domaine stratégique et transversal, jouant un rôle central dans le développement de solutions intelligentes, efficaces et adaptées aux exigences du monde moderne. Des chaînes de production automatisées aux applications médicales, en passant par les systèmes embarqués et les technologies de communication, la robotique constitue aujourd'hui l'un des piliers majeurs de l'industrie 4.0.

Parmi les différents types de robots industriels, les robots manipulateurs tiennent une place essentielle. Leur capacité à exécuter des tâches de manière autonome, précise et répétable leur confère une grande valeur ajoutée dans des domaines aussi variés que l'assemblage, le tri, la manutention ou l'inspection. Le robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm), en particulier, se distingue par sa structure simple, sa rapidité de mouvement, et sa grande précision dans les tâches de type pick-and-place. Il constitue ainsi un choix privilégié pour de nombreuses applications industrielles.

Dans une optique d'innovation et d'exploration de nouvelles perspectives technologiques, notre projet s'inscrit dans une démarche de conception et de réalisation d'un système robotisé intelligent, intégrant des solutions de communication optique par lumière visible (VLC), des contrôleurs embarqués (STM32, Arduino), ainsi que des algorithmes de commande et de modélisation. Ce travail s'appuie sur une approche multidisciplinaire, combinant la mécanique, l'électronique, l'informatique industrielle et l'automatique.

Cette mémoire présente donc une étude approfondie allant de la modélisation géométrique et dynamique du robot SCARA jusqu'à la mise en œuvre pratique du système, en passant par la conception matérielle, la commande, et l'intégration des différents sous-systèmes. Elle vise non seulement à démontrer la faisabilité technique du projet, mais aussi à mettre en lumière les enjeux actuels de la robotique intelligente dans un monde de plus en plus interconnecté.

Chapitre I

Généralité sur les robots

I.1. Introduction :

Depuis plusieurs décennies, la robotique s'impose comme un pilier central de l'innovation technologique. L'émergence de systèmes automatisés intelligents a transformé de nombreux secteurs, en apportant des solutions efficaces aux tâches répétitives, dangereuses ou de haute précision. De l'usine automatisée aux robots médicaux, en passant par les drones et les véhicules autonomes, les robots ne cessent d'élargir leur champ d'application. Cette évolution rapide s'accompagne d'un besoin croissant de compréhension des différents types de robots, de leurs caractéristiques, de leurs domaines d'utilisation, ainsi que des technologies de communication qui leur permettent d'interagir avec leur environnement. Ce chapitre vise ainsi à poser les bases nécessaires à l'étude de tout système robotique moderne, en introduisant les concepts essentiels du domaine.

I.2. Définition

I.2.1. Robotique

La robotique est une discipline multidisciplinaire qui regroupe l'ensemble des sciences et technologies impliquées dans la conception, la fabrication, la programmation et l'intégration de robots. Elle fait appel à des domaines variés tels que la mécanique, l'électronique, l'informatique, la mécatronique et l'intelligence artificielle. Son objectif est de créer des systèmes capables d'interagir avec leur environnement de manière autonome ou semi-autonome, dans des contextes aussi bien industriels que domestiques, médicaux ou exploratoires [1].

I.2.2. Robot

Un robot est un système électromécanique programmable, conçu pour percevoir son environnement, prendre des décisions et exécuter des actions physiques. Il peut être autonome ou télécommandé, mobile ou fixe, et se décline en une grande variété de formes selon son domaine d'application.

Parmi les catégories les plus répandues, on trouve les robots manipulateurs, largement utilisés dans le secteur industriel. Ces robots, souvent sous forme de bras articulés, sont capables d'exécuter des tâches complexes avec précision, rapidité et répétabilité. Leur fonctionnement repose sur des modèles mathématiques avancés de cinématique, dynamique et contrôle des trajectoires. Grâce à leur polyvalence, ils sont essentiels dans les processus de fabrication modernes, notamment dans le cadre de l'industrie 4.0 [2].

I.3. Typologie des robots :

La classification des robots peut se faire selon plusieurs critères, notamment leur structure mécanique, leur mode de déplacement, ou encore leur domaine d'application. Dans ce cadre, deux grandes familles de robots se distinguent : les robots mobiles, capables de se déplacer dans leur environnement, et les robots fixes, généralement utilisés pour des tâches répétitives dans un espace de travail défini.

I.3.1 robots mobile

Un robot mobile est un système mécanique, électronique et informatique agissant physiquement sur son environnement en vue d'atteindre un objectif qui lui a été assigné, ce robot doté de moyens de locomotion qui lui permettent de se déplacer suivant son degré d'autonomie, il peut être doté de moyens de perception et de raisonnement [3].

I.3.1.1. Robots militaires

Les robots militaires sont développés pour répondre aux exigences des opérations de défense et de sécurité. Ils peuvent être terrestres, aériens ou marins, et sont utilisés pour des missions à haut risque telles que la reconnaissance, le déminage, l'assistance au combat, la surveillance frontalière, ou le transport de matériel. Équipés de capteurs avancés et parfois d'armements, ces robots permettent de réduire l'exposition humaine aux dangers tout en augmentant l'efficacité opérationnelle sur le terrain. [4]



Figure I.1 : Robot militaire [24].

I.3.1.2. Robots aériens (UAV / Drones)

Les robots volants, également appelés drones, sont des aéronefs ou des appareils volants télécommandés et capables de voler sans pilote ni passager. Ce type de robot doit respecter une réglementation spécifique. Il se caractérise par son autonomie, sa rapidité et sa capacité à fournir des informations après analyse par divers capteurs. De plus en plus utilisés dans les applications militaires et civiles, ils permettent de réduire l'exposition des pilotes à des environnements dangereux lors de certaines missions [5].



Figure I.2 : Drones.

I.3.1.3. Robots sous-marins (AUV)

Les robots **sous-marins autonomes**, ou **AUV** (*Autonomous Underwater Vehicles*), sont conçus pour explorer et intervenir dans les environnements aquatiques profonds. Grâce à leur structure étanche et à leurs systèmes de propulsion, ces robots peuvent naviguer de manière autonome sous la surface de l'eau pour accomplir des missions telles que la cartographie des fonds marins, l'inspection de pipelines, la collecte de données océanographiques ou encore la détection d'objets immergés. Leur autonomie énergétique et leur capacité à évoluer sans câble en font des outils précieux pour la recherche marine [6].



Figure I.3 : Robot sous-marins (AUV) [25].

I.3.2. Les robots fixe :

Un robot fixe est un robot industriel ancré à un point déterminé, incapable de se déplacer mais capable d'exécuter des tâches automatisées précises grâce à ses bras articulés ou ses effecteurs. Il est principalement utilisé dans les environnements de production pour des opérations telles que l'assemblage, la soudure, ou la manutention, où la répétition et la précision sont nécessaires. Sa stationnarité est compensée par une grande liberté de mouvement grâce à plusieurs axes articulés [7].

I.3.2.1. Robots polaires

Robots spécialement conçus pour explorer et opérer dans les environnements froids, glacés et accidentés comme l'Arctique ou l'Antarctique. Ils résistent aux températures extrêmes et aux terrains difficiles [8].



Figure I.4 : Robot polaire [8]

I.3.2.2. Les robots cylindriques :

Ce type de robots est caractérisé par une rapidité et un espace de travail cylindrique. C'est un robot à 3 axes, série (RTT) et 3 degrés de liberté, son espace de travail est cylindrique [8].



Figure I.5 : Robot cylindrique [8]

I.3.2.3. Les robots sphériques :

Ce sont des robots à 3 axes, série (RRT), et 3 degrés de libertés, leurs espace de travail est sphérique. Ils sont caractérisés par leur grande charge utile [8].



Figure I.6 : Robot sphérique [8]

I.3.2.4. Les robots Cartésiens :

Ce sont des robots à 3 axes perpendiculaires 2 à 2, série (TTT), et 3 degrés de liberté et caractérisés par leur Très bonne précision, mais ils sont lents [8].

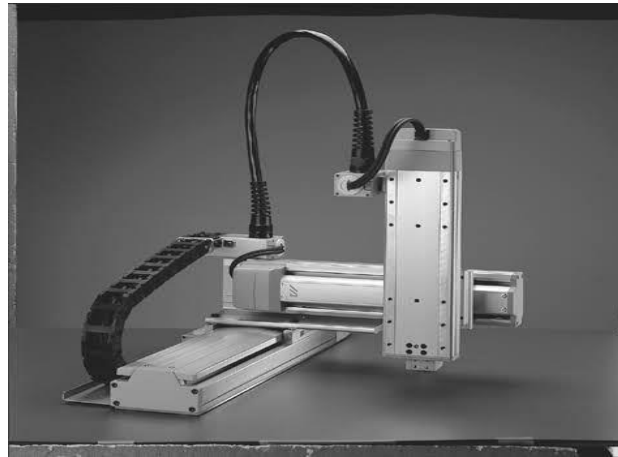


Figure I.7 : Robot Cartésien [8]

I.3.2.5. Les robots parallèles :

Ce sont des robots à Plusieurs chaînes cinématiques en parallèles et un espace de travail réduit. Ils sont caractérisés par la rapidité et la précision (grande rigidité de la structure) [8].



Figure I.8 : Robot parallèle [8]

I.3.2.6. Les robots SCARA :

Son nom vient de sa structure : Selective Compliance Assembly Robot Arm, c'est-à-dire un bras robotique à conformité sélective. Ce type de robot à la fois précis et rapide, est utilisé dans l'assemblage et de conditionnement. Sur le plan mécanique, un robot SCARA est généralement composé de deux articulations rotatives pour les déplacements dans le plan, et d'un axe prismatique (translation) pour les mouvements verticaux. Cette configuration RRT (Rotatif-Rotatif-Translation) lui confère trois degrés de liberté (3 DOF). L'espace de travail

du SCARA est généralement cylindrique, ce qui lui permet d'atteindre des points circulaires autour de sa base [9] [10].



Figure I.10 : Robot SCARA [26]

I.4. Domaines d'application de la robotique

La robotique, en tant que discipline interdisciplinaire, trouve ses applications dans de nombreux secteurs stratégiques. Ces domaines d'application reflètent l'évolution des besoins sociétaux, économiques et technologiques, et exploitent les capacités des systèmes robotiques pour améliorer la précision, la sécurité, la productivité et l'autonomie dans des environnements variés.

I.4.1. Robotique industrielle

La robotique industrielle représente la plus ancienne et la plus répandue des branches de la robotique. Elle regroupe tous les robots automatisant les processus de fabrication, principalement dans les secteurs manufacturiers. Ces robots réalisent des tâches répétitives avec une extrême précision et fiabilité, tels que le bras robotisé d'assemblage [9].

I.4.2. Robotique médicale

Dans la robotique médicale, l'objectif est d'assister les professionnels de santé ou de remplacer certaines actions médicales. Outre les robots chirurgicaux, cette catégorie inclut également les dispositifs de rééducation motorisée et les robots compagnons pour les personnes vulnérables [11].

I.4.3. Robotique humanoïde

Elle vise à reproduire l'apparence et certains comportements humains. Ces robots sont utilisés pour la recherche en interaction homme-machine, dans l'assistance domestique ou l'éducation. Leur développement intègre la mécanique avancée, la vision artificielle et l'intelligence artificielle [12].

I.4.4. Robotique spatiale

La robotique spatiale regroupe les systèmes robotiques conçus pour explorer l'espace et intervenir à distance. Elle comprend notamment les rovers planétaires, les bras robotiques sur les stations spatiales et les robots d'entretien de satellites [13].

I.4.5. Robotique de défense

Cette branche englobe les robots utilisés dans des contextes militaires ou de sécurité civile. Ils peuvent remplir des missions de surveillance, de déminage ou d'intervention rapide en terrain dangereux [14].

I.4.6. Robotique de service

Elle englobe les robots destinés à un usage civil hors du secteur industriel : logistique (robots de tri), nettoyage (aspirateurs intelligents), accueil (robots guides dans les aéroports), ou encore assistance aux personnes [15].

I.5. Les modes de communication des robots :

La communication entre un robot et son environnement, ou entre ses différentes composantes, constitue un élément clé de son fonctionnement. Ces communications permettent le contrôle à distance, la transmission des données, ou encore la coordination entre plusieurs robots. Elles peuvent être classées en deux grandes catégories : les communications filaires et les communications sans fil.

I.5.1. Communication filaire :

La communication filaire repose sur l'utilisation de connexions physiques (câbles) pour transmettre les informations. Cette méthode est couramment utilisée dans les environnements industriels, où la fiabilité et la stabilité des signaux sont primordiales. Cependant, elle limite la mobilité du robot et peut engendrer un encombrement important dans les environnements complexes. Parmi les protocoles filaires les plus utilisés, on peut citer :

- **RS232 / RS485 / UART** : des protocoles de communication série, simples et robustes, utilisés pour la transmission de données entre microcontrôleurs ou automates.
- **USB (Universal Serial Bus)** : largement utilisé pour la programmation ou le transfert de données à courte distance.
- **Ethernet** : protocole réseau permettant une communication rapide et stable, particulièrement utilisé dans les systèmes robotisés industriels connectés.
- **CAN Bus (Controller Area Network)** : utilisé notamment dans les véhicules autonomes et les robots mobiles, ce bus permet la communication entre les capteurs, actionneurs et unités de contrôle.
- **SPI (Serial Peripheral Interface) et I²C (Inter-Integrated Circuit)** : protocoles destinés à la communication à courte distance entre un microcontrôleur et des périphériques internes au robot.

I.5.2. Communication sans fil :

La communication sans fil est de plus en plus privilégiée pour les robots mobiles ou les systèmes nécessitant une grande flexibilité. Plusieurs technologies sont employées en fonction des besoins en débit, portée et consommation énergétique.

- **Wi-Fi :**

Le Wi-Fi, basé sur la norme IEEE 802.11, permet la connexion des robots à un réseau local ou à Internet. Cette technologie est utilisée dans des applications telles que la télésurveillance, les drones ou les robots domestiques connectés. Elle offre une large portée (jusqu'à 100 mètres) et un débit élevé, mais reste sensible aux interférences et à la congestion du réseau [16].

- **Bluetooth :**

Le Bluetooth (norme IEEE 802.15.1) est utilisé pour des communications à courte portée (10 à 100 mètres), notamment pour le contrôle de robots via smartphone ou tablette. Il présente l'avantage d'une faible consommation énergétique et d'une mise en œuvre simple, mais son débit reste limité comparé au Wi-Fi [17].

- **ZigBee :**

ZigBee, basé sur la norme IEEE 802.15.4, est destiné aux applications nécessitant un faible débit et une faible consommation, tout en permettant la création de réseaux maillés. Il est particulièrement adapté aux systèmes multi-robots ou aux environnements domotiques [17].

- **Infrarouge :**

L'infrarouge utilise la lumière infrarouge pour transmettre des données. Cette méthode est employée pour les télécommandes de robots ou pour la détection d'obstacles simples. Elle nécessite une ligne de vue directe et est limitée en portée [18].

I.6. Applications robotiques dans l'industrie 4.0

L'industrie 4.0, également appelée la quatrième révolution industrielle, repose sur l'intégration des technologies numériques, de l'intelligence artificielle et de l'Internet des objets (IoT) dans les systèmes de production. La robotique y joue un rôle central, en apportant flexibilité, autonomie et interconnexion aux processus industriels. Voici les principales applications robotiques dans ce contexte :

a) Robotique collaborative

Les robots collaboratifs travaillent aux côtés des humains sans nécessiter de barrières de sécurité traditionnelles. Leur rôle est d'améliorer la productivité en partageant des tâches physiques tout en assurant la sécurité [19].

- Exemple : L'utilisation de Robots chez BMW pour l'assemblage automobile.



Figure I.11 : Des Robots BMW pour l'assemblage automobile [27].

b) Robotique mobile autonome (AMR)

Les AMR sont des robots capables de se déplacer de manière autonome dans les environnements industriels. Ils sont utilisés pour la logistique interne, réduisant les délais de livraison des pièces et matières premières [20].

- Exemple : Les AMR chez Amazon Robotics pour la gestion des entrepôts.



Figure I.12 : Robotiques Amazon pour la gestion des entrepôts [28].

c) Inspection et maintenance prédictive

Des robots équipés de capteurs avancés effectuent des inspections automatiques pour détecter des défauts avant qu'ils ne deviennent critiques. Cela permet la maintenance prédictive, essentielle pour éviter des arrêts imprévus [21].

- Exemple : Inspection automatisée de pipelines par des robots intelligents.



Figure I.13 : Exemple robot d'inspection [29].

d) Robotique cloud et intégration IoT

Les robots sont connectés à des plateformes cloud, leur permettant de partager des données et d'améliorer leurs performances en temps réel via la machine learning [22].

- Exemple : Plateforme cloud de KUKA permettant aux robots industriels d'être supervisés à distance.

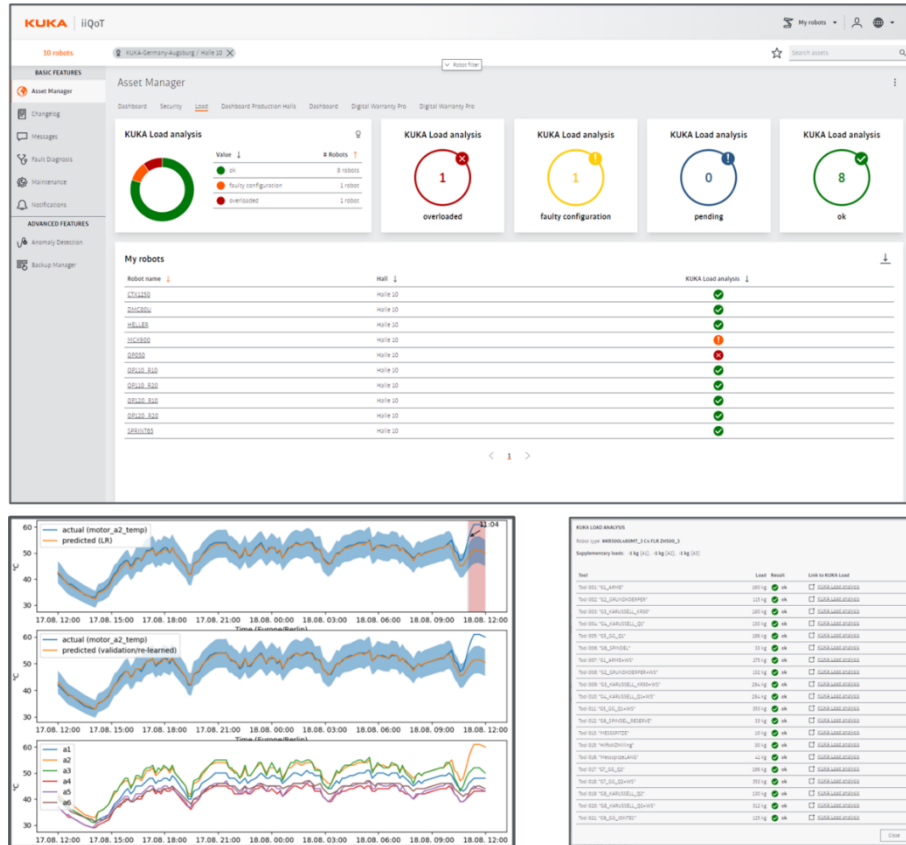


Figure I.14 : Plateforme cloud de KUKA [30].

e) Robotique intelligente avec vision et IA

Grâce à l'IA et à la vision artificielle, les robots peuvent prendre des décisions complexes, reconnaître des objets, et s'adapter aux changements dans leur environnement [23].

- Exemple : Robots dans la fabrication électronique capables d'auto-ajuster les paramètres en fonction de la qualité détectée.



. **Figure I.15** : Robots de Niryo avec Vision IA [31].

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une vue globale sur les robots manipulateurs, en commençant par une introduction générale, puis en abordant leurs différentes classifications selon la structure, le type de mouvement et les domaines d'application. Nous avons ensuite détaillé l'architecture mécanique de ces systèmes, ce qui a permis de mieux comprendre la structure physique qui soutient leur précision et leurs mouvements. Nous avons également examiné le rôle des systèmes d'entraînement et des actionneurs dans l'exécution des mouvements, ainsi que l'importance des capteurs dans l'amélioration de l'interaction avec l'environnement. Le concept de degrés de liberté et son lien avec la cinématique ont également été analysés, en tant que fondement de la modélisation et de la commande des robots. En fin de chapitre, nous avons exploré les principales applications industrielles des robots manipulateurs, tout en mettant en lumière leurs avantages ainsi que les défis liés à leur intégration dans les processus de production. Ces connaissances introductives constituent une base solide pour aborder des aspects plus avancés de la robotique, tels que la modélisation mathématique, les techniques de commande intelligente et les algorithmes de planification de mouvement, qui feront l'objet des prochains chapitres.

Chapitre II

La technologie VLC

II.1. Introduction

La technologie de communication par la lumière visible (VLC) est l'une des technologies émergentes les plus prometteuses dans le domaine des télécommunications, en raison de son lien étroit avec l'adoption rapide des lampes LED à l'échelle mondiale, ainsi que de l'essor croissant des systèmes d'éclairage intelligents. L'industrie de l'éclairage a réagi de manière positive à ces avancées, au point où les lampes LED jouent désormais un rôle double : fournir un éclairage tout en assurant la transmission de données, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'intégration des systèmes de communication dans les infrastructures d'éclairage intelligent [32].

II.2. Définition La communication par lumière visible

La communication par lumière visible (VLC) est une technologie de communication sans fil qui utilise le spectre de la lumière visible (380–750 nm) pour transmettre des données numériques, en modulant l'intensité lumineuse émise par une source telle qu'une LED. Le signal est reçu par une photodiode, qui le convertit en signal électrique afin d'extraire les données. Cette technique permet un débit de transmission élevé et s'intègre facilement aux systèmes d'éclairage existants [33].

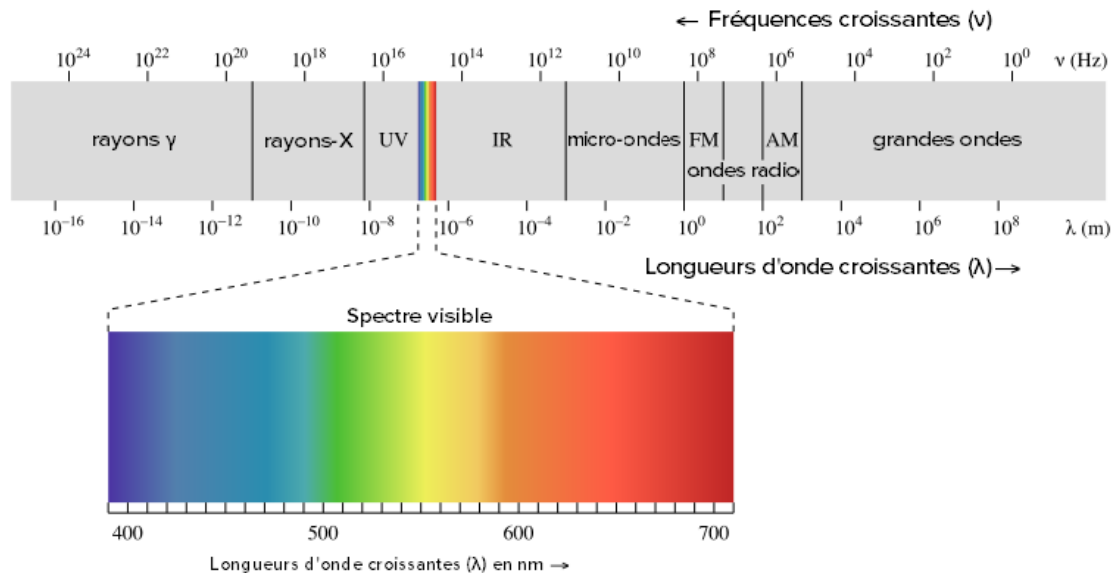


Figure II.1 : Répartition du spectre électromagnétique et du spectre visible [34].

II.3. Principe de fonctionnement

Le principe est simple : des LEDs transmettent de l'information, des photodiodes la reçoivent. Si une LED est allumée, elle transmet un bit 1, si elle est éteinte, un bit 0. Les LEDs peuvent changer d'état très rapidement et donc avoir un débit suffisant pour la

transmission d'information La fréquence de commutation est suffisamment élevée pour que l'œil humain perçoive une lumière continue, sans scintillement [35].

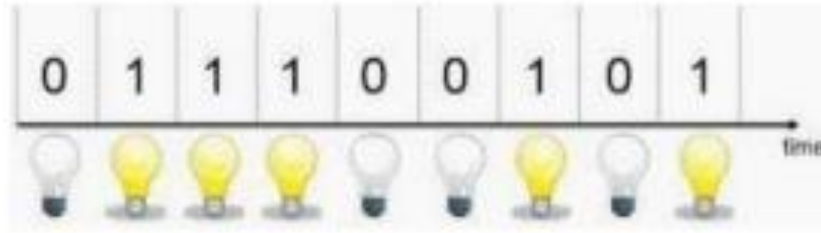


Figure II.2 : Le principe de fonctionnement.

II.4. ARCHITECTURE D'UN SYSTEME DE COMMUNICATION VLC

Système VLC se compose essentiellement :

II.4.1. L'émetteur : Les principaux composants utilisés dans les systèmes VLC pour la transmission sont de deux types : les diodes électroluminescentes (LED) et les diodes laser (LD). Grâce à leur coût abordable et la popularité croissante, les LED sont devenues le principal support utilisé dans les communications par lumière visible.

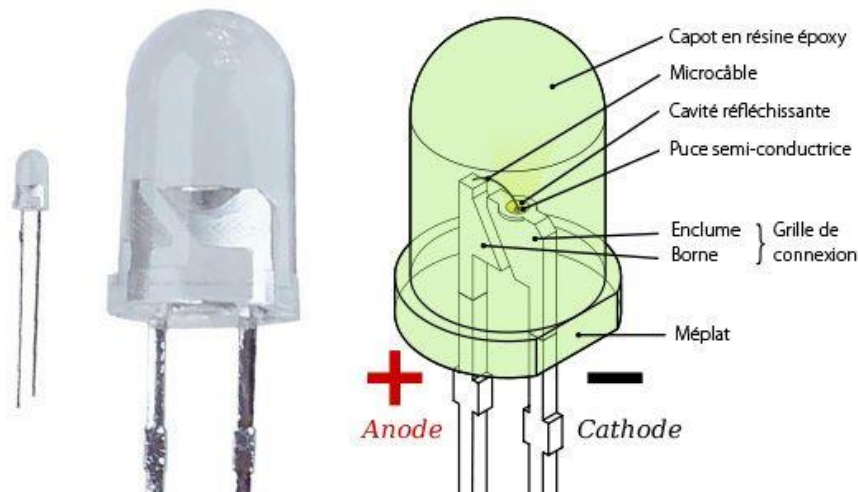


Figure II.3 : Led [36]

II.4.2. Le récepteur : Les performances d'un système VLC sont affectées par les performances du récepteur. La lumière reçue n'est pas seulement la lumière de l'émetteur, mais aussi d'autres sources lumineuses (naturelles ou artificielles), qui provoquent de fortes interférences. Nous utilisons donc une photodiode en raison de sa haute sensibilité, car elle reçoit le faisceau lumineux modulé, puis convertit la lumière en un signal électrique à partir

duquel les données sont extraites sans avoir besoin d'une source d'alimentation externe.

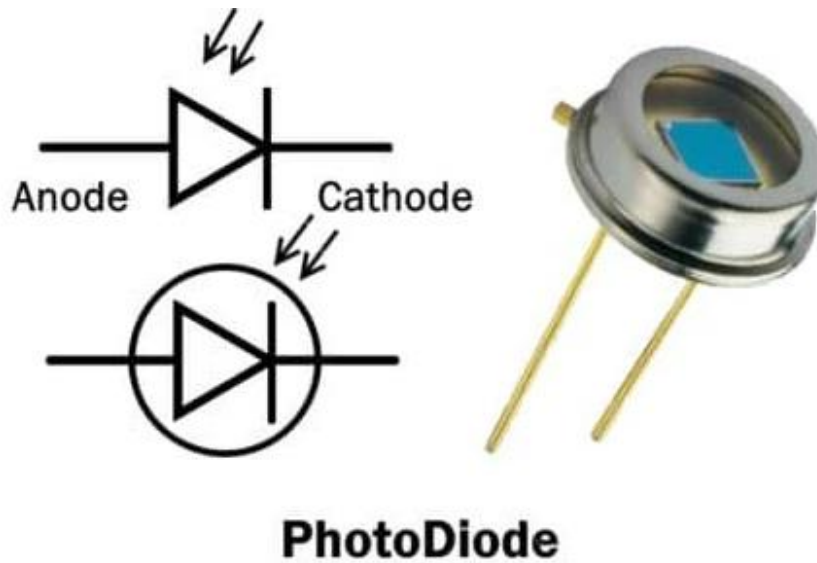


Figure II.4 : photodiode [37]

II.4.3. Le canal : Il existe deux types de configurations de liaison en VLC, en fonction de la présence ou non d'un lien direct entre l'émetteur et le récepteur (LOS ou non-LOS). De plus, l'angle d'ouverture de l'émetteur ainsi que le champ de vision (Field of View – FOV) du récepteur influencent également la liaison [38].

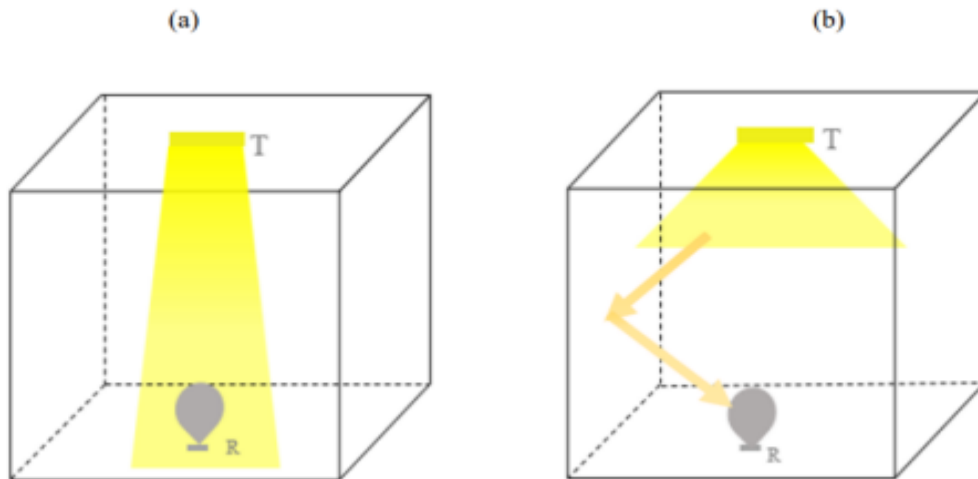


Figure II.5 : Configuration de liaison sur VLC : (a) est LOS et (b) est NLOS, T est un émetteur et R est un récepteur [38]

II.5. Modulations associées aux communications VLC :

Il existe plusieurs techniques de modulation associées aux communications optiques sans fil :

a) La modulation OOK

La modulation On-Off Keying (OOK) est le mode de modulation le plus simple utilisée dans les systèmes VLC car il est possible de communiquer en modulant la lumière. Un moyen facile de moduler la lumière. Cela consiste à allumer la LED pour transmettre un bit « 1 » et à la faire s'éteindre pour transmettre un bit « 0 ». Certains inconvénients de la technologie OOK sont liés à l'interférence des sources lumineuses ambiantes, ce qui peut entraîner des erreurs de réception [39].

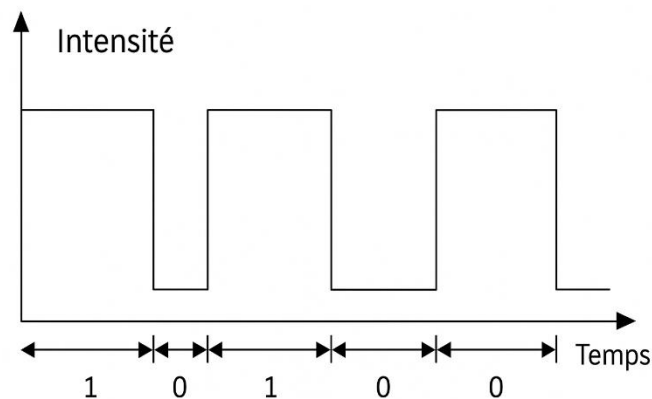


Figure II.6 : La modulation OOK [40]

b) La modulation VPPM

Une autre technique largement utilisée dans les systèmes VLC est la VPPM. Cette méthode utilise deux types de modulation : la modulation par impulsions de position (PPM) et la modulation par impulsions de largeur (PWM). En modulation de position d'impulsion, la largeur et l'amplitude de l'impulsion sont constantes. Cependant, la valeur numérique du signal est donnée par la position de l'impulsion, en fonction du temps. L'un des avantages de la modulation de position d'impulsion est sa simplicité de mise en œuvre. Cependant, une seule impulsion est émise pour chaque symbole, ce qui limite le débit de données. La modulation de largeur d'impulsion fonctionne en fonction de la longueur du signal, qui détermine sa largeur en fonction du temps. En modulation de largeur d'impulsion, la longueur de l'impulsion détermine sa valeur, pour une période donnée [40].

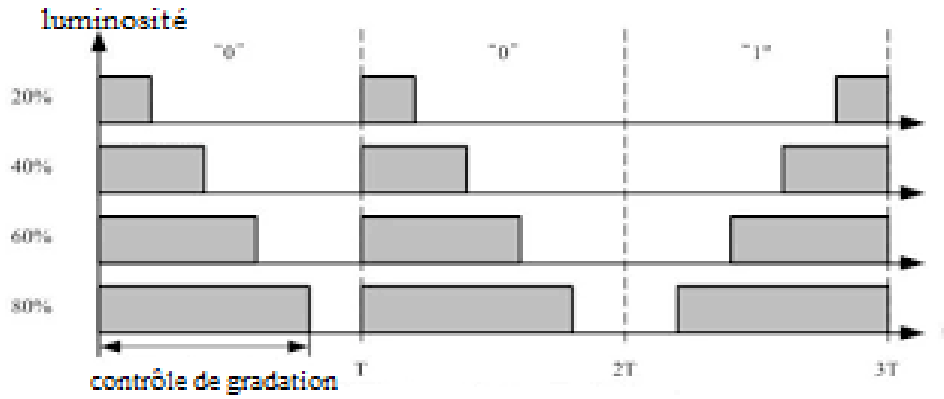


Figure II.7 : La modulation VPPM [39].

c) La modulation OFDM

(Orthogonal frequency division multiplexing) est un schéma de transmission de données parallèles dans lequel des débits de données élevés peuvent être atteints en transmettant des sous-porteuses orthogonales. Il divise des flux de données à haut débit en plusieurs sous-flux à faible débit, chacun modulé sur des sous-porteuses orthogonales distinctes.

L'OFDM bénéficie d'une efficacité spectrale élevée, d'une résistance aux évanouissements multitrajets et d'une égalisation de canal simple. Cependant, il est entravé par une sensibilité au décalage de fréquence porteuse et un rapport puissance moyenne/puissance de crête élevé. De plus, la possibilité de combiner l'OFDM avec n'importe quel schéma d'accès multiple en fait une excellente option pour les applications de communication par lumière visible [41].

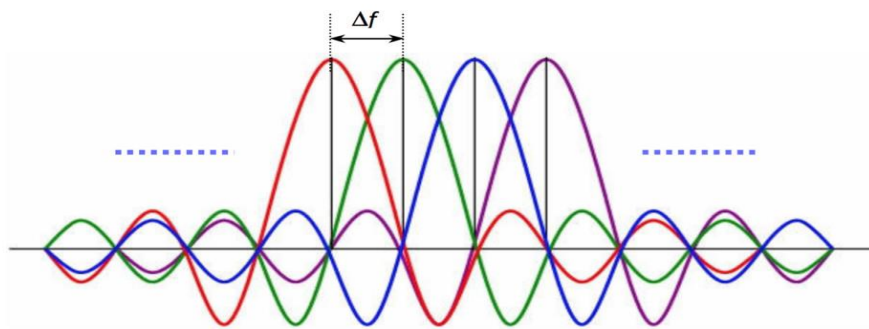


Figure II.8 : Schéma de la modulation OFDM [41].

d) La modulation CSK

Color Shift Keying (CSK) : le signal module la luminosité des trois couleurs qui composent une sorte de LED appelée multi-puce. La LED est composée de trois puces ou

plus de LED, généralement rouges, vertes et bleues. Les trois couleurs sont utilisées pour produire de la lumière blanche. Les modulations OOK et VPPM ont des débits de données faibles, ce qui fait que la modulation CSK est considérée comme un moyen d'améliorer les débits de données, c'est-à-dire pour les systèmes de communication en lumière visible. La modulation CSK est basée sur le diagramme de chromaticité. Il y a sept bandes de longueur d'onde disponibles parmi lesquelles la source RVB peut être choisie. Cette source place le sommet d'un triangle sur lequel se trouvent les points des symboles CSK. Chaque point de couleur du symbole est produit par modulation de l'intensité des puces RVB [43].

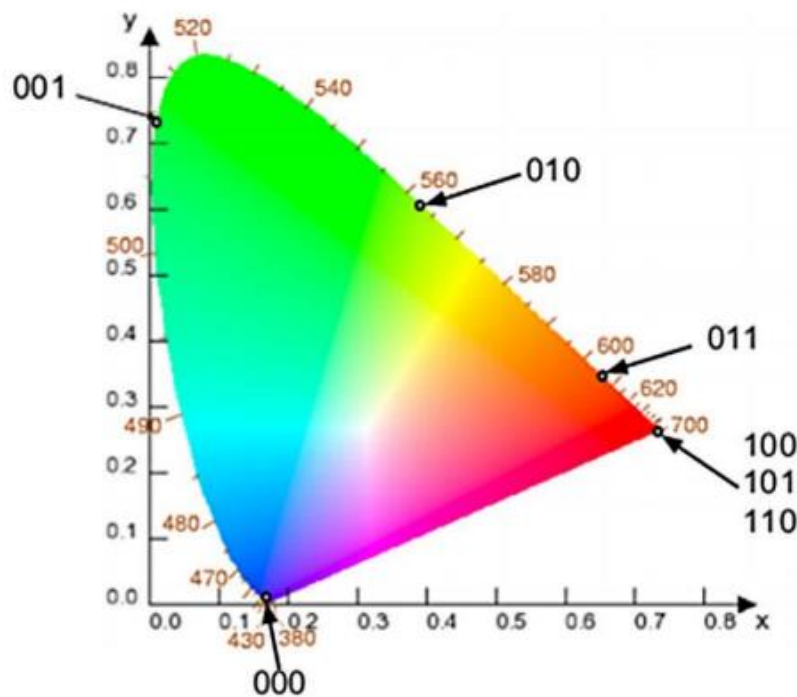


Figure II.9 : La modulation CSK [39].

II.6. Avantages et inconvénients de la technologie VLC :

II.6.1. Avantage :

- L'utilisation d'ondes lumineuses permet de s'affranchir des problèmes de perturbations liés au domaine RF, notamment dans les environnements tels que les avions, les hôpitaux ou les installations industrielles.
- Grâce à la valeur des longueurs d'onde ($\approx$ nm) comparée aux dimensions des récepteurs ($\approx$ cm), cette technologie n'est pas sujette aux évanouissements dus aux trajets multiples.
- La bande passante disponible pour cette technologie s'étend sur plusieurs GHz et

peut être utilisée sans restriction.

- Le VLC permet une double fonctionnalité : éclairage et communication. Les LED utilisées pour l'éclairage peuvent simultanément transmettre des données, ce qui réduit les besoins en infrastructure et en maintenance.

II.6.2. Inconvénients :

- Elle nécessite que la source et le récepteur soient en visibilité directe (LOS).
- Portée de transmission limitée (3 à 5,5 m) avec des LED standard du commerce.
- L'impossibilité pour la lumière de traverser le matériau opaque pose de sérieux problèmes de blocage. Si le récepteur est bloqué par un objet, aucun signal lumineux ne peut l'atteindre, rompant ainsi la liaison avec le signal transmis.
- Dans certains cas, la lumière visible peut également avoir un impact physiologique. (Il est possible d'observer des effets de scintillement lors de la transmission d'informations). Cela entraîne une gêne visuelle, voire des nausées. Cependant, de nombreuses méthodes de modulation du signal permettent de résoudre ce problème.
- Il est à noter que cette technologie peut être perturbée par de nombreuses sources de bruit optique ambiant, telles que le soleil, les lampes à incandescence ou toute autre source lumineuse.

II.7. Domaine application VLC

Les caractéristiques intrinsèques de la VLC incluent une large bande passante, l'absence de risques pour la santé, une faible consommation d'énergie et l'utilisation de canaux sans licence, ce qui la rend particulièrement attrayante pour une utilisation pratique. Ci-dessous sont présentés quelques scénarios d'application de la VLC :

II.7.1. Indoor

II.7.1.1. Li-Fi

En 2011, Harald Haas a été le premier à introduire le terme « Light Fidelity » (Li-Fi) [44]. Le Li-Fi est un système de communication sans fil bidirectionnel à haut débit, entièrement connecté et fonctionnant à partir de la lumière visible, à l'image du Wi-Fi, qui, lui, utilise les ondes radio (RF) pour transmettre les données. Cependant, les signaux Wi-Fi peuvent provoquer des interférences avec d'autres signaux radiofréquences, en particulier ceux utilisés par les équipements de navigation aérienne. Par conséquent, dans les environnements

sensibles aux rayonnements électromagnétiques, le Li-Fi représente une alternative plus sûre. Il s'intègre également dans l'écosystème de l'Internet des objets (IoT), grâce à sa capacité à connecter efficacement une multitude d'appareils. Le Li-Fi permet d'atteindre des débits allant jusqu'à 10 Gbit/s, soit environ 250 fois plus rapides que ceux du très haut débit classique [45].



Figure II.10 : Technologie Li-Fi [46].

II.7.1.2. Aviation

Dans les cabines d'aéronefs, l'utilisation des ondes radio par les passagers est souvent restreinte en raison de la sensibilité des systèmes de navigation aux interférences électromagnétiques. Ainsi, la communication par lumière visible (VLC) représente une solution idéale. Chaque source d'éclairage à bord pourrait devenir un émetteur potentiel de VLC, permettant non seulement d'assurer l'éclairage, mais aussi de fournir des services multimédias aux passagers. En outre, cette technologie permettrait de réduire les coûts de construction de l'avion ainsi que son poids, en limitant le recours aux câblages lourds [47].

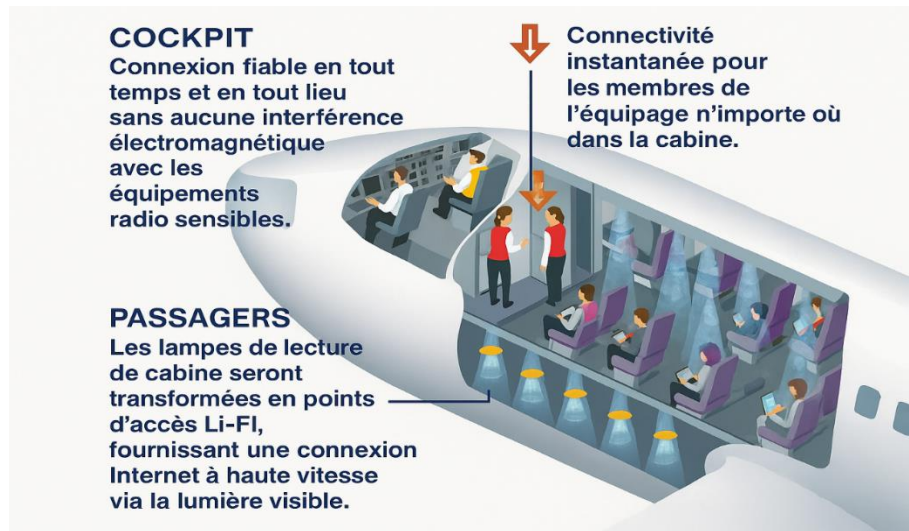


Figure II.11 : L'utilisation de VLC dans les avions [48].

II.7.1.3. Hôpitaux

Avec les progrès technologiques de la numérisation médicale, les hôpitaux traditionnels se transforment en hôpitaux numériques. De plus en plus d'appareils médicaux dotés de capacités de communication sans fil sont déployés et de plus en plus d'appareils portables sont intégrés au corps des patients, comme les stimulateurs cardiaques. De graves problèmes d'interférences électromagnétiques doivent être pris en compte, car ils compromettent la sécurité médicale.

Dans ce contexte, la technologie VLC (Visible Light Communication) est explorée comme solution expérimentale au sein du bloc opératoire numérique. En remplaçant les communications radio par la lumière visible, elle permettrait de réduire considérablement les interférences électromagnétiques tout en assurant une connectivité fiable et sécurisée [49].



Figure II.12 : Transmission vidéo avec VLC dans la salle d'opération numérique [49].

II.7.1.4. Industrielle

Dans les environnements industriels, la communication par lumière visible permet une communication en temps réel entre les machines, garantissant un transfert de données précis et efficace. Ceci est particulièrement important dans les usines de fabrication, où une communication rapide peut améliorer l'efficacité de la production et réduire les temps d'arrêt. La communication par lumière visible offre également une solution pour les systèmes d'éclairage industriel, combinant les fonctionnalités d'éclairage et de communication de données afin de réduire la consommation d'énergie et l'encombrement [50].

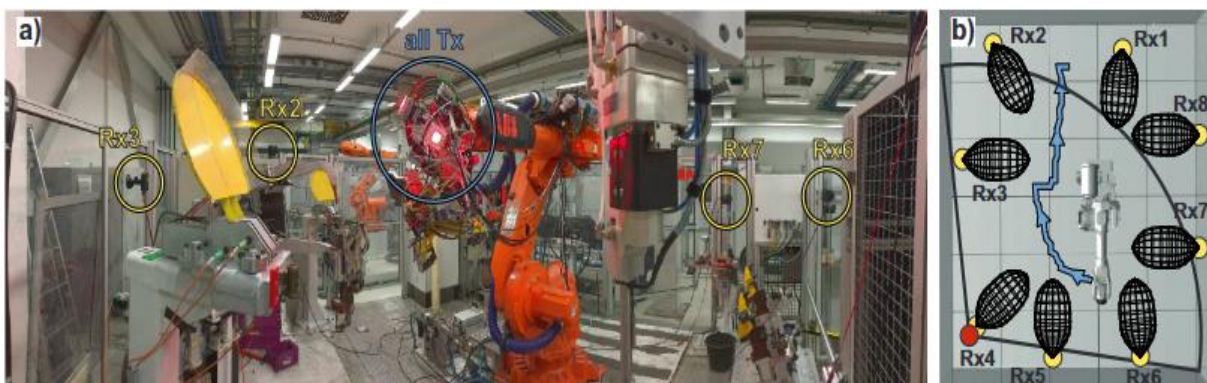


Figure II.13 : (a) Cellule de fabrication utilisée pour les expériences dans l'installation d'essai de robots de BMW ; et (b) la trace du mouvement du bras du robot étudiée [52].

II.7.2. OUTDOOR

Concernant les applications extérieures, il existe un domaine où la technologie VLC propose une solution performante là où la technologie RF n'en apporte pas.

II.7.2.1. Communications sous-marines

La technologie VLC permet une transmission de données à haut débit sous l'eau, là où les technologies sans fil, telles que la radiofréquence (RF), sont inefficaces en raison de leur mauvaise propagation dans l'eau de mer. Ils offrent ainsi une solution pour assurer l'éclairage, les communications et le transfert de données entre les plongeurs ou les véhicules sous-marins télécommandés.

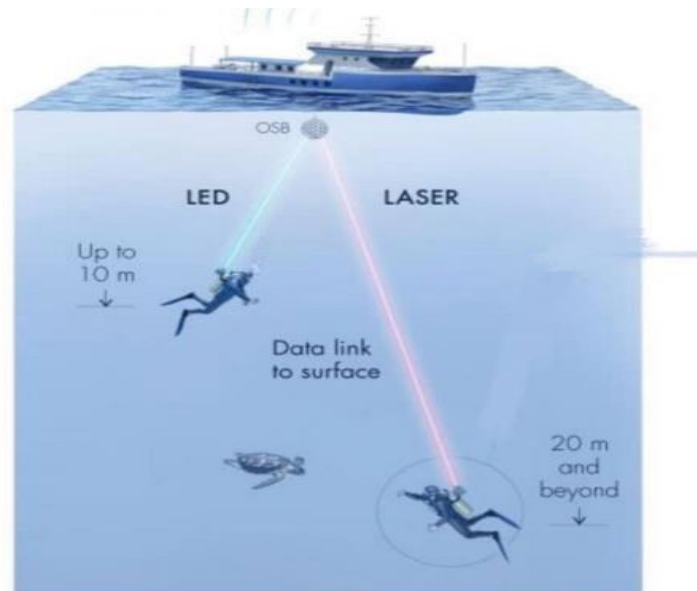


Figure II.14 : Utilisation de VLC dans la communication sous-marine [53].

II.7.2.2. Véhicule et transport

Dans la vie moderne, les véhicules occupent une place essentielle dans la vie quotidienne. La technologie VLC peut être exploitée dans les systèmes de transport intelligents (ITS) pour améliorer la sécurité et l'efficacité. En remplaçant les feux avant et arrière des voitures par des LED, il devient possible d'établir une communication de véhicule à véhicule (V2V), réduisant ainsi les risques d'accidents grâce à l'échange instantané d'informations.

De plus, dans la communication infrastructure-véhicule (I2V), les lampadaires équipés

de caméras peuvent surveiller la circulation, détecter les embouteillages ou les urgences, puis envoyer les informations directement via la technologie LiFi au centre de gestion du trafic pour une action rapide [54].

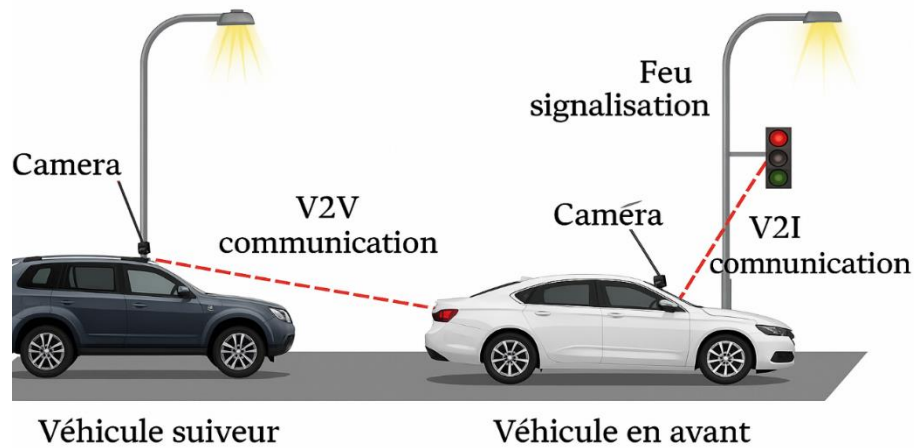


Figure II.15 : Communication de véhicule à véhicule [55].

II.8. Différence entre VLC et Li-Fi

La VLC (Communication par Lumière Visible) est une technologie de communication optique sans fil qui utilise la lumière visible pour transmettre des données. Elle englobe un large éventail d'applications, allant de la localisation en intérieur aux communications entre appareils.

Le Li-Fi (Light Fidelity), quant à lui, représente une application spécifique de la VLC visant à fournir un accès à Internet sans fil via des LED. Ainsi, tout système Li-Fi repose sur la technologie VLC, mais toutes les applications VLC ne sont pas du Li-Fi. En résumé, le Li-Fi est au VLC ce que le Wi-Fi est aux ondes radio [56].

II.9. Comparaison entre Li-Fi et Wi-Fi :

Li-Fi est un terme technique utilisé pour la communication sans fil à haut débit dans la technologie de communication à lumière visible. Elle tient son nom de sa similitude avec le Wi-Fi, qui utilise seulement l'onde lumineuse au lieu d'ondes radio [52]. Lorsqu'on compare le Wi-Fi et le Li-Fi, il est très difficile de choisir l'un ou l'autre, car chacun présente ses propres avantages et inconvénients. C'est pourquoi il est nécessaire d'adopter une approche différente et d'envisager ces technologies sous un angle différent.

Une idée reçue répandue concernant les systèmes Li-Fi est qu'ils ont été créés pour remplacer le Wi-Fi. Étant donné que la plupart des infrastructures existantes sont déjà conçues pour accueillir la technologie RF, il serait très coûteux et fastidieux de les remplacer toutes pour céder la place à une technologie plus récente. C'est pourquoi le Li-Fi doit être considéré comme une technologie complémentaire visant à améliorer les performances de la technologie existante et à alléger le spectre radio déjà encombré utilisé pour les connexions Wi-Fi [57]. Les caractéristiques de comparaison entre LI-FI et WI-FI sont récapitulées dans le tableau.

Tableau II.1 : Les caractéristiques de comparaison entre LI-FI et WI-FI.

Propriétés	Li-Fi (Light Fidelity)	Wi-Fi (Wireless Fidelity)
Spectre	Lumière Visible	Radio Fréquence
Couverture	Autour de 10 mètres	Autour de 32 mètres (WLAN 802.11b/11g),
Débit de Données	> 10Gbps	< 1Gbps
Consommation d'énergie	Faible	Haut
Bande passante	Non limitée.	Limitée
Coût	Bas	Plus élevé
Opérations	Le Li-Fi émet les données à travers la lumière de lampes LED.	Le Wi-Fi émet les données par ondes radio à travers un routeur Wi-Fi.
Densité de données	Fonctionne dans un environnement très dense.	Fonctionne dans un endroit moins dense.
Composants du système	Le pilote de lampe, l'ampoule LED et le photodétecteur.	Nécessite l'installation de routeurs, les appareils des utilisateurs
Applications	Hôpitaux, les avions, les musées, les bureaux...	Surfer sur l'internet en utilisant les points d'accès Wi-Fi.
Modulation	ACO/DCO-OFDM	OFDM, Direct Sequence Spread Spectrum (DSSS)
Interférence	Faible	Elevé
Standard	IEEE 802.15.xx	IEEE 802.11.xx

II.10. Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons présenté la définition et le principe de fonctionnement des technologies de communication par la lumière visible sans fil, ainsi que les notions de base associées et l'architecture d'un tel système.

Nous avons également exposé ses différentes applications dans divers domaines. Ensuite nous avons présenté une étude comparative entre le Li-Fi, qui utilise la partie optique du spectre électromagnétique, et le Wi-Fi, qui exploite la partie radio du même spectre, a été présenté.

Chapitre III

Logiciels et matériels

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons les aspects logiciels et matériels de notre projet. Nous travaillerons sur la conception d'un robot Scara avec SolidWorks et la création d'un circuit imprimé électrique avec KiCad. Nous décrirons les technologies employées, détaillerons les étapes de développement du projet et clarifierons les résultats obtenus par des expériences pratiques.

III.2. Partie logicielle

III.2.1. Conception mécanique

III.2.1.1. SOLIDWORKS

Le logiciel SOLIDWORKS est un modelleur volumétrique permettant la création de pièces 3D complexes. Ces pièces peuvent ensuite être utilisées pour créer des mises en plan 2D et des assemblages de plusieurs pièces. SOLIDWORKS est un système piloté par les cotes. Il est possible de spécifier les cotes et les relations géométriques entre les éléments. Une modification de cote entraîne une modification de la taille de la pièce tout en préservant l'intention de conception. Un modèle SOLIDWORKS est composé de pièces, d'assemblages et de mises en plan, et affiche le même modèle dans différents documents.



Le logiciel SolidWorks permet de :

- Concevoir des objets en 3D de manière très précise.
- Développer des produits.
- Vérifier la conception
- Mettre en place des mises en plan 2D.
- Créer des images et animations de vos objets 3D.

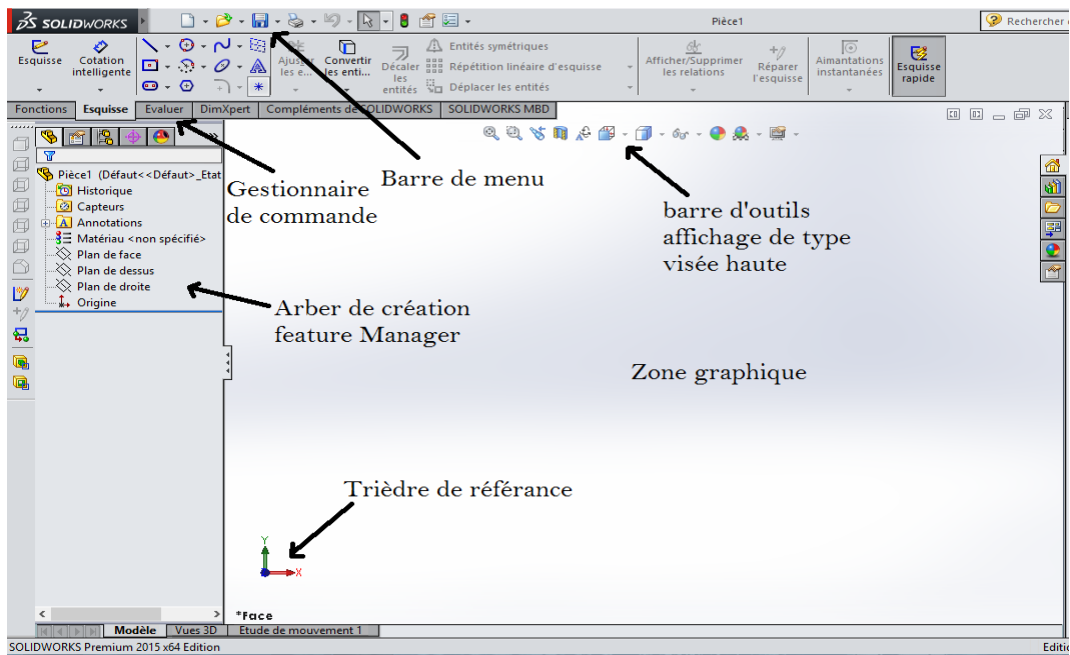
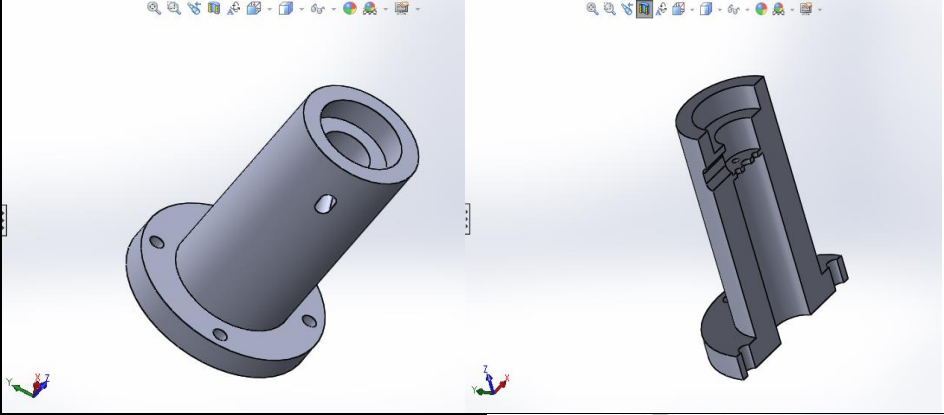
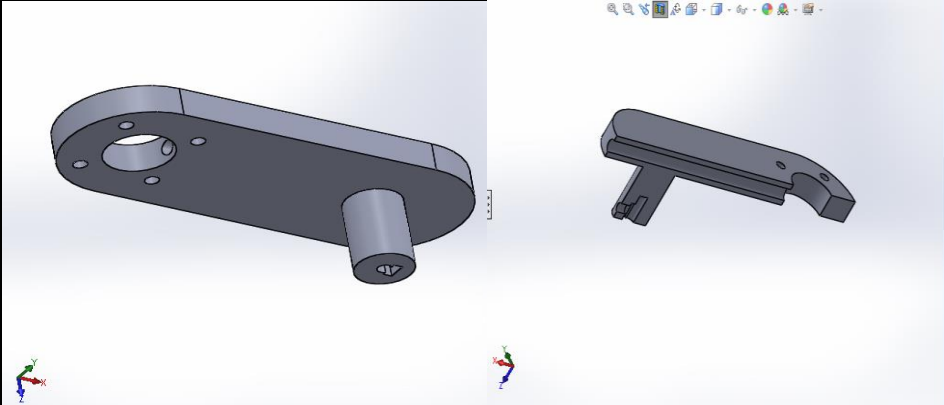
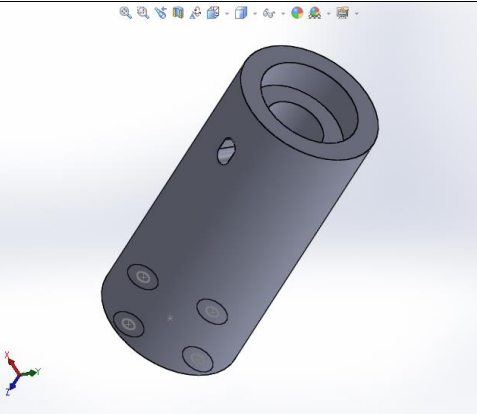
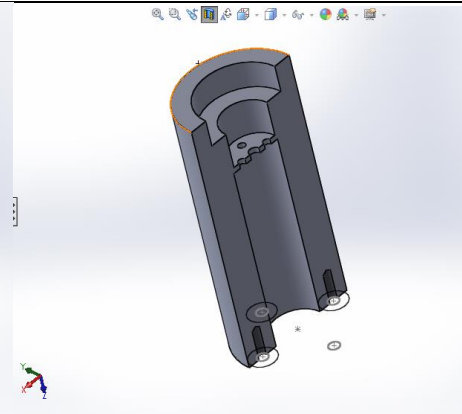
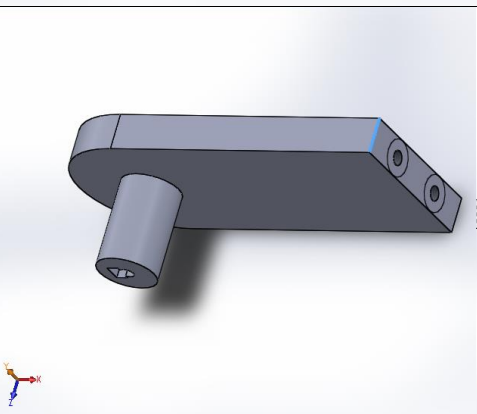
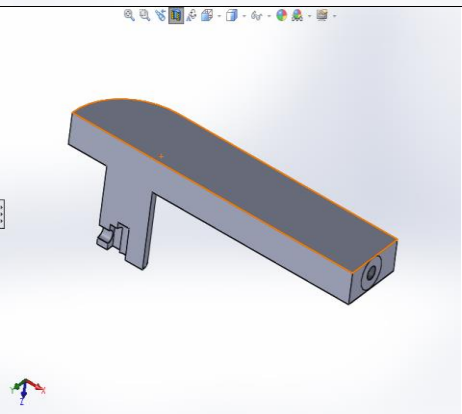
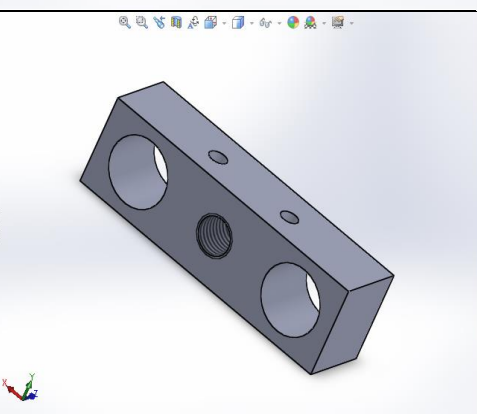
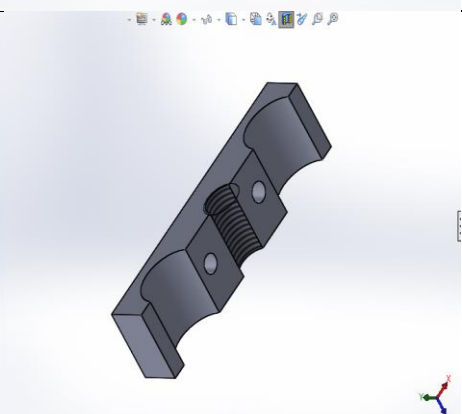
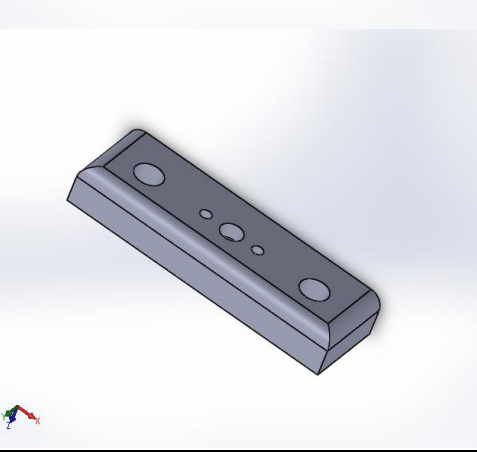
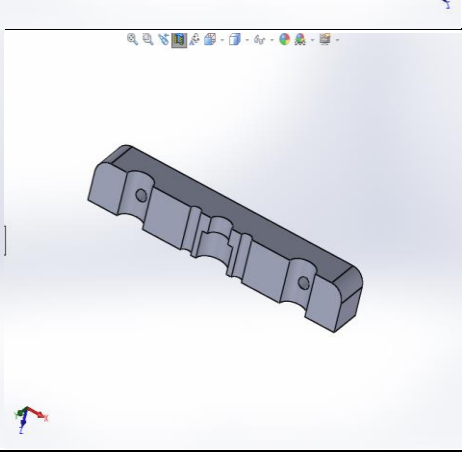
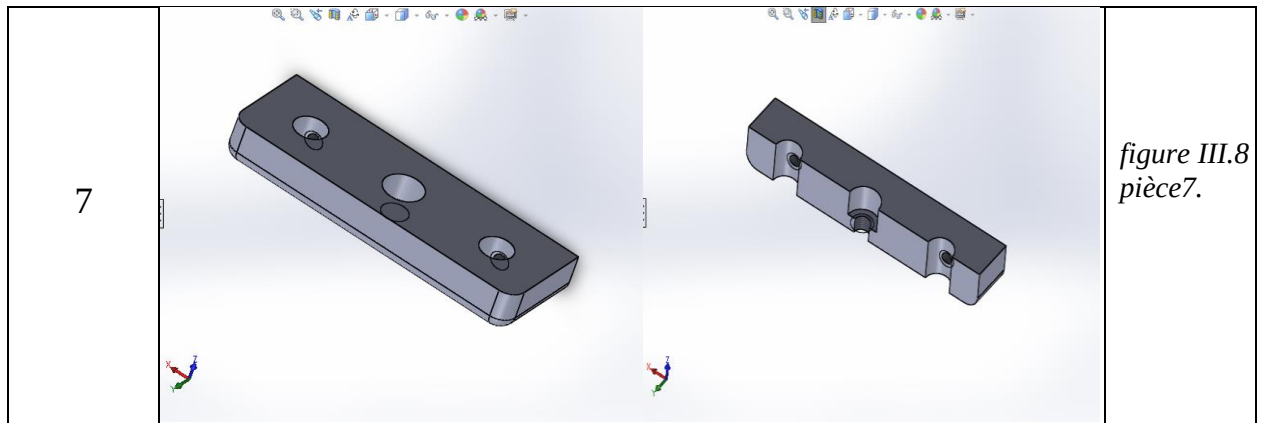


Figure III.1 : Interface de SolidWorks.

III.2.1.2. Conception des pièces :

N figures	Figure	Titre
1		figure III.2 pièce1.
2		figure III.3 pièce2.

3			<i>figure III.4 pièce3.</i>
4			<i>figure III.5 pièce4.</i>
5			<i>figure III.6 pièce5.</i>
6			<i>figure III.7 pièce6.</i>



III.2.1.3. L'assemblage des pièces

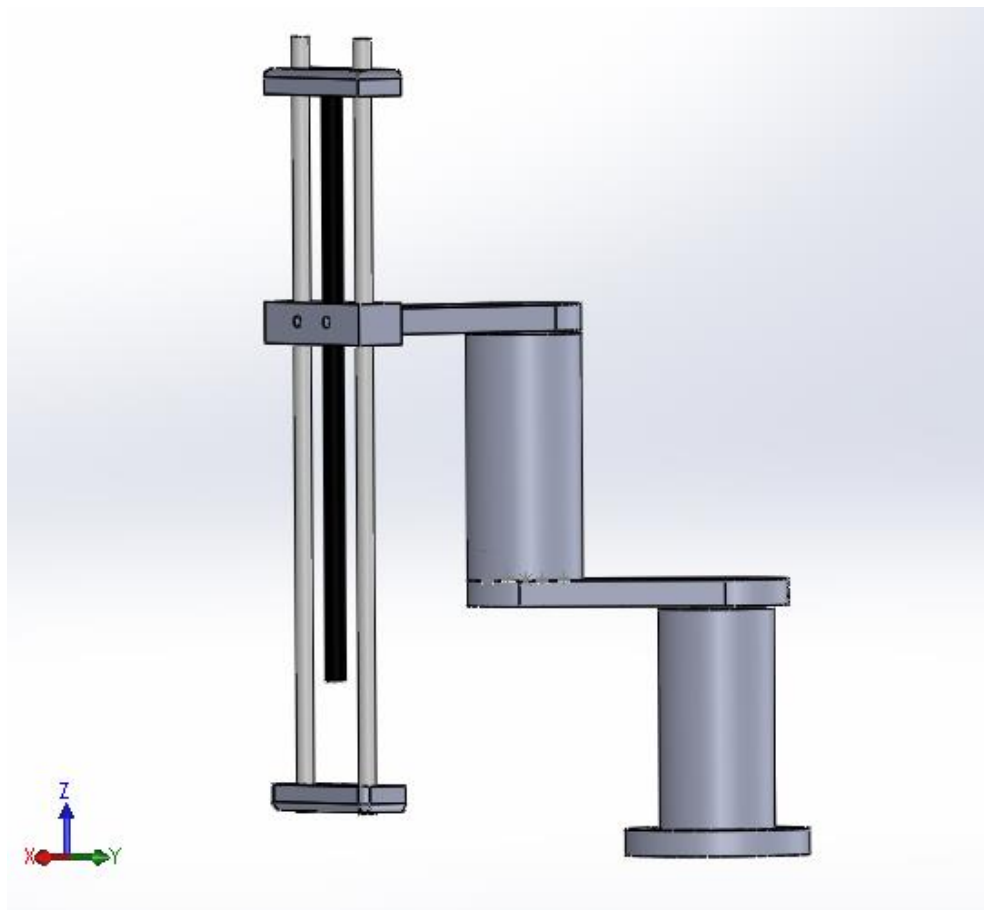


Figure III.9 : Assemblage de bras manipulateur SCARA in SolidWorks.

III.2.1.4. Impression 3D des pièces mécaniques

Une fois toutes les pièces nécessaires conçues dans SolidWorks, nous les imprimons à

l'aide d'une imprimante 3D de logiciel CREALITY en utilisant du plastique. Cependant, nous n'imprimons pas toutes les pièces, car certaines seront achetées et modifiées selon nos besoins, telles que les tiges et les roulements.

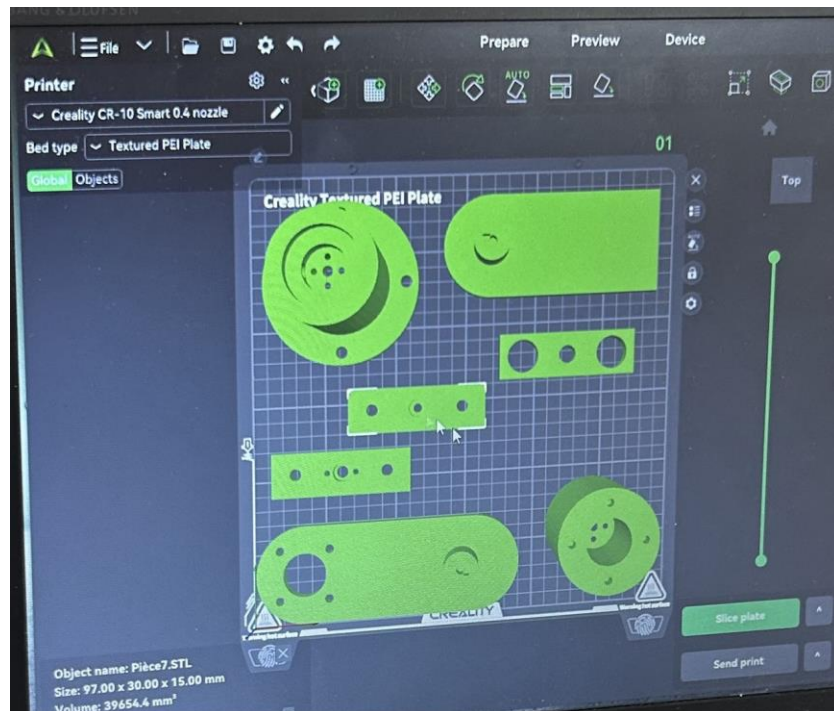


Figure III.10 : L'impression les pièces in CREALITY.

III.2.1.5. Composants mécaniques du robot

La figure suivante montre toutes les pièces nécessaires au montage du robot SCARA. On y trouve les pièces imprimées en 3D, les moteurs, les roulements, ainsi que les tiges lisses et filetage mécaniques, prêts pour l'assemblage final.



Figure III.11 : Toutes les pièces nécessaires.

III.2.2. Conception électronique

III.2.2.1. KiCad

KiCad est une suite logicielle open-source dédiée à la conception de circuits électroniques. Elle permet de créer des schémas électriques, de concevoir des circuits imprimés (PCB), et de préparer des fichiers de fabrication (Gerber) nécessaires à la production.



Le logiciel KiCad offre plusieurs fonctionnalités majeures :

- Dessiner des schémas électriques détaillés.
- Organiser et gérer les bibliothèques de composants électroniques.
- Placer et router les pistes sur plusieurs couches pour la conception de PCB complexes.
- Vérifier l'intégrité électrique à l'aide d'outils de validation (ERC, DRC).
- Générer des vues 3D réalistes des circuits imprimés pour la visualisation et la validation mécanique.

III.2.2.2. Conception du schéma électrique et sélection des composants

Dans un premier temps, l'ensemble des composants nécessaires au fonctionnement du robot SCARA (microcontrôleur STM32, moteurs à courant continu, encodeurs, alimentation, électroaimant) a été sélectionné en fonction des contraintes techniques du projet. Le schéma électrique a été élaboré à l'aide de l'éditeur de schémas de KiCad, en veillant à assurer la cohérence des connexions entre les différents modules. Une attention particulière a été portée à la bonne répartition des tensions d'alimentation, à la compatibilité des niveaux logiques et à la protection des composants sensibles.

Dans le cadre de la conception du circuit imprimé (PCB), une sélection rigoureuse des composants électroniques a été effectuée selon les besoins fonctionnels du robot. Parmi les éléments principaux, on trouve :

- des régulateurs de tension à découpage (comme le LM2596) assurant une alimentation stable,
- des drivers de moteurs L298N pour le pilotage des moteurs à courant continu,
- des condensateurs électrolytiques et SMD pour le filtrage des tensions,
- des diodes de protection (y compris des diodes de roue libre pour les moteurs),
- des résistances de commande,

- un transistor MOSFET destiné à la commande de l'électroaimant,
- une carte de développement STM32 jouant le rôle de contrôleur principal du système.

Tous les composants ont été placés principalement sur la couche supérieure du PCB afin d'optimiser le routage et de faciliter le processus d'assemblage

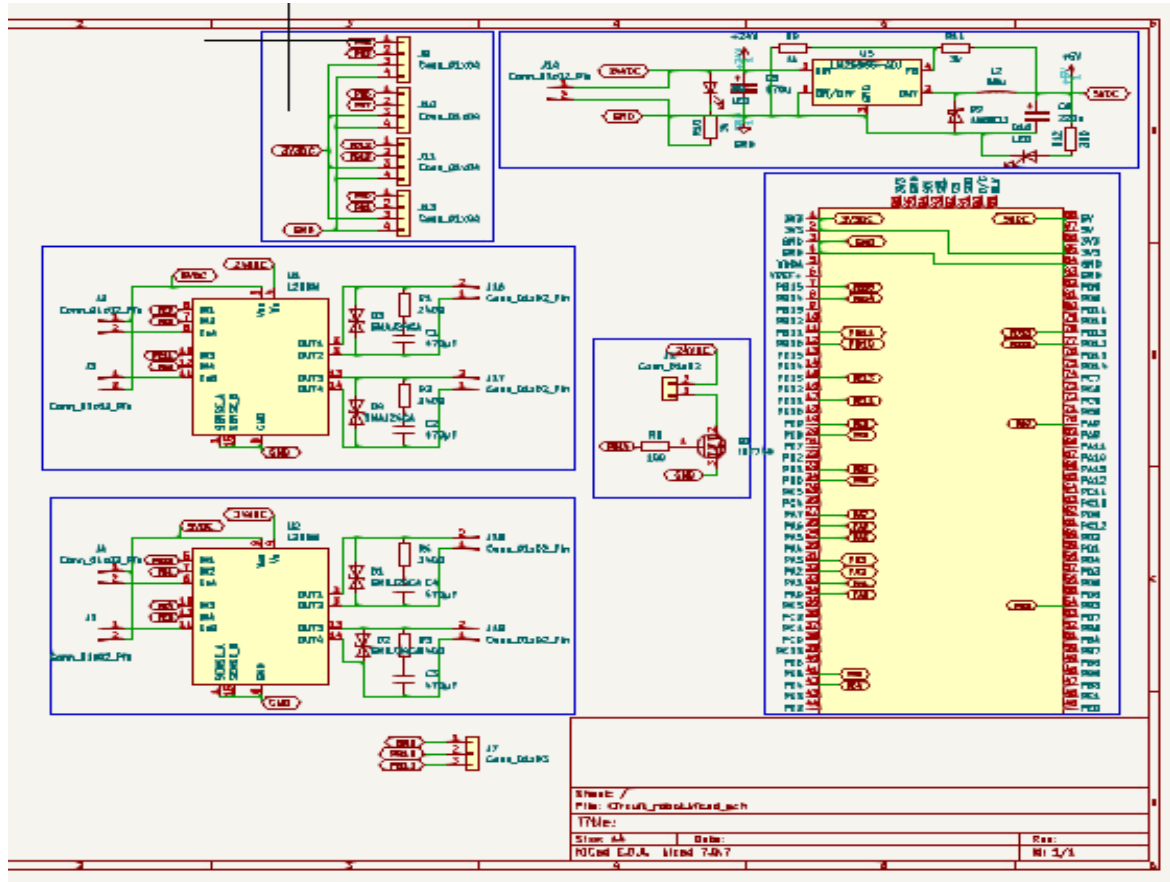


Figure III.12 : Schéma électrique global.

a) Circuit d'alimentation et régulation de tension

Le circuit d'alimentation a été conçu pour fournir une tension stable de +5V à partir d'une source d'entrée de +12V. Cette conversion est assurée par un régulateur à découpage LM2596S-ADJ, réputé pour son rendement élevé et sa capacité à maintenir une tension de sortie constante malgré les variations de charge [58].

Le schéma comprend les composants suivants :

- Entrée 12V : alimentation principale du système.
- Diode de protection pour éviter les inversions de polarité.
- Condensateurs électrolytiques pour le filtrage des bruits.
- Régulateur LM2596S-ADJ : convertisseur Buck qui réduit le 12V à 5V.

- Inductance (L2), diode Schottky (1N5822), et condensateurs de sortie pour garantir une sortie 5V propre et stable.
- LEDs d'indication pour visualiser l'état de fonctionnement de l'alimentation.

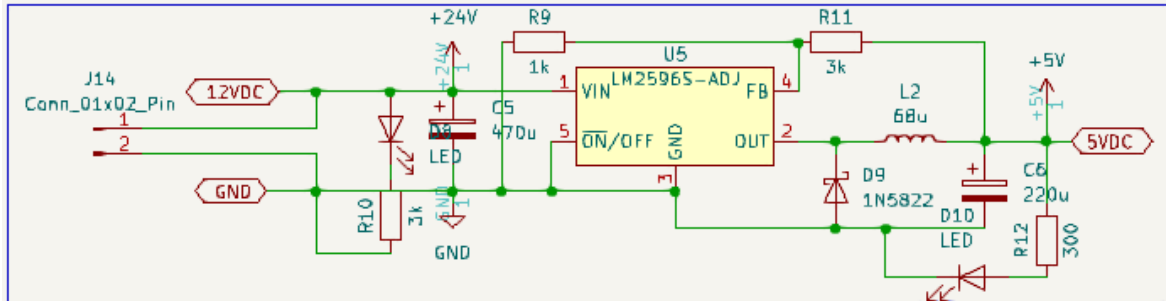


Figure III.13 : Module d'alimentation LM2596S.

b) Commande des moteurs à courant continu (L298N)

Deux circuits L298N sont utilisés comme ponts en H pour la commande de deux moteurs à courant continu. Chaque L298N permet de contrôler un moteur dans les deux sens de rotation avec modulation de la vitesse via PWM [59]. Ces modules jouent un rôle central dans le déplacement des bras du robot SCARA.

Chaque module comprend :

- Une alimentation double : 12V pour la puissance moteur et 5V pour la logique de commande.
- Des diodes de roue libre (D1–D4) pour protéger les transistors internes contre les surtensions dues aux variations du champ magnétique dans les bobines du moteur.
- Des connecteurs (J2–J5) assurant l'interface avec le STM32 pour le pilotage (IN1–IN4, ENA, ENB).

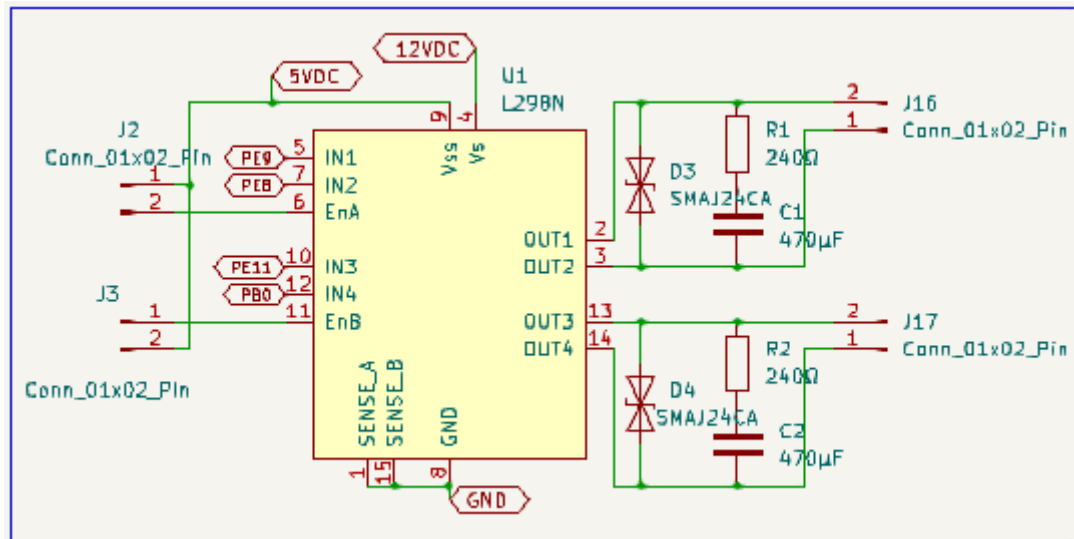


Figure III.14 : Commande moteur L298N.

c) Microcontrôleur STM32

Le cœur du système est un microcontrôleur STM32 de la famille ARM Cortex-M, offrant une grande flexibilité d'E/S, des minuteries PWM et des interfaces de communication série. Il est représenté dans la partie droite du schéma avec toutes ses broches disponibles sur des connecteurs (port PA, PB, PC, etc.).

Il est alimenté en **3.3V** pour le cœur logique et reçoit également une tension de 5V pour alimenter certains périphériques. Il contrôle directement :

- les ponts en H (via PWM et GPIO).
- l'électroaimant.
- les encodeurs.
- la communication avec d'autres cartes (Arduino, PC via UART ou USB).

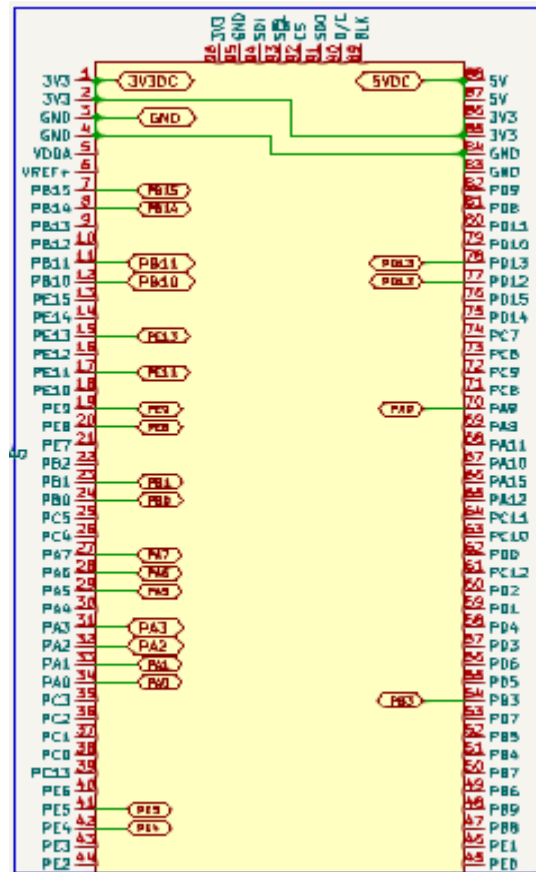


Figure III.15 : Microcontrôleur STM32

d) Circuit de commande de l'électroaimant

L'électroaimant utilisé pour le système de préhension est commandé à l'aide d'un transistor NPN configuré en interrupteur électronique. Celui-ci permet de commuter la charge de l'électroaimant alimenté en 12V à partir d'un simple signal logique fourni par le STM32. Une diode de roue libre est placée en parallèle avec l'électroaimant pour éviter les pics de tension lors de la coupure du courant.

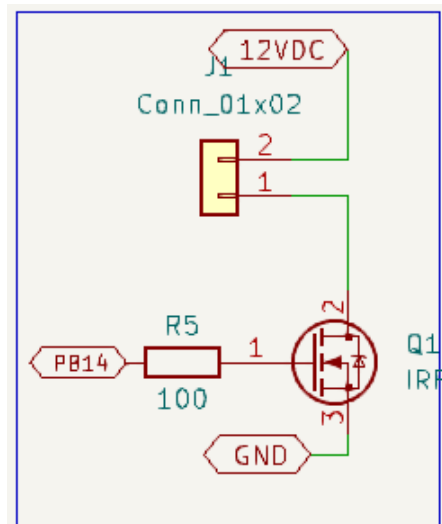


Figure III.16 : Circuit de commande de l'électroaimant.

e) Interfaces capteurs et encodeurs

Plusieurs connecteurs sont prévus pour recevoir les signaux des encodeurs incrémentaux attachés aux moteurs. Ces encodeurs permettent de mesurer la position angulaire et la vitesse des bras du robot. Les signaux sont dirigés vers les entrées numériques du STM32, qui les interprète à l'aide de ses compteurs/quadrature encodeurs pour réaliser le contrôle en boucle fermée.

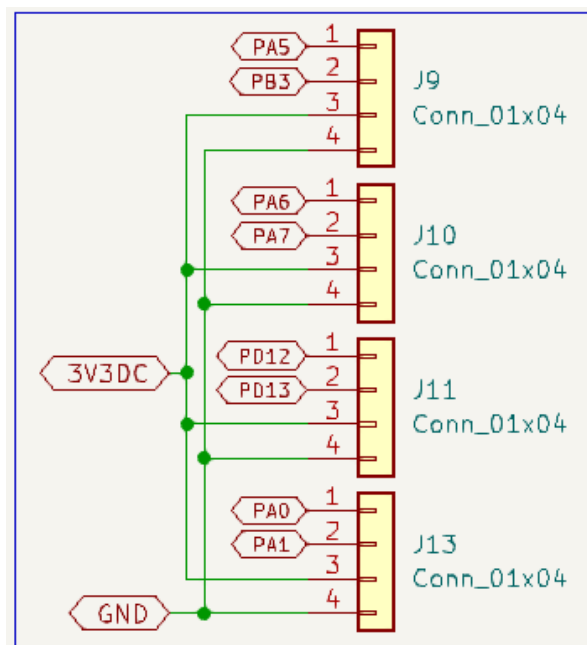


Figure III.17 : Les connecteurs d'encodeurs.

III.2.2.3. La carte PCB

La phase de conception du circuit imprimé a été réalisée avec le logiciel KiCad, après l'achèvement du schéma électrique. La carte a été conçue en double couche, mais avec un placement unilatéral : l'ensemble des composants électroniques a été placé exclusivement sur la couche supérieure (Top Layer) (A). Ce choix facilite l'assemblage manuel et permet une meilleure accessibilité lors des tests.

La couche inférieure (Bottom Layer) (B) n'a été utilisée que pour le routage des pistes conflictuelles, c'est-à-dire les connexions qui ne pouvaient pas être établies sur la couche supérieure sans croisement. Cette technique de routage permet de :

- Réduire les interférences électromagnétiques en minimisant la superposition des pistes de puissance et de signal.
- Optimiser l'espace disponible tout en maintenant une disposition logique et ordonnée.
- Conserver une structure compacte et facile à imprimer.

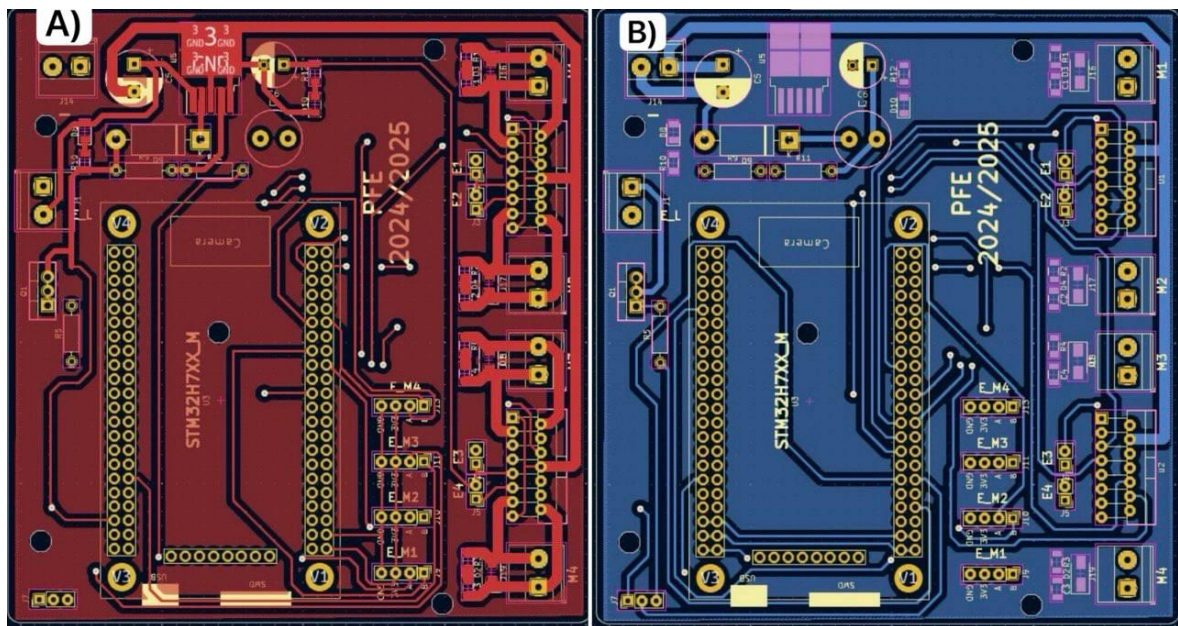


Figure III.18 : (A) couche supérieure (B) couche inférieure de la carte PCB

III.2.2.4. Visualisation 3D de la carte

Finalement, une modélisation 3D de la carte électronique a été réalisée pour vérifier l'assemblage mécanique et de vérifier les dimensions globales, détecter d'éventuels problèmes avant fabrication.

La vue 3D offre une projection réaliste de la carte finie, incluant :

- La hauteur des composants (condensateurs, borniers, circuits intégrés...).
- La position des connecteurs pour l'alimentation, les moteurs, et les signaux de commande.
- La densité d'encombrement sur la couche supérieure.
- L'alignement des pastilles et des vias traversants.

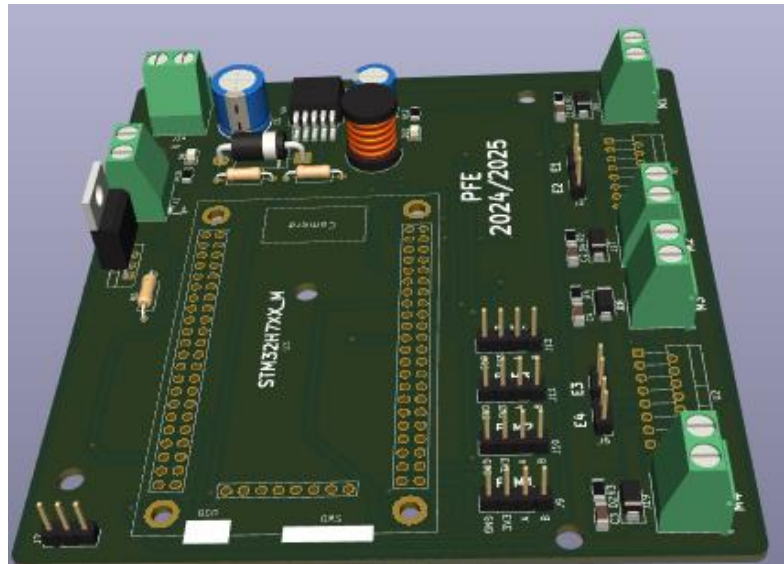


Figure III.19 : Visualisation 3D de la carte PCB finale réalisée avec KiCad.

III.2.2.5. Fabrication et assemblage de la carte électronique :

Après avoir finalisé la conception du circuit imprimé sur le logiciel KiCad, une première version de la carte réelle a été réalisée dans le laboratoire de notre université à l'aide d'une machine CNC, permettant le fraisage des pistes et le perçage des trous. Toutefois, cette carte présentait quelques défauts physiques visibles (éraflures), comme on peut le voir sur la photo (A). Pour garantir une meilleure qualité et fiabilité, une nouvelle carte (B) a été commandée auprès de la société SNC ALMITech, spécialisée dans la fabrication de circuits imprimés. Cette nouvelle version, de finition professionnelle, a permis de poursuivre le projet avec une base matérielle stable et soignée.

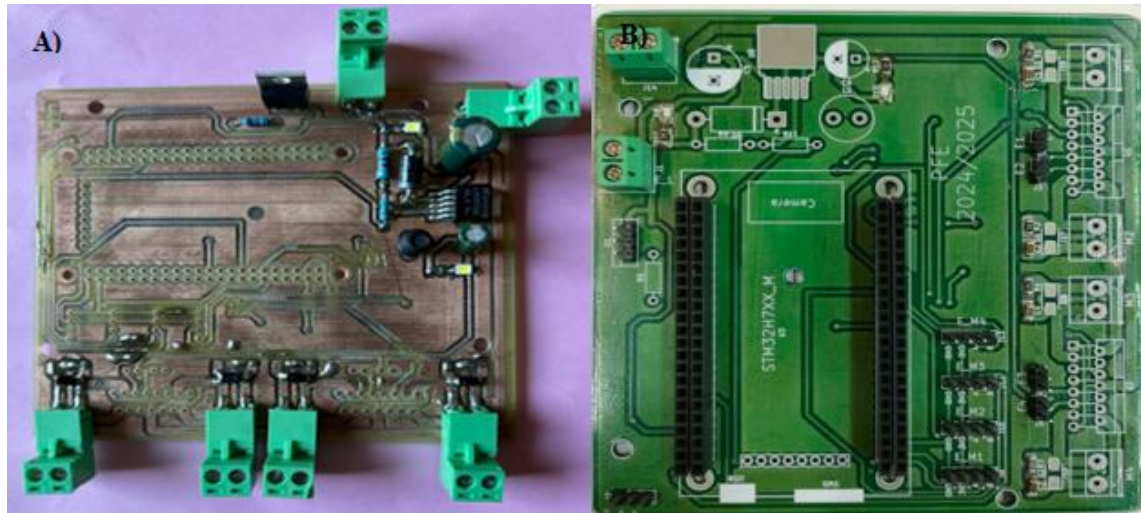


Figure III.20 : carte-réelle.

III.2.3. Programmation et outils de développement

III.2.3. 1. STM32CubeIDE

STM32CubeIDE est un environnement de développement intégré (IDE) proposé par STMicroelectronics pour la configuration, la programmation et le débogage des microcontrôleurs de la gamme STM32. Cet IDE combine des outils essentiels tels que STM32CubeMX pour la configuration matérielle, un éditeur basé sur Eclipse, le compilateur open-source ARM-none-eabi-gcc et un débogueur compatible avec les programmeurs ST Link.



Parmi ses principaux avantages, STM32CubeIDE offre une interface visuelle intuitive permettant de configurer facilement les périphériques embarqués (USART, GPIO, timers, CAN, I2C, SPI, etc.) via une interface graphique. L'IDE génère automatiquement le code d'initialisation matérielle en utilisant les bibliothèques HAL (Hardware Abstraction Layer) ou LL (Low Layer), assurant une abstraction matérielle optimale et une grande portabilité.

Pour le développement, STM32CubeIDE inclut un éditeur avec coloration syntaxique, des suggestions intelligentes (IntelliSense), la navigation entre fonctions et la détection d'erreurs en temps réel. Il prend en charge les projets basés sur CMake et Makefile, facilitant leur intégration dans des workflows complexes [60].

Pour le débogage, l'outil propose des fonctionnalités avancées telles que l'analyse des registres, des variables, des interruptions et des points d'arrêt conditionnels. Des vues graphiques permettent également de visualiser l'état des périphériques. Une console intégrée permet la communication UART directe avec le microcontrôleur.

STM32CubeIDE prend en charge tous les microcontrôleurs STM32 basés sur l'architecture ARM Cortex-M et est compatible avec Windows, Linux et macOS, ce qui en fait une solution idéale pour les projets industriels, académiques et les prototypages rapides [61].

III.2.3.2. Arduino

Arduino est une plateforme open source et un environnement de développement intégré pour le prototypage électronique. La plateforme se compose de deux éléments principaux : des cartes matérielles (comme les Arduino Uno, Mega, Nano, etc.) et l'environnement de développement intégré (IDE Arduino). Multiplateforme (Windows, Mac, Linux), elle permet d'écrire du code en C ou C++ et de le transférer sur des cartes compatibles Arduino. Facile à utiliser, elle est idéale pour tous ceux qui souhaitent créer des projets [62].



III.2.3.3. Matlab

MATLAB est un langage de haut niveau conçu pour le calcul technique. Il intègre le calcul numérique, la visualisation et la programmation dans un environnement convivial et interactif. En outre, MATLAB prend en charge les structures de données avancées, propose des outils intégrés d'édition et de débogage, et supporte la programmation orientée objet [63].



Ces fonctionnalités en font un outil idéal pour l'enseignement et la recherche scientifique. Comparé aux langages traditionnels tels que C ou FORTRAN, MATLAB est particulièrement adapté à la résolution de problèmes techniques complexes. Il s'agit d'un environnement interactif dans lequel l'élément de base est un tableau qui ne nécessite pas de dimensionnement explicite. Depuis sa commercialisation en 1984, MATLAB est devenu un standard dans de nombreuses universités et industries à travers le monde [64].

MATLAB dispose de nombreuses fonctions intégrées permettant une grande variété de calculs. Les résultats peuvent être visualisés immédiatement grâce à des commandes graphiques simples et efficaces. De plus, MATLAB propose des « toolboxes » (boîtes à outils) spécialisées qui étendent ses fonctionnalités à des domaines précis tels que le traitement du signal, le calcul symbolique, la théorie du contrôle, la simulation, l'optimisation, et bien d'autres domaines de l'ingénierie appliquée [65].

III.3. Partie Matériel

III.3.1. Un microcontrôleur STM32H7

La carte NUCLEO-H750VB est une carte de développement proposée par STMicroelectronics, équipée du microcontrôleur STM32H750VBT6 reposant sur le cœur ARM Cortex-M7. Elle fait partie de la série Nucleo-144 et a été conçue pour offrir une plateforme polyvalente destinée au développement d'applications embarquées à haute performance.

La NUCLEO-H750VB dispose de nombreuses fonctionnalités, parmi lesquelles :

- 144 broches d'extension pour des applications à connectivité étendue ;
- Un microcontrôleur STM32H750VBT6 cadencé à 480 MHz ;
- Une large gamme de périphériques intégrés : 2x CAN FD, 4x SPI, 4x USART/UART,

2x I2C, USB OTG FS, Ethernet, etc. ;

- 128 Ko de mémoire flash pour le programme et 1 Mo de mémoire RAM (SRAM) ;
- Un programmeur/débogueur intégré ST-LINK/V2-1 ;
- Un connecteur d'alimentation externe et un bouton de réinitialisation.

Cette carte Nucleo-144 offre une grande flexibilité pour les projets de prototypage et d'évaluation rapide. Elle est entièrement compatible avec l'environnement de développement STM32CubeIDE, qui permet la configuration graphique des périphériques, la génération automatique du code, ainsi que le débogage en temps réel.

La NUCLEO-H750VB constitue un choix pertinent pour les applications nécessitant des capacités de traitement intensif, telles que le contrôle temps réel, la communication en réseau ou encore le traitement du signal, tout en assurant une compatibilité étendue avec les cartes d'extension (shields) et les bibliothèques logicielles.

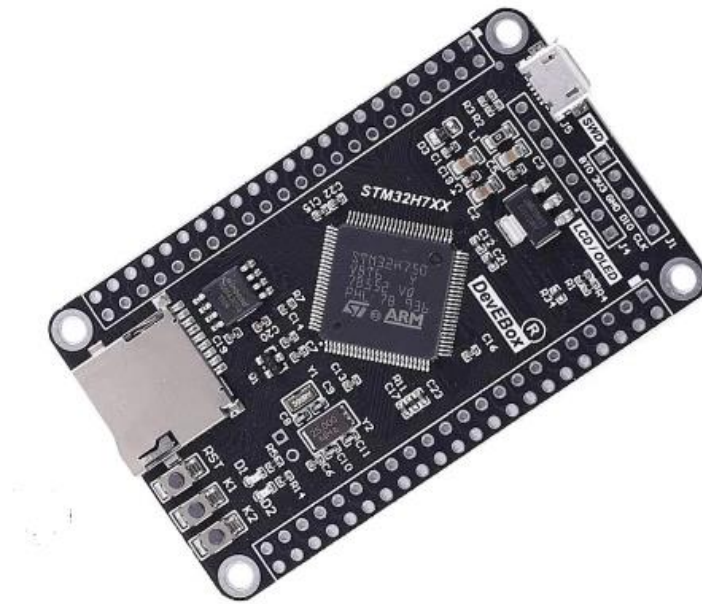


Figure III.21 : Carte développement ARM STM32H750VBT6.

III.3.2. Moteurs DC avec encodeurs

Pour assurer les déplacements des bras du robot SCARA, des moteurs à courant continu de type JGA25-370 ont été sélectionnés. Ces moteurs fonctionnent sous une tension de 12V DC et offrent une vitesse de rotation nominale de 915 tours par minute (RPM). Grâce à leur réducteur intégré, ils fournissent un couple suffisant pour les mouvements précis et fluides requis par l'architecture du robot.

Chaque moteur est équipé d'un encodeur rotatif intégré monté sur l'axe arrière. Cet encodeur fournit des signaux numériques proportionnels à la rotation de l'arbre moteur, ce qui permet une mesure en temps réel de la vitesse et de la position angulaire. Ces informations sont cruciales pour la mise en œuvre d'un contrôle en boucle fermée, notamment à l'aide d'un régulateur PID, assurant une meilleure précision dans le positionnement.

Ce choix de moteur combine fiabilité mécanique, compatibilité avec les circuits de commande disponibles (notamment le driver L298N), et simplicité d'intégration dans le système global de contrôle du robot.



Figure III.22 : Moteur à courant continu JGA25-370 avec encodeur intégré.

III.3.3. Partie émetteur

- L'Arduino Uno :

Également connu sous le nom de Genuino Uno, est une carte à microcontrôleur basée sur le composant ATmega328P. Elle dispose de 14 broches d'entrée/sortie numériques, dont 6 peuvent être utilisées pour la modulation de largeur d'impulsion (PWM), ainsi que de 6 entrées analogiques.

La carte est équipée d'un oscillateur à quartz de 16 MHz, d'un port USB pour la programmation et l'alimentation, d'un connecteur d'alimentation externe (prise jack), d'un connecteur ICSP (In-Circuit Serial Programming), ainsi que d'un bouton de réinitialisation. L'Arduino Uno est conçue pour être immédiatement opérationnelle. Il suffit de la connecter à un ordinateur via un câble USB ou de l'alimenter à l'aide d'un adaptateur secteur ou d'une batterie pour commencer à développer des applications embarquées [66].



Figure III.23 : Arduino UNO et Genuino UNO [67].

- LED

Diode électroluminescente est un composant semi-conducteur qui émet de la lumière grâce au phénomène d'électroluminescence. Il s'agit d'une diode à jonction PN qui, lorsqu'elle est polarisée en direct, permet la recombinaison des électrons et des trous au niveau de la jonction. Cette recombinaison libère de l'énergie sous forme de photons, ce qui entraîne une émission de lumière visible.

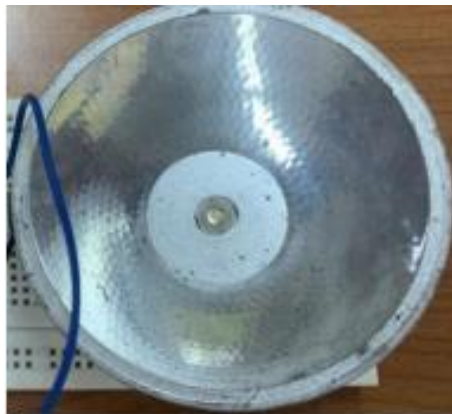


Figure III.24 : LED.

III.3.4. Partie récepteur :

- L'Arduino Mega 2560

Une carte qui utilise l'ATmega2560 comme noyau de microcontrôleur. 54 broches d'entrée/sortie numériques sont disponibles, dont 15 sont adaptées aux sorties PWM. De plus, il y a 16 entrées analogiques, 4 UART (ports série matériels), un oscillateur à cristal 16 MHz, une connexion USB, une prise d'alimentation, un en-tête ICSP et un bouton de réinitialisation. Le microcontrôleur est supporté avec tout ce qu'il contient. Il suffit de le connecter à un ordinateur avec un câble USB ou de l'alimenter avec un adaptateur CA-CC ou une batterie pour commencer [68].

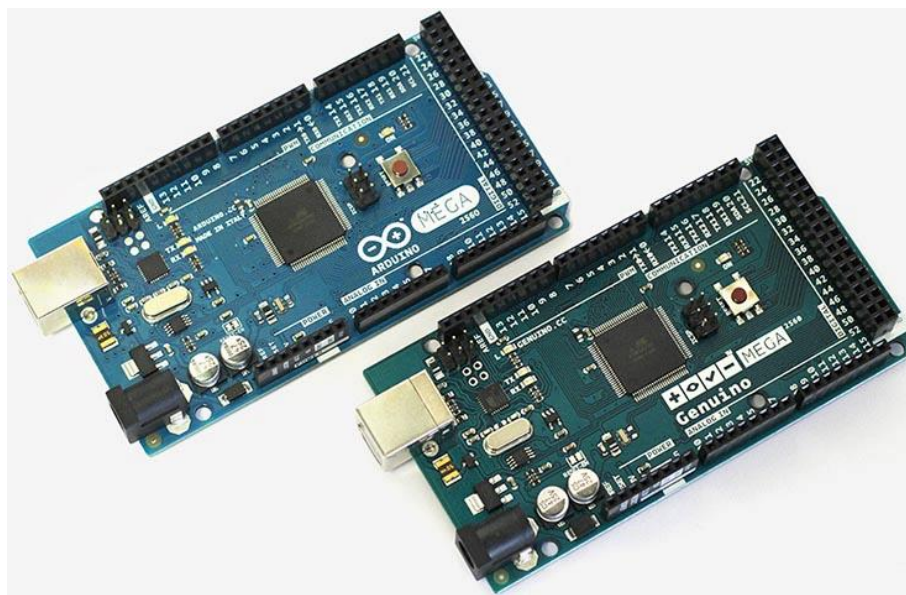


Figure III.25 : Arduino MEGA 2560 et Genuino MEGA 2560 [69].

- Photodiode PD (BPW34)

La BPW34 est une photodiode PIN très sensible, capable de détecter la lumière visible et le proche infrarouge (400 à 1100 nm). Elle est rapide, fiable, et fonctionne en mode photoconductif (polarisation inverse), ce qui améliore sa réponse.

Grâce à sa faible capacité de jonction et son courant d'obscurité réduit, elle est idéale pour les systèmes de communication optique comme le VLC, ainsi que pour des applications telles que la détection infrarouge, les capteurs de lumière ambiante et les systèmes de mesure optique [70].



Figure III.26 : BPW34 Photodiode.

III.3.5. l'électroaimant

Un électroaimant est un dispositif constitué d'une bobine de fil conducteur enroulée autour d'un noyau ferromagnétique. Lorsqu'un courant électrique circule dans la bobine, un champ magnétique est généré, transformant temporairement le noyau en aimant. Ce phénomène est réversible : le champ disparaît dès que le courant est interrompu.

Les électroaimants sont largement utilisés dans les systèmes de commande, les actionneurs, les relais, les moteurs, et les dispositifs de verrouillage magnétique. Leur principal avantage réside dans la possibilité de contrôler l'activation et la désactivation du champ magnétique par simple commande électrique [71].



Figure III.27 : Électro-aimants.

III.4. Conclusion

Ce chapitre a résumé les étapes essentielles de la réalisation du robot SCARA, incluant la conception mécanique via SOLIDWORKS, l'élaboration du schéma électrique sur KiCad, ainsi que l'intégration des composants électroniques et la programmation via STM32CubeIDE, Arduino et MATLAB. Cette partie pratique a permis de concrétiser le système du robot en assurant l'interopérabilité entre les éléments matériels et logiciels. Le chapitre suivant présentera les résultats des tests et l'analyse des performances.

Chapitre IV

Modélisation et Implémentation VLC

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter d'abord la modélisation géométrique du robot SCARA, c'est-à-dire comment on peut représenter sa structure et ses mouvements selon ses articulations. Cette partie est importante pour bien comprendre comment le robot se déplace dans l'espace. Ensuite, nous passons à la modélisation dynamique, qui prend en compte les forces, les couples et les mouvements causés par les moteurs. Après ça, nous allons expliquer comment nous avons utilisé une commande PID pour bien contrôler les mouvements du robot et corriger les erreurs entre la position voulue et la position réelle. Et pour finir, nous avons utilisé un code VLC à base STM32CubeIDE pour visualiser et contrôler le robot, ce qui permet de suivre son fonctionnement en temps réel.

IV.2. Modélisations géométrique et dynamique

La modélisation géométrique (directe et inverse) et dynamique d'un robot manipulateur SCARA, en vue de comprendre et de simuler son comportement pour des applications industrielles telles que l'assemblage et la manutention. [72].

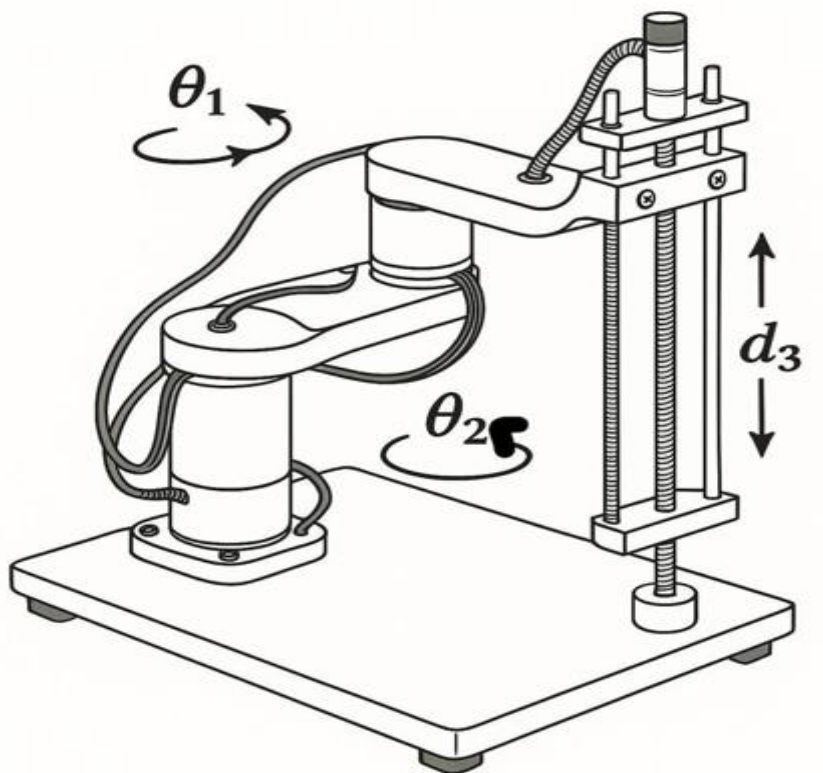


Figure IV. 1 : Structure mécanique du robot SCARA

IV.2.1. Modélisation géométrique

La modélisation géométrique permet d'établir les relations entre les positions articulaires (θ_1, θ_2, d_3) et la position de l'effecteur dans l'espace (x, y, z). Cette cinématique est divisée en deux étapes : directe et inverse. [72].

IV.2. 1.1. Convention de Denavit-Hartenberg

Pour modéliser le robot, on applique la convention de Denavit-Hartenberg (D-H) :

Tableau.IV.1 : la convention de Denavit-Hartenberg (D-H) du robot SCARA

I	θ_i (rotation)	d_i (translation)	a_i (longueur)	α_i (inclinaison)
1	θ_1	0	L_1	0
2	θ_2	0	L_2	0
3	0	d_3	0	0

IV. 2.2. Modèle Géométrique directe

La modélisation géométrique directe consiste à exprimer la position et l'orientation de l'effecteur final du robot en fonction de ses variables articulaires. Pour le robot SCARA à 3 degrés de liberté, cette modélisation repose sur l'utilisation de matrices homogènes issues des paramètres de Denavit-Hartenberg (DH). [72].

IV. 2.2.1. Matrices homogènes élémentaires

Transformation T_1^0 (base $\rightarrow$ 1er bras) :

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 & 0 & L_1\cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & \cos\theta_1 & 0 & L_1\sin\theta_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Transformation T_2^1 (1er $\rightarrow$ 2e bras) :

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & L_2\cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & L_2\sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

Transformation T_3^2 (2e bras $\rightarrow$ effecteur) :

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

Matrice homogène totale T_3^0

$$T_3^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \quad (4.4)$$

Le résultat donne :

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1 + \theta_2) & -\sin(\theta_1 + \theta_2) & 0 & x \\ \sin(\theta_1 + \theta_2) & \cos(\theta_1 + \theta_2) & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Avec :

Les coordonnées de l'effecteur (x, y, z) en fonction des angles et de la translation :

$$x = L_1 \cdot \cos(\theta_1) + L_2 \cdot \cos(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.6)$$

$$y = L_1 \cdot \sin(\theta_1) + L_2 \cdot \sin(\theta_1 + \theta_2) \quad (4.7)$$

$$z = d_3 \quad (4.8)$$

IV. 2.3 Modèle Géométrique inverse

La modélisation géométrique inverse permet de déterminer les coordonnées articulaires (angles et translation) du robot SCARA à partir d'une position cible de l'effecteur dans l'espace. Dans notre cas, le robot SCARA possède trois degrés de liberté : deux rotations autour de l'axe vertical (Z) et une translation verticale. Cette configuration permet un positionnement plan précis (dans le plan XY) ainsi qu'un ajustement en hauteur (Z). [73].

$$r = \sqrt{(x^2 + y^2)} \quad (4.9)$$

$$\cos(\theta_2) = (r^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2 \cdot L_1 \cdot L_2) \quad (4.10)$$

$$\theta_1 = \arccos((x^2 + y^2 - L_1^2 - L_2^2) / (2 \cdot L_1 \cdot L_2)) \theta_2 \quad (4.11)$$

$$\theta_2 = \arctan2(y, x) - \arctan2((L_2 \cdot \sin(\theta_2)), (L_1 + L_2 \cdot \cos(\theta_2))) \quad (4.12)$$

$$d_3 = z \quad (4.13)$$

IV.3. Modélisation dynamique (formulation d'Euler-Lagrange)

La modélisation dynamique permet de décrire le comportement du robot en mouvement en prenant en compte les effets de l'inertie, de la gravité, et des forces appliquées. [74].

IV.3.1. Lagrangien

On définit le lagrangien $L = T - V$ avec :

- T : énergie cinétique

- V : énergie potentielle [75].

Pour un robot SCARA avec masses m_1 , m_2 (bras 1 et 2), et m_3 (chariot vertical), les énergies sont :

IV.3.1.1. Énergie cinétique :

$$T = (1/2) \cdot m_1 \cdot v_1^2 + (1/2) \cdot I_1 \cdot \dot{\theta}_1^2 + (1/2) \cdot m_2 \cdot v_2^2 + (1/2) \cdot I_2 \cdot (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + (1/2) \cdot m_3 \cdot \dot{d}_3^2 \quad (4.14)$$

IV.3.1.2. Énergie potentielle :

$$V = m_3 \cdot g \cdot d_3 \quad (4.15)$$

(car seules les masses mobiles verticalement influencent V) [76].

IV.3.2. Équations d'Euler-Lagrange

Les équations d'Euler-Lagrange permettent d'obtenir les équations différentielles du mouvement d'un système mécanique à partir de son lagrangien $L = T - V$. Pour chaque coordonnée généralisée q_i , l'équation s'écrit:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_i \quad (4.16)$$

Appliquées aux trois coordonnées généralisées du robot SCARA :

- Pour θ_1 : équation du premier moteur rotatif,
- Pour θ_2 : équation du deuxième moteur rotatif,
- Pour d_3 : équation du moteur linéaire vertical. [77].

IV.3.3. Système d'équations du mouvement

Les équations du mouvement peuvent être regroupées sous la forme matricielle standard:

$$M(q) \cdot \ddot{q} + C(q, \dot{q}) \cdot \dot{q} + G(q) = \tau \quad (4.17)$$

$q = \begin{bmatrix} \theta^1 \\ \theta^2 \\ d_3 \end{bmatrix}$ est le vecteur des coordonnées généralisées,

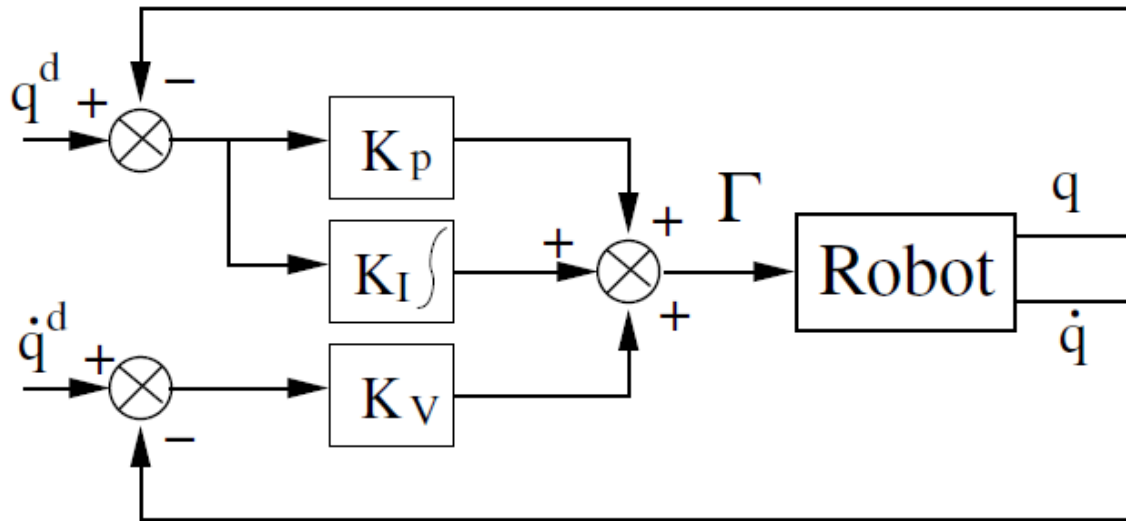
- $\ddot{q}$ est le vecteur des accélérations généralisées,
- $M(q)$ est la matrice d'inertie du robot (symétrique et définie positive),
- $C(q, \dot{q})$ est la matrice des forces de Coriolis et des frottements,
- $G(q)$ est le vecteur des forces gravitationnelles

$\tau = \begin{bmatrix} \tau^1 \\ \tau^2 \\ F_3 \end{bmatrix}$ est le vecteur des actions généralisées (couples ou forces appliqués aux articulations). [78].

IV.4. Commande PID du robot SCARA

Le robot SCARA étudié dispose de trois degrés de liberté: deux articulations rotatives (θ_1 et θ_2) et un axe de translation vertical (d_3). Pour garantir la stabilité, la précision et la rapidité du positionnement de chaque axe, une commande PID (Proportionnelle-Intégrale-Dérivée) est utilisée. [79].

IV.4.1. Schéma bloc de PID



FigureIV.2 : Schéma représente le bloc de PID en boucle fermé

IV.4.2. Comparaison des types des correcteurs PID

Dans cette section, nous présentons une comparaison des correcteurs PID appliqués aux différents axes du robot. Chaque axe, correspondant à un degré de liberté, nécessite un type spécifique de correcteur en fonction de la nature du mouvement à contrôler (rotation ou translation). Le tableau suivant résume les signaux d'entrée et de sortie associés à chaque correcteur.

Tableau.IV.2 : Comparaison des types des correcteurs pid

Degré de liberté	Type de mouvement	Signal d'entrée	Signal de sortie
θ_1	Rotation (bras 1)	Angle cible	Commande moteur
θ_2	Rotation (bras 2)	Angle cible	Commande moteur
d3	Translation (Z)	Hauteur cible	Commande moteur

IV.4.3. Principe du PID

La commande PID est une méthode classique de régulation qui permet de corriger l'erreur entre la position désirée et la position réelle. La loi de commande est donnée par:

$$U(t) = K_p \times e(t) + K_i \times \int e(t)dt + K_d \times de(t)/dt \quad (4.18)$$

Où :

- $e(t)$ est l'erreur entre la consigne et la position réelle,
- K_p ajuste la réaction proportionnelle,
- K_i corrige l'erreur statique,
- K_d anticipe les variations rapides. [82].

IV.4.4. Architecture de la commande PID

Type de correcteur	Avantages	Inconvénients	Utilisation typique
P	Simple, rapide à mettre en œuvre	Erreur statique présente	Systèmes tolérant une erreur résiduelle
PI	Élimine l'erreur statique	Peut engendrer des oscillations	Commande de position ou vitesse
PD	Bonne stabilité, réponse rapide	Ne corrige pas l'erreur statique	Systèmes où l'anticipation est utile
PID	Précis, rapide, stable	Plus complexe à régler	Commandes exigeant précision et stabilité (robots, moteurs)

Le système est structuré en 3 boucles PID indépendantes, une boucle pour chaque degré de liberté :

Tableau.IV.3 : Types des correcteurs PID

Chaque boucle PID compare la consigne à la position réelle mesurée par un capteur, puis génère un signal de commande pour le driver du moteur.

IV.4.5. Réglage des gains PID

Il existe plusieurs méthodes de réglages des gains PID, parmi ces méthodes :

IV.4.5.1. Méthode empirique

Les gains K_p , K_i , K_d sont ajustés à l'aide d'essais :

1. **K_p** élevé pour réduire l'erreur rapidement.
2. **K_i** introduit pour éliminer l'erreur statique.
3. **K_d** stabilise et réduit l'oscillation.

IV.4.5.2. Méthode de Ziegler-Nichols

Plusieurs méthodes expérimentales ont été développées pour déterminer les coefficients d'un correcteur PID. En 1942, Ziegler et Nichols ont proposé deux approches expérimentales destinées à ajuster rapidement les paramètres des régulateurs P, PI et PID. La première nécessite la réponse indicielle du système à contrôler, alors que la deuxième demande d'amener le système en boucle fermée à sa limite de stabilité. Cette méthode propose des réglages à partir de la réponse en oscillation du système en boucle ouverte. [83].

IV.4.5.3. Régulateur PID par la méthode de la réponse indicielle

Afin d'assurer un bon comportement dynamique du bras manipulateur SCARA, nous avons recours à une commande PID (Proportionnelle – Intégrale – Dérivée) pour chaque axe. Dans cette section, nous allons déterminer les paramètres du régulateur PID (K_p , T_i , T_d) en nous basant sur la méthode de la réponse indicielle, également connue sous le nom de méthode de Ziegler-Nichols [84].

IV.5. Simulation du robot SCARA avec commande PID

IV.5.1. Objectif de la simulation

La simulation numérique est une étape cruciale dans la validation des algorithmes de commande des systèmes robotiques. Elle permet d'évaluer les performances d'un régulateur, d'anticiper le comportement du système face à différentes consignes, et d'optimiser les paramètres sans risque matériel.

Dans le cadre de ce travail, l'objectif principal de la simulation est de :

- Valider l'efficacité de la commande PID appliquée aux trois axes du robot SCARA ;
- Vérifier la stabilité et la précision du système en boucle fermée ;
- Analyser les performances dynamiques telles que le temps de réponse, le dépassement et l'erreur de position. [85]

IV.5.2. Modélisation simplifié du robot SCARA

Le robot SCARA étudié possède trois degrés de liberté : deux articulations rotatives (θ_1 et θ_2) et un axe de translation vertical (d_3). Chaque axe est modélisé comme un système dynamique de premier ordre. Pour simplifier l'implémentation sous MATLAB. Bien que cette modélisation soit simplifiée, elle est suffisante pour tester l'effet de la commande PID sur le comportement global du robot. [86]

IV.5.3. Commande PID appliquée à chaque axe

Chaque articulation du robot est commandée indépendamment par un régulateur PID par la méthode empirique ce dernier est défini par l'équation :

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \cdot \int e(t) dt + K_d \cdot de(t)/dt \quad (4.19)$$

Où:

- $e(t)$ est l'erreur entre la consigne et la position réelle,
- K_p , K_i , K_d sont respectivement les gains proportionnel, intégral et dérivatif [87]

Les valeurs des gains sont choisies de manière empirique pour chaque axe, comme suit:

- Pour l'axe θ_1 : $K_p = 20$, $K_i = 5$, $K_d = 1$
- Pour l'axe θ_2 : $K_p = 15$, $K_i = 4$, $K_d = 0.8$
- Pour l'axe d_3 : $K_p = 10$, $K_i = 2$, $K_d = 0.5$

IV.5.4. Programme MATLAB utilisé

Afin d'évaluer les performances de la commande PID appliquée aux trois axes du robot SCARA, un code sous l'environnement MATLAB a été développé. Ce programme simule la réponse dynamique de chaque axe à une consigne constante, en intégrant les régulateurs PID avec les gains définis précédemment. Plutôt que de détailler le code dans ce mémoire, nous présentons directement les résultats obtenus sous forme de courbes de réponse issues de la simulation. [88]

IV.5.5. Résultats et discussion

Les résultats obtenus montrent que les trois régulateurs PID assurent un bon suivi de la consigne avec un temps de réponse rapide, une erreur statique nulle (grâce à l'action intégrale) et une réponse stable (grâce à l'action dérivative). Les courbes de position des trois axes convergent rapidement vers la valeur de consigne sans oscillations importantes [89]

Les figures ci-dessous illustrent les courbes obtenues pour chaque axe :

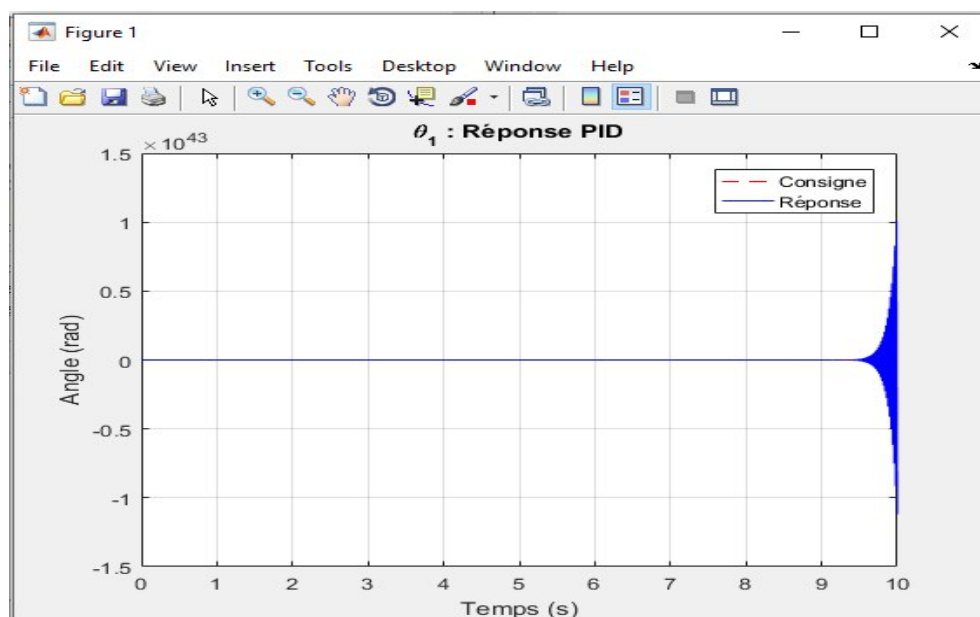
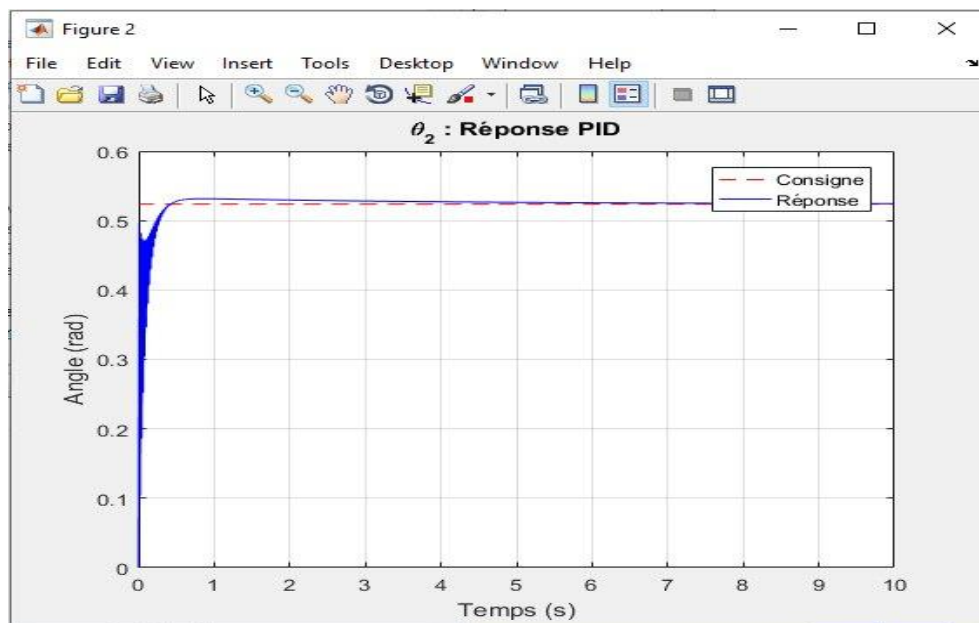


Figure IV. 3 : Réponse en position de l'axe θ_1

- **Réponse PID θ_1 :**

Cette courbe représente la réponse de la première articulation rotative (θ_1) soumise à une commande PID. On observe un léger dépassement suivi d'une stabilisation rapide autour de la consigne, ce qui reflète une bonne dynamique et une réponse rapide du système.

**Figure IV. 4 : Réponse en position de l'axe θ_2**

- **Réponse PID θ_2 :**

Cette courbe illustre la réponse de la deuxième articulation rotative (θ_2). La sortie suit correctement la consigne sans oscillations importantes. Le système est stable, avec une réponse bien amortie, ce qui indique un bon réglage du correcteur PID.

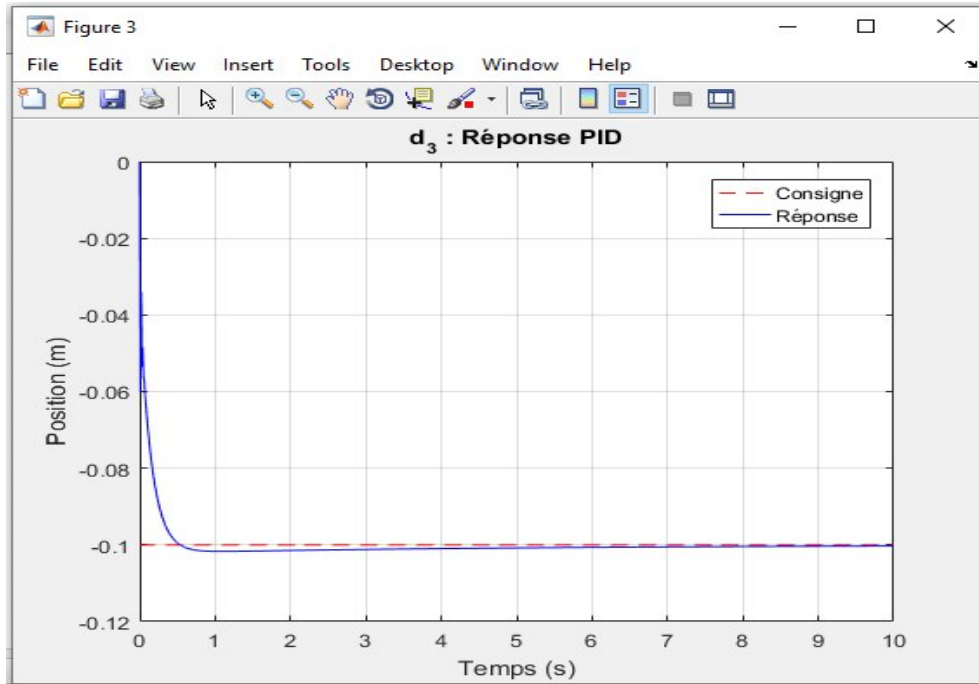


Figure IV. 5 : Réponse en position de l'axe d_3

- **Réponse PID d_3 :**

Cette courbe correspond à la réponse de l'articulation linéaire (d_3), représentant une translation. Le système atteint une position proche de la consigne avec une certaine erreur statique. La réponse est rapide et stable, malgré une légère différence finale entre la consigne et la réponse.

IV.6. Mise en œuvre d'un système de commande VLC

Avant d'implémenter le protocole de communication sans fil à base de la technologie VLC (Li-Fi), nous avons effectué un petit test, transmettre des données via cette technologie.

IV.6.1. Banc d'essai

Ce modèle utilise des composants standards tels que la LED, photodiode, résistance. Deux cartes arduino sont intégrées pour le codage et le décodage des données, garantissant ainsi la sécurité et la fiabilité de la communication VLC. De plus, un cône focalise la lumière émise par la LED, améliorant ainsi la portée et la précision du système. Une résistance de 100Ω est ajoutée en parallèle à la photodiode pour éliminer les interférences indésirables et améliorer la réception des données à une distance 2,5 mètre.

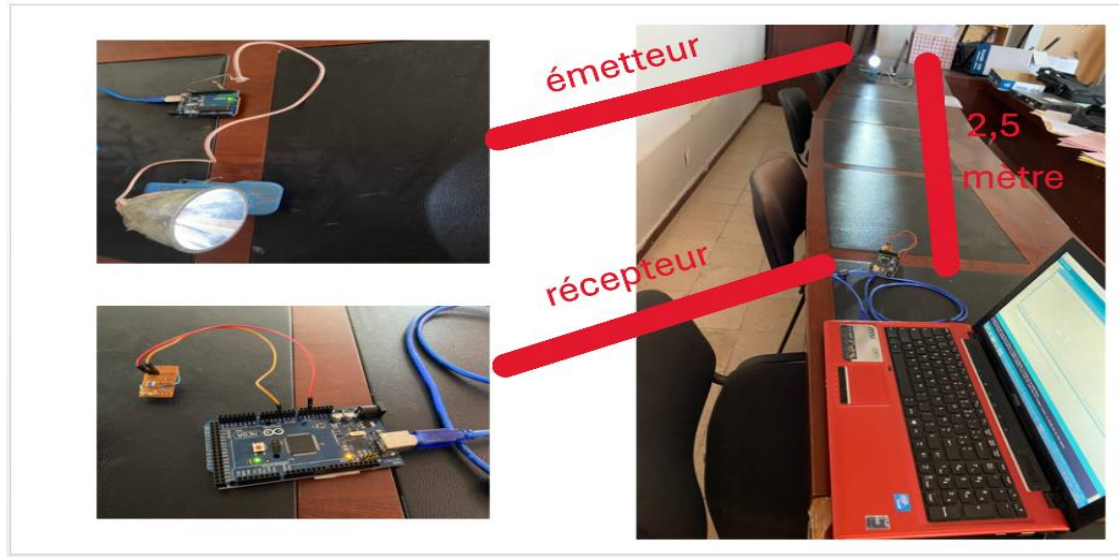
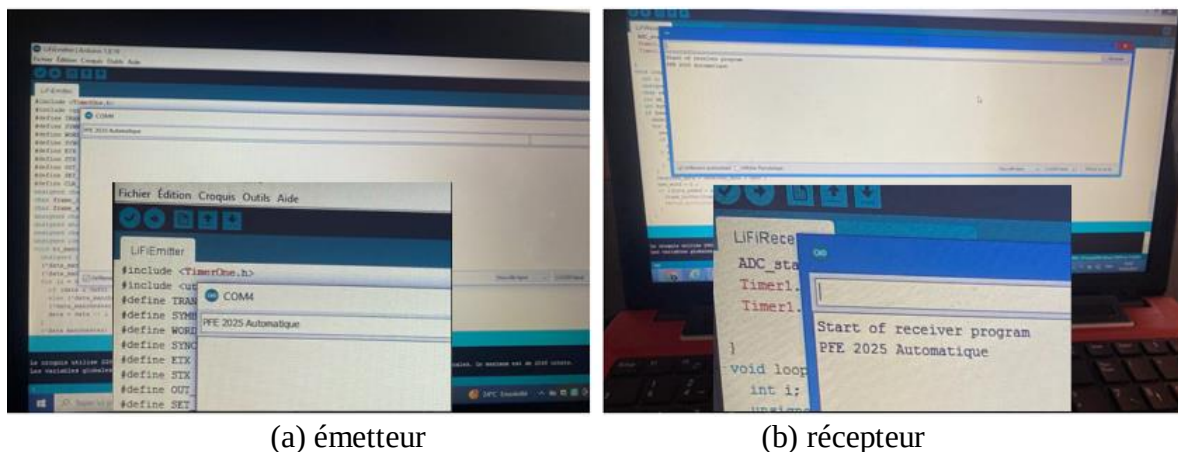


Figure IV.6 : Prototype de LED à photodiode

Dans notre expérimentation, deux ordinateurs portables ont été utilisés :

- Le premier est connecté à un Arduino Uno configuré comme émetteur,
- Le second est connecté à un Arduino Mega servant de récepteur.

Le message texte « PFE 2025 Automatique » a été envoyé depuis le premier ordinateur à travers une LED, et capté par une photodiode reliée au second Arduino. Grâce à la communication Li-Fi, le message a été correctement reçu, comme affiché dans les deux moniteurs série ci-dessous. Cette démonstration met en évidence la capacité de la technologie Li-Fi à transmettre des données entre deux systèmes sans fil et de manière fiable.



(a) émetteur

(b) récepteur

Figure IV. 7 : Transmission de message entre deux Pc via VLC

IV.7. Implémentation du robot SCARA

Le robot conçu dans notre projet est un modèle SCARA, largement utilisé dans

l'automatisation industrielle pour ses mouvements rapides et précis dans un espace de travail principalement plat.

Il a été entièrement modélisé, fabriqué en impression 3D (CREALITY), puis assemblé avec des composants électromécaniques afin de valider les performances d'un système de commande PID appliqué à ses axes.



Figure IV. 8 : Prototypé réel du robot SCARA imprimé en 3D

IV.7.1. Commande du robot SCARA via la technologie Li-Fi

Dans la prochaine étape du projet, le robot SCARA sera entièrement mis en fonctionnement réel. La commande se fera à l'aide des cartes arduino qui permettra d'envoyer les signaux nécessaires aux moteurs pour exécuter les mouvements souhaités selon les consignes définies. Chaque articulation du robot sera connectée à un driver moteur, et des capteurs seront utilisés pour assurer le retour d'information sur la position. L'ensemble du système sera alimenté et testé étape par étape, afin de vérifier la fiabilité des mouvements et la précision du suivi des consignes. Ce processus permettra de valider le fonctionnement du robot en conditions réelles, en s'appuyant sur les simulations effectuées et les réglages du correcteur PID développés précédemment. Par ailleurs, une technologie de communication innovante, le Li-Fi, sera utilisée pour envoyer les commandes sans fil à

travers un signal lumineux. Cette approche moderne permet de remplacer les connexions filaires par une transmission rapide et fiable sans fils.

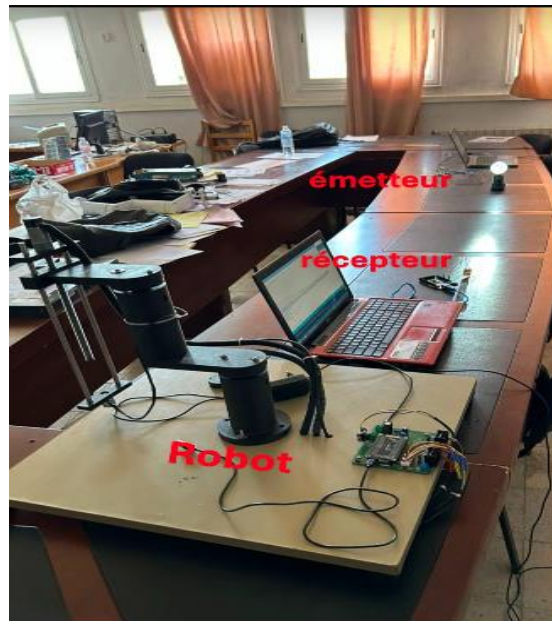


Figure IV. 9 : Robot SCARA commandé via la technologie Li-Fi.

IV.8. Conclusion

Ce chapitre a présenté la modélisation géométrique et dynamique du robot SCARA, permettant de comprendre ses mouvements. Une commande PID a été mise en place pour chaque axe, assurant la précision et la stabilité du notre prototype. Les résultats de simulation ont été validé sur un modèle simplifié et montre l'efficacité de cette commande. Enfin, l'intégration d'une application VLC a permis une transmission sans fil des commandes, testée sur un prototype réel imprimé en 3D. Ces étapes confirment la faisabilité du système et ouvrent la voie à son déploiement réel.

Conclusion Générale

La réalisation de ce projet de fin d'études a permis de mettre en œuvre une approche complète et intégrée de développement d'un système robotique intelligent, basé sur le bras manipulateur SCARA. À travers les différentes étapes de conception, de modélisation, de simulation et de mise en œuvre, nous avons pu appliquer des connaissances théoriques acquises durant notre formation, tout en développant des compétences pratiques et transversales essentielles au métier d'ingénieur.

Le choix du robot SCARA s'est révélé pertinent au regard de ses performances mécaniques et de sa simplicité de commande pour les applications de type pick-and-place. L'intégration d'une solution de communication par lumière visible (VLC) a, quant à elle, ouvert des perspectives intéressantes en matière d'optimisation des échanges de données sans fil dans des environnements industriels contraints. L'ensemble du système a été pensé dans une logique de fiabilité, d'efficacité et de flexibilité, en cohérence avec les exigences des systèmes cyber-physiques modernes.

Ce travail a aussi été l'occasion de prendre conscience de l'importance de l'interdisciplinarité dans les projets d'ingénierie, et de la rigueur nécessaire pour assurer la cohérence entre les aspects mécaniques, électroniques et logiciels. La robotique, en tant que domaine en perpétuelle évolution, offre encore de nombreux défis et opportunités, que ce soit dans l'automatisation industrielle, l'intelligence artificielle ou la communication embarquée.

Cette expérience a été pour nous une étape formatrice et enrichissante, renforçant notre intérêt pour les systèmes autonomes intelligents et consolidant notre ambition de contribuer activement à l'innovation technologique dans notre futur parcours professionnel.

Les références

- [1] Siciliano, B., & Khatib, O. (2016). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.
- [2] Niku, S. B. (2020). *Introduction to Robotics: Analysis, Control, Applications*. Wiley.
- [3] Craig, J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. 4th Edition, Pearson, 2017.
- [4] Lin, P., Bekey, G., & Abney, K. *Robot Ethics: The Ethical and Social Implications of Robotics*. MIT Press, 2012.
- [5] Zhang, C., & Kovacs, J. M. "The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review." *Precision Agriculture*, 13(6), 2012, pp. 693–712.
- [6] Singh, H., & Whitcomb, L. L. "Advances in deep ocean robotics." *Science Robotics*, 3(25), 2018.
- [7] Khachouche, S. (2018). *Conception et réalisation d'un bras manipulateur de type PUMA à quatre degrés de liberté* [Mémoire de Master, Université Saad Dahlab – Blida 1]. Dépôt institutionnel de l'Université Blida 1.
- [8] Loucif Fatiha. "Introduction à la robotique." brochure des cours, Université de 8 Mai 1945 Guelma, (2024).
- [9] Groover, M. P. *Automation, Production Systems, and Computer-Integrated Manufacturing*, 4th ed., Pearson Education, 2015, pp. 348–355.
- [10] Craig, J. J. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*, 3rd ed., Pearson, 2004, pp. 96–101.
- [11] Taylor, R. H., & Stoianovici, D. (2003). "Medical robotics in computer-integrated surgery." *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 19(5), pp. 149–154.
- [12] Kajita, S., Hirukawa, H., Harada, K., & Yokoi, K. (2014). *Introduction to Humanoid Robotics*. Springer, pp. 75–95.
- [13] Ellery, A. (2015). *Mobile Robotics for Space Exploration*. Springer, pp. 60–85
- [14] Singer, P. W. (2009). *Wired for War : The Robotics Revolution and Conflict in the 21st Century*. Penguin Books, pp. 245–275.
- [15] Thrun, S. (2004). "Toward a framework for human-robot interaction." *Human-Computer Interaction*, 19(1), pp. 50–70.
- [16] Siegwart, R., Nourbakhsh, I. R., & Scaramuzza, D. (2011). *Introduction to Autonomous Mobile Robots*. MIT Press.
- [17] Khatib, O., & Siciliano, B. (2008). *Springer Handbook of Robotics*. Springer.
- [18] Craig, J. J. (2005). *Introduction to Robotics : Mechanics and Control*. Pearson.
- [19] Moeuf, A., Pellerin, R., Lamouri, S., Tamayo-Giraldo, S., & Barbaray, R. (2021).

Industrie 4.0 : Concepts, technologies et applications. Dunod.

[20] Ghobakhloo, M. (2018). “The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0.” *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29(6), pp. 910–936.

[21] Lee, J., Bagheri, B., & Kao, H.A. (2015). “A Cyber-Physical Systems architecture for Industrie 4.0-based manufacturing systems.” *Manufacturing Letters*, 3, pp. 18–23.

[22] KUKA AG. (2020). *Industrie 4.0 and Cloud Robotics*. Livre blanc disponible sur le site officiel de KUKA.

[23] Monostori, L. (2014). “Cyber-physical production systems: Roots, expectations and R&D challenges.” *Procedia CIRP*, 17, pp. 9–13.

[24] **Ghost Robotics**. (2023). *Vision 60 Quadrupedal Unmanned Ground Vehicle (Q-UGV)*. Scopex. Consulté à l'adresse : <https://www2.scopex.fr/en/products/vision-60-legged-robot-q-ugv-2/>

[25] **Ecoptik**. (2023). *Le ROV sous-marin*. Récupéré de <https://fr.ecoptik.net/about-underwater-rov.html>

[26] **Epson**. (2023). *Epson LS6-B SCARA Robot – 500mm*. Récupéré de <https://epson.ca/Pour-le-travail/Robotique/SCARA/Epson-LS6-B-SCARA-Robot---500mm/p/RLS6B502ST9B5>

[27] **BMW Group**. (2020, 20 novembre). BMW Group créé la société IDEALworks pour développer et distribuer des robots innovants et des logiciels de gestion des solutions logistiques.

[28] **Chenevoy, C.** (2019, 30 octobre). Pourquoi Amazon parie sur la robotisation. LSA Conso. Récupéré de <https://www.lsa-conso.fr/pourquoi-amazon-parie-sur-la-robotisation,332011>

[29] **Li, H., Li, R., Zhang, J., & Zhang, P.** (2020). Development of a Pipeline Inspection Robot for the Standard Oil Pipeline of China National Petroleum Corporation. *Applied Sciences*, 10(8), 2853.

[30] **KUKA AG**. (2023). KUKA iiQoT – Surveillance de l'état et maintenance planifiée de vos robots.

[31] **Niryo**. (2024, 10 juillet). *Formation Vision IA*. Récupéré de <https://niryo.com/fr/application/formation-vision-ia/>

[32] A. Zúñiga and B. Krishnamachari, “A Survey of Visible Light Communication,” *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 21, no. 1, pp. 868–885, 2019.

[33] Chowdhury, M. Z., Hossan, M. T., Jang, Y. M., & Haas, H. (2018). "A comparative survey of optical wireless technologies: Architectures and applications." *IEEE Access*, 6, 9819–9840.

[34] *Light and the electromagnetic spectrum*, Khan Academy. [En ligne]. Disponible : <https://fr.khanacademy.org/science/physique-a-l-ecole/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-6e-annee-secondaire1h/x6e8a541a302cdab5:physique-a-l-ecole-6e-1h-electromagnetisme/a/light-and-the-electromagnetic-spectrum>

[35] P. Chrzanowski, “**Communication par lumière visible**,” *Ambassade de France au Royaume-Uni*, publié le 23 septembre 2011.

[36] *Principe de fonctionnement des LED*, Universal LED. [En ligne]. Disponible : <https://universal-led.com/infos-led/principe>

[37] *Difference between photodiode and phototransistor*, PCB Hero. [En ligne]. Disponible : <https://www.pcb-hero.com/blogs/lilycolumn/difference-between-photodiode-and-phototransistor>

[38] Ertunç, Ezgi, ” Non-line of Sight Visible Light Communications, ” mémoire Master. České vysoké učení technické v Praze. Vypočetní a informační centrum. (2018).

[39] RF Wireless World, “**OOK vs VPPM vs CSK modulation**,” [En ligne]. Disponible : <https://www.rfwireless-world.com/tutorials/other-wireless/ook-vs-vppm-vs-csk-modulation>

[40] Sellaoui Raid Houssein Eddine. "Commande d'un robot à base de la technologie VLC." mémoire Master, Université 8 Mai 1945 Guelma. (2021).

[41] Fiveable Library, “**Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM)**,” [En ligne]. Disponible : <https://library.fiveable.me/advanced-signal-processing/unit-11/orthogonal-frequency-division-multiplexing-ofdm/study-guide/5wj4CgYJsuWuAtm9>

[42] Lu Z, Tian P, Chen H, Baranowski I, Fu H, Huang X, Montes J, Fan Y, Wang H, Liu X, Liu R, Zhao Y. Active tracking system for visible light communication using a GaN-based micro-LED and NRZ-OOK.

[43] N. Chaudhary et al., “Visible Light Communication: Concepts, Applications and Challenges,” *International Journal of Information and Communication Technology*, vol. 8, no. 2, pp. 112–120, 2019.

[44] Haas, H. (2011). *Wireless data from every light bulb* [Vidéo]. YouTube. https://www.youtube.com/watch?v=KgTwSXX_5VY

[45] M. Z. Afgani, H. Haas, H. Elgala, and D. Knipp, “**Visible light communication: Modulation techniques and recent applications**,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 55, no. 3, pp. 2543–2550, 2016

[46] *LiFi Technology*, Iberdrola. [En ligne]. Disponible : <https://www.iberdrola.com/innovation/lifi-technology>

- [47] REZAIGUIA Oussama. " Study and Implementation of a Mobile Robot for Object Detection Based on VLC Technology." mémoire Master. Université of 8 Mai 1945. (2024).
- [48] *Li-Fi: IoT at the Speed of Light*, Avnet Silica. [En ligne]. Disponible : <https://my.avnet.com/silica/resources/article/li-fi-iot-at-the-speed-of-light/>
- [49] H. Li et al., "**Application of visible light communication technology in digital operating room**," *Clinics in Surgery*, vol. 5, art. 2990, 2020.
- [50] LiFi.co, "**LiFi applications in Industry & Transportation**," [En ligne]. Disponible : <https://lifi.co/lifi-applications/industry-transportation/>
- [51] P. Wilke Berenguer et al., "Optical Wireless MIMO Experiments in an Industrial Environment," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 36, no. 1, pp. 185-193, Jan. 2018, doi: 10.1109/JSAC.2017.2774618.
- [52] Chouabia Halim. « Système MIMO multifonctionnel dans le concept VLC. » Thèse de doctorat, Université 8 mai 1945 Guelma. (2023).
- [53] *Comment les sous-marins communiquent-ils avec le monde extérieur ?*, AGASM. [En ligne]. Disponible : <https://www.agasm.fr/comment-les-sous-marins-communiquent-ils-avec-le-monde-exterieur/>
- [54] S. Alfattani, "**Review of LiFi technology and its future applications**," *Journal of Optical Communications*, vol. 42, no. 1, pp. 121–132, 2021.
- [55] M. S. Islam et al., "A review of visible light communication (VLC) technology," *ResearchGate*, 2020. [En ligne]. Disponible : https://www.researchgate.net/publication/340178920_A_review_of_visible_light_communication_VLC_technology
- [56] Haas, H., Yin, L., Wang, Y., & Chen, C. (2016). *What is LiFi?* *Journal of Lightwave Technology*, 34(6), 1533–1544. <https://doi.org/10.1109/JLT.2015.2510021>
- [57] LiFi.co, "**LiFi vs WiFi: The Differences**," [En ligne]. Disponible : <https://lifi.co/lifi-vs-wifi>
- [58] Texas Instruments. (2015). *LM2596 SIMPLE SWITCHER® Power Converter Datasheet*. Disponible sur : <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
- [59] STMicroelectronics. (2018). *L298N Dual Full Bridge Driver Datasheet*. Disponible sur : <https://www.st.com/resource/en/datasheet/l298.pdf>
- [60] *Tutoriel STM32CubeIDE*, ENSICAEN. Disponible en ligne : https://foad.ensicaen.fr/pluginfile.php/83070/mod_folder/content/0/fr_tutoriel_stm32cubeide.pdf
- [61] STMicroelectronics, *STM32CubeIDE Overview*, Data brief. Disponible en ligne : https://www.st.com/resource/en/data_brief/stm32cubeide.pdf
- [62] Arduino, *Arduino Education*. Disponible en ligne : <https://www.arduino.cc/education>
- [63] MathWorks, *MATLAB - The Language of Technical Computing*. Disponible en ligne :

<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>, consulté en mai 2025.

[64] MathWorks, Symbolic Math Toolbox Documentation. <https://www.mathworks.com/help/symbolic/>, consulté en mai 2025.

[65] MathWorks, MATLAB and Simulink Toolboxes. <https://www.mathworks.com/products.html>, consulté en mai 2025

[66] Arduino, Arduino Uno Rev3 — Datasheet. Disponible en ligne : <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>, consulté en mai 2025

[67] Arduino, *Arduino Uno Rev3*. Disponible en ligne : <https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3>

[68] Arduino, Arduino Mega 2560 Rev3 — Documentation. Disponible en ligne : <https://docs.arduino.cc/hardware/mega-2560>, consulté en mai 2025

[69] Arduino, *Arduino Mega 2560 Rev3*. Disponible en ligne : <https://store.arduino.cc/products/arduino-mega-2560-rev3>

[70] Vishay, *BPW34 Datasheet*, <https://www.vishay.com/docs/81521/bpw34.pdf>

[71] Paul Horowitz, Winfield Hill, *The Art of Electronics*, 3rd edition, Cambridge University Press, 2015.

[72].Benamar, F., & Abderrahim, K. (2021). *Modélisation cinématique et dynamique d'un robot manipulateur SCARA*. Revue des Sciences et Technologies, Université de Béjaïa. [Disponible sur ASJP : <https://www.asjp.cerist.dz/>].

[73].Craig, J. J. (2017). *Introduction to robotics : Mechanics and control* (4e éd.). Pearson.

[74].Djemaï, M., & Lauber, J. (2003). *Commande des systèmes mécaniques : Applications à la robotique*. Paris : Editions Technip.

[75].Khalil, W., & Dombre, E. (1999). *Modélisation, identification et commande des robots*. Paris : Hermès Science Publications.

[76].Niku, S. B. (2020). *Introduction to robotics : Analysis, control, applications* (3e éd.). Wiley.

[77].Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M. (2006). *Robot modeling and control*. Wiley.

[78].Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB). (n.d.). *Mémoire de fin d'études - Robotique*. [Disponible sur <http://fstm.usthb.dz>]

[78].Åström, K. J., & Hägglund, T. (1995). *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning* (2nd ed.). Research Triangle Park, NC : Instrument Society of America (ISA).

[79].Kuo, B. C., & Golnaraghi, F. (2017). *Automatic Control Systems* (10th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.

- [80]. **Ogata, K.** (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- [81]. **Nise, N. S.** (2011). *Control Systems Engineering* (6th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- [82]. **Ziegler, J. G., & Nichols, N. B.** (1942). Optimum settings for automatic controllers. *Transactions of the ASME*, 64(11), 759–768.
- [83]. **Craig, J. J.** (2005). *Introduction to Robotics: Mechanics and Control* (3rd ed.). Upper Saddle River, NJ: Pearson Education.
- [84]. **Spong, M. W., Hutchinson, S., & Vidyasagar, M.** (2006). *Robot Modeling and Control*. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.
- [85] K. Ogata, "Moderne Commande Automatique", 5e édition, Pearson, 2010.
- [86] J.J. Craig, "Introduction to Robotics: Mechanics and Control", 3rd Edition, Pearson, 2005.
- [87] Ziegler, J. G., & Nichols, N. B. (1942). Optimum Settings for Automatic Controllers. Transactions of the ASME.
- [88] Nise, N. S., "Engineering Systems Analysis and Design", Wiley, 2011.
- [89] Bouzid, A., "Commande des systèmes linéaires par régulateur PID", Mémoire de Master, Université de Blida, 2019