

**Ecole d'Ingénierie Digitale et d'Intelligence Artificielle  
(EIDIA)**

**Projet de Fin de module**

**Filière : Robotique & Cobotique**

**Semestre : 7**

**Module : Conception Et Modelisation Des Systemes Robotiques**

**Thème :**

**Réalisation d'un bras robotique à 4 DOF**

**Encadré par :**

Pr. Zakaria Chalh

**Préparé par les étudiants:**

Omar EL ALAOU

Mohamed BOFARHA

Bouarfa LAHMR

Hiba MOUHSINE

**Année Universitaire : 2024-2025**

## **Table des matières :**

1. Résumé exécutif
2. Introduction
3. Conception mécanique
4. Cinématique
5. Prototypage et fabrication
6. Architecture électronique et contrôle
7. Programmation
8. Simulation
9. Contraintes et limitations
10. Résultats et discussion
11. Conclusion et perspectives

## 1. Résumé exécutif :

Dans le cadre du module **Conception et Modélisation des Systèmes Robotiques**, ce projet porte sur la conception et la réalisation d'un bras robotique à 4 degrés de liberté (DOF). L'objectif principal est de développer un système capable d'exécuter des tâches de manipulation avec une grande précision, tout en intégrant des solutions mécaniques, électroniques et programmatiques adaptées.

La démarche suivie inclut l'étude théorique des principes de cinématique directe et inverse, la modélisation CAO de la structure mécanique, la fabrication via impression 3D, et le développement d'un système de contrôle basé sur une architecture électronique performante. Des outils tels que Python ont été utilisés pour la programmation, avec des simulations réalisées sous RViz pour valider les performances.

Malgré les contraintes de temps et de ressources matérielles, ce projet représente une excellente opportunité de mettre en pratique les concepts étudiés dans le module. Il a permis d'acquérir une expérience concrète dans le domaine de la robotique, tout en ouvrant des perspectives pour des applications futures dans des contextes variés, tels que l'automatisation industrielle et la manipulation d'objets complexes.



## 2. Introduction :

### 2.1 Contexte et motivation :

L'automatisation est devenue un pilier fondamental de l'innovation industrielle et technologique. Dans ce contexte, les bras robotiques jouent un rôle clé dans la réalisation de tâches complexes nécessitant précision et efficacité, notamment dans les domaines de la production, de la logistique, et de la recherche.

Ce projet s'inscrit dans une démarche pédagogique visant à appliquer les concepts théoriques étudiés dans nos cours à la conception et à la réalisation d'un système robotisé fonctionnel. Il répond également au besoin de maîtriser les outils modernes de robotique et d'électronique pour répondre aux exigences croissantes des industries modernes.

### 2.2 Objectifs du projet :

Ce projet a pour objectif principal de concevoir et de réaliser un bras robotique à 4 degrés de liberté (DOF). Les objectifs spécifiques incluent :

- **Conception mécanique** : Développer une structure robuste et flexible, adaptée à des tâches variées.
- **Cinématique** : Analyser et appliquer les principes de cinématique directe et inverse pour garantir des mouvements précis.
- **Prototypage et fabrication** : Utiliser des techniques avancées telles que l'impression 3D pour la fabrication des composants.
- **Architecture électronique et contrôle** : Intégrer un système électronique performant, basé sur des microcontrôleurs et des modules compatibles.
- **Programmation et simulation** : Développer un logiciel permettant de contrôler les mouvements du bras robotique, et valider les résultats à travers des simulations réalistes.

En réalisant ce projet, nous avons également pour ambition d'approfondir nos compétences en robotique et en ingénierie, tout en contribuant à la résolution de problématiques réelles dans le domaine.

### 3. Conception mécanique :

#### 3.1 Étude des degrés de liberté (DOF)

Le bras robotique à 4 degrés de liberté (DOF) a été conçu pour garantir une flexibilité et une précision suffisantes dans ses mouvements. Chaque DOF correspond à une articulation permettant des rotations ou des translations spécifiques, essentielles pour manipuler des objets dans un espace tridimensionnel. Ce choix de configuration a été fait pour équilibrer complexité mécanique, coût, et performance, tout en maintenant une facilité de contrôle et d'intégration.

#### 3.2 Modélisation CAO

Pour optimiser le développement, un modèle 3D existant a été sélectionné et adapté à nos besoins spécifiques à l'aide d'outils de conception assistée par ordinateur (CAO). Les pièces ont été conçues pour être compatibles avec une impression 3D et un assemblage modulaire. Cette approche a permis de visualiser et de simuler les mouvements du bras avant la phase de fabrication, en identifiant et en corrigeant les éventuelles erreurs de conception.



#### 3.3 Systèmes d'entraînement

Pour assurer les mouvements du bras robotique, deux types de servomoteurs ont été utilisés :

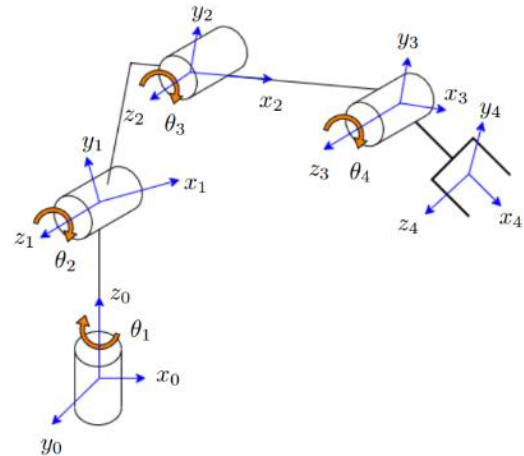
- **Servomoteurs MG995** : Choisis pour leurs capacités de couple élevé, ces moteurs sont dédiés aux articulations principales, nécessitant une force importante pour déplacer les segments.
- **Servomoteurs MG90** : Plus compacts et précis, ces moteurs sont affectés aux articulations demandant une manipulation fine et rapide.



## 4. Cinématique :

### 4.1 Théorie cinématique :

La cinématique d'un bras robotique consiste à décrire et analyser les mouvements des différentes articulations en termes de position, de vitesse et d'accélération sans tenir compte des forces en jeu. La cinématique directe permet de déterminer la position et l'orientation de l'effecteur en fonction des angles des articulations, tandis que la cinématique inverse calcule les angles nécessaires pour atteindre une position spécifique.



Dans ce projet, la cinématique a été étudiée pour assurer une précision optimale dans les mouvements du bras robotique et pour répondre aux exigences de manipulation.

### 4.2 Tableau de Denavit-Hartenberg (DH)

La méthode de Denavit-Hartenberg (DH) est utilisée pour modéliser les liaisons entre les différents segments du bras robotique. Elle simplifie la description géométrique du bras en utilisant des paramètres standardisés pour représenter les transformations entre les cadres de référence des articulations.

Le tableau DH suivant résume les paramètres de notre bras robotique à 4 DOF :

Joint	$\theta_i (^\circ)$	$\alpha_i (^\circ)$	d	r
1	$\theta_1$	90	13,461	0
2	$\theta_2$	0	0	12
3	$\theta_3$	0	0	12,25
4	$\theta_4$	0	0	12,306

### 4.3 Résultats de la cinématique directe :

La cinématique directe consiste à calculer la position et l'orientation de l'effecteur à partir des angles d'articulation  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4$ . En utilisant les matrices homogènes et les transformations successives définies par le tableau DH, la matrice de transformation totale  $T$  a été obtenue :

**Calcul des matrices homogènes  $A_1, A_2, A_3, A_4$  :**

$$A_1 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & 0 & \sin(\theta_1) & 0 \\ \sin(\theta_1) & 0 & -\cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 13,461 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 12,25 \cos(\theta_3) \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 12,25 \sin(\theta_3) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 12 \cos(\theta_2) \\ \sin(\theta_2) & \cos(\theta_2) & 0 & 12 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$A_4 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 12,306 \cos(\theta_4) \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 0 & 12,306 \sin(\theta_4) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

**La matrice de transformation totale  $T = A_1.A_2.A_3.A_4$  :**

**Matrice de Transformation Totale  $T$  :**

$$T = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0.002 \cos(\theta_1) (6153 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 6125 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 6000 \cos(\theta_2)) \\ \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) & -\sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) \sin(\theta_1) & -\cos(\theta_1) & 0.002 \sin(\theta_1) (6153 \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 6125 \cos(\theta_2 + \theta_3) + 6000 \cos(\theta_2)) \\ \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & \cos(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) & 0 & 12.31 \sin(\theta_2 + \theta_3 + \theta_4) + 12.25 \sin(\theta_2 + \theta_3) + 12.0 \sin(\theta_2) + 13.46 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

#### 4.4 Résultats de la cinématique inverse :

La cinématique inverse a été utilisée pour déterminer les angles des articulations nécessaires afin d'atteindre une position spécifique de l'effecteur ( $x_t, y_t, z_t$ ). Les équations suivantes ont été résolues

$$\theta_1 = \arctan 2(y_0, x_0)$$

$$\theta_2 = \arctan 2(z_0 - l_1, \sqrt{x_0^2 + y_0^2}) - \arctan 2(l_3 + l_4 \cos(\theta_3), l_2)$$

$$\cos(\theta_3) = \frac{(x_0^2 + y_0^2 + (z_0 - l_1)^2) - l_2^2 - (l_3 + l_4)^2}{2l_2(l_3 + l_4)}$$

$$\theta_3 = \arccos(\cos(\theta_3))$$

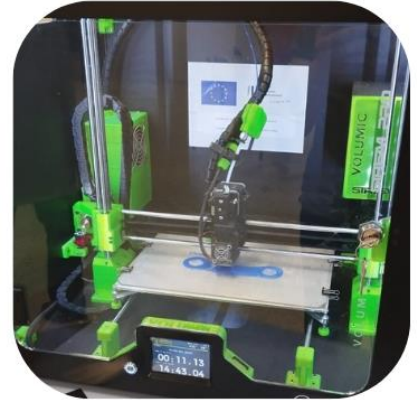
$$\theta_4 = \arctan 2(z_0 - l_1 - l_2 \sin(\theta_2) - l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3), x_0 - l_2 \cos(\theta_2) - l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3))$$



## 5. Prototypage et fabrication :

### 5.1 Impression 3D

Pour accélérer le processus de réalisation et concentrer nos efforts sur les aspects essentiels du projet, nous avons opté pour un modèle 3D existant disponible sur Internet. Ce choix stratégique nous a permis d'optimiser le temps nécessaire à la conception mécanique et de nous focaliser sur les étapes critiques telles que la cinématique, le contrôle et les tests.



Le modèle sélectionné a été soigneusement évalué pour répondre aux exigences de notre projet, notamment en termes de dimensions, de robustesse et de compatibilité avec les composants électroniques et mécaniques. Les pièces ont ensuite été imprimées à l'aide d'une imprimante.

### 5.2 Assemblage

L'assemblage des différentes pièces imprimées a été réalisé en suivant un plan précis, afin d'assurer une configuration conforme au modèle 3D sélectionné. Les étapes de l'assemblage incluaient :

- L'installation des moteurs et des engrenages pour les articulations.
- La fixation des pièces imprimées à l'aide de vis et de connecteurs.
- L'intégration des modules électroniques, en veillant à la gestion des cables.



## 6. Architecture électronique et contrôle

### 6.1 Microcontrôleur utilise

Pour répondre aux exigences de notre projet, nous avons opté pour la Raspberry Pi 4 en tant que microcontrôleur principal. Ce choix s'explique par les performances élevées de la Raspberry Pi 4, sa capacité de traitement rapide et sa compatibilité avec divers capteurs et composants électroniques. Elle offre également une large communauté de développeurs et des bibliothèques bien documentées, ce qui facilite son intégration dans un projet complexe comme celui-ci.



La Raspberry Pi 4 est responsable de l'exécution des algorithmes de contrôle et de la gestion des communications avec les moteurs et capteurs, permettant une synchronisation fluide des mouvements du bras robotique.

### 6.2 Alimentation :

Pour alimenter l'ensemble du système, nous avons utilisé des piles lithium rechargeables de 7.4 volts. Ce choix garantit une alimentation stable et suffisante pour les servomoteurs.



### 6.3 PCA9685 :

Le module PCA9685 a été utilisé pour contrôler les moteurs du bras. Il permet également de diviser l'alimentation, assurant une gestion efficace et stable de l'énergie.



### 6.4 XL4015 :

Le XL4015 est un module abaisseur de tension et de courant, utilisé pour convertir une tension d'entrée élevée en une tension stable plus faible.



## 7. Programmation :

### 7.1 Langage de programmation :

Pour le contrôle du bras robotique, nous avons choisi Python en raison de sa simplicité, de sa flexibilité et de la richesse de ses bibliothèques. En utilisant Python, nous avons pu implémenter des algorithmes de contrôle pour la cinématique directe et inverse, ainsi que pour la gestion des mouvements des servomoteurs.



### 7.2 Contrôle des servomoteurs :

Le contrôle des servomoteurs a été réalisé en utilisant la bibliothèque RPi.GPIO, qui permet de gérer les GPIOs de la Raspberry Pi. Les servomoteurs sont contrôlés via des signaux PWM (modulation de largeur d'impulsion) pour ajuster précisément les angles des articulations. Chaque servomoteur est relié à un pin GPIO de la Raspberry Pi, et la commande de mouvement est envoyée via des fonctions Python dédiées.

### 7.3 Interface utilisateur :

Une interface graphique simple a été développée avec Tkinter pour permettre à l'utilisateur de contrôler le bras robotique à partir de la Raspberry Pi. Cette interface permet de définir les angles des articulations et de visualiser les mouvements du bras en temps réel. Elle comprend également des fonctionnalités pour tester la cinématique inverse et définir des trajectoires précises.



## 8. Simulation :

### 8.1 Simulations sous RViz et Gazebo :

Avant de passer à la fabrication physique du bras robotique, des simulations ont été réalisées sous RViz et Gazebo pour tester le comportement du bras en environnement virtuel. Ces outils nous ont permis de simuler les mouvements du bras en réponse aux commandes de la Raspberry Pi et de vérifier le fonctionnement du système sans risque de dommages matériels.



## 9. Contraintes et Limitations

### 9.1 Contraintes :

1. **Contraintes de Temps** : Les délais serrés ont forcé une réduction de la portée du projet, limitant les fonctionnalités avancées comme la capacité à jouer aux échecs.
2. **Contraintes de Matériel** : Des achats imprévus de composants ont ajouté des délais et des coûts supplémentaires au projet.
3. **Contraintes d'Alimentation** : La gestion de l'alimentation pour les composants a nécessité l'utilisation de régulateurs de tension (comme le XL4015), afin d'éviter des problèmes d'alimentation instable.
4. **Utilisation du Microcontrôleur Raspberry Pi** : L'usage du Raspberry Pi, avec lequel l'équipe n'avait pas d'expérience, a introduit des difficultés dans la programmation et l'intégration des composants.
5. **Limitation de la Caméra** : La caméra Raspberry Pi a présenté des limites en termes de résolution et de puissance de traitement, affectant la performance des tâches de vision par ordinateur.
6. **Complexité de la Cinématique** : Le calcul des matrices homogènes pour la cinématique directe et inverse a nécessité une attention particulière pour éviter les erreurs de mouvement du bras robotique.
7. **Problèmes d'Assemblage** : L'assemblage des pièces imprimées en 3D a nécessité des ajustements pour garantir un montage correct des moteurs et articulations.

### 9.2 Limitations :

1. **Limitation de la Précision des Mouvements** : Le bras robotique à 4 DOF souffre de limitations mécaniques qui affectent la précision de certaines tâches fines.
2. **Capacité de Traitement de la Raspberry Pi** : La capacité de calcul du Raspberry Pi limite le traitement en temps réel des données issues de la caméra, notamment pour des applications complexes.
3. **Durabilité des Composants** : L'usure prématurée des servomoteurs peut limiter la longévité du bras robotique, nécessitant une sélection de moteurs plus robustes pour une utilisation à long terme.
4. **Limitation du Software** : Bien que Python et OpenCV soient utiles, leur capacité à gérer des tâches complexes de vision par ordinateur reste limitée par la configuration matérielle.
5. **Contraintes d'Adaptation à Différents Environnements** : Le bras robotique, conçu principalement pour un environnement de laboratoire, nécessite des modifications pour être utilisé efficacement dans des contextes réels avec des conditions variées.

## **10. Résultats et discussion :**

### **10.1 Performances du bras robotique :**

Après avoir mis en place tous les éléments du bras robotique et effectué les ajustements nécessaires, des tests ont été réalisés pour évaluer la précision des mouvements du bras et sa capacité à atteindre différentes positions dans l'espace tridimensionnel. Les résultats ont montré que le bras pouvait exécuter des mouvements précis avec une marge d'erreur inférieure à 2 cm sur les positions cibles. Cependant, certains ajustements ont été nécessaires pour optimiser le contrôle des servomoteurs et la stabilité des mouvements.

### **10.2 Analyse de la cinématique inverse :**

L'application de la cinématique inverse a permis de déterminer les positions et angles des articulations nécessaires pour atteindre un point donné dans l'espace. La résolution des équations s'est avérée efficace pour des configurations simples, mais des difficultés sont apparues lors des positions complexes, notamment en raison de la singularité du système lorsque certaines configurations d'articulations sont atteintes. Ces problèmes ont été minimisés en ajustant les trajectoires et en intégrant des mécanismes de contrôle adaptatifs pour éviter les erreurs de positionnement.

### **10.3 Impact des contraintes matérielles et temporelles :**

Les limitations matérielles et les contraintes de temps ont impacté la qualité du prototypage et la possibilité de tester pleinement certaines fonctionnalités avancées. Par exemple, la conception de pièces supplémentaires ou l'augmentation du nombre de capteurs n'a pas été possible. Néanmoins, les objectifs principaux du projet ont été atteints, et le bras robotique a montré une bonne capacité à manipuler des objets dans un environnement contrôlé.

## **11. Conclusion et perspectives :**

### **11.1 Conclusion générale :**

Ce projet de conception d'un bras robotique à 4 DOF a permis d'appliquer de manière concrète les concepts théoriques abordés dans le module de Conception et Modélisation des Systèmes Robotiques. Malgré les défis rencontrés, le projet a été un succès, avec un système capable de réaliser des tâches de manipulation avec une précision satisfaisante. Les différentes étapes de la conception mécanique, de la programmation, et des tests ont été complétées avec des résultats cohérents et satisfaisants dans l'ensemble.

### **11.2 Perspectives d'amélioration :**

Il existe plusieurs voies d'amélioration pour ce projet. Par exemple, la précision des mouvements pourrait être augmentée par l'intégration de capteurs de position supplémentaires tels que des encodeurs rotatifs ou des capteurs de force. L'ajout de fonctions avancées telles que l'apprentissage automatique pour la gestion des mouvements et la prise de décision pourrait également permettre d'améliorer l'efficacité et l'automatisation du bras robotique. De plus, des améliorations au niveau du système d'alimentation et de la gestion des erreurs de communication entre les composants sont envisageables pour rendre le bras plus robuste.