

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche
Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème

Conception et réalisation d'un robot parallèle à trois degrés de liberté

Devant le jury composé de :

MEGDOUD Soufiane Président
BOUSBIA Seif Eddine Examineur
MANSOURI Khaled Encadreur

Présenté par :

- HAMIED Taha Dhia El Hak
- BAKKOUCHE Ala Eddine

2017-2018

Remerciement

Tout d'abord (El-hamdoulillah), c'est lui qui nous donne l'effort, le Courage et la volonté pour réaliser ce projet.

Nous souhaitons adresser nos remerciements chaleureux à notre encadreur **Mr MANSOURI KHALED** pour avoir assuré la direction de ce mémoire et pour ses encouragements tout au long de cette année de travail.

Nous tenons aussi à présenter nos plus sincères reconnaissances à l'équipe **dzduino** qui, nous a mis à disposition certaines pièces.

Nos remerciements vont aussi à certaines personnes qui ont contribué à la mise en œuvre de ce projet, notamment **CHERIET Mokhtar, SALHI Belgacem, KACEMI Oussama**.

Dédicace

Je dédie ce travail à ma mère pour ses encouragements et ses prières tout au long de mes études. A l'âme de mon père qui nous a planté l'amour de science.

Je le dédie à mes frères et sœurs, et je les remercie pour leurs encouragements et leurs aides ainsi que toute ma grande famille.

A tous mes amis sans citer les noms.

Tables de Matières

Remerciement.....	i
Dédicace	ii
Liste des figures	v
Liste des tableaux	vii
Notations et Abréviations.....	viii
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Etat de l'art des machines à structure parallèle

I.1. Introduction	3
I.2. Types de robots industriels existants et définitions	4
I.2.1. Les robots industriels d'architecture sérielle.....	4
I.2.2. Avantages des robots série	5
I.2.3. Inconvénients des robots série.....	5
I.2.4. Les Robots parallèles	6
I.2.4.1. Définitions	6
I.2.4.2. Historique	7
I.2.4.3. Avantages	9
I.2.4.4. Inconvénients.....	10
I.2.5. Récapitulatif	11
I.2.6. Architectures parallèles	11
I.2.6.1. Introduction	11
I.2.6.2. La Plate-forme de Gough	11
I.2.6.3. Le robot Delta.....	13
I.2.6.4. Le robot Delta linéaire	14
I.3. Conclusion	15

Chapitre II : Modélisation de robot Delta linéaire

II.1. Introduction	17
II.2. Choix d'une architecture	17
II.2.1. Les performances dynamiques	17
II.2.2. Comportement thermique.....	17
II.2.3. La rigidité	18
II.3. Modélisation générique	19
II.3.1. Paramétrage.....	19
II.3.2. la description géométrique	19

II.3.3.	Modélisation géométrique.....	20
II.3.3.1.	Modèle géométrique inverse.....	21
II.3.3.2.	Modèle géométrique direct.....	21
II.3.4.	Modélisation cinématique.....	22
II.3.5.	Choix d'un agencement.....	23
II.3.6.	Réduction du nombre de paramètres.....	24
II.4.	Modélisation de l'architecture choisie.....	24
II.4.1.	Paramétrage.....	24
II.4.2.	Modèles géométriques.....	24
II.4.3.	Modèles cinématiques.....	27
II.4.4.	Dynamique.....	27
II.4.5.	Energie cinétique de système :.....	28
II.4.6.	Espace de travail :.....	29
II.5.	Conclusion.....	30

Chapitre III : Réalisation de Robot Delta linéaire

III.1.	Introduction.....	32
III.2.	Étapes du développement d'un projet robot Delta.....	32
III.3.	Choix des dimensions optimales de Robot Delta.....	33
III.4.	1 ^{er} partie : Conception et réalisation pratique le robot Delta.....	35
III.5.	2 ^{eme} partie command : Composants électriques et électroniques.....	41
III.6.	Résultats.....	44
III.6.1.	Introduction.....	44
III.6.2.	Résultats de simulation.....	44
III.7.	Conclusion.....	50
	Conclusion générale.....	51
	Références Bibliographiques.....	52
	Annexes A.....	55
A.1.	Notation des liaisons dans les graphes d'agencement.....	55
	Annexes B.....	56
B.1.	Schéma de contrôle.....	56

Liste des figures

Figure I.1 : Indices des prix des robots industriels en France (avec et sans ajustement de la qualité) comparé à l'indice des salaires (indices basés sur la conversion du \$ de 1990) – Source : Nations Unies, IFR.	3
Figure I.2 : Exemple de robot série : Robot IRB 6600ID (ABB).	4
Figure I.3 : Schéma d'un manipulateur à structure sérielle.	4
Figure I.4 : Architectures de robot d'après [4].	6
Figure I.5 : Premier robot parallèle sphérique, breveté en 1931 (Brevet US No. 1,789,680)[5]...	7
Figure I.6 : Premier robot parallèle spatial industriel, breveté en 1942 (Brevet US No. 2,286,571)[5].	8
Figure I.7 : La plate-forme de Gough et son agencement.	9
Figure I.8 : Robot Delta à 3 ddl en translation [13].	9
Figure I.9 : Quelques applications de la plate-forme de Gough.	12
Figure I.10 : Le FlexPicker et son agencement.	13
Figure I.11 : Quelques applications du robot Delta.	14
Figure I.12 : Architecture et paramètres géométriques du robot Delta linéaire [25] [26].	15
Figure II.1 : Description géométrique du robot Delta linéaire.	19
Figure II.2 : Points de la nacelle.	20
Figure II.3 : Illustration des agencements étudiés.	23
Figure II.4 : Schéma de principe.	24
Figure II.5 : Paramètres géométriques.	25
Figure II.6 : Espace de travail de robot Delta ($R=0.7$; $r=0.2$; $L=1.06$).	29
Figure III.1 : Étapes du développement d'un projet robot Delta.	32
Figure III.2 : Evolution de la fonction objective pendant les itérations.	34
Figure III.3 : Les individus optimaux.	34
Figure III.4 : Conditionnement de la matrice jacobienne inverse en fonction de L ($Rb = 0.35, Rn = 0.06$).	34
Figure III.5 : La base.	36
Figure III.6 : Le rail de guidage linéaire.	36
Figure III.7 : La vis à bille et écrou de bloc anti-retour pour vis.	37
Figure III.8 : La plaque à tige filetée.	37
Figure III.9 : La glissière complète.	38
Figure III.10 : Le moteur pas à pas.	38
Figure III.11 : La rotule.	39

Figure III.12 : La rotule et barre.....	39
Figure III.13 : La nacelle.	39
Figure III.14 : Robot Delta Linéaire assemblé.	40
Figure III.15 : Logo de logiciel «SolidWorks».	40
Figure III.16 : ARDUINO MEGA ADK.....	41
Figure III.17 : RAMPS 1.4.	42
Figure III.18 : DRV8825.	42
Figure III.19 : SMART CONTROLLER LCD.	42
Figure III.20 : La case de command.	43
Figure III.21 : Logo de logiciel «Arduino IDE ».	43
Figure III.22 : Trajectoire de centre de la nacelle dans le plans $z=0.1m$	44
Figure III.23 : La courbe de déplacement sur x à $z = 0.1m$	45
Figure III.24 : La courbe de vitesse (Vx) à $z=0.1m$	45
Figure III.25 : La courbe de l'accélération (Ax) à $z=0.1m$	45
Figure III.26 : La courbe de déplacement sur y à $z = 0.1m$	46
Figure III.27 : La courbe de vitesse (Vy) à $z=0.1m$	46
Figure III.28 : La courbe de l'accélération (Ay) à $z=0.1m$	46
Figure III.29 : La courbe de déplacement ($q1$).	47
Figure III.30 : La courbe de vitesse ($Vq1$).	47
Figure III.31 : La courbe de l'accélération ($Aq1$).	47
Figure III.32 : La courbe de déplacement ($q2$).	48
Figure III.33 : La courbe de vitesse ($Vq2$).	48
Figure III.34 : La courbe de l'accélération ($Aq2$).	48
Figure III.35 : La courbe de déplacement ($q3$).	49
Figure III.36 : La courbe de vitesse ($Vq3$).	49
Figure III.37 : La courbe de l'accélération ($Aq3$).	49
Figure A.1 : Conventions des graphes d'agencement.	55
Figure B.1 : représente les étapes de la commande.	56

Liste des tableaux

Tableau I.1 : <i>Tableau comparatif entre robot série et robot parallèle</i>	11
Tableau III.1 : <i>Solution optimale obtenue</i>	35

Notations et Abréviations

\mathcal{R}_b	Repère fixe (repère de base)
\mathcal{R}_n	Repère mobile (attaché à la nacelle)
L	Longueur des barres [m]
R	Rayon extérieur de robot [m]
r	Rayon de la nacelle [m]
q	Cordonnés articulaires (cordonnés des actionnaires) [m]
\dot{q}	Vitesse linéaire des actionnaires [m/s]
\ddot{q}	Accélération des actionnaires [m/s ²]
x	Cordonnés de centre de la nacelle [m]
\dot{x}	Vitesse de centre de la nacelle [m/s]
\ddot{x}	Accélération de centre de la nacelle [m/s ²]
J	La matrice Jacobienne
u	Vecteur unitaire
F_{mot}	Effort de poussée des moteurs [N]
F_{nac}	Torseur des efforts appliqués sur la nacelle [N]
F_{ext}	Efforts extérieurs (principalement les efforts de coupe) appliqués à la nacelle [N]
F_b	Efforts à l'intérieur des barres [N]
c	Conditionnement de la matrice Jacobienne
Abréviation :	
CAO	Conception assistée par ordinateur

Introduction générale

Pour certaines applications industrielles, les manipulateurs à cinématique sérielle ne semblent plus être les mieux adaptés. En effet, ce type d'architecture implique que chaque axe motorisé supporte le suivant. Les performances dynamiques se trouvent dégradées à cause de la cumulation des masses en mouvements.

C'est pour cette raison que les manipulateurs à cinématique parallèle sont aujourd'hui de plus en plus utilisés. La qualité élevée de leurs performances dynamiques ainsi que leurs aptitudes à supporter des charges importantes sont avantageusement mises à profit dans le monde industriel. Dans un premier temps, ils ont été utilisés comme simulateur de vol et comme robot de manutention ayant des cadences élevées. Actuellement, le monde de l'UGV, ainsi que le milieu médical, leur ouvrent les portes pour des applications de plus en plus précises. Or, c'est en termes de précision, que les manipulateurs à cinématique parallèle n'ont toujours pas montré leur supériorité sur leurs homologues à cinématique sérielle.

Ce travail porte sur la conception optimale d'un robot parallèle à trois degrés de liberté, suivi par une réalisation avec une étude géométrique et cinématique de ce système.

Ce manuscrit est divisé en 3 parties. Après un état de l'art des architectures existantes pour les applications industrielles, avec une présentation de robot Delta linéaire que nous choisissons à réaliser dans ce travail. Dans le Chapitre 2, est dédié à la modélisation géométrique, cinématique, et dynamique du robot considéré. Nous choisissons les architectures parallèles candidates. Parmi ces architectures, nous prenons le robot Delta afin de concevoir une machine trois axes, c'est-à-dire qui possède uniquement trois translations de la plateforme mobile.

Enfin, le Chapitre 3 traite du problème de la conception optimale des robots Delta linéaire en prenant en considération les performances cinématiques comme critères de performances et une résolution par la méthode de l'algorithme génétique implanté en Matlab. Suivi par une présentation des étapes de construction mécanique de notre machine avec un système de commande basée sur la carte Arduino. Une conception et simulation à réaliser sous un logiciel CAO 3D (SolidWorks) de modèle géométrique et cinématique de robot Delta linéaire.

Chapitre I : Etat de l'art des machines à structure parallèle

Dans ce chapitre, nous commençons tout d'abord par présenter les robots parallèles en énonçant quelques définitions et nous donnons une liste non exhaustive des différentes architectures qu'on trouve dans la littérature. Nous introduisons des notions nécessaires pour l'analyse et la manipulation des robots parallèles.

I.1. Introduction

Les robots industriels ont d'abord été massivement utilisés dans le secteur de l'automobile pour les applications de ferrage et d'assemblage. Ces applications utilisent des robots de type anthropomorphe à six degrés de liberté. Rapidement cependant, la robotique s'est élargie à d'autres secteurs et en particulier aux industries utilisant des tâches répétitives de prise-dépose d'objets, autrement appelées "pick-and place".

Ce segment est en perpétuelle évolution et connaît une croissance annuelle de l'ordre de 15 à 20%. Cette augmentation s'explique en partie par le couple "augmentation du coût de la main d'œuvre / réduction des coûts de fabrication des robots". En effet, entre 1990 et 2004, le prix des robots a chuté d'une façon très significative. A titre d'exemple, la Figure 1.1 représente l'évolution des prix des robots en se basant sur un indice de prix égal à 100 en 1990. Cette valeur 100 représente le coût d'achat moyen en 1990, ainsi que le salaire moyen en France pour cette même année. Il est également intéressant de noter que la qualité des robots s'est améliorée au cours de ces années, ce qui a pour effet de dévaluer d'autant l'indice de prix (courbe "prix des robots avec ajustement de qualité")[1].

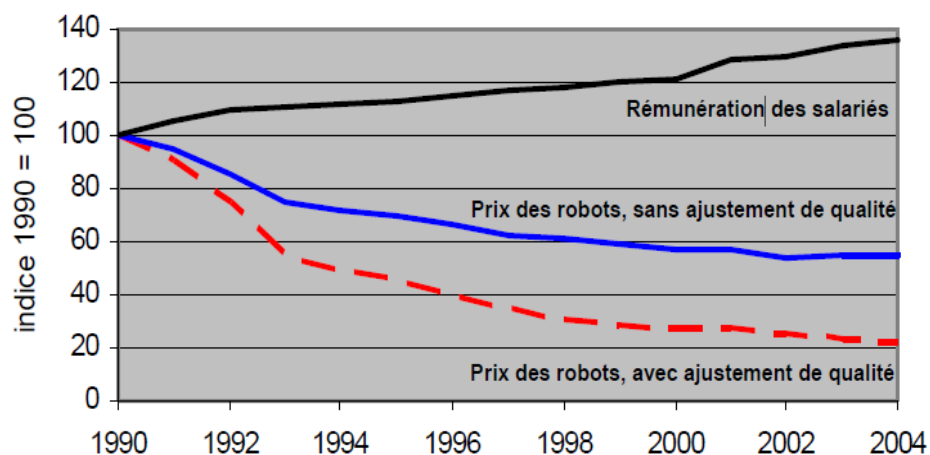


Figure I.1 : Indices des prix des robots industriels en France (avec et sans ajustement de la qualité) comparé à l'indice des salaires (indices basés sur la conversion du \$ de 1990) – Source : Nations Unies, IFR.

I.2. Types de robots industriels existants et définitions

I.2.1. Les robots industriels d'architecture sérielle

Selon l'Association Française de Normalisation (AFNOR) "un robot industriel est un manipulateur automatique, asservi en position, reprogrammable, polyvalent, capable de positionner et d'orienter des matériaux, pièces, outils ou dispositifs spécialisés au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution de tâches variées". (NF E 61100). Un robot manipulateur d'architecture sérielle (Figure I.2) est constitué d'une série n segments qui sont



Figure I.2 : Exemple de robot série : Robot IRB 6600ID (ABB).

reliés par un joint assurant une rotation ou une translation relative entre segments. La Figure I.3 illustre la structure d'un robot manipulateur série composé de $n + 1$ corps, notés $C_0, \dots, C_{i-1}, C_j, C_{j+1}, \dots, C_n$ et de n articulations. Le paramétrage de Denavit-Hartenberg modifié peut être utilisé pour paramétrer ce type d'architecture[2].

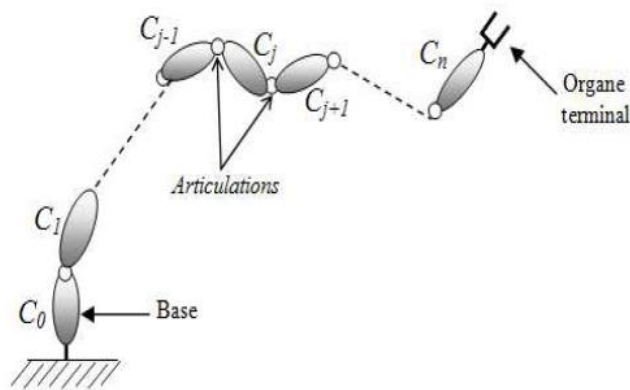


Figure I.3 : Schéma d'un manipulateur à structure sérielle.

I.2.2. Avantages des robots série

Les robots série constituent la majorité des robots installés dans l'industrie. Leur architecture mécanique est inspirée du bras humain. Ils ne sont pas nécessairement appropriés à toutes les tâches, du fait de ce caractère anthropomorphe. Un robot série est constitué d'une chaîne cinématique ouverte. Il s'agit d'une succession de segments reliés entre eux par des liaisons à un degré de liberté en rotation ou en translation ; chaque articulation est commandée par un actionneur situé à l'articulation ou sur l'un des segments précédents. Parmi les avantages que les robots série présentent, on peut citer :

- Grand volume de travail.
- Simplicité de la synthèse des lois de commande.

I.2.3. Inconvénients des robots série

Les principaux défauts des robots série sont les suivants :

- Une inertie élevée due aux masses réparties sur toute la chaîne cinématique (actionneurs et organes de transmission), peut engendrer des erreurs de positionnement, des vibrations et surtout limiter la rapidité.
- Précision médiocre, ceci est dû à l'accumulation d'erreurs le long de la chaîne cinématique.
- Faible rapport (charge transportable / masse totale du robot) qui n'est jamais supérieur à 0,3 dans le meilleur des cas[3].
- Manque de rigidité due à la mise en série d'éléments de la chaîne cinématique. Le fait que les éléments soient disposés en série, implique que chaque segment doit supporter la charge, mais aussi la masse des segments suivants, ce qui provoque la flexion.
- Une fatigue et une usure des liaisons de puissance assurant l'alimentation des actionneurs peuvent engendrer des pannes plus fréquentes.
- Une fatigue et une usure des liaisons assurant la circulation des informations entre les capteurs et la commande a des conséquences importantes sur la sécurité car une erreur de transmission peut engendrer des mouvements désastreux du robot.
- Les erreurs de conception mécanique et l'imprécision des capteurs s'accumulent et contribuent à diminuer la précision de l'organe terminal. De plus, il devient difficile de commander ces robots à des vitesses élevées car certaines forces perturbatrices (inertie, Coriolis et centrifuge) prennent de l'ampleur.

I.2.4. Les Robots parallèles

I.2.4.1. Définitions

Un manipulateur parallèle généralisé est un mécanisme en chaîne cinématique fermée dont l'organe terminal est relié à la base par plusieurs chaînes cinématiques indépendantes[3].

Cette définition générale d'un manipulateur parallèle permet de le distinguer d'un manipulateur sériel qui est composé d'une seule chaîne cinématique entre la base et l'organe terminal. L'association de ces deux types de structures permet de construire des structures dites hybrides (Figure I.4).

L'organe terminal fait référence à l'interface permettant au manipulateur d'interagir avec son environnement (pince, outil, torche à souder...)[2].

Pour les robots parallèles, l'élément du robot sur lequel est fixé l'organe terminal est généralement appelé plate-forme mobile ou nacelle. C'est ce dernier terme qui sera utilisé dans la suite de ce manuscrit.

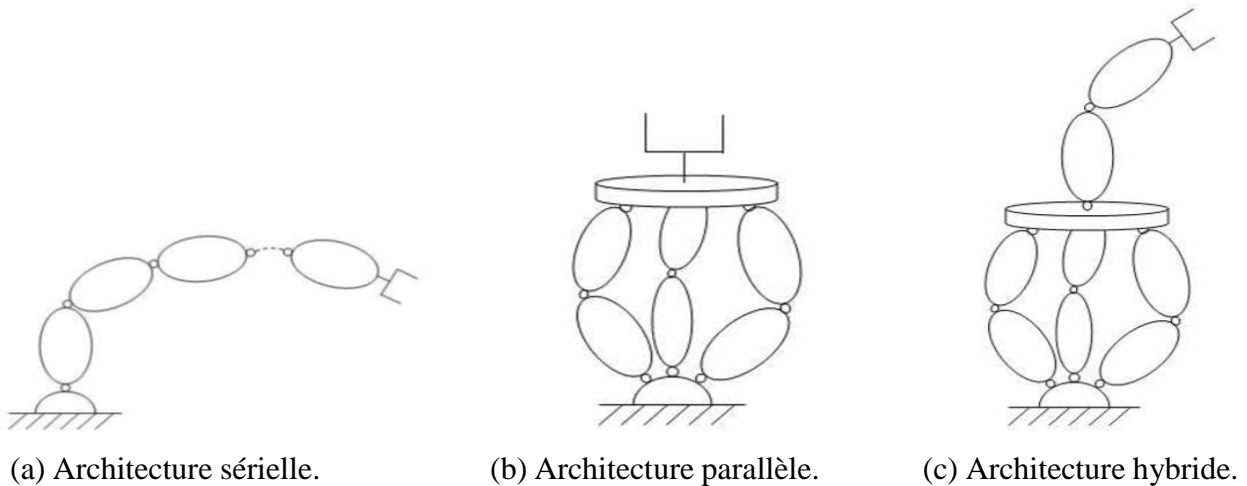


Figure I.4 : Architectures de robot d'après [4].

La pose de l'organe terminal désigne sa situation (position et orientation) dans l'espace. Elle est décrite par les coordonnées généralisées :

- x, y, z pour la position.
- ψ, θ, ϕ pour l'orientation. Ces angles peuvent être définis de plusieurs façon différentes suivant la convention utilisée : angles d'Euler, angles de Bryant (également appelés angles de Roulis-Tangage-Lacet), etc.

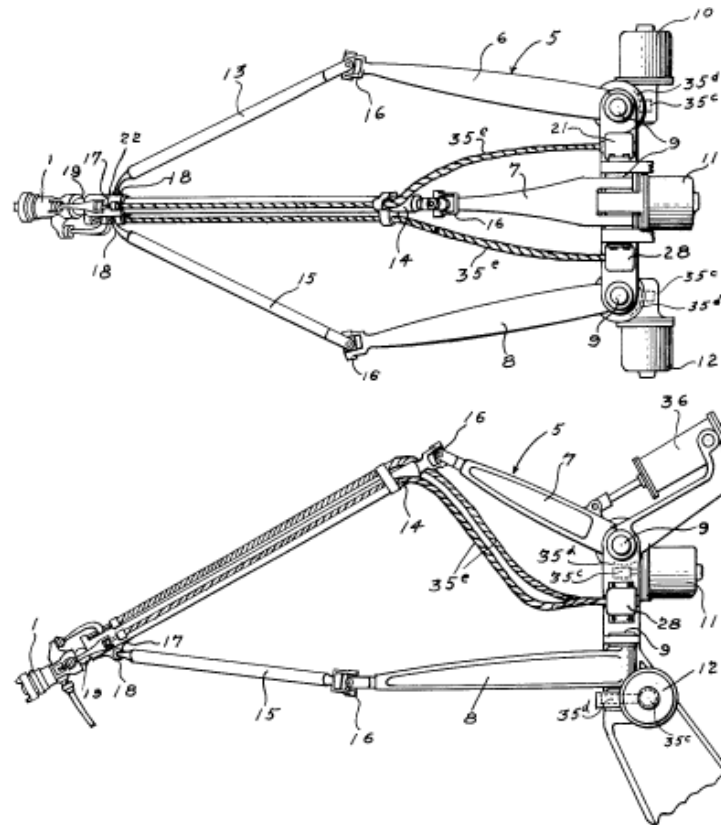
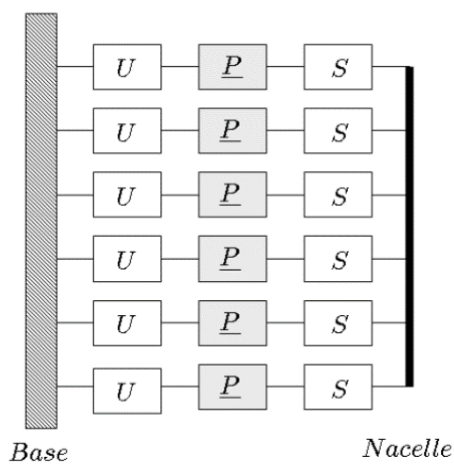
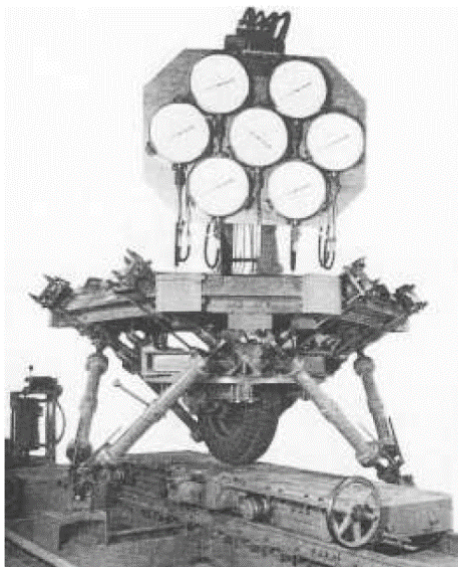


Figure I.6 : Premier robot parallèle spatial industriel, breveté en 1942 (Brevet US No. 2,286,571)[5].

Eric Gough, également appelé plate-forme de Gough [6]. Cet hexapode a été construit afin de tester des pneus pour la société Dunlop et le premier exemplaire a été produit en 1954 (Figure I.7 (a)). Pour beaucoup de chercheurs, l'invention de la plate-forme de Gough marque le début de l'ère des robots parallèles.

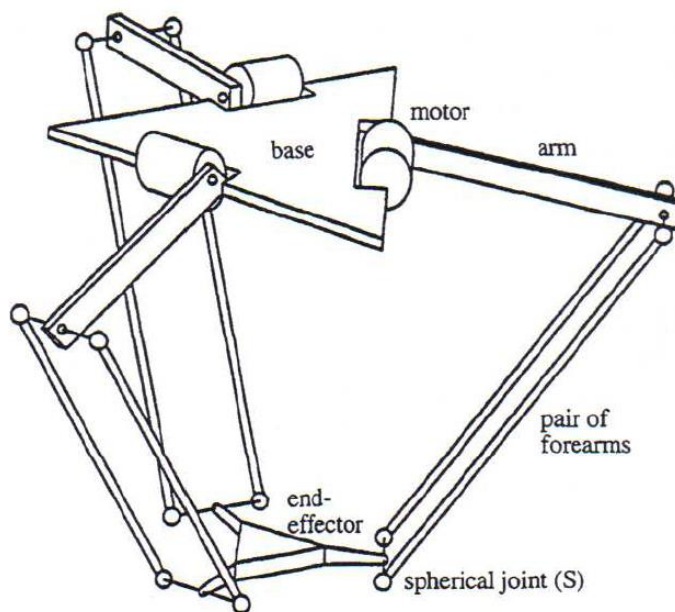
L'autre événement majeur de la robotique parallèle est l'invention du premier robot parallèle léger, le robot Delta, par le professeur Clavel dans les années 80 (Figure I.8). Ce robot, qui est à ce jour le robot parallèle le plus vendu dans le monde, marque l'arrivée des robots parallèles rapides destinés, entre autres, à des tâches de conditionnement. Le robot Par4, est un parfait exemple de l'engouement de l'industrie pour les robots parallèles rapides. En effet, une version commerciale du robot Par4, le robot Quattro développé par Adept, a récemment vu le jour et est actuellement le robot le plus rapide du marché (240 cycles par minute).

Il existe un grand nombre de cinématiques dérivées de robots parallèles et leurs applications possibles sont nombreuses : simulateur de vol, machine-outil, robot de prise et dépose, positionneur de haute précision, robot médical, capteurs d'effort, etc. Aujourd'hui encore, de nouveaux domaines s'ouvrent pour ces robots notamment grâce à la recherche sur les robots redondants [7] [8], les robots à câbles [9] [10] [11] ou les robots ultra rapides [12].



(a) Prototype original (Dunlop, Royaume-Uni).

(b) Graphe d'agencement.

Figure I.7 : La plate-forme de Gough et son agencement.**Figure I.8 :** Robot Delta à 3 ddl en translation [13].

I.2.4.3. Avantages

Les principales qualités associées aux robots parallèles dans la littérature sont :

- un rapport masse transportable / masse en mouvement du robot très supérieur à celui des robots sériels ;

- une bonne rigidité due aux chaînes cinématiques fermées.
- une bonne dynamique car les masses en mouvement sont généralement faibles.
- une meilleure précision que les robots sériels.

Si les trois premières qualités ont été démontrées sur la plupart des prototypes de robots parallèles, la quatrième semble beaucoup moins évidente. En effet, l'argument souvent évoqué est que les erreurs géométriques et les erreurs de contrôle sont moyennées sur les robots parallèles alors qu'elles s'accumulent sur un robot sériel. Or, Briot remarque qu'il n'existe aucune étude qui prouve que ce soit effectivement le cas [14].

Il propose donc d'étudier deux paires de robots à 2 ddl :

- deux robots à actionneurs rotatifs : un robot parallèle et un sériel.
- deux robots à actionneurs linéaires : un robot parallèle et un sériel.

Seule la sensibilité aux erreurs de position des actionneurs est étudiée, car elles sont la principale source d'erreur selon Merlet [15]. Cette étude montre que les robots parallèles étudiés sont moins sensibles aux erreurs de position des actionneurs que les robots sériels. Ces résultats obtenus pour ces deux paires de robots ne sont pas généralisables à l'ensemble des robots parallèles. Cependant, ils apportent un élément de réponse puisqu'ils montrent que, dans certains cas, il est possible d'obtenir des robots parallèles intrinsèquement plus précis que des robots séries.

I.2.4.4. Inconvénients

Les principaux défauts des robots parallèles sont :

- un Modèle Géométrique Direct (MGD) souvent complexe.
- un volume de travail faible par rapport à l'encombrement de la machine.
- des amplitudes en orientation souvent limités à cause des singularités et des collisions internes.
- un très grand nombre de topologies possibles.

L'atténuation de ces défauts a fait l'objet de nombreuses recherches. La redondance, par exemple, a été utilisée afin de faciliter la résolution du MGD, mais aussi pour obtenir de plus grandes orientations. Les travaux de thèse de Krut portaient essentiellement sur les problèmes de faibles débattements angulaires des robots parallèles [16]. Il apporte un certain nombre de solutions originales comme par exemple le dispositif Twice [17]. Les robots à nacelle articulée (H4, I4, Par4) développés au LIRMM répondent également en partie à ce problème d'orientation [18] [19]

[20]. Il existe également de nombreux travaux portant sur l'optimisation des dimensions des robots parallèles avec comme objectif de maximiser le rapport volume de travail / encombrement de la machine [21] [22].

I.2.5. Récapitulatif

Les avantages et les inconvénients des robots série et parallèles sont illustrés dans le tableau I :

Tableau I.1 : *Tableau comparatif entre robot série et robot parallèle.*

Critères de comparaison	Robots série	Robots parallèles
Charge transportable	Faible	Grande
Masse mobile (inertie)	Grande	Faible
Rigidité	Faible	Grande
Précision	Médiocre	Grande
Vitesse et Accélération	Médiocre	Très grandes
Ratio volume de travail/encombrement	Grande	Faible
Volume de travail	Grande	Faible
Singularité dans l'espace de travail	Rare	Présence de singularité
Obtention du modèle géométrique direct	Simple	Difficile
Obtention du modèle géométrique inverse	Difficile	Simple
Synthèse des lois de commande	Difficile	Difficile
Conception	Simple	Difficile

I.2.6. Architectures parallèles

I.2.6.1. Introduction

Il existe différentes façons de classer les robots parallèles. La plus répandue consiste à les regrouper en fonction de la spatialité de leur organe terminal. Il est difficile de faire une liste exhaustive de toutes les différentes architectures de robots parallèles, néanmoins Merlet répertorie un grand nombre de ces différentes architectures dans son livre dédié aux robots parallèles [3]. Dans la suite de ce manuscrit, nous nous intéressons essentiellement aux robots parallèles de type plate-forme de Gough, Delta et Delta linéaire. Nous allons donc présenter brièvement ces trois types de robots parallèles.

I.2.6.2. La Plate-forme de Gough

Description : Comme nous l'avons souligné précédemment, les hexapodes ont été les premiers robots parallèles industrialisés. Un des représentant de cette famille, la plateforme de Gough, est

l'une des architectures parallèles la plus étudiée et la plus reproduite dans le monde universitaire ainsi que dans le monde industriel [3].

La plate-forme de Gough fait partie de la famille des manipulateurs à six ddl et plus particulièrement des robots à chaînes UPS. Les six chaînes reliant la base à la nacelle sont identiques comme le montre le graphe d'agencement (Figure I.7 (b)).

Applications : la plate-forme de Gough a été utilisée dans différents domaines. La figure I.8 permet d'avoir un aperçu rapide de ces différentes applications. La plus classique reste le simulateur de vol (Figure I.9 (b)), mais il existe des applications plus exotiques comme le simulateur de houle conçu par l'entreprise Symétrie (Figure I.9 (d)).



(a) Machine-outil basée sur une plate-forme de Gough (Ingersoll, USA).



(b) Simulateur de vol (CAE, Canada).



(c) Hexapode de positionnement (Physik Instrumente, Allemagne).



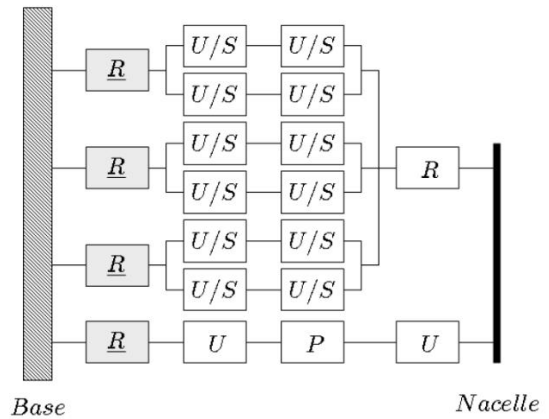
(d) Simulateur de houle (Symétrie, France).

Figure I.9 : Quelques applications de la plate-forme de Gough.

I.2.6.3. Le robot Delta



(a) FlexPicker de chez ABB (version industrielle du robot Delta)



(b) Graphe d'agencement du FlexPicker

Figure I.10 : *Le FlexPicker et son agencement.*

Description : le robot Delta est considéré comme le premier robot parallèle léger. Il a été développé par le professeur Clavel dans les années 80 à l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL) [13]. C'est l'un des premiers robots parallèles ayant moins de mobilités que les six ddl habituels. Le robot Delta original était muni de trois actionneurs rotatifs fixés sur la base (Figure I.7). Il fait partie de la famille des manipulateurs à trois ddl et plus particulièrement des manipulateurs pour translation. Les trois ddl du robot Delta lui permettent de positionner son organe terminal dans l'espace avec une orientation fixe aux tolérances de fabrication et de montage près. Il existe également un robot Delta dit linéaire, pour lequel les actionneurs rotatifs sont remplacés par des actionneurs linéaires [23]. Cette version est parfois appelée Linapod ou Triaglidle. L'Orthoglidle fait partie de cette famille des robots Delta à actionneurs linéaires [24] et présente en plus la particularité d'être isotrope au centre de son volume de travail. Dans la suite du manuscrit, ce type de robot sera appelé Delta linéaire.

Le robot Delta est constitué de trois chaînes cinématiques identiques $R(SS)_2$ (ou $P(SS)_2$ pour la version linéaire). L'utilisation de parallélogrammes spatiaux permet à la nacelle de se déplacer parallèlement à la base du robot.

Une variante de ce robot à quatre ddl existe. Une chaîne RUPU est ajoutée pour obtenir la rotation infinie de l'organe terminal par rapport à la normale au plan de la nacelle (Figure I.9 (b)).

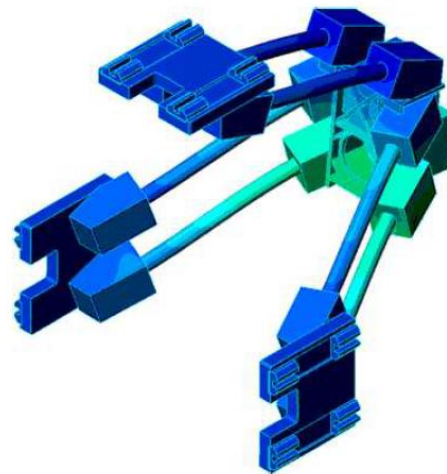
Applications : la principale application du robot Delta dans l'industrie est la prise et dépose (Figure I.10 (a)). Plusieurs fabricants proposent une version industrielle du robot Delta pour cette

application : ABB, Demarex, SIG. Le brevet étant tombé dans le domaine public en 2007, d'autres fabricants se sont lancés dans la fabrication du robot Delta. Comme nous l'avons déjà précisé, il est le plus gros succès commercial dans le domaine de la robotique parallèle.

Il existe d'autres applications du robot Delta. Dans le domaine de la robotique médicale, le Surgiscope[®] est un robot Delta qui permet de porter des outils pour des actes chirurgicaux sous le contrôle du chirurgien (Figure I.11 (a)). Comme la plate-forme de Gough, le robot Delta a également été utilisé comme base pour des machines-outils mais dans sa version linéaire (Figure I.11 (b)).



(a) Le SurgiScope[®] (Isis, France).



(b) La machine Quickstep (Krause & Mauser Group, Allemagne).

Figure I.11 : *Quelques applications du robot Delta.*

I.2.6.4. Le robot Delta linéaire

Description : Il s'agit d'un robot parallèle à 3 *ddl* en translation (Figure I.12), utilisant des actionneurs linéaires liés à la base par des glissières d'axe parallèle à \mathbf{z}_0 . Ce robot est principalement constitué d'une base fixe solidaire d'un bâti support de l'installation (non représenté) et d'une plateforme mobile (nacelle). La liaison entre la base fixe et la nacelle est assurée par trois chaînes cinématiques identiques espacées angulairement, chacune d'elles est formée d'un actionneur linéaire et de deux barres parallèles de longueur L , munies chacune d'une articulation rotule à chaque extrémité. L'ensemble barres parallèles et les deux éléments de liaison aux bras et à la nacelle sont nommés parallélogramme.

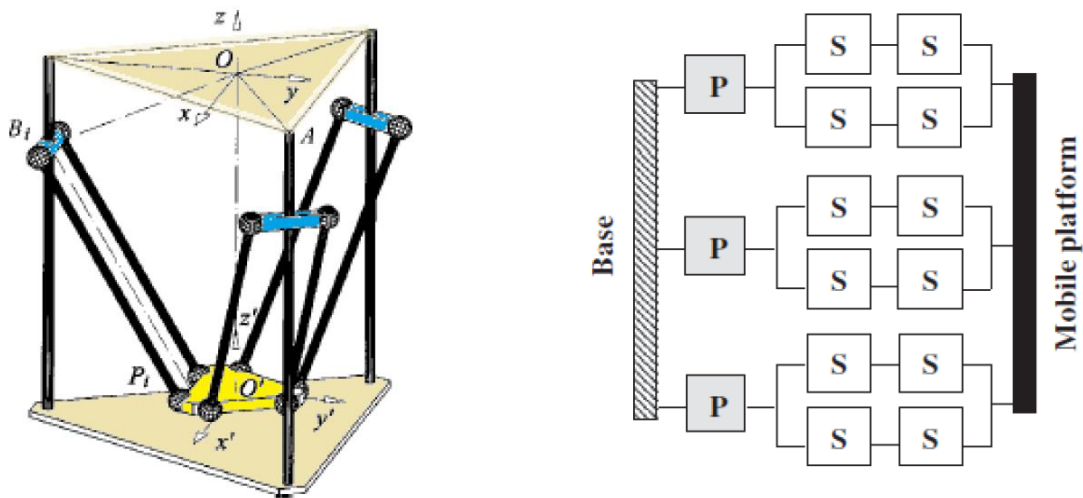


Figure I.12 : Architecture et paramètres géométriques du robot Delta linéaire [25] [26].

I.3. Conclusion

Ce chapitre a introduit les architectures de robots qui ont été étudiés durant nos travaux. Nous avons également rappelé les différentes définitions concernant la redondance en robotique et proposé des définitions pour les degrés de redondance d'actionnement, cinématique et métrologique. La présentation de quelques robots parallèles montre ensuite l'intérêt qu'il peut y avoir d'utiliser de telles géométries pour certaines applications. Ce chapitre aura également permis de définir le vocabulaire relatif aux capacités de positionnement des robots. Nous avons soumis un certain nombre de types liés à cette problématique. Parmi ces types introduits pour la conception et la réalisation de robots parallèles, nous avons choisis robot delta linéaire que nous allons présenter dans les chapitres suivants.

Chapitre II : Modélisation de robot Delta linéaire

II.1. Introduction

Dans ce chapitre nous présentons la conception d'une structure de robot delta à 3 degré de liberté en translation. Nous donnons une description générale et détaillée d'une chaîne cinématique parmi les 3 chaînes qui le composent. Comme nous donnons les modélisations géométriques, cinématique et dynamique de la structure proposée.

II.2. Choix d'une architecture

De par la nature des performances des machines-outils et des robots, nous pouvons établir un rapprochement entre ces deux types de machines, en notons toutefois que la valeur de ces performances n'est pas du même ordre de grandeur. Par conséquent, cette différence ne permet qu'à certaines architectures de robots parallèles d'être adaptées pour les machines-outils, dont les performances dynamiques, la précision, le comportement thermique et la rigidité sont des points très importants.

II.2.1. Les performances dynamiques

Des machines-outils conditionnent leur productivité. L'amélioration des performances dynamiques passe obligatoirement par une réduction des masses en mouvement. Le principal intérêt d'utiliser des mécanismes parallèles à la place des architectures série réside dans le fait que leurs performances dynamiques sont intrinsèquement meilleures. Afin de profiter au maximum de l'amélioration de ces performances, nous devons choisir des architectures dont les pièces en mouvement sont les plus légères possibles, c'est à dire les structures dont les actionneurs (qui comptent parmi les pièces les plus massives) sont fixés sur le bâti de la machine.

II.2.2. Comportement thermique

La précision des machines est un autre point important qui est influencée par la qualité de réalisation de leurs organes, par la finesse de leur étalonnage ainsi que par leur comportement thermique. L'énergie thermique dissipée par les moteurs provoque une augmentation de la température des « pattes » de la machine, cette augmentation de température induit un allongement des barres qui nuit au positionnement précis de l'outil. La solution idéale est d'évacuer l'énergie thermique dissipée par les moteurs dans le bâti.

II.2.3. La rigidité

Des organes de la chaîne cinématique reliant la broche à l'outil est un point capital pour les machines-outils et ce afin que les efforts de coupe ne provoquent pas un déplacement de l'outil trop important entraînant un défaut de la géométrie et de la position de la surface usinée, même si ces efforts de coupe diminuent en usinage TGV. Pour obtenir une machine rigide, chacune des pièces chargées du mécanisme doit avoir une déformation minimale ce qui implique soit, l'utilisation de pièces massives au détriment de la dynamique de la machine, soit, un chargement des pièces favorable par rapport à leur géométrie. Nous voyons que, par rapport à notre problème, la deuxième solution est préférable.

Enfin, concernant la simplicité de réalisation, il est préférable d'utiliser des actionneurs fixes afin d'éviter la déformation des câbles qui les alimentent et éventuellement celle des canalisations qui les refroidissent.

Les points suivants ressortent de notre phase de réflexion sur la conception d'une machine-outil parallèle performante :

- Actionneurs fixes sur le bâti.
- Utilisation d'actionneurs linéaires.
- Chaînes cinématiques identiques.
- Pas de chaîne passive.
- Utilisation de barres de longueur constante.

Compte tenu de la réduction de l'espace de recherche à laquelle nous venons de procéder, il ne reste, parmi les architectures parallèles connues à ce jour, que deux architectures candidates : l'architecture Delta dont la nacelle possède trois degrés de liberté de translation et l'architecture P-U-S à six degrés de liberté, cette architecture ayant déjà été utilisée pour la réalisation de machines-outils (HexaM) [27]. En fonction de la nature des tâches que devra effectuer la machine à construire (usinage trois axes) on va choisir l'architecture Delta, pour cette dernière, trouver le meilleur type d'agencement. Pour cela, nous modélisons de manière générique l'architecture choisie afin d'évaluer un ou plusieurs critères de performance.

II.3. Modélisation générique

II.3.1. Paramétrage

Terminologie :

Nous appellerons « barres » les pièces reliant la nacelle aux actionneurs. Pour un agencement de type Delta, ces barres sont regroupées par paires.

Les mécanismes étudiés comportent une partie fixe reliée à une partie mobile (nacelle) par plusieurs barres. Nous utilisons deux repères.

- Un repère \mathcal{R}_b fixe, attaché arbitrairement au centre du volume de travail, soit le point O.
- Un repère \mathcal{R}_n mobile, attaché à la nacelle. Nous désignerons par position de la nacelle l'origine du repère \mathcal{R}_n dont les coordonnées sont exprimées dans \mathcal{R}_b , soit le point E.
- Pour un agencement de type Delta, la disposition des articulations de la machine impose au repère \mathcal{R}_n de rester parallèle au repère \mathcal{R}_b . Pour simplifier notre exposé, les axes de \mathcal{R}_n seront choisis parallèles et de même sens que ceux de \mathcal{R}_b .

II.3.2. La description géométrique

Les barres d'une même paire reliant la nacelle aux actionneurs sont toutes deux de longueur l_i . Elles sont attachées d'un côté, à la nacelle de part et d'autre du point B_i (points B_{i1} et B_{i2}) et de l'autre côté, à l'actionneur numéro i de part et d'autre du point A_i (points A_{i1} et A_{i2}) comme présenter dans le Figure II.1.

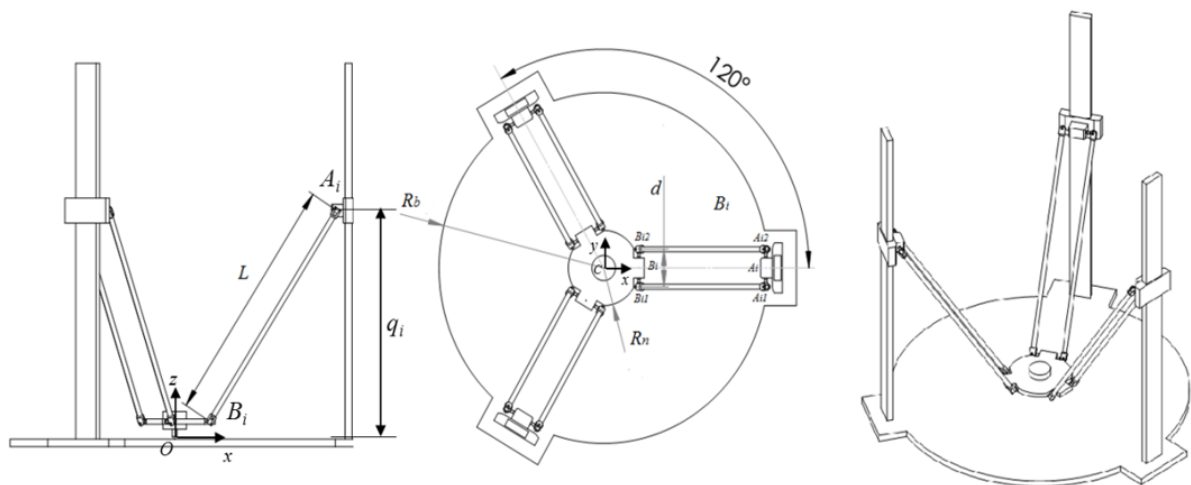


Figure II.1 : Description géométrique du robot Delta linéaire.

La Figure II.2 décrit la position des différents points considérés sur la nacelle :

- Le point G est le centre de gravité (situé sur l'axe de symétrie) de l'ensemble nacelle + électro-broche.
- Le point C est le centre de la nacelle.
- Le point D est le point correspondant à la face avant du cône de la broche. Les vitesses de la nacelle sont mesurées en ce point.
- Le point E est le point piloté. La position de la nacelle est donnée par les coordonnées de ce point.
- Le point F est le point d'application des efforts de coupe.

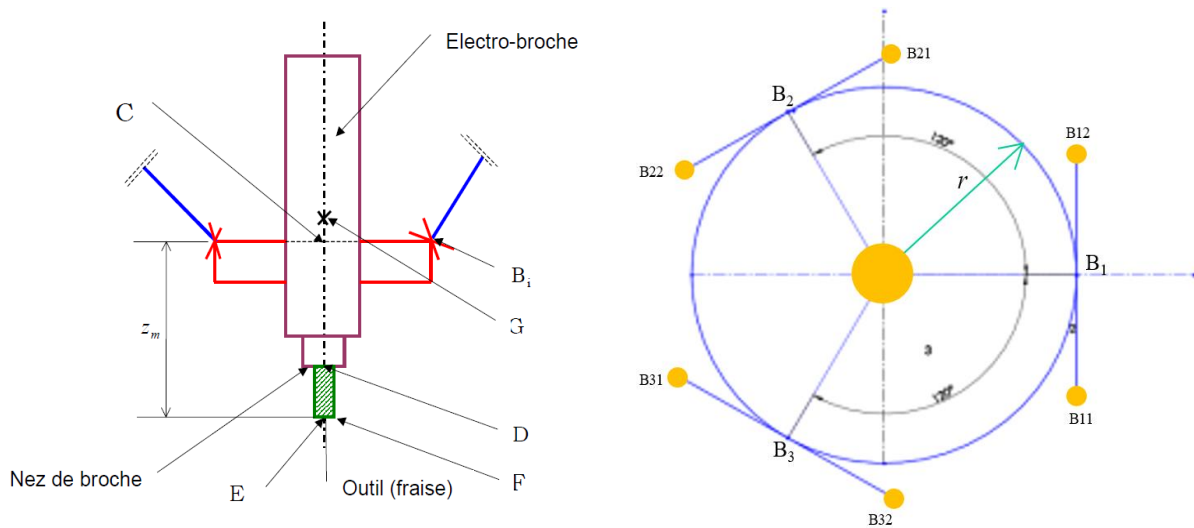


Figure II.2 : Points de la nacelle.

II.3.3. Modélisation géométrique

Les modèles géométriques direct et inverse sont les relations qui expriment la situation de l'organe terminal du robot (la nacelle dans le cas présent) en fonction de la configuration du mécanisme (coordonnées articulaires) et inversement [13].

Dans notre cas de l'architecture Delta l'orientation reste constante (le paramétrage de l'orientation de la nacelle est inutile car cette dernière reste parallèle à un plan de référence) et seulement trois actionneurs sont utilisés. Nous devons alors résoudre un système de trois équations à trois inconnues.

Soit :

- \mathbf{P} la matrice contenant les coordonnées des points \mathbf{P}_i exprimées dans le repère \mathcal{R}_b .

- A la matrice contenant les coordonnées des points A_i exprimées dans le repère \mathcal{R}_b .
- U la matrice contenant les composantes des vecteurs u_i exprimées dans le repère \mathcal{R}_b .

II.3.3.1. Modèle géométrique inverse

Pour calculer le vecteur des variables articulaires q (les coordonnées suivant z des points A), nous écrivons que chacun des segments $A_i B_i$, pour $1 < i < k$ ($k = 3$) a une longueur constante l_i . Ce qui nous donne le système de trois équations.

$$q_i^2 - q_i[2(x - P_i B_i)u_i] + [(x - P_i B_i)^2 - l_i^2] = 0 \quad (\text{II.1})$$

En répétant cette procédure pour chacune des k chaînes du robot, nous obtenons un système de k équations reliant la position de la nacelle à la position des actionneurs. Chacune de ces équations est un polynôme du second degré en q_i . Ce polynôme possède soit :

- Deux solutions complexes conjuguées. Dans ce cas la position x de la nacelle n'est pas accessible.
- Une solution réelle double. Dans ce cas, le mécanisme est dans une position singulière.
- Deux solutions réelles distinctes (position régulière).

Si la position x est régulière, deux solutions réelles distinctes existent. Nous choisissons arbitrairement de ne conserver que la plus grande (pour obtenir la configuration correspondant à la plus petite, il suffit d'inverser le sens du vecteur directeur unitaire u_i).

Nous en déduisons le modèle géométrique inverse pour une position x est :

$$q_i = (x - P_i B_i)u_i + \sqrt{[(x - P_i B_i)u_i]^2 + [(x - P_i B_i)^2 - l_i^2]} \quad (\text{II.2})$$

II.3.3.2. Modèle géométrique direct

Le modèle géométrique direct permet de calculer la position et l'orientation du point piloté de la nacelle, connaissant la position des actionneurs. Pour obtenir ce modèle, il faut résoudre le système (II-2) par rapport aux variables x (aucune orientation dans l'architecture Delta). Dans le cas général, cette résolution ne peut se faire que de manière implicite car il n'existe pas de solution analytique à ce problème [28]. Nous remarquerons cependant que cette résolution est possible analytiquement, en particulier pour l'architecture Delta.

II.3.4. Modélisation cinématique

Le modèle cinématique établit la relation entre la vitesse de la nacelle en translation et en rotation (que nous noterons $\dot{\mathbf{x}}$) et $\dot{\mathbf{q}}$ (vitesse linéaire des actionneurs) pour une position et une orientation donnée de la nacelle.

L'équiprojectivité des vitesses d'un solide est la propriété qui sera utilisée afin d'établir les modèles cinématiques. Cette propriété sera appliquée à chacune des k barres. Pour la barre numéro i , nous avons :

$$V_{Ai} \cdot A_i B_i = V_{Bi} \cdot A_i B_i \quad (\text{II.3})$$

Avec : $V_{Ai} = \dot{q}_i \cdot u_i$, $V_{Bi} = V_c$ (car l'orientation est constante)

D'où $\dot{q}_i \cdot u_i \cdot A_i B_i = \dot{\mathbf{x}} \cdot A_i B_i$

L'écriture pour l'ensemble des k barres nous donne l'écriture matricielle :

$$J_q \dot{\mathbf{q}} = J_x \dot{\mathbf{x}} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$$J_q = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \cdot u_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 B_2 \cdot u_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 B_3 \cdot u_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.5})$$

$$J_x = \begin{bmatrix} (A_1 B_1)_x & (A_1 B_1)_y & (A_1 B_1)_z \\ (A_2 B_2)_x & (A_2 B_2)_y & (A_2 B_2)_z \\ (A_i B_i)_x & (A_i B_i)_y & (A_i B_i)_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.6})$$

Le modèle cinématique inverse est l'expression de $\dot{\mathbf{q}}$ en fonction de $\dot{\mathbf{x}}$. L'écriture du modèle cinématique inverse à partir de l'équation (II-4) est alors :

$$\dot{\mathbf{q}} = J_q^{-1} J_x \dot{\mathbf{x}} \quad (\text{II.7})$$

Soit en posant $J = J_q^{-1} J_x$

$$\dot{\mathbf{q}} = J^{-1} \dot{\mathbf{x}} \quad (\text{II.8})$$

Où J est appelée la matrice Jacobienne.

Le modèle cinématique directe est l'expression de $\dot{\mathbf{x}}$ en fonction de $\dot{\mathbf{q}}$. Compte tenu des notations précédentes et de l'équation (II-8), le modèle cinématique direct s'écrit :

$$\dot{\mathbf{x}} = J \dot{\mathbf{q}} \quad (\text{II.9})$$

II.3.5. Choix d'un agencement

Maintenant que nous avons choisi et modélisé des points de vue géométrique et cinématique une architecture, il nous reste à répondre à deux questions : Comment allons-nous disposer les glissières (topologie T) et quelles dimensions (D) allons-nous retenir ? Souvent les outils utilisés en synthèse de mécanismes résolvent ces deux problèmes simultanément. Nous avons choisi de répondre à ces deux questions séparément l'une après l'autre, car, dans notre cas, le choix de la topologie relève de critères dont certains sont subjectifs et l'optimisation des dimensions de critères qualitatifs. Dans un premier temps nous allons déterminer quel est le meilleur type d'agencement et après nous rechercherons quelles sont les dimensions optimales pour cet agencement.

L'illustration de différents agencements est donnée sur la Figure II.3

Nous choisissons la solution « glissières parallèles à l'axe z » car l'encombrement de cette solution est faible et sa réalisation est plus simple que les autres.

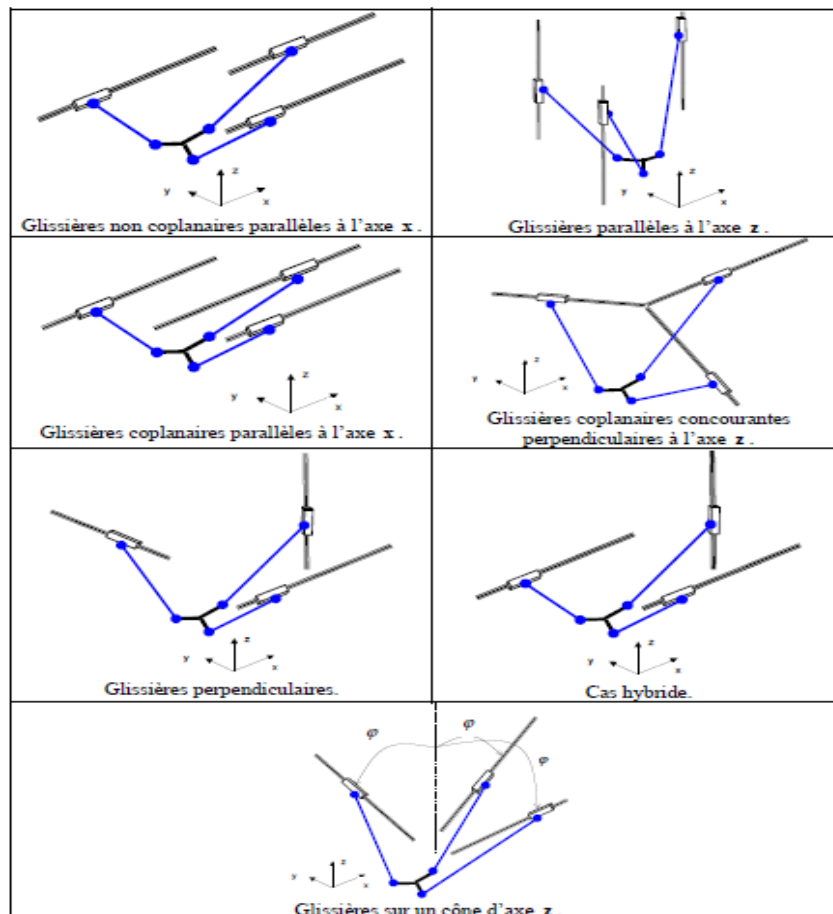


Figure II.3 : Illustration des agencements étudiés.

II.3.6. Réduction du nombre de paramètres.

La réduction du nombre de paramètres c.-à-d. une simplicité de réalisation de la machine, par exemple, si les points P_i sont sur un cercle et espacés angulairement de manière régulière, nous n'utiliserons que deux paramètres pour décrire leur position : le rayon du cercle et la valeur angulaire de leur espacement. De même nous considérerons que toutes les barres du mécanisme ont la même longueur L . Nous obtenons ainsi un nombre réduit de paramètres.

Nous réalisons une « contraction » de la nacelle. En effet, nous considérerons que la nacelle comme un disque de centre C et tous les points B sont placés sur la circonférence du disque. Et on considérera que chaque paire des barres comme une barre équivalente.

II.4. Modélisation de l'architecture choisie.

II.4.1. Paramétrage.

L'illustration de l'architecture que nous avons choisie est représentée Figure II-4.

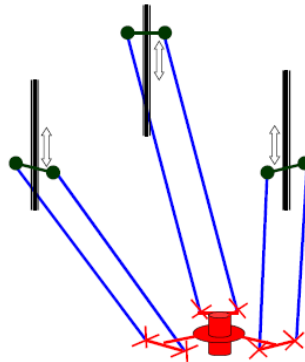


Figure II.4 : Schéma de principe.

Le paramétrage de cet agencement est présenté en Figure II.4. Les glissières sont disposées sur un cylindre de rayon R . La nacelle a pour rayon r . L'espacement angulaire des glissières est de 120 degrés.

II.4.2. Modèles géométriques

Le modèle géométrique du robot permet d'exprimer la situation (position et orientation) de l'organe terminal $(x \ y \ z)^T$ par rapport à un repère de référence $\{R_0\}$, connaissant les variables articulaires de commande $(q_1 \ q_2 \ q_3)^T$ et inversement. Les équations de contraintes peuvent être choisies de la manière suivante :

Coordonnées des points P_i dans le repère fixe :

$$[P_1 \ P_2 \ P_3] = \begin{bmatrix} R & -\frac{R}{2} & -\frac{R}{2} \\ 0 & R\frac{\sqrt{3}}{2} & -R\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.10})$$

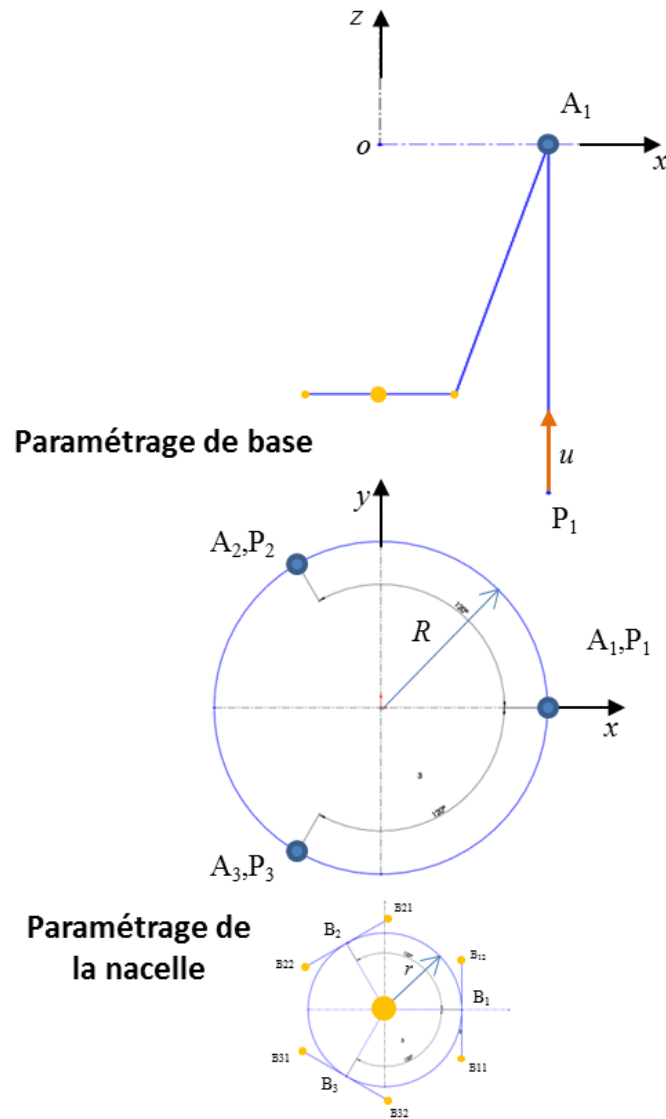


Figure II.5 : Paramètres géométriques.

Coordonnées des points B_i dans le repère mobile R_n :

$$[B_1 \ B_2 \ B_3] = \begin{bmatrix} r & -\frac{r}{2} & -\frac{r}{2} \\ 0 & r\frac{\sqrt{3}}{2} & -r\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

Composantes des vecteurs \mathbf{u}_i dans le repère fixe :

$$[u_1 \quad u_2 \quad u_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Nous obtenons l'expression analytique du modèle géométrique inverse :

$$\begin{cases} q_1 = z + \sqrt{L^2 - (r - R + x)^2 - y^2} \\ q_2 = z + \sqrt{L^2 - \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 - \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2} \\ q_3 = z + \sqrt{L^2 - \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 - \left((R - r)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2} \end{cases} \quad (\text{II.13})$$

Pour obtenir l'expression analytique du modèle géométrique direct, nous devons résoudre le système (II-14) par rapport aux variables x , y et z .

$$\begin{cases} (r - R + x)^2 + y^2 + (z - q_1)^2 = L^2 \\ \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 + \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2 + (z - q_2)^2 = L^2 \\ \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 + \left((R - r)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2 + (z - q_3)^2 = L^2 \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Le système (II-14) peut se réécrire :

$$\begin{cases} (A^2 + C^2 + 1)z^2 + 2(C(D - (R - r)) + A * B - q_1)z \\ \quad + B^2 + (D - (R - r))^2 + q_1^2 - L^2 = 0 \\ y = Az + B \\ x = Cz + D \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

$$\text{Avec : } A = \frac{(q_2 - q_3)}{\sqrt{3}(r - R)} \quad B = \frac{(q_3^2 - q_2^2)}{\sqrt{3}(r - R)} \quad C = \frac{A(q_2 - q_1) - A\sqrt{3}(r - R)}{3(r - R)}$$

$$D = \frac{q_1^2 - q_2^2 - B\sqrt{3}(r - R)}{3(R - r)}$$

La première équation du système (II-15) admet deux solutions qui correspondent à deux positions de la nacelle. La solution correspondant à la machine étudiée est la position basse. Il faut donc conserver la plus petite des deux solutions de l'équation polynomiale. Connaissant, nous pouvons ensuite calculer x et y de manière unique.

II.4.3. Modèles cinématiques

Dans le cas de l'architecture choisie et avec le paramétrage de la Figure II.5, les matrices J_x et J_q de l'équation (II-7) s'écrivent :

$$J_x = \begin{bmatrix} r - R + x & y & z - q_1 \\ \frac{1}{2}(R - r) + x & \frac{\sqrt{3}}{2}(r - R) + y & z - q_2 \\ \frac{1}{2}(R - r) + x & \frac{\sqrt{3}}{2}(R - r) + y & z - q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

$$\text{et } J_q = \begin{bmatrix} z - q_1 & 0 & 0 \\ 0 & z - q_2 & 0 \\ 0 & 0 & z - q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.17})$$

II.4.4. Dynamique

Nous recherchons l'expression de $\ddot{\mathbf{q}}$ (accélération des moteurs) en fonction de $\ddot{\mathbf{x}}$ (accélération désirée de la nacelle). En réalité est également fonction de $\dot{\mathbf{x}}$, $\dot{\mathbf{q}}$, \mathbf{x} et \mathbf{q} . La connaissance de cette relation nous permet de déterminer les caractéristiques requises concernant l'accélération des moteurs en fonction des performances en accélération demandées à la nacelle. L'expression recherchée s'obtient en dérivant le modèle cinématique par rapport au temps), nous obtenons :

$$\ddot{\mathbf{q}} = J^{-1}\ddot{\mathbf{x}} + J_q^{-1}(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{\mathbf{x}} \quad (\text{II.18})$$

Pour l'arrangement de l'architecture Delta que nous avons retenu, les matrices \dot{J}_x et \dot{J}_q , s'expriment analytiquement :

$$\dot{J}_x = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_1 \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_2 \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_3 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \quad (\text{II.19})$$

$$\dot{J}_q = \begin{bmatrix} \dot{z} - \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{z} - \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{z} - \dot{q}_3 \end{bmatrix} \dot{\mathbf{x}} \quad (\text{II.20})$$

Nous constatons que l'accélération des moteurs est composée de la somme de deux termes :

$J^{-1}\ddot{\mathbf{x}}$ L'accélération des actionneurs due à l'accélération de la nacelle.

$(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x}$ L'accélération des actionneurs due au déplacement de la nacelle à une vitesse constante. Ce terme traduit le non linéarité de la relation entre la vitesse des actionneurs et la vitesse de la nacelle.

Le modèle dynamique inverse donne la poussée que doit fournir chacun des moteurs pour des vitesses et des accélérations données de la nacelle. Cette poussée des moteurs doit vaincre les forces de frottement (négligées dans cette étude), les efforts extérieurs appliqués à la nacelle, l'inertie des moteurs en translation et l'inertie de la nacelle en translation.

- $M_{mot}\ddot{q}$ composante de l'effort moteur due à l'accélération de la masse (M_{mot}) de la partie mobile des moteurs (secondaire du moteur + liaison rotule). Tous les moteurs sont identiques (modularité). Qui peuvent s'écrire aussi : $M_{mot}J^{-1}\ddot{x} + M_{mot}J_q^{-1}(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x}$.
- ${}^t J F_{ext}$ Composante de l'effort moteur due aux efforts extérieurs (principalement les efforts de coupe) appliqués à la nacelle.
- ${}^t J F_{nac,acc,D} = M_{nac} {}^t J \ddot{x}$: Composante de l'effort moteur due à l'accélération de la masse de la nacelle (M_{nac}) exprimé au point D.

Après regroupement, le modèle dynamique inverse s'écrit :

$$F_{mot} = (M_{nac} {}^t J + M_{mot} J_q^{-1})\ddot{x} + M_{mot} J_q^{-1}(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x} + {}^t J F_{ext}$$

II.4.5. Energie cinétique de système :

L'énergie cinétique de robot est donnée par la relation :

$$T = T_{nac} + \sum_1^3 T_{mot} \dot{x} \quad (\text{II.21})$$

L'énergie cinétique de la nacelle est :

$$T_{nac} = \frac{1}{2} M_{nac} \dot{x}^2 = \frac{1}{2} M_{nac} \dot{q}^T J^T J \dot{q} \quad (\text{II.22})$$

L'énergie cinétique de chaque moteur est :

$$T_{mot} = \frac{1}{2} M_{mot} v_{m,i}^2 \quad (\text{II.23})$$

Où :

$$v_{m,1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \dot{q} = J_{m,1} \dot{q} \quad , \quad v_{m,2} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dot{q} = J_{m,2} \dot{q} \quad , \quad v_{m,3} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dot{q} = J_{m,3} \dot{q}$$

$$\text{Et} \quad \dot{q} = {}^T [\dot{q}_1 \quad \dot{q}_2 \quad \dot{q}_3]$$

$$\text{Donc} \quad T_{mot} = \frac{1}{2} M_{mot} \dot{q}^T J_{m,i}^T J_{m,i} \dot{q}$$

Par conséquent, l'énergie cinétique du robot est :

$$T = \frac{1}{2} M_{nac} \dot{q}^T J^T J \dot{q} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} M_{mot} \dot{q}^T J_{m,i}^T J_{m,i} \dot{q} \quad (\text{II.24})$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T I \dot{q} = \frac{1}{2} \dot{q}^T \left(M_{nac} J^T J + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} M_{mot} J_{m,i}^T J_{m,i} \right) \dot{q} \quad (\text{II.25})$$

D'après :

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{x}$$

La matrice masse de robot est donnée par :

$$M = J^{-T} I J^{-1} = J^{-T} \left(M_{nac} J^T J + \frac{1}{2} M_{mot} \sum_{i=1}^3 J_{m,i}^T J_{m,i} \right) J^{-1} \quad (\text{II.26})$$

II.4.6. Espace de travail

L'espace de travail E est l'un des facteurs les plus importants pour la conception de robots parallèles [29, 30]. Théoriquement, c'est l'ensemble de l'espace de configuration que l'organe terminal peut atteindre. Cet espace est défini par ses limites qui sont imposées par les articulations (active et passive), les longueurs des segments et par les collisions internes.

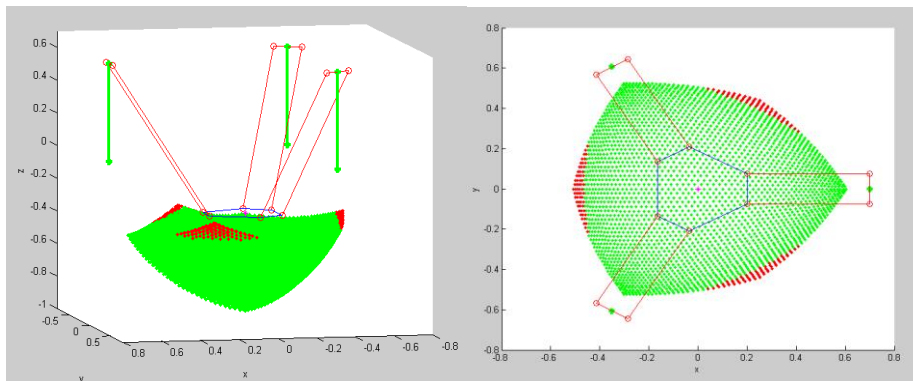


Figure II.6 : Espace de travail de robot Delta ($R=0.7$; $r=0.2$; $L=1.06$).

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté la limite des robots d'architecture parallèle dans le domaine des robots.

Nous avons choisi le robot delta (robot parallèle à 3 degrés de liberté) et l'agencement correspondant. Et pour cet agencement nous avons fait une modélisation générique de la structure, et enfin la détermination de modèle géométrique, cinématique et dynamique correspondant.

Chapitre III : Réalisation de Robot Delta linéaire

III.1. Introduction

Après l'étude théorique générale de robot parallèle, on arrive à la réalisation pratique. Ce chapitre est réparti en trois parties, la première concerne une formulation d'un problème d'optimisation afin de trouver des dimensions optimales de robot Delta,

Et en deuxième partie, la réalisation les différents parties de notre machine, avec une conception de ces pièces par un logiciel CAO (SolidWorks). Ensuite, l'assemblage de toutes les pièces mécaniques et électriques de robot Delta. Enfin, nous allons présenter le système de commande de notre système ou nous utilisons la carte Arduino pour effectuer le contrôle de moteur de robot.

Finalement, nous allons présenter graphiquement la solution du modèle géométrique et cinématique de robot delta (Analytique, et les résultats de la simulation).

III.2. Étapes du développement d'un projet robot Delta

Les étapes principales appliquées dans ce travail :



Figure III.1 : *Étapes du développement d'un projet robot Delta.*

III.3. Choix des dimensions optimales de Robot Delta

Dans cette partie, une formulation d'un problème d'optimisation se fait, afin de trouver les dimensions optimales de notre mécanisme, nous prenons la performance cinématique comme critère. Les paramètres géométriques du robot Delta à optimiser sont :

- Pour la base : le rayon de la base R_b .
- Pour la plateforme mobile : le rayon de la plateforme mobile R_n .
- Pour les segments : la longueur L des segments constituant les trois parallélogrammes.

Pour mesurer la performance cinématique, nous pouvons utiliser l'indice d'isotropie (conditionnement de la matrice Jacobienne (Equ.II-9)).

Il est à noter que l'indice d'isotropie cinématique dépend largement de la configuration et des paramètres géométriques du robot. Nous utilisons les indices globaux η_J (très souvent utilisée pour comparer les différentes structures), qui sont définies par les moyennes des indices locaux sur l'espace de travail accessible.

Par conséquent le problème peut être formulé comme suit :

« *Trouver un vecteur P^* (vecteur des variables de conception) tel que : $\min (\eta_J)$ »*

$$\text{Où : } \eta_J = \frac{\int c_j dE}{\int dE} \quad \text{et} \quad c_j = \text{cond}(J) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}}$$

σ_{\max} : la valeur propre maximale de J

σ_{\min} : la valeur propre minimale de J

- Limite de l'espace de travail x et y (m)

$$X_{es} = \begin{cases} -0.15 \leq x \text{ (m)} \leq 0.15 \\ -0.15 \leq y \text{ (m)} \leq 0.15 \end{cases}$$

- Limites des variables de conception

$$0.35 \leq L \text{ (m)} \leq 0.75$$

$$0.2 \leq R_b \text{ (m)} \leq 0.35$$

$$0.06 \leq R_n \text{ (m)} \leq 0.1$$

D'après définir tous les paramètres de problème, et les données par rapport le robot Delta. L'utilisation de l'algorithme génétique sous Matlab, nous donne les résultats présentés graphiques qui sont présentées dans les Figures (III.2 et III.3).

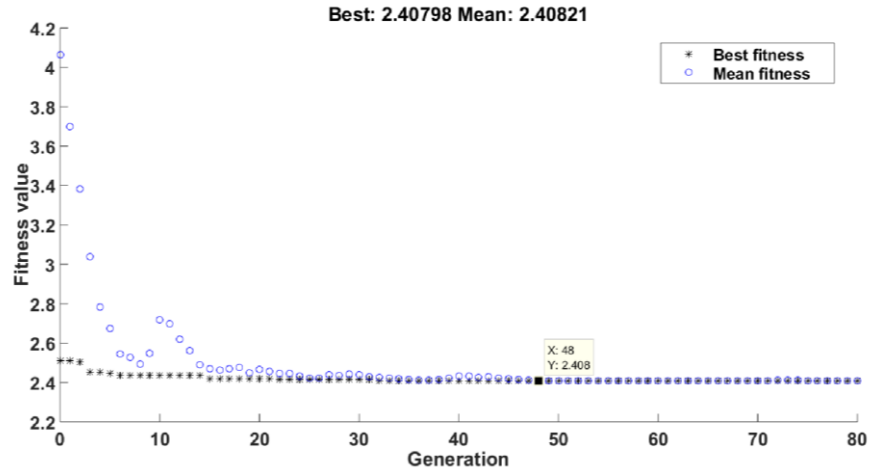


Figure III.2 : Evolution de la fonction objective pendant les itérations.

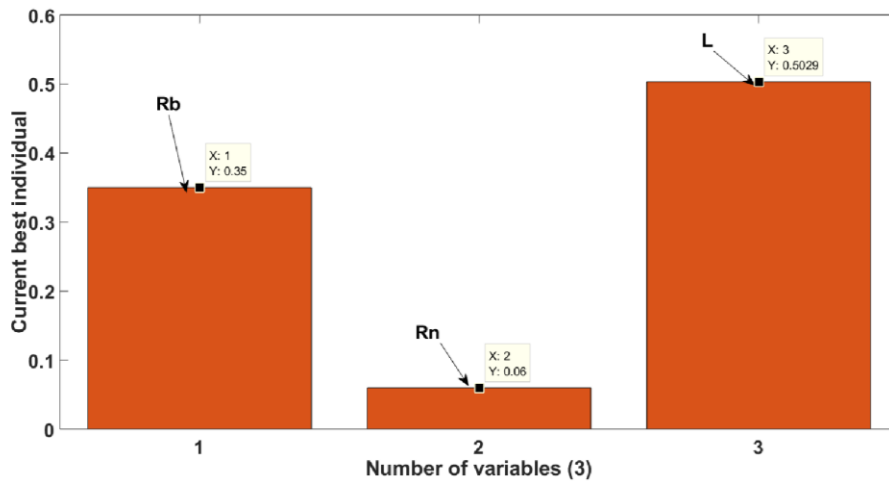


Figure III.3 : Les individus optimaux.

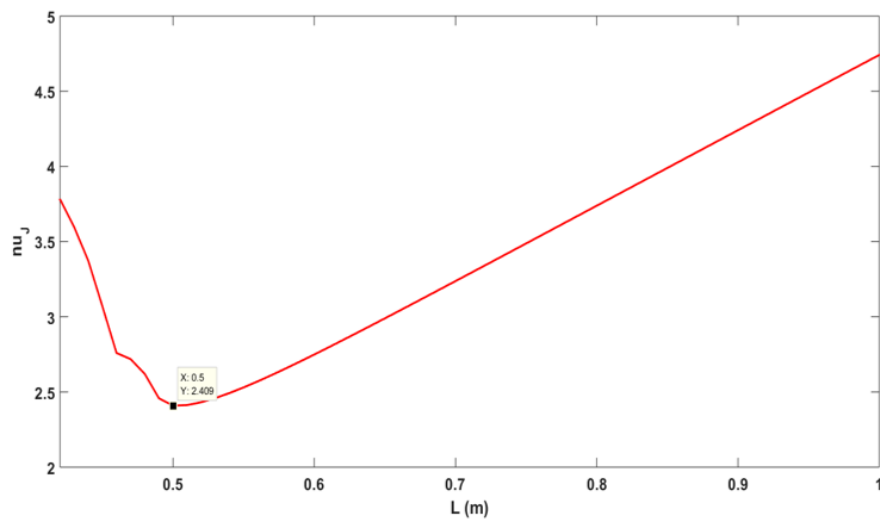


Figure III.4 : Conditionnement de la matrice jacobienne inverse en fonction de L ($R_b = 0.35, R_n = 0.06$).

La Figure III.4 montre qu'il existe une valeur de $L_{opt,cond}$, qui minimise le conditionnement, mais nous voyons que ce dernier évolue peu pour $L > L_{opt,cond}$.

L'optimisation de notre machine nous donne les dimensions optimales (Tableau III.1) que nous allons utiliser dans la partie suivante.

Tableau III.1 : *Solution optimale obtenue.*

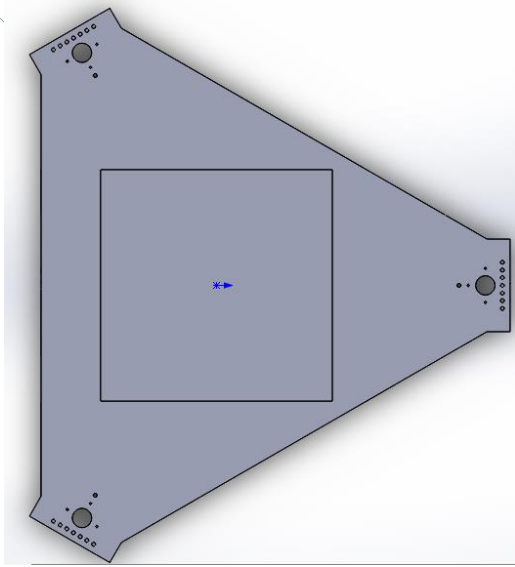
Fonction objective	Rb	Rn	L
η_J	(m)	(m)	(m)
2.408	0.35	0.06	0.5029

III.4. 1^{er} partie : Conception et réalisation pratique le robot Delta

Dans ces paragraphes on parle de la conception et réalisation pratique de différentes parties de robot Delta :

- **La base.**
- **Moteur linéaire.**
 - **Le rail de guidage linéaire.**
 - **La vis à bille et écrou de bloc anti-retour pour vis.**
 - **la plaque à tige filetée.**
 - **La glissière.**
 - **Le moteur pas à pas**
- **La rotule et barre (parallélogramme).**
- **La nacelle.**

La base : c'est le bas et la partie supérieure de la structure et son rôle est de soulever des charges de construction et d'assurer leur fixation.



(a) *Modèle CAO.*

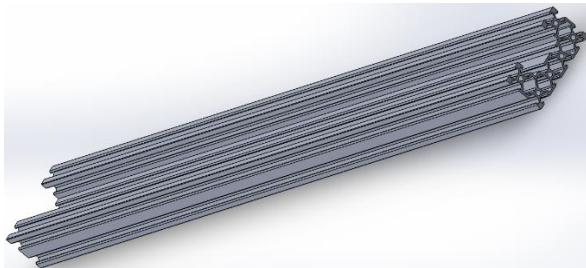


(b) *Après la réalisation.*

Figure III.5 : *La base.*

Moteur linéaire :

Le rail de guidage linéaire : cela nous permet de fixer les parties bas et supérieur de base. De plus, assurer de créer rapidement des actionneurs linéaires.



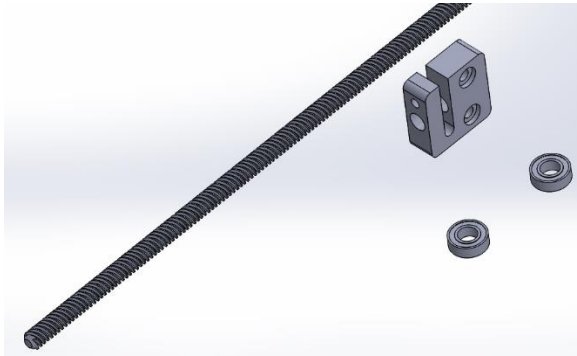
(a) *Modèle CAO.*



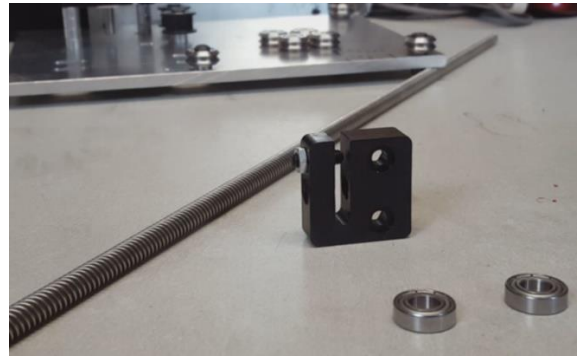
(b) *Après la réalisation.*

Figure III.6 : *Le rail de guidage linéaire.*

La vis à bille et écrou de bloc anti-retour pour vis :



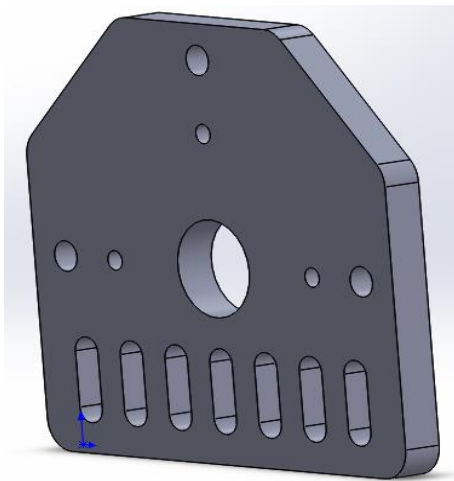
(a) Modèle CAO.



(b) Après la réalisation.

Figure III.7 : La vis à bille et écrou de bloc anti-retour pour vis.

La plaque à tige filetée : Il est utilisé à la fin du bras.



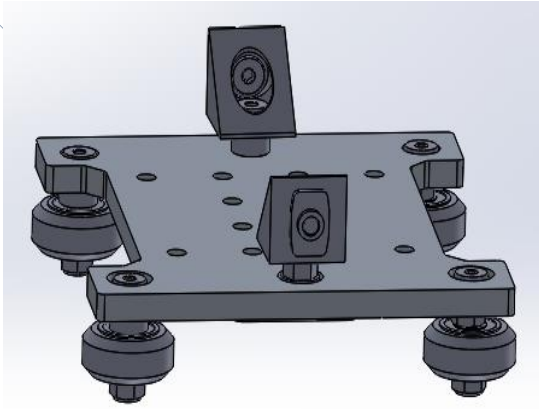
(a) Modèle CAO.



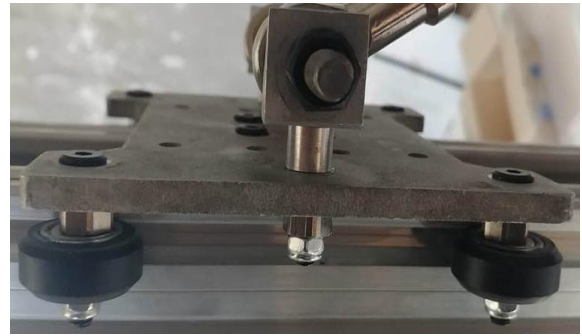
(b) Après la réalisation.

Figure III.8 : La plaque à tige filetée.

La glissière : cela permet nous donne un mouvement linéaire sur le rail de guidage linéaire.



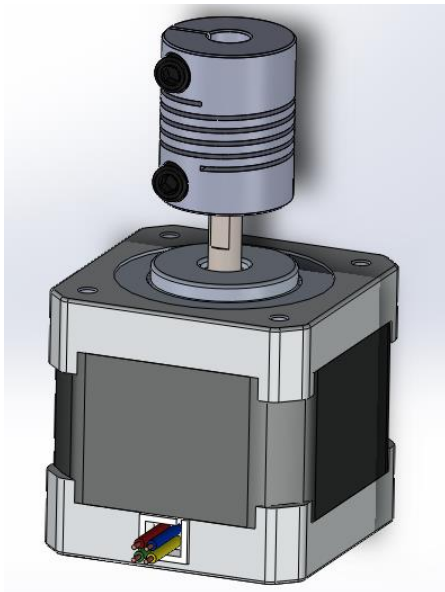
(a) Modèle CAO.



(b) Après la réalisation.

Figure III.9 : La glissière complète.

Le moteur pas à pas : est un moteur électrique utilisé dans les petites machines qui ont besoin de contrôle de précision dans leurs moteurs tels que l'imprimante, coupe-laser etc.



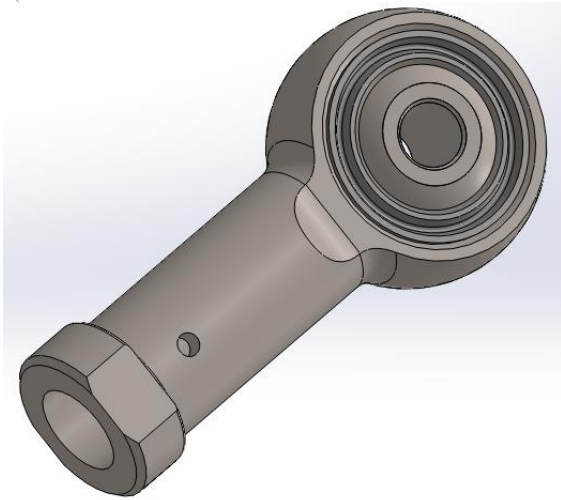
(a) Modèle CAO.



(b) Après la réalisation.

Figure III.10 : Le moteur pas à pas.

La rotule et barre (parallélogramme) : sont les éléments qui relient la glissière (la base) et la nacelle avec des articulations rotules.

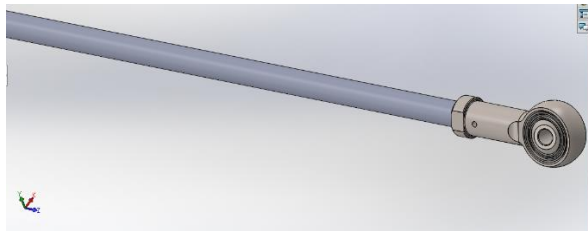


(a) Modèle CAO.



(b) Après la réalisation.

Figure III.11 : La rotule.



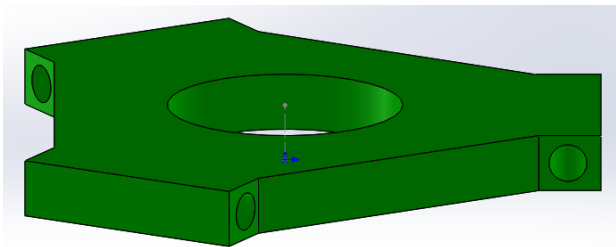
(a) Modèle CAO.



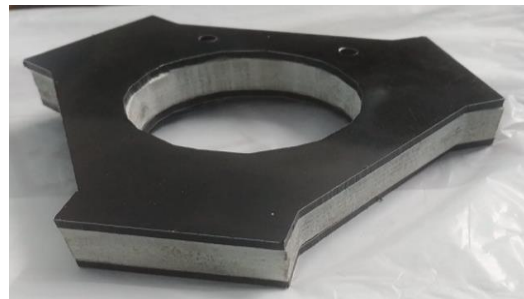
(b) Après la réalisation.

Figure III.12 : La rotule et barre.

La nacelle : c'est l'organe terminal qui portant les outils des travaux (outils d'usinage, tête d'imprimant 3D,..).

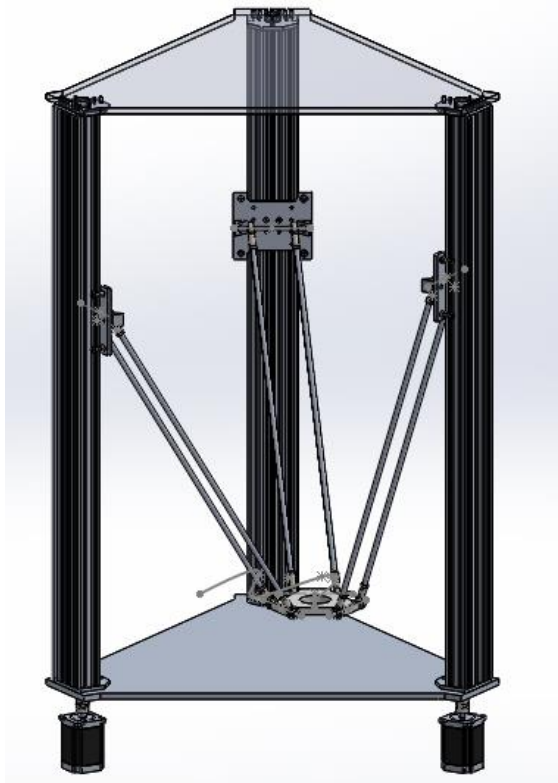


(a) Modèle CAO.

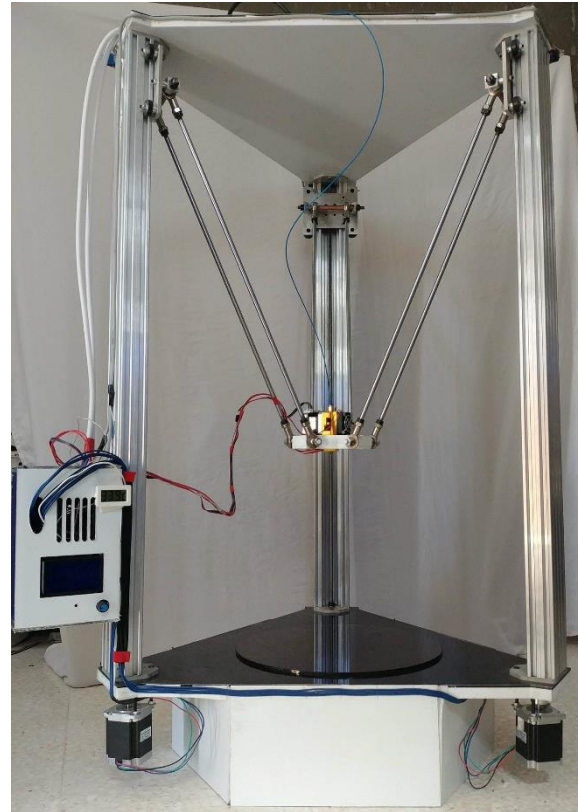


(b) Après la réalisation.

Figure III.13 : La nacelle.



(a) Modèle CAO.



(b) Après la réalisation.

Figure III.14 : Robot Delta Linéaire assemblé.

On fait la simulation de ce mécanisme par logiciel « SolidWorks »

SolidWorks : est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows.



SOLIDWORKS

Figure III.15 : Logo de logiciel «SolidWorks».

III.5. 2^{ème} partie command : Composants électriques et électroniques

Dans ces paragraphes on parle des composants électriques et électroniques pratique de différentes parties de robot Delta :

- **La case de command.**
 - ARDUINO MEGA ADK
 - RAMPS 1.4 REPRAP ARDUINO MEGA POLOLU SHIELD FOR 3D PRINTER & CNC
 - DRV8825 PILOTE DU MOTEUR PAS À PAS
 - SMART CONTROLLER LCD

La case de command :

ARDUINO MEGA ADK : Arduino est une plate-forme de prototypage d'objets interactifs à usage créatif constituée d'une carte électronique et d'un environnement de programmation.

La carte Arduino repose sur un circuit intégré (un mini-ordinateur appelé également microcontrôleur) associée à des entrées et sorties qui permettent à l'utilisateur de brancher différents types d'éléments externes.



Figure III.16 : ARDUINO MEGA ADK.

RAMPS 1.4 : La Ramps (RepRap Arduino Mega Pololu Shield) est une carte conçue pour piloter le circuit de puissance d'une imprimante 3D et pour y connecter les différents senseurs, stop-ends, etc.



Figure III.17 : *RAMPS 1.4.*

DRV8825 : C'est un contrôleur de moteur pas à pas en micro_stepping ; leur avantage contrôle en courant ajustable, à l'aide d'un potentiomètre, Protection en cas de surchauffe, court-circuit.

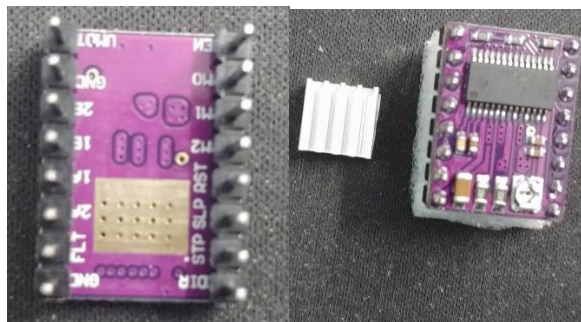


Figure III.18: *DRV8825.*

SMART CONTROLLER LCD:

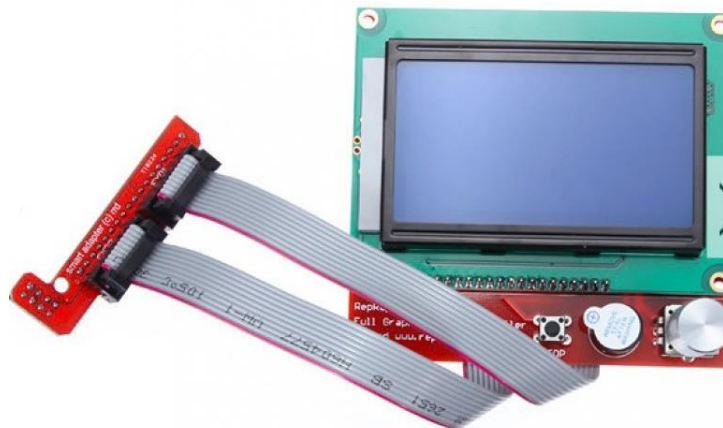


Figure III.19 : *SMART CONTROLLER LCD.*



Figure III.20 : *La case de command.*

Logiciel de programmation «Arduino IDE »

La carte Arduino programmé par l'environnement Arduino IDE.

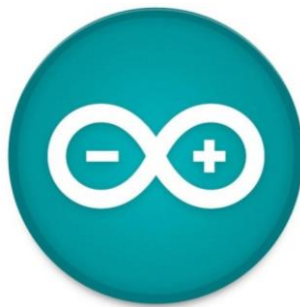


Figure III.21 : *Logo de logiciel «Arduino IDE ».*

III.6. Résultats

III.6.1. Introduction

On s'intéresse à cette partie après avoir collecté les pièces du robot en expérimentant le mouvement de Figure III.22 et en étudiant la cinématique de notre robot.

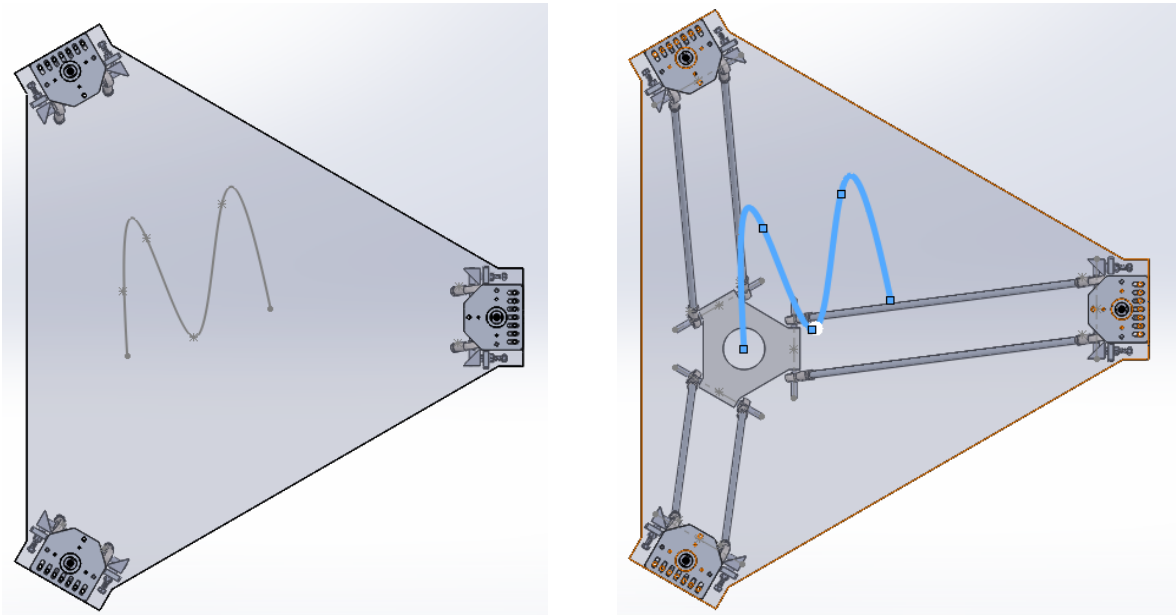


Figure III.22 : Trajectoire de centre de la nacelle dans le plans $z=0.1m$.

III.6.2. Résultats de simulation

Dans cette partie, nous choisissons une trajectoire de centre de la nacelle (Figure III.22), et d'après la simulation exécutée en SolidWorks nous donne la solution du modèle géométrique et cinématique de notre système.

Les figures suivantes présentent les déplacements, les vitesses, et les accélérations des coordonnées articulaires ou les paramètres des liaisons motorisées q suivant la trajectoire choisie précédemment.

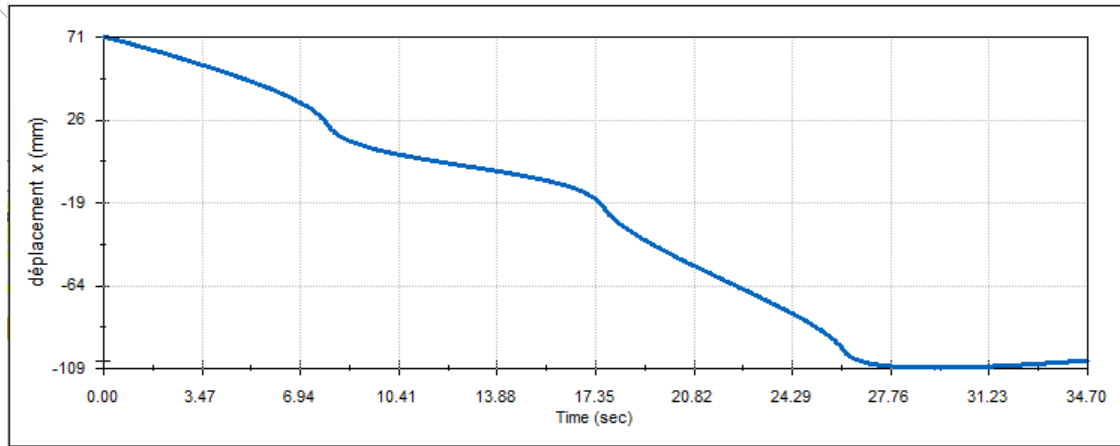


Figure III.23 : La courbe de déplacement sur x à $z = 0.1m$.

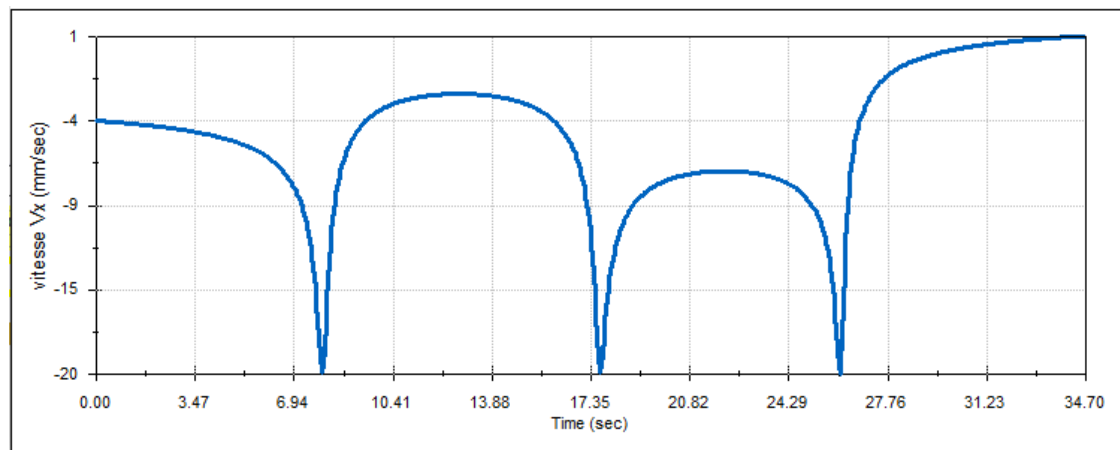


Figure III.24 : La courbe de vitesse (V_x) à $z=0.1m$.

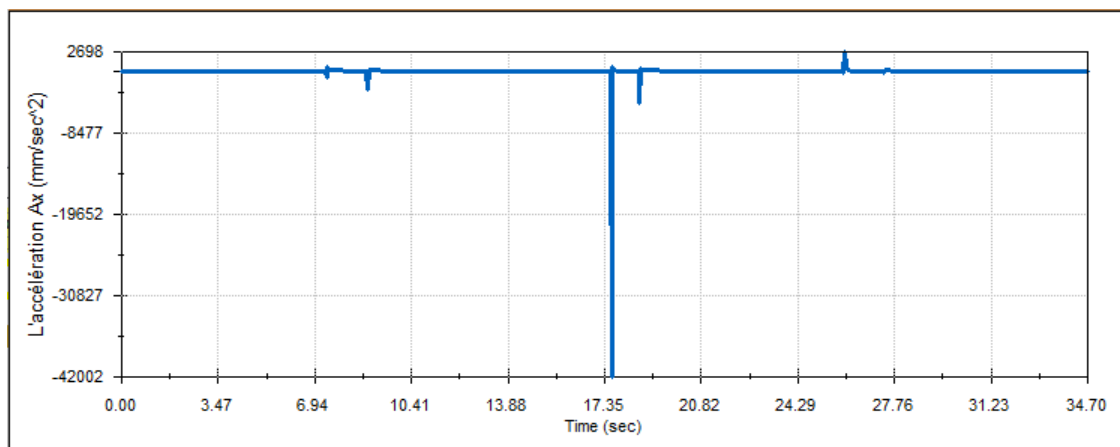


Figure III.25 : La courbe de l'accélération (A_x) à $z=0.1m$.

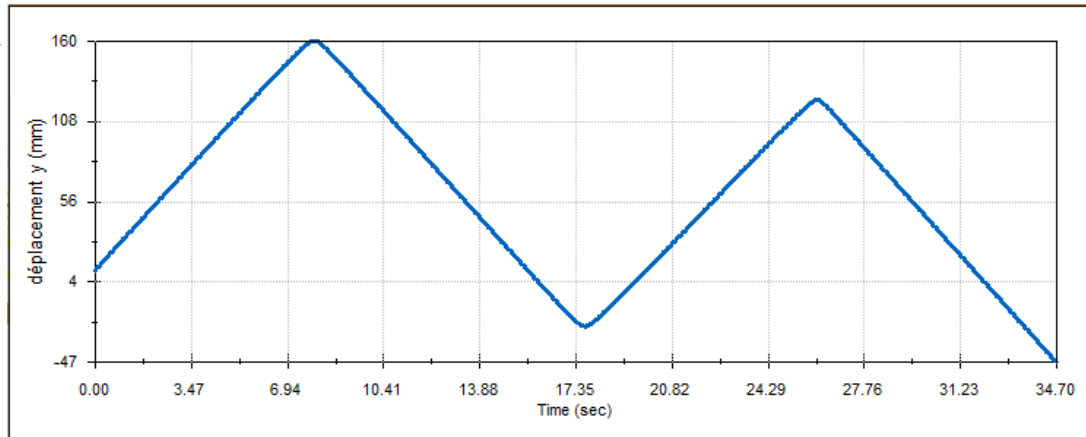


Figure III.26 : La courbe de déplacement sur y à $z = 0.1m$.

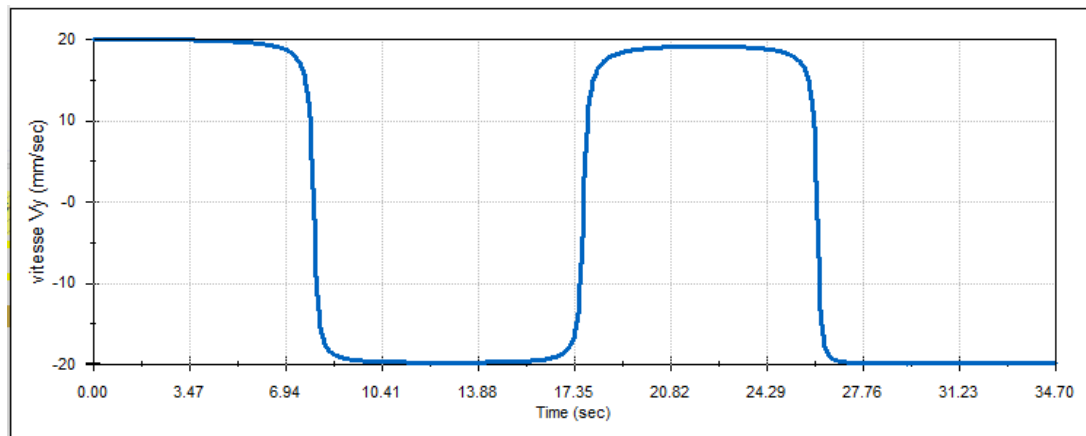


Figure III.27 : La courbe de vitesse (V_y) à $z=0.1m$.

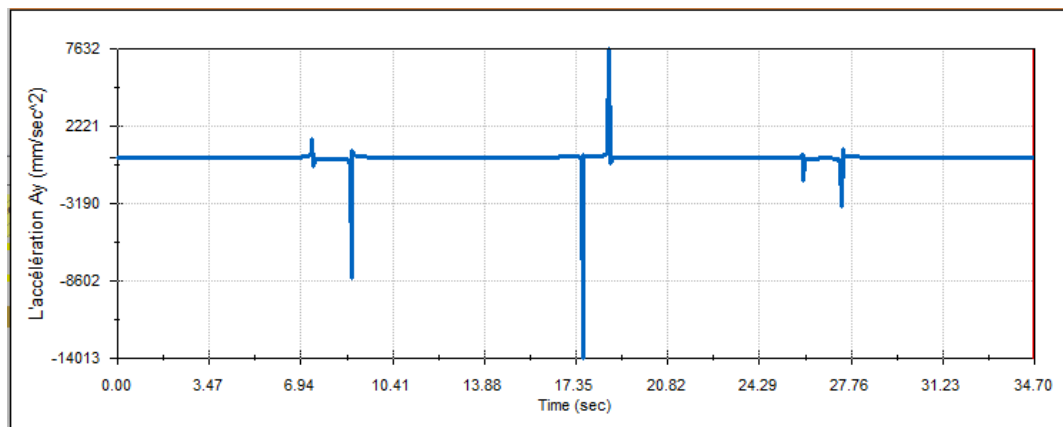


Figure III.28 : La courbe de l'accélération (A_y) à $z=0.1m$.

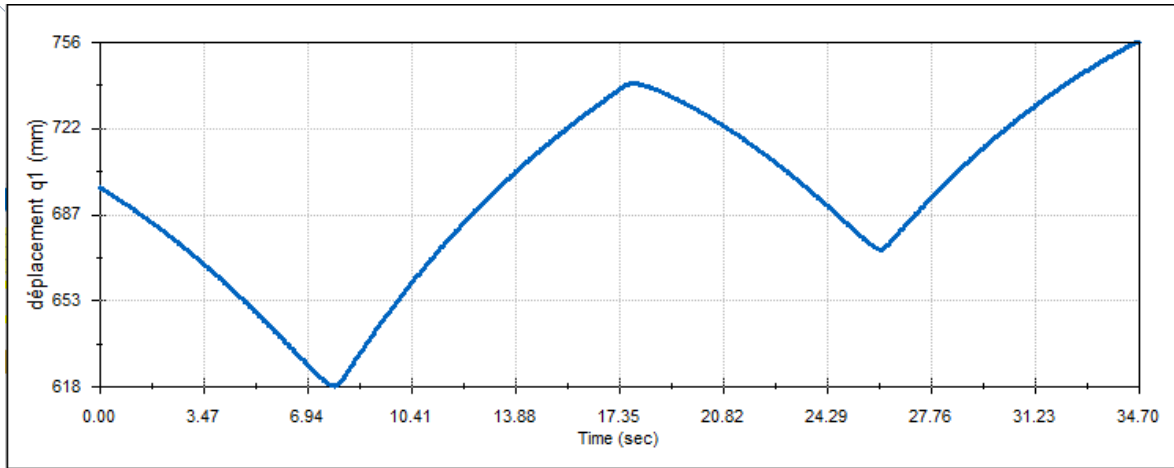


Figure III.29 : La courbe de déplacement (q_1).

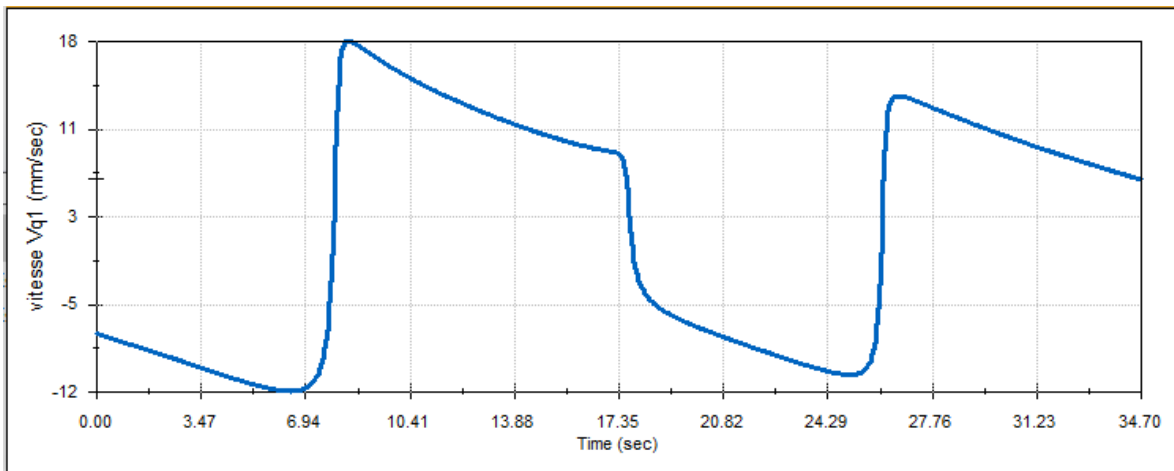


Figure III.30 : La courbe de vitesse (V_{q_1}).

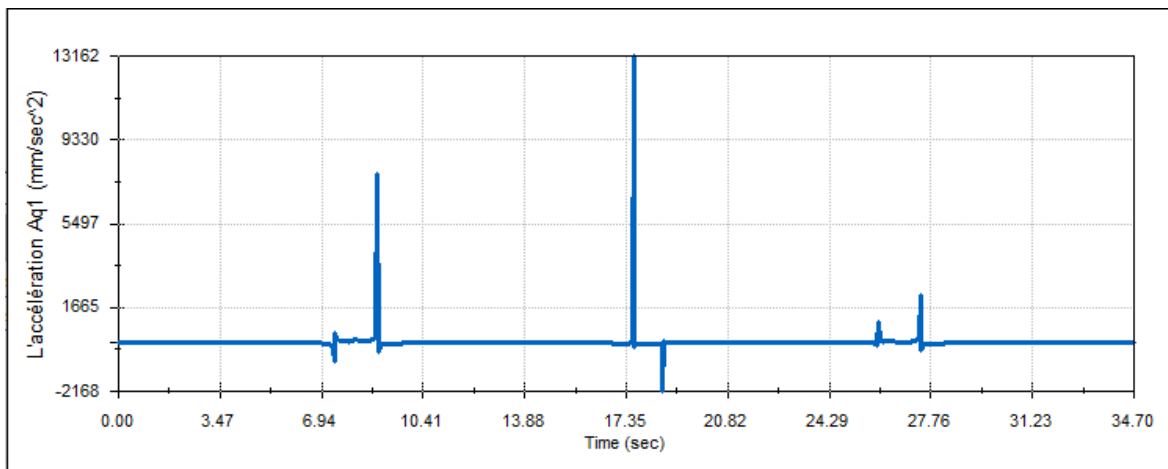


Figure III.31 : La courbe de l'accélération (A_{q_1}).

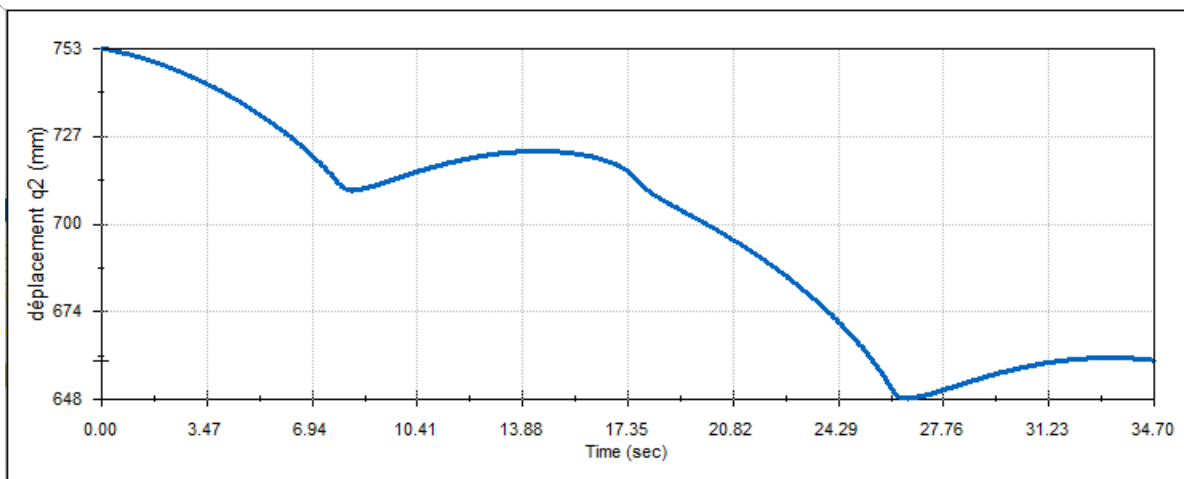


Figure III.32 : La courbe de déplacement (q_2).

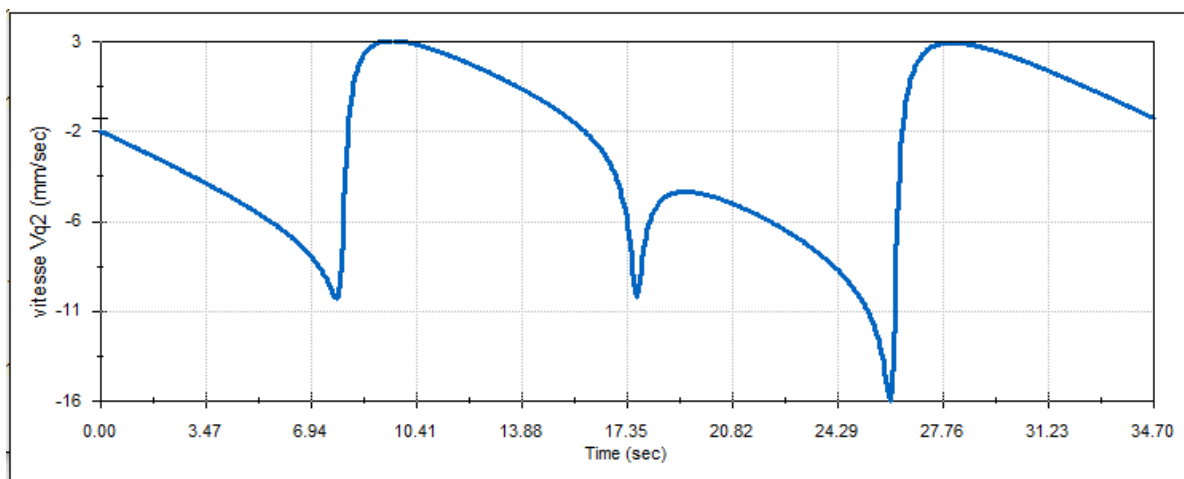


Figure III.33 : La courbe de vitesse (Vq_2).

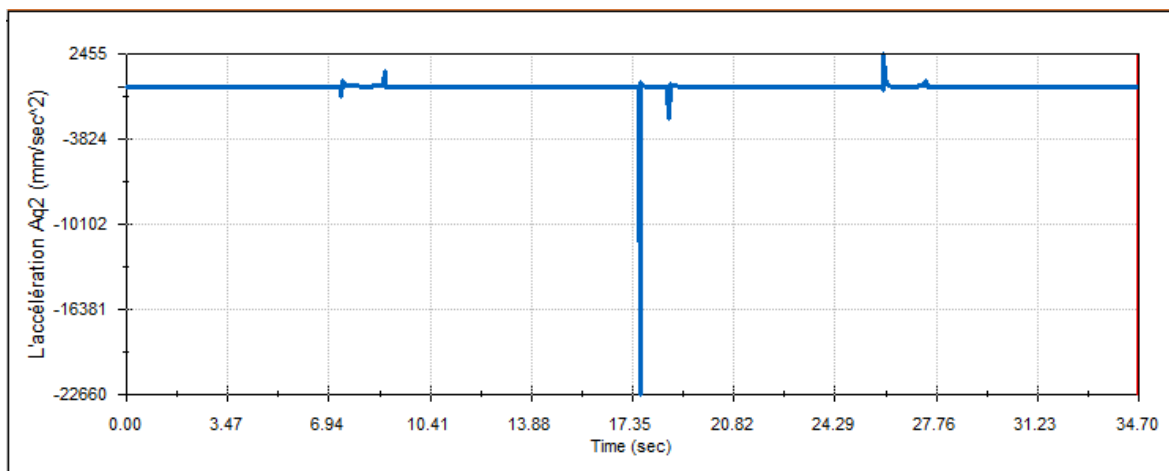


Figure III.34 : La courbe de l'accélération (Aq_2).

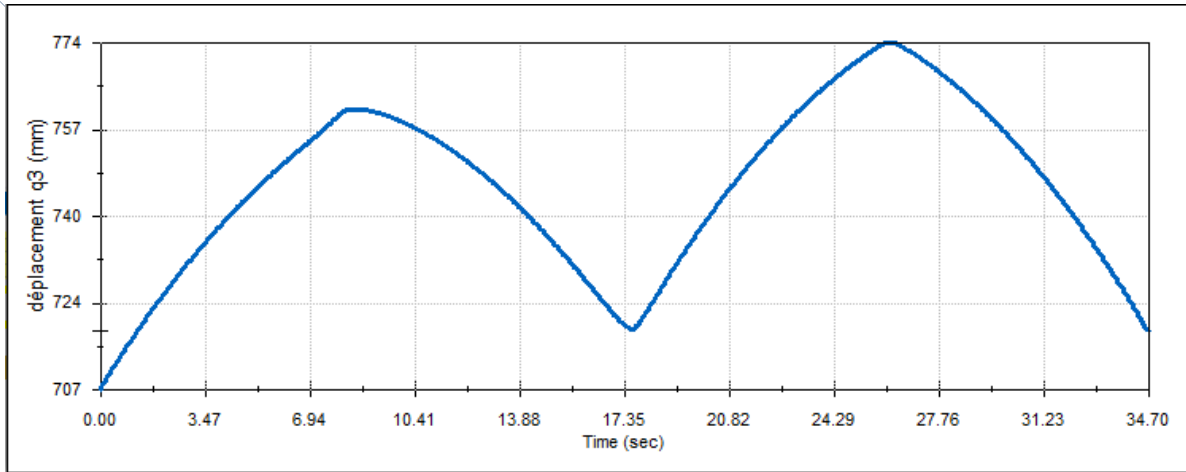


Figure III.35 : La courbe de déplacement (q_3).

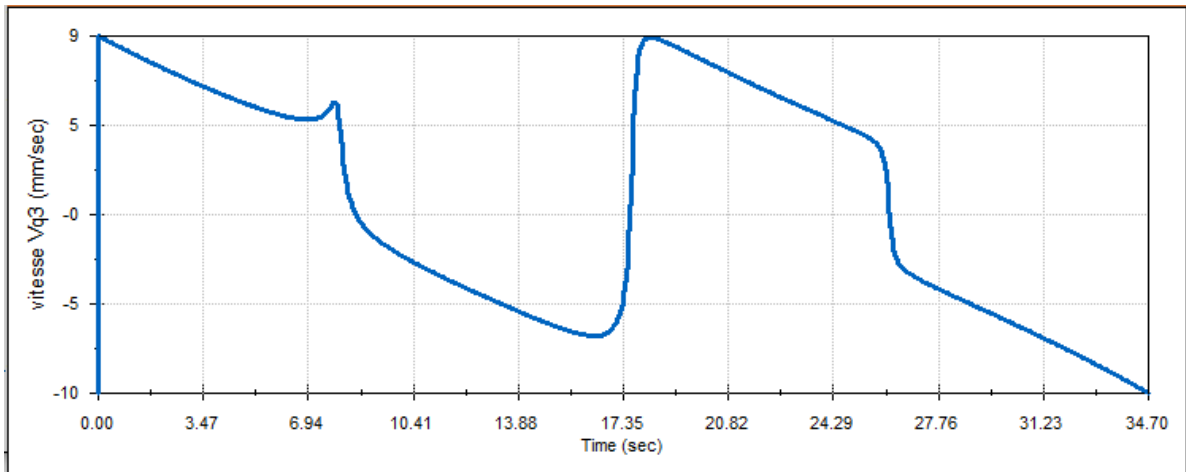


Figure III.36 : La courbe de vitesse (V_{q_3}).

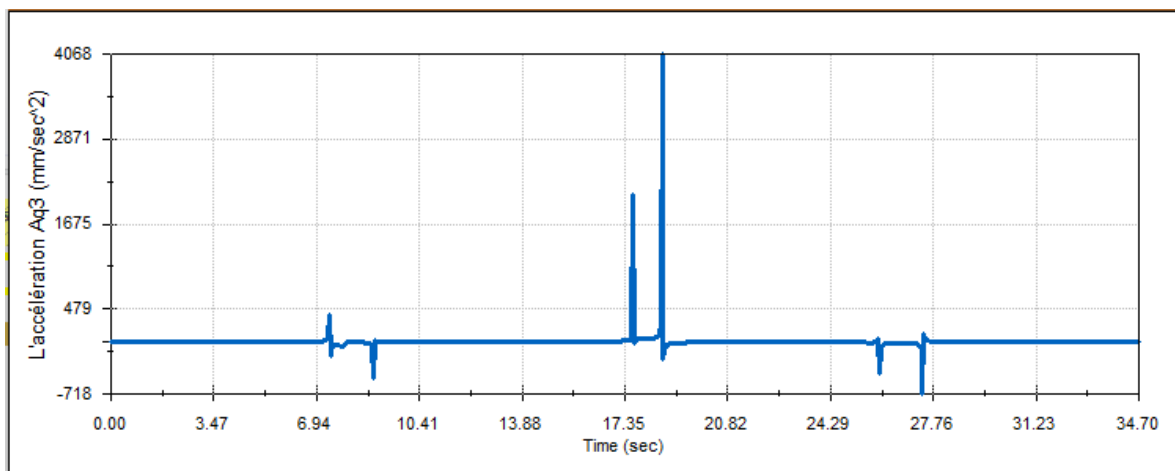


Figure III.37 : La courbe de l'accélération (A_{q_3}).

III.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons réalisé pratique de différent partie de robot Delta linéaire, avec une modélisation 3D à l'aide du logiciel SolidWorks. Nous avons présenté le système de commande de notre système ou nous utilisons la carte Arduino pour effectuer le contrôle de moteur de robot.

Conclusion générale

Nous avons présenté dans ce manuscrit une méthodologie de conception et réalisation de systèmes complexes, à savoir la conception de robots parallèles à 3 degrés de liberté (ddl).

Le choix de l'architecture parallèle adéquate se fait après de comparaisons entre les caractéristiques de robots séries et les robots parallèles, tels que la performance dynamique, la précision et la rigidité. Parmi ces architectures parallèles nous prenons le robot d'architecture Delta linéaire. Ensuite, nous avons choisi l'agencement de notre machine, afin de faire une modélisation géométrique, cinématique et dynamique de robot.

Dans ce travail, nous avons formé un problème d'optimisation de notre machine. Nous avons utilisé dans ce mémoire la technique de l'algorithme génétique (Toolbox Matlab) que nous avons implémenté sous Matlab. Nous avons un objectif à optimiser, concerne l'isotropie cinématique avec trois variables de décisions. Les résultats obtenus montrent qu'il y a une influence de la longueur des barres de robot sur la fonction objective qui est le conditionnement de la matrice Jacobienne. En fin nous avons trouvé une solution optimale pour les dimensions de robot.

Une réalisation de robot Delta basée sur les dimensions optimales est accomplie, nous avons présenté les différentes parties constitue notre machine, suivi par une détaille des étapes de construction et de système de commande basée sur la carte Arduino. Finalement une simulation sous le logiciel CAO 3D (SolidWorks) a effectué afin d'étudier les modèles géométrique et cinématique de robot Delta linéaire.

Finalement, nous concluons par les perspectives suivantes : d'appliquer cette étude sur des différents types de robot parallèle, avec une amélioration et assurance de plusieurs points de mesure par l'utilisation de différents types des capteurs.

Références Bibliographiques

- [1] I. F. R. International Federation of Robotics, *World robotics 2003*. New York: United Nations, 2003.
- [2] W. Khalil and E. Dombre, "Modeling, Identification and Control of robots Hermes," *Penton., Paris et Londres*, 2002.
- [3] J.-P. Merlet, *Parallel robots*. Springer Science & Business Media, 2006.
- [4] W. Khalil and E. Dombre, *Modélisation, identification et commande des robots*. Paris: Hermes, 1999.
- [5] I. Bonev, "The true origins of parallel robots <http://www.parallemic.org/Reviews/Review007p.html>," ed: January, 2003.
- [6] V. Gough, "Contribution to discussion of papers on research in automobile stability, control and tyre performance," in *Proc. Auto Div. Inst. Mech. Eng*, 1957.
- [7] S. J. Ryu *et al.*, "Eclipse: an Overactuated Parallel Mechanism for Rapid Machining," in *ASME Manufacturing Science and Engineering*, 1998, vol. 8, pp. 681–689.
- [8] F. Marquet and S. Krut, "O. Company, F. Pierrot, "Archi, a redundant mechanism for machining with unlimited rotation capacities", " in *Proc. of ICAR*, 2001.
- [9] J. Albus, R. Bostelman, and N. Dagalakis, "The NIST robocrane," *Journal of Field Robotics*, vol. 10, no. 5, pp. 709-724, 1993.
- [10] C. Ferraresi, M. Paoloni, and F. Pescarmona, "A new methodology for the determination of the workspace of six-DOF redundant parallel structures actuated by nine wires," *Robotica*, vol. 25, no. 1, pp. 113-120, 2007.
- [11] J.-P. Merlet, "Kinematics of the wire-driven parallel robot MARIONET using linear actuators," in *Robotics and Automation, 2008. ICRA 2008. IEEE International Conference on*, 2008, pp. 3857-3862: IEEE.
- [12] C. Baradat, V. Nabat, S. Krut, and F. Pierrot, "Par2: A spatial mechanism for fast planar, 2-dof, pick-and-place applications," in *Fundamental Issues and Future Research Directions for Parallel Mechanisms and Manipulators*, 2009, p. 10.
- [13] R. Clavel, "Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté," 1991.
- [14] S. Briot and I. Bonev, "Are parallel robots more accurate than serial robots?," *CSME Transactions*, vol. 31, no. 4, pp. 445-456, 2007.

- [15] J. Merlet, "Computing the worst case accuracy of a PKM over a workspace or a trajectory," in *The 5th Chemnitz Parallel Kinematics Seminar, Chemnitz, Germany*, 2006, pp. 83-96: Citeseer.
- [16] K. Sébastien, "Contribution à l'étude des robots parallèles légers, 3T-1R et 3T-2R, à forts débattements angulaires," Université Montpellier II, 2003.
- [17] S. Krut, O. Company, F. Marquet, and F. Pierrot, "Twice: a tilting angle amplification system for parallel robots," in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, 2002, vol. 4, pp. 4108-4113: IEEE.
- [18] F. Pierrot, "A new 3T-1R parallel robot," in *ICAR'99*, 1999, pp. 557-562.
- [19] S. Krut, M. Benoit, H. Ota, and F. Pierrot, "I4: A new parallel mechanism for Scara motions," in *Robotics and Automation, 2003. Proceedings. ICRA'03. IEEE International Conference on*, 2003, vol. 2, pp. 1875-1880: IEEE.
- [20] V. Nabat, M. de la O RODRIGUEZ, O. Company, S. Krut, and F. Pierrot, "Par4: very high speed parallel robot for pick-and-place," in *Intelligent Robots and Systems, 2005.(IROS 2005). 2005 IEEE/RSJ International Conference on*, 2005, pp. 553-558: IEEE.
- [21] C. Gosselin and J. Angeles, "The optimum kinematic design of a planar three-degree-of-freedom parallel manipulator," *Journal of mechanisms, transmissions, and automation in design*, vol. 110, no. 1, pp. 35-41, 1988.
- [22] M. Badescu, J. Morman, and C. Mavroidis, "Workspace optimization of 3-UPU parallel platforms with joint constraints," in *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA'02. IEEE International Conference on*, 2002, vol. 4, pp. 3678-3683: IEEE.
- [23] R. Cravel, "Delta, a fast robot with parallel geometry," *Proc. ISIR*, 1988, vol. 91, 1988.
- [24] D. Chablat and P. Wenger, "A New Three-DOF Parallel Mechanism: Milling Machine Applications," in *The 2nd Chemnitz Parallel Kinematics Seminar*, 2000, pp. 1-9: Chemnitz University.
- [25] X.-J. Liu, J. Wang, K.-K. Oh, and J. Kim, "A New Approach to the Design of a DELTA Robot with a Desired Workspace," *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 209-225, 2004.
- [26] R. Kelaiaia and A. Zaatri, "Multiobjective optimization of parallel kinematic mechanisms by the genetic algorithms," *Robotica*, vol. 30, no. 5, pp. 783-797, 2012.
- [27] O. Company, "Machines-outils rapides rapides à structure parallèle. Méthodologie de conception, applications et nouveaux concepts," 2000.

- [28] C. Mavroidis, "Completely specified displacements of a rigid body and their application in the direct kinematics of in-parallel mechanisms," *Journal of mechanical design*, vol. 121, no. 4, pp. 485-491, 1999.
- [29] A. Kosinska, M. Galicki, and K. Kedzior, "Determination of parameters of 3-dof spatial orientation manipulators for a specified workspace," *Robotica*, vol. 21, no. 2, pp. 179-183, 2003.
- [30] R. E. Stamper, L.-W. Tsai, and G. C. Walsh, "Optimization of a three DOF translational platform for well-conditioned workspace," in *Robotics and Automation, 1997. Proceedings., 1997 IEEE International Conference on*, 1997, vol. 4, pp. 3250-3255: IEEE.
- [31] F. Pierrot, "Robots pleinement parallèles légers: conception, modélisation et commande," Montpellier 2, 1991.

Annexes A

A.1. Notation des liaisons dans les graphes d'agencement

Les graphes d'agencement représentent la topologie de la structure des robots et mettent en évidence les diverses branches et boucles. Ils permettent de mieux appréhender l'architecture parfois subtile des mécanismes parallèles. Ils ont été proposés par [31]. La Figure A.1 représente la symbolique utilisée pour ces graphes.

Par contre avec ce type de représentation, les informations concernant l'agencement géométrique des liaisons sont perdues.

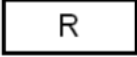

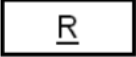


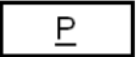
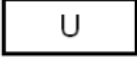
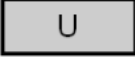
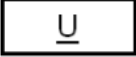
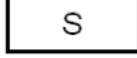
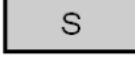
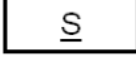



Liaisons	passive	actionnée	mesurée
Rotoïde (pivot)			
Prismatique (glissière)			
Universelle (cardan)			
Sphérique (rotule)			
Autres éléments du robot			
Base			
Nacelle			
Pièce			

Figure A.1 : Conventions des graphes d'agencement.

Annexes B

B.1. Schéma de contrôle

La Figure B.1 suivante représente les étapes de la commande d'un robot Delta (Imprimant 3D) via un ordinateur via un câble USB ou un LCD.

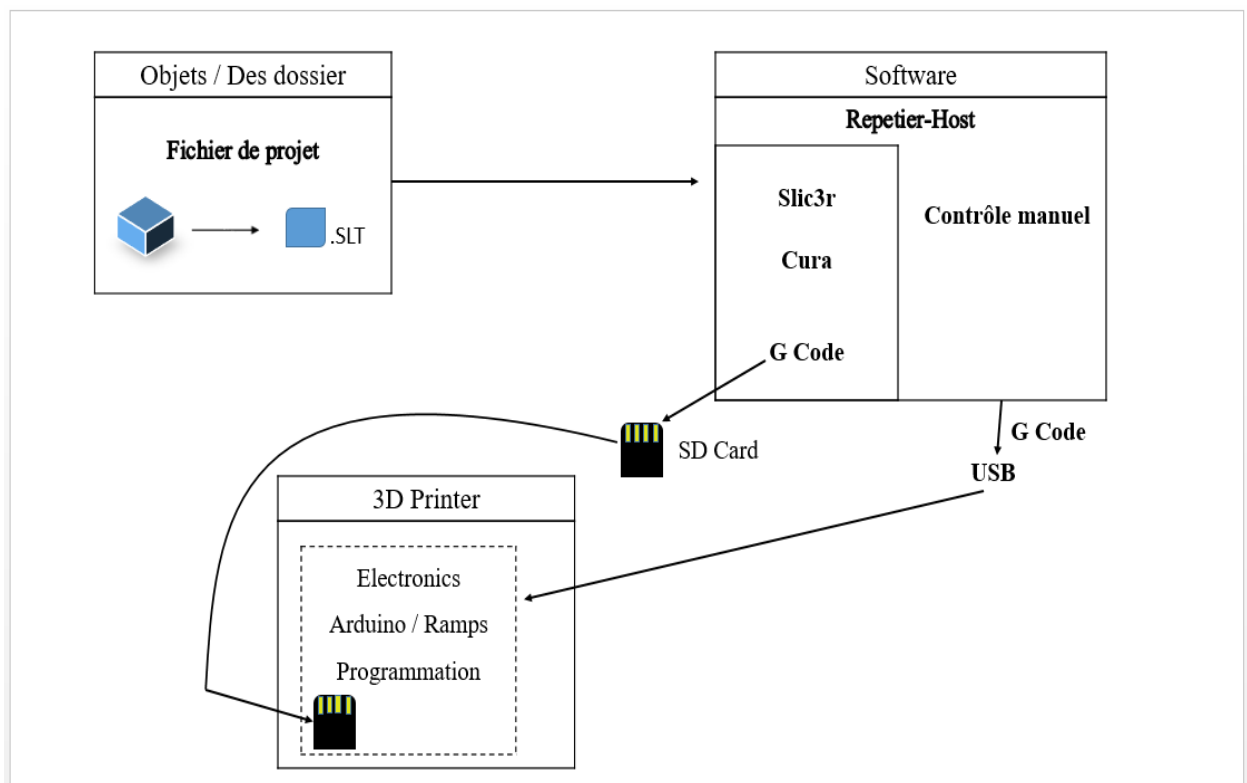


Figure B.1 : représente les étapes de la commande.

Titre du mémoire : Conception et réalisation d'un robot parallèle à trois degrés de liberté.

Master : Electromécanique

Mots clefs : Robot Parallèle, Robot Delta, Modèle géométrique et cinématique.

Résumé :

Cette mémoire porte sur la conception optimale d'un robot parallèle à trois degrés de liberté, suivi par une réalisation avec une étude géométrique et cinématique de ce système. Dans cette étude, nous choisissons le robot Delta linéaire comme un manipulateur parallèle à réaliser. Pour l'obtention des paramètres géométriques d'une machine à cinématique parallèle, nous présentons une modélisation dimensionnelle et cinématique de structure choisie, cette étape demeure une tâche très importante vue que les critères de performance d'une architecture donnée dépendent très fortement des dimensions de ses paramètres géométriques. Suivi par une formulation d'un problème d'optimisation en prenant en considération les performances cinématiques comme critères de performances. Finalement, nous présentons les différentes étapes de construction de robot Delta, avec une modélisation 3D réalisée à l'aide du logiciel SolidWorks.

Report title: Design and realization of a 3-DOF parallel robot.

Key words: Parallel Robot, Delta Robot, Geometric and Kinematic Model.

Abstract:

This memory focuses on the optimal design of a parallel robot with three degrees of freedom, followed by a realization with a geometric and kinematic study of this system. In this study, we choose the linear Delta robot as a parallel manipulator to realize. In order to obtain the geometrical parameters of a parallel kinematic machine, we present a dimensional and kinematic modeling of the chosen structure, this step remains a very important task since the performance criteria of a given architecture depend very strongly on the dimensions of the structure. Its geometric parameters. Followed by a formulation of an optimization problem taking into consideration the kinematic performances as performance criteria. Finally, we present the different steps of Delta robot construction, with 3D modeling realized using the SolidWorks software.

عنوان المذكرة: تصميم وتحقيق روبوت متوازي بثلاث درجات من الحرية.

الكلمات المفتاحية: روبوت المتوازي، دلتا روبوت، نموذج هندسي وحركي.

ملخص:

تركز هذه المذكرة على التصميم الأمثل للروبوت المتوازي بثلاث درجات من الحرية، ويتبعها تطبيق مع دراسة هندسية وحركية لهذا الأخير، وفي هذه الدراسة اخترنا الروبوت دلتا الخطي كنموذج لبناءه. للحصول على الأبعاد الهندسية للروبوت المتوازي، نقدم نمذجة الأبعاد والحركة للهيكل المختار، تظل هذه الخطوة مهمة جدًا نظرًا لأن معايير الأداء لبنية معينة تعتمد بشدة على أبعاد هذه البنية. تليها صياغة لمشكل التحسين مع الأخذ بعين الاعتبار الأداء الحركي كمعيار. وأخيرًا، نقدم المراحل المختلفة من بناء روبوت دلتا، مع تصميم نماذج ثلاثية الأبعاد باستخدام برنامج SolidWorks.