

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

**Modélisation et Optimisation multi-objectif
des paramètres de conception d'un robot
parallèle Delta linéaire**

Devant le jury composé de :

Présenté par :

Dr. NECIB Djilani

Président

- HARROUCHI Aissa

Mr. MILOUDI Khaled

Examineur

- SAIM Nadhir

Mr. MANSOURI Khaled

Encadreur

2017-2018

Résumé :

Ce travail présente un travail de recherche dédiés à une machine à une chaîne cinématique parallèle à 3ddl destiné à être utilisé en tant que machine-outil. La procédure permet de sélectionner un mécanisme parallèle avec un arrangement adapté. Puis il dérive les modèles nécessaires pour la conception, y compris la géométrie, la cinématique, statique, dynamique et rigidité simplifiée. Ensuite, une formulation d'un problème d'optimisation multi-objectif en exprimant les fonctions objectives, les contraintes et les espaces de recherche correspondants, ainsi que la résolution du problème par l'utilisation de méthodes et outils mathématiques performants (Algorithmes génétique), afin de trouver une structure parallèle optimisée.

Mots-clés : Robot parallèle, Algorithmes génétique, Modélisation géométrique et cinématique, Optimisation multi-objectif.

Abstract:

This work presents a research work dedicated to a machine has a kinematic parallel to 3ddl chain for use as a machine tool. The procedure for selecting a parallel mechanism with a suitable arrangement. Then drift models needed to design, including geometry, kinematics, static, dynamic and simplified stiffness. Next, a formulation of a multi-objective optimization problem by expressing the objective functions, constraints and corresponding search spaces, and the resolution of the problem through the use of powerful mathematical methods and tools (genetic algorithms), to find an optimized parallel structure.

Key words: Parallel Robot, Genetic Algorithms, Geometric Modeling and Kinematics.

ملخص:

يقدم هذا العمل بحثا مكرسا لالة ذات سلسلة حركية موازية 3 درجات حرية بغرض استخدامها كأداة الية , يتيح لك الاجراء اختيار الية موازية لترتيب مناسب ثم يستمد النماذج الازمة لتصميم بما في ذلك الهندسية والحركيات والصلابة والديناميكية والصلابة المبسطة ثم صياغة لمشكلة تحسين متعددة الاهداف من خلال التعبير عن الوظائف الهدف والقيود والمساحات البحث المقابلة وكذلك حل مشكلة عن طريق استخدام الاساليب والادوات الرياضية الفعالة (الخوارزمية الجينية), لإيجاد بنية موازية محسنة .

كلمات مفتاحية : الاربوت المتوازي , الخوارزمية الجينية , النمذجة الهندسية والحركية , التحسين متعددة الاهداف .

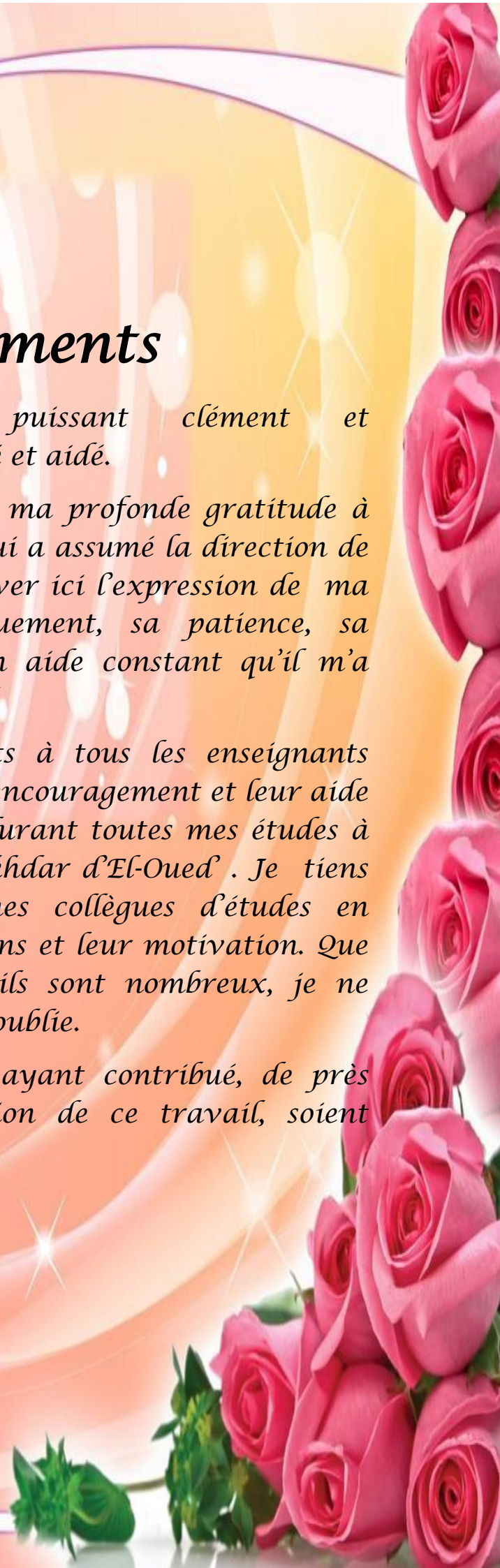
Remerciements

Je remercie Dieu tout puissant clément et miséricordieux de m'avoir soigné et aidé.

Je tiens, avant tout, à exprimer ma profonde gratitude à monsieur Dr. Mansouri khaled, qui a assumé la direction de ce travail. Qu'il veuille bien trouver ici l'expression de ma reconnaissance pour son dévouement, sa patience, sa disponibilité, ses conseils et son aide constant qu'il m'a apporté tout au long de ce travail.

J'adresse mes vifs remerciements à tous les enseignants qui par leur enseignement, leur encouragement et leur aide ont contribué à ma formation durant toutes mes études à l'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued . Je tiens également à remercier tous mes collègues d'études en post graduation pour leurs soutiens et leur motivation. Que tous mes amis sans exception, ils sont nombreux, je ne peux tous les citer mais je ne les oublie.

Enfin, que toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, soient chaleureusement remerciées.



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.



Remerciements

Dédicace

Sommaire	i
Liste des figures	iv
Liste des tableaux.....	vi
Notations et Abréviations	vii
Introduction générale	1

Chapitre I : Robots parallèles pour Machines outils

I.1. Introduction:	3
I.2. Historique :.....	3
I.3. Les robots parallèles :.....	5
I.3.1. Définitions :.....	5
I.4. Avantages des robots parallèles :	7
I.5. Inconvénients des robots parallèles :.....	7
I.6. Caractéristiques d'un robot :.....	8
I.7. Architecture des robots parallèles :	9
I.7.1. Les robots parallèles planaires :	9
I.7.2. Les robots parallèles spatiaux :.....	9
I.8. Robots parallèles existants :	10
I.8.1. Robots parallèles à deux degrés de liberté :	10
I.8.2. Robots parallèles à trois degrés de liberté :	11
□ Le robot Delta :.....	11
□ Le robot Orthoglide :.....	12
I.8.3. Robots parallèles à quatre degrés de liberté :	12
I.8.4. Robots parallèles à six degrés de liberté :.....	13
I.9. Quelques Machines-outils parallèles :	15
I.9.1. La machine Cosmo Center PM-600 de la société Okuma :.....	15
I.9.2. La machine HEXACT développée par INA et l'IFW :.....	15
I.9.3. L'Hexapode 300 de la société CMW :	16
I.9.4. La machine Hexaglide de l'ETHH (Zurich) :.....	16
I.9.5. La machine Triaglide :.....	17
I.9.6. La machine UrangeSX de la société Renault Automation/Com :	18
I.10. Conclusion :.....	18

Chapitre II : Modélisation du robot Delta

II.1.	Introduction :	19
II.2.	Description et modélisation de Robot Delta :	19
II.2.1.	La géométrie de robot Delta :	20
II.2.2.	Modélisation cinématique :	22
II.2.3.	Performance dynamique :	24
II.3.	Conclusion :	26

Chapitre III : Méthodes d'Optimisation multi-objectifs

III.1.	Introduction :	27
III.2.	Formulation du problème d'optimisation :	27
III.2.1.	Les critères de performance :	27
III.2.2.	Variables et contraintes :	28
III.3.	Différentes méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif :	30
III.3.1.	Les méthodes d'optimisation a priori :	31
□	La méthode d'agrégation des fonctions objectifs :	31
□	La méthode du compromis (la méthode ϵ -contrainte) :	31
□	La méthode du but à atteindre (Goal attainment) :	31
□	La méthode du but programmé (Goal programming) :	31
III.3.2.	Les méthodes progressives :	31
□	La méthode de Fandel :	32
□	Autres méthodes progressives :	32
III.3.3.	Les méthodes d'optimisation a posteriori :	32
□	Le recuit simulé :	32
□	Algorithme du recuit simulé :	33
□	Algorithme de la méthode recherche Tabou :	33
III.4.	Solution d'un problème d'optimisation multi-objectif :	33
III.4.1.	Optimum de Pareto :	33
III.4.2.	La notion de dominance :	33
III.4.3.	La frontière de Pareto :	34
III.5.	Présentation de l'algorithme NSGA II :	34
III.5.1.	Non dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) :	34
III.5.2.	NSGA II :	36
III.6.	Conclusion :	39

Chapitre IV : Simulation numérique

IV.1. Introduction :	40
IV.2. Données de l'algorithme génétique et les caractéristiques du robot :.....	40
IV.3. Résultats et discussions :	41
IV.4. Conclusion :	47
Conclusion générale.....	48

Liste des figures

Liste de figures

Figure I.1 : Premier robot parallèle sphérique, breveté en 1931	4
Figure I.2 : Premier robot parallèle spatial industriel.....	4
Figure I.3 : La plate-forme de Gough-Stewart pour la simulation de vol aérien	4
Figure I.4 : Types des robots parallèles.....	5
Figure I.5 : Schéma d'un manipulateur à structure parallèle.	6
Figure I.6 : Exemples d'architectures de robots planaires	9
Figure I.7: Robots parallèles de type SSM, TSSM et MSSM	10
Figure I.8 : Manipulateurs à deux degrés de liberté.....	11
Figure I.9 : Robot Delta à trois degrés de liberté.	11
Figure I.10 : Architecture d'Orthoglide.	12
Figure I.11 : Robot Delta à quatre degrés de liberté.	13
Figure I.14 : Hexapode M850-11.....	14
Figure I.15 : Robot Hexa à six degrés de liberté.....	14
Figure I.16 : Okuma Cosmo Center PM-600.	15
Figure I.17 : Machine HEXACT.....	16
Figure I.18 :Machine L'Hexapode 300 de la société CMW.	16
Figure I.19 : Machine Hexaglide.....	17
Figure I.20 : Machine Triaglide.....	17
Figure I.21 : Renault automation Urane SX.....	18
Figure II.1 : Paramétrage de la géométrie de structures de type Delta linéaire	19
Figure II. 2 : Points de la nacelle.....	20
Figure II. 3 : Paramètres géométriques	21
Figure II. 4 : Répartition de la masse des barres.	25
Figure III.1 : Classification des méthodes d'optimisation multi-objectifs.....	31
Figure III.2 : Exemple de dominance	34
Figure III.3 : Exemples de frontière de Pareto	34
Figure III.4 : Schéma de fonctionnement de NSGA.	35
Figure III.5 : Calcul de la distance de crowding.	37
Figure III.6 : Schéma de fonctionnement de NSGA-II.	39
Figure IV.1 : frontière de Pareto entre l'espace de travail dextérité et ηM	41
Figure IV.2 : représente l'effet de L sur les fonctions ET dest.	41
Figure IV.3 : représente l'effet de L sur les fonctions ηM	42

Liste des figures

Figure IV.4 : Représentation de robot Delta sous MATLAB .	42
Figure IV.5 : Evolution du Conditionnement de la matrice Jacobienne avec ($L= 0.5053$, $Rb= 0.35$ $Rn=0.06$).	43
Figure IV.6 : Evolution du Conditionnement de la matrice Jacobienne ($L= 0.5084$ $Rb= 0.35$ $Rn=0.06$).	43
Figure IV.7 : Representation de quelque positions de robot Delta.	44
Figure IV.8 : Schéma Plock de robot parallèle .	45
Figure IV.9: le trajectoire de la nacelle.	45
Figure IV.10: vitesse de déplacement de la nacelle.	45
Figure IV.11: Accélération de déplacement de la nacelle.	46
Figure IV.12: Déplacements de moteur.	46
Figure IV.13: vitesse de moteurs.	46
Figure IV.14: Accélération de moteurs.	46

Liste de tableau:

Liste de tableau:

TABLE I Donnés de l'algorithme NSGA II.....	40
TABLE II. Caractéristiques du robot.....	40

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/s²]
 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/s²]
 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
 σ_{max} La valeur singulière maximale de la matrice Jacobienne
 σ_{min} La valeur singulière minimale de la matrice Jacobienne
 Δx La déformation d'une barre [m]
 S Surface d'une section droite de la barre [m²]
 E Module d'Young du matériau [N/mm²]

Abréviation :

- CA** Cinématique Avancé
CI Cinématique Inverse
NSGA No dominated Sorting Genetic Algorithm
VEGA Vector Evaluated Genetic Algorithm
M OGA Multi-Objective Genetic Algorithm
N PGA Nighed Pareto Genetic Algorithm
S PEA Strength Pareto Evolutionary Algorithm

Introduction générale

Introduction générale

Une question importante pour la nouvelle génération de machines est de savoir comment améliorer des performances de la machines a besoin d'une évolution permanente de ce secteur afin de proposer des machines de plus en plus rapides, flexibles et rigide [1].

A cet effet, de nombreux chercheurs ont exploré le domaine de la robotique pour développer une technologie adaptée aux exigences des machines d'usinage. Dans le contexte de notre travail, nous nous intéressons aux structures parallèles destinées à l'usinage à grande vitesse, dont certaines caractéristiques géométriques et mécaniques (cinématique et dynamique) seront optimisées en fonction des exigences inhérentes à l'isotropie et à la dynamique de la machine, en tenant compte des contraintes liées aux singularités de la machine et aux déformations des barres.

La synthèse dimensionnelle reste une étape importante de la conception optimale des robots parallèles parce que les critères de performance d'un robot donné sont très sensibles à leur géométrie. Parmi toutes les mesures cinématiques, l'espace de travail est l'un des principaux indices importants dans la conception d'un robot parallèle [2-3].

Dans ce travail, et dont le but de trouver une structure parallèle optimisé de type Delta, Nous donnons une formulation du problème multi-objectif en exprimant les fonctions objectives, les contraintes et les espaces de recherche correspondants, ainsi que la résolution du problème par l'utilisation de méthodes et outils mathématiques performants (Algorithmes génétique...).

Pour atteindre cet objectif, nous présentons notre contribution, organisée dans ce présent mémoire en cinq chapitres :

Le premier chapitre dresse un état de l'art non exhaustif des robots parallèles, et une présentation de quelques machines-outils parallèles utilisées dans l'industrie, pour mettre en exergue les grands problèmes posés dans le secteur des robots parallèles.

Le deuxième chapitre est dédié à la modélisation géométrique, cinématique, et dynamique du robot considéré. Nous choisissons les architectures parallèles candidates pour les machines-outils. Parmi ces architectures, nous prenons le robot Delta afin de concevoir une machine d'usinage trois axes, c'est-à-dire qui possède uniquement trois translations de l'outil de coupe par rapport à la pièce.

Introduction générale

Le troisième chapitre présente une formulation d'un problème d'optimisation multi-objectifs, en prendre l'augmentation de l'espace de travail dextérité (isotropie cinématique), et la performance dynamique comme objectifs. Suivi par une synthèse des méthodes de l'optimisation multi-objectif, avec une description des principales approches non Pareto de résolution pour ces problèmes, dont l'approche par algorithmes génétiques en général et par NSGA II en particulier.

Finalement, nous présentons la résultat de résolution de l'algorithme génétique développé sous Matlab , ensuite,, une simulation du modèle de robot optimisé sous Matlab, pour différentes configuration paramétriques, tels que les déplacements des moteurs, leurs vitesses et leurs accélérations avec un déplacement donné de la nacelle.

Une conclusion générale et des perspectives d'amélioration parachève ce travail.

Chapitre I

Robots parallèles pour Machines outils

I.1.	Introduction:	3
I.2.	Historique :	3
I.3.	Les robots parallèles :	5
I.4.	Avantages des robots parallèles :	7
I.5.	Inconvénients des robots parallèles :	7
I.6.	Caractéristiques d'un robot :	8
I.7.	Architecture des robots parallèles :	9
I.8.	Robots parallèles existants :	10
I.9.	Quelque Machines-outils parallèles :	15
I.10.	Conclusion :	18

I.1. Introduction:

Le domaine de la robotique parallèle est fascinant car il semble y avoir une infinité de sujets de recherche, d'une complexité grandissante mais encore surmontable. Voilà pourquoi, il n'est pas surprenant de constater que des milliers de chercheurs s'intéressent à ce domaine aujourd'hui. De plus en plus d'industriels adoptent des architectures parallèles pour leurs produits : simulateurs de mouvement, robots industriels, positionneurs, joysticks, etc. .

Dans ce chapitre nous présentons dresse un état de l'art non exhaustif des robots parallèles, et une présentation de quelques machines-outils parallèles utilisées dans l'industrie, pour mettre en exergue les grands problèmes posés dans le secteur des robots parallèles.

I.2. Historique :

Des travaux théoriques sur les octaèdres articulés datent de 1897 [4], mais la première véritable invention d'un robot parallèle à plus d'un degré de liberté (ddl) semble être un simulateur de mouvement pour l'industrie de divertissement, annoncé en 1912. Il y a de grandes chances que ce robot ne fut qu'un concept et que ni son problème géométrique direct, ni ses singularités n'ont été étudiés. D'ailleurs, il est très probable, que ce robot n'ait jamais été construit, à cause de la complexité de sa commande.

Ensuite, Bonev rappelle que le premier brevet déposé pour un mécanisme parallèle porte sur un mécanisme sphérique destiné à être utilisé comme plate-forme de cinéma dynamique en 1928 (Figure I.1). Trop en avance sur son temps, cette machine n'a jamais été construite. Quelques dizaines d'années plus tard, Williard L.V. Pollard conçoit ce qui est considéré comme le premier robot parallèle industriel. Son fils fait breveter cette invention qui n'a, elle non plus, jamais été produite (Figure I.2). Enfin, le premier robot parallèle industriel à voir le jour est l'hexapode en forme d'octaèdre inventé par Eric Gough, également appelé plate-forme de Gough [5].

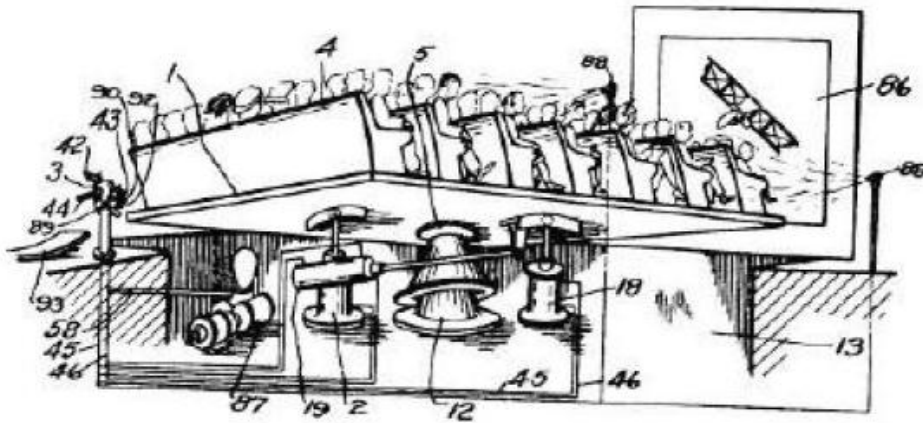


Figure I.1 : Premier robot parallèle sphérique, breveté en 1931 .

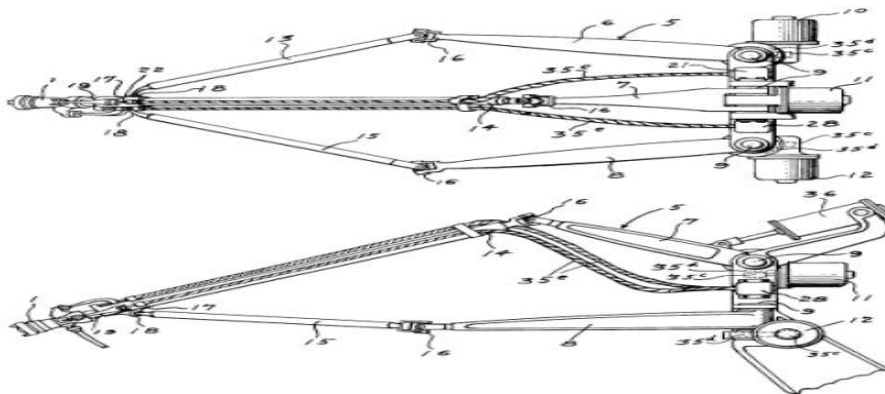


Figure I.2 : Premier robot parallèle spatial industriel.

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.3).

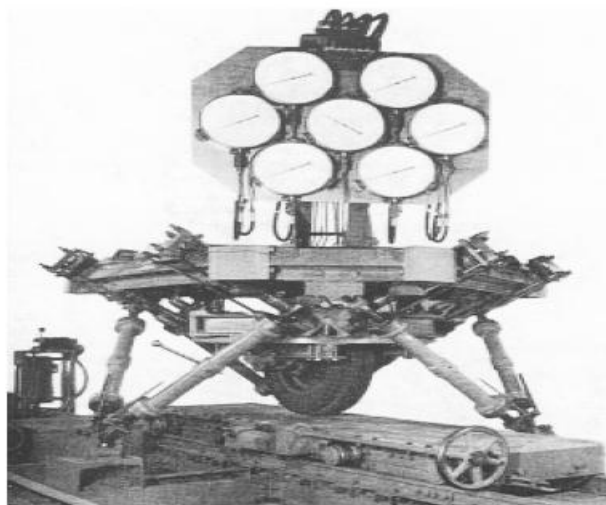


Figure I.3 : La plate-forme de Gough-Stewart pour la simulation de vol aérien .

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. 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 (Figure I.4). 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).



a) Robot Delta (FlexPicker , ABB) b) Robot Par4 c) Le Quattro (Adept, USA)

Figure I.4 : Types des robots parallèles.

Il existe un grand nombre de cinématiques différentes 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.

I.3. Les robots parallèles :

I.3.1. Définitions :

L'Association Française de Normalisation (A.F.N.O.R.) définit un robot comme étant un système mécanique de type manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de liberté, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours de mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches. Il a souvent l'apparence d'un, ou plusieurs, bras se terminant par un poignet. Son unité de commande utilise, notamment, un dispositif de mémoire et éventuellement de perception et d'adaptation à l'environnement et aux circonstances. Ces machines polyvalentes sont généralement étudiées pour effectuer la même

fonction de façon cyclique et peuvent être adaptées à d'autres fonctions sans modification permanente du matériel [6].

Dans cette définition, on retrouve les différentes composantes d'une cellule robotisé :

- le mécanisme : ayant une structure plus ou moins proche de celle du bras humain, il permet de remplacer ou de prolonger son action (le terme ' manipulateur ' exclut implicitement les robots mobiles). Sa motorisation est réalisée par des actionneurs électriques, pneumatiques ou hydrauliques qui transmettent leurs mouvements aux articulations par des systèmes appropriés.
- La perception : qui permet de gérer les relations entre le robot et son environnement (les organes de perception sont des capteurs).
- La commande : qui synthétise les consignes des asservissements pilotant les actionneurs. A partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur, elle permet d'engendrer les actions du robot.
- L'interface homme-machine : à travers laquelle l'utilisateur programme les tâches que le robot doit exécuter.

Un robot parallèle est mécanisme formé par un ensemble de chaînes cinématiques indépendantes dont l'une de leurs extrémités est liée à un corps de référence appelé base et l'autre extrémité à une plateforme mobile (souvent appelée nacelle) qui porte l'organe terminal (Figure I.5). L'ensemble forme une chaîne cinématique fermée [7].

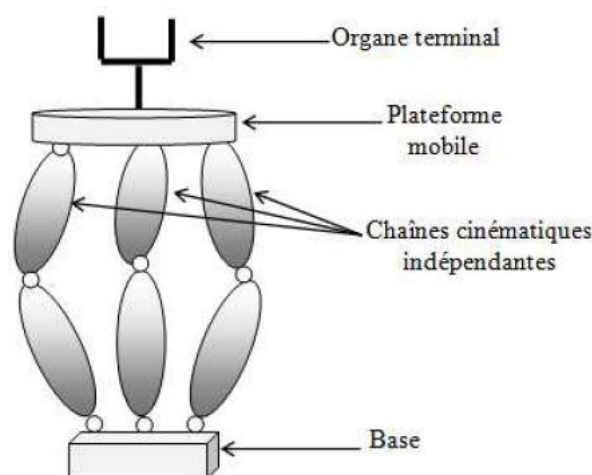


Figure I.5 : Schéma d'un manipulateur à structure parallèle.

I.4. Avantages des robots parallèles :

Mettre en parallèle plusieurs chaînes cinématiques entraînées chacune par un actionneur offre les avantages suivants [8] :

- Faible masse mobile, car les actionneurs sont souvent solidaires de la plate-forme fixe contrairement aux robots série qui comportent des actionneurs sur certaines articulations,
- Une bonne rigidité mécanique confère aux structures parallèles une bonne précision,
- Capacité de charge transportable élevée due à sa distribution sur les différentes chaînes cinématiques,
- Les structures parallèles donnent la possibilité d'obtenir des mouvements à haute dynamique (vitesses et accélérations élevées jusqu'à 50 g), car les actionneurs n'auront pas à compenser des poids importants appliqués en porte-à-faux, ils peuvent donc engendrer des vitesses et accélérations beaucoup plus importantes,
- La possibilité de positionner les actionneurs directement sur la base fixe procure de nombreux avantages. Tout d'abord, cela offre un choix important pour les actionneurs car leur masse n'est plus un critère de sélection du fait qu'elle n'intervient pas dans l'inertie. Les problèmes de liaison entre actionneurs, capteurs et contrôleurs sont simplifiés. Les moteurs sont plus facilement isolables de l'espace de travail dans le cas d'application en atmosphère propre,
- Les déformations des segments sont réduites, car ils sont sollicités qu'en traction-compression, ce qui leur offre aussi une bonne rigidité.
- La symétrie des robots parallèles (composés de plusieurs chaînes cinématiques identiques) donne la possibilité de fabrication en série, ce qui permet de réduire : les coûts d'étude unitaire et de construction, les pièces détachées en stock, etc.
- Les erreurs sur les capteurs internes (ceux qui mesurent les longueurs des segments) n'affectent l'erreur sur la position de la plateforme que de manière faible.

I.5. Inconvénients des robots parallèles :

les robots parallèles présentent les inconvénients suivants[9] :

- Espace de travail réduit (restreint),
- Faible ratio volume de travail/encombrement,
- Le modèle géométrique est parfois difficile à obtenir,

- Présence des singularités dans l'espace de travail qui peut conduire à une perte de contrôle de la plateforme mobile (nacelle),
- Non linéarité entre les équations géométriques et cinématiques ce qui entraîne une grande complexité de conception et de commande .

I.6. Caractéristiques d'un robot :

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte :

- La charge maximum transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).
- L'architecture du SMA, le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, défini comme l'ensemble des points atteignables par l'organe terminal. Tous les mouvements ne sont pas possibles en tout point du volume de travail. L'espace de travail, est le volume de l'espace que le robot peut atteindre via au moins une orientation. L'espace de travail dextre est le volume de l'espace que le robot peut atteindre avec toutes les orientations possibles de l'effecteur (organe terminal). Cet espace de travail est un sous-ensemble de l'espace de travail maximal.
- Le positionnement absolu, correspondant à l'erreur entre un point souhaité (réel) défini par une position et une orientation dans l'espace cartésien et le point atteint et calculé via le modèle géométrique inverse du robot. Cette erreur est due au modèle utilisé, à la quantification de la mesure de position, à la flexibilité du système mécanique. En général, l'erreur de positionnement absolu, également appelée précision, est de l'ordre de 1 mm.
- La répétabilité, ce paramètre caractérise la capacité que le robot a à retourner vers un point (position, orientation) donné. La répétabilité correspond à l'erreur maximum de positionnement sur un point prédéfini dans le cas de trajectoires répétitives. En général, la répétabilité est de l'ordre de 0,1 mm.
- La vitesse de déplacement (vitesse maximum en élongation maximum), accélération.
- La masse du robot.
- Le coût du robot.
- La maintenance, ...

I.7. Architecture des robots parallèles :

Pratiquement, on distingue deux classes des robots parallèles, les robots planaires et les robots spatiaux.

I.7.1. Les robots parallèles planaires :

Un robot planaire est constitué généralement d'une plate-forme, comportant trois degrés de liberté : deux translations et une rotation autour de la normale au plan de la plate-forme. Nous recherchons une structure de robot pleinement parallèle, donc possédant trois chaînes cinématiques indépendantes motorisées par trois actionneurs. Chacune de ces chaînes devant être liées à la fois au sol et à la plate-forme mobile, nous aurons donc trois points d'attache au sol et sur la plate-forme mobile. On peut donc considérer sans perte de généralités une plate-forme triangulaire [10].

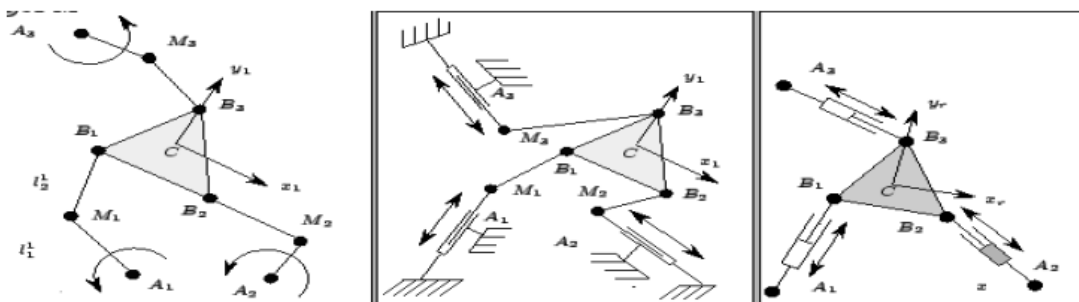


Figure I.6 : Exemples d'architectures de robots planaires .

I.7.2. Les robots parallèles spatiaux :

Dans les robots parallèles spatiaux, la plate-forme et la base sont reliées entre elles par des chaînes cinématiques assurant trois ou six degrés de liberté à la plate-forme. Le plus connu des robots à trois degrés de liberté en translation est le Delta développé initialement à l'Ecole Polytechnique de Lausanne par l'équipe du Pr Clavel [11]. Et le plus connu pour les robots parallèles à six degrés de liberté est la plate-forme de Gough-Stewart [12], [13], appartient à la famille des hexapodes. Elle est aujourd'hui connue sous le nom de plate-forme de Stewart. Merlet [14] décrit trois concepts de structures à six degrés de liberté avec base et une plate-forme reliée entre elles par six actionneurs linéaires (Figure I.7):

- les robots de type SSM (Simplified Symmetric Manipulator) ou la base et la plate-forme sont hexagonales. Les chaînes sont connectées aux sommets des hexagones ;
- les robots de type TSSM (Trianglar Simplified Symmetric Manipulator) ou la plate-forme est triangulaire alors que la base est hexagonale. Deux chaînes sont connectées sur un même sommet du triangle de la plate- forme ;
- les robots de type MSSM (Minimal Simplified Symmetric Manipulator) ou la base et la plate-forme sont triangulaires. Les points d'articulation sur chaque triangle sont communs à deux chaînes. L'ensemble de la structure forme un octaèdre.

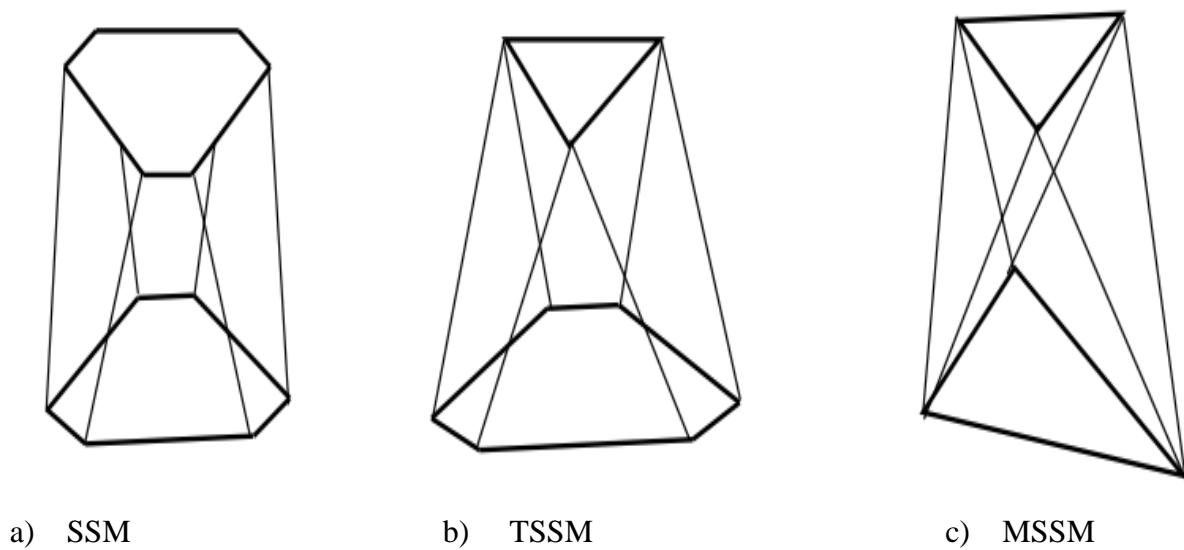
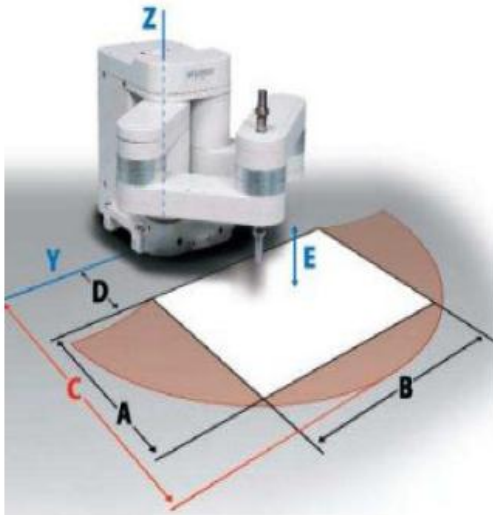


Figure 1.7: Robots parallèles de type SSM, TSSM et MSSM

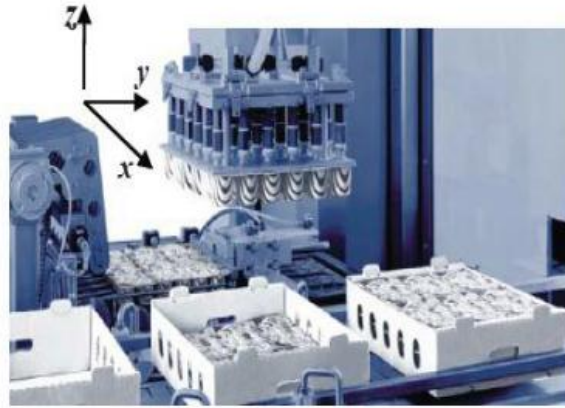
I.8. Robots parallèles existants :

I.8.1. Robots parallèles à deux degrés de liberté :

Les robots parallèles à deux degrés de liberté sont utilisés pour le pick-and-place (prise et pose d'un objet) et sont des mécanismes capables de réaliser deux translations (Figure I.8).



a) Robot Mitsubishi RP1-AH.



b) Exemple d'application pour un mécanisme 2T

Figure I.8 : Manipulateurs à deux degrés de liberté.

I.8.2. Robots parallèles à trois degrés de liberté :

- Le robot Delta :

Les robots parallèles à trois degrés de liberté en translation présentent un intérêt important pour les opérations de transfert. En conséquence différents prototypes ont été proposés. Le plus utilisé a été développé initialement à l'Ecole Polytechnique de Lausanne et est commercialisé sous le nom " Delta " par la société Demarex (Figure I.9).

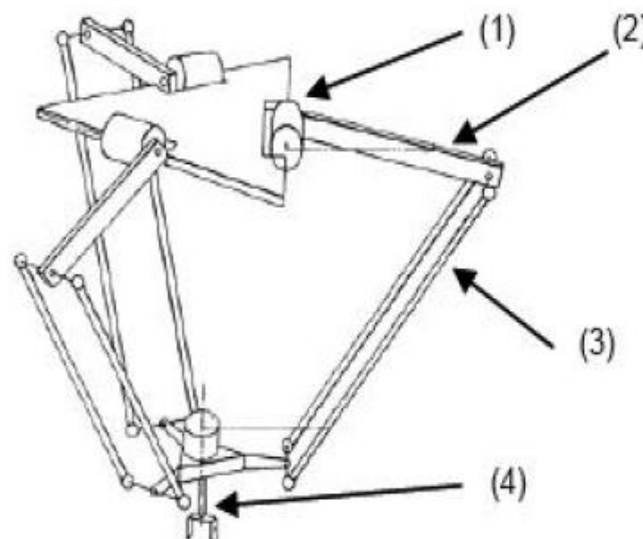


Figure I.9 : Robot Delta à trois degrés de liberté.

Ce robot était muni de trois moteurs rotatifs (1) reliant une nacelle (4) par l'intermédiaire de trois chaînes cinématiques identiques. Ces dernières sont composées d'un bras (2) et d'un système à quatre barres en chaîne fermée (3). Ce système est communément nommé "parallélogramme spatial" car sa fonction est de garantir le parallélisme entre deux solides dans l'espace, à condition que les barres restent coplanaires deux à deux (ce qui est vérifié sur un Delta quand toutes les chaînes cinématiques sont assemblées). Ces robots parallèles présentent de nombreux avantages pour les tâches de pick-and-place.

- **Le robot Orthoglide :**

L'Orthoglide est une machine de type parallèle possédant 3 articulations prismatiques orthogonales reliées au bâti (Figure I.10). La plate-forme mobile est connectée aux articulations prismatiques par 3 parallélogrammes articulés et bouge dans l'espace cartésien (x-y-z) avec une orientation fixe.

L'Orthoglide est dédié à l'usinage à grande vitesse, car son architecture se rapproche des machines standards d'architecture série PPP (espace de travail Cartésien régulier et performances uniformes) et avec, en plus, les propriétés des structures parallèles (inerties moins importantes et meilleures performances dynamiques). Son espace de travail est proche d'un cube et ne possède aucune singularité.

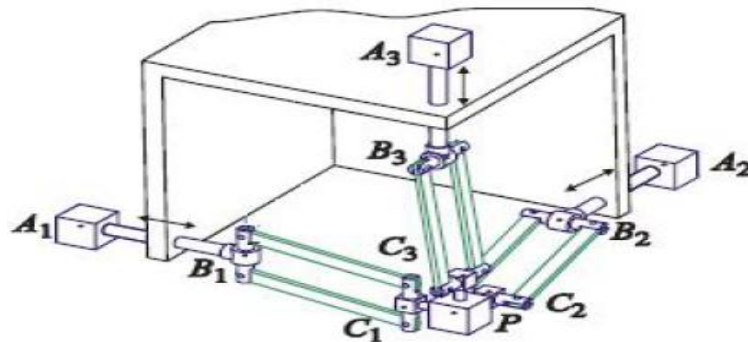


Figure I.10 : Architecture d'Orthoglide.

I.8.3. Robots parallèles à quatre degrés de liberté :

Afin de répondre aux besoins des applications de manipulation d'objets, l'architecture Delta, originalement pourvue de trois degrés de liberté, fut modifiée afin d'y ajouter une quatrième mobilité. Ainsi, la rotation est obtenue en ajoutant une liaison rotoïde à la plateforme dont la rotation est commandée à l'aide d'une chaîne cinématique de type RUPU (Figure I.11). Cette "patte télescopique" permet de réaliser une rotation illimitée, mais

a l'inconvénient majeur de limiter les performances dynamiques du Delta ainsi modifié, et ce, d'autant plus pour des robots de grande taille. En effet, la fiabilité et la durée de vie de cette patte passive se trouvent réduites lorsque le robot réalise des mouvements dont les accélérations sont importantes.



Figure I.11 : Robot Delta à quatre degrés de liberté.

I.8.4. Robots parallèles à six degrés de liberté :

Plusieurs formes d'architectures parallèles à six degré de liberté sont possibles et la plus répandue est la plate-forme de Gough-Stewart (Figure I.12). Il s'agit d'un manipulateur à six degrés de liberté, dont la plate-forme est déplacée par l'élongation de six actionneurs linéaires. Son application la plus connue est le simulateur de vol (Figure I.13) en raison, entre autres, de la masse élevée de la cabine (jusqu'à 15 000 kg) à laquelle on doit faire subir des mouvements. Les simulateurs de vol sont utilisés pour l'entraînement des pilotes au sol.



Figure I.12: Plate-forme de Gough-Stewart .



Figure I.13 : Simulateur de vol.

Les hexapodes sont aussi utilisés afin de positionner et orienter précisément des objets de masse importante. Dans ce type d'applications, la dynamique de la structure n'est pas un critère de première importance, ce qui importe, c'est de donner une position précise à un objet pouvant être massique. Dans l'exemple de la (Figure I.14), l'hexapode présenté permet de positionner une charge de 200 kg suivant l'axe z avec une répétabilité de $\pm 1\mu\text{m}$ dans un volume de travail de $100\times 100\times 50\text{mm}^3$.



Figure I.14 : Hexapode M850-11.

Un autre exemple de robot parallèle léger est l'Hexa [15]. Ce mécanisme à six degrés de liberté est composé de six chaînes cinématiques actionnées par des moteurs rotatifs. Grâce à leurs capacités dynamiques très élevées, ces robots sont particulièrement bien adaptés aux applications de manipulation rapide, et en particulier aux applications de pick-and-place (Figure I.15).

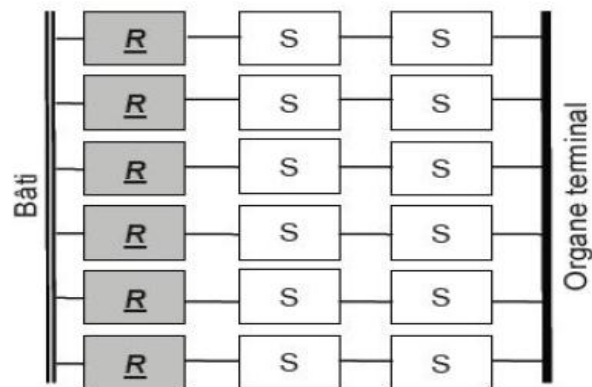


Figure I.15 : Robot Hexa à six degrés de liberté.

I.9. Quelques Machines-outils parallèles :

I.9.1. La machine Cosmo Center PM-600 de la société Okuma :

Il s'agit également d'une machine de type hexapode développée par la société Okuma.



Figure I.16 : Okuma Cosmo Center PM-600.

I.9.2. La machine HEXACT développée par INA et l'IFW :

Il s'agit encore d'une machine de type hexapode dont la disposition des pattes est intéressante. En effet, comme la machine Mikromat, les pattes sont connectées à la nacelle dans deux plans perpendiculaires à l'axe de la broche. Ces plans sont situés de part et d'autre d'un plan médian sur lequel la deuxième extrémité des pattes est connectée. Les six points de connexion sur le plan médian constituent les sommets d'un hexagone régulier. Cette disposition des liaisons est intéressante du point de vue de la simplicité de conception de la machine et de sa compacité. Par contre, elle souffre de deux défauts majeur

- Comme pour la machine Mikromat, les débattements angulaires sont réduits à cause de l'éloignement des plans de connexion par rapport à l'outil.
- La machine, telle qu'elle a été conçue, présente une singularité au centre de son volume de travail (raideur nulle pour un moment appliqué autour de l'axe de la broche quand cette dernière a une orientation nulle).

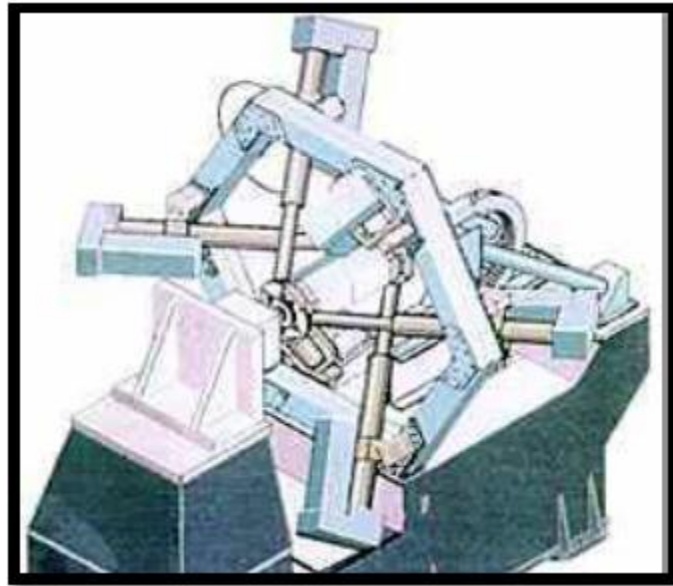


Figure I.17 : Machine HEXACT.

I.9.3. L'Hexapode 300 de la société CMW :

Cette machine (Figure I.18) est de type hexapode. Elle peut être utilisée soit de manière autonome (son volume de travail est alors limité), soit portée par une structure cartésienne destinée à la positionner en plusieurs endroits afin de recouvrir un volume de travail plus important.

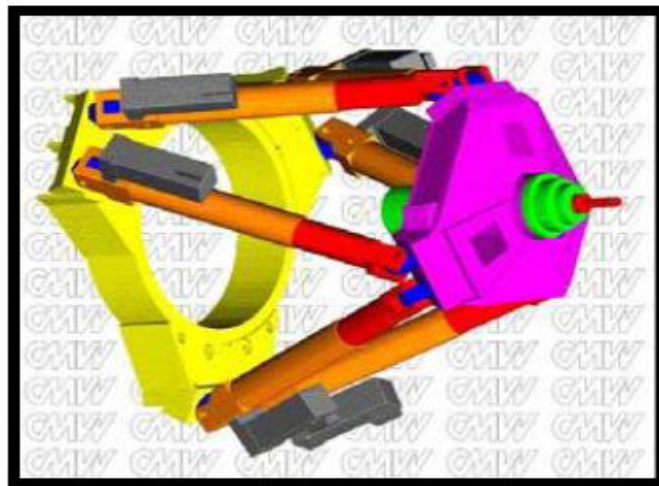


Figure I.18 : Machine L'Hexapode 300 de la société CMW.

I.9.4. La machine Hexaglide de l'ETHH (Zurich) :

L'Hexaglide est une machine qui appartient à la famille « main gauche ». Elle est composée de 6 actionneurs linéaires fixes et d'une nacelle reliés par des barres de longueur

fixe montées surrotule. Il s'agit d'une machine d'usinage 5 axes. Sa particularité réside dans la disposition des liaisons glissières qui sont toutes coplanaires et de même direction. Cette disposition permet d'avoir une direction de déplacement privilégiée afin d'usiner des pièces longues.



Figure I.19 : Machine Hexaglide .

I.9.5. La machine Tria glide :

Elle ne possède que trois degrés de liberté de translation. La machine Tria glide est une machine 3 axes à actionneurs linéaires. Il s'agit de la version machine-outil de l'architecture du robot Delta. Les liaisons glissières sont parallèles entre elles ce qui permet d'avoir une direction de déplacement privilégiée pour l'usinage de pièces longues.

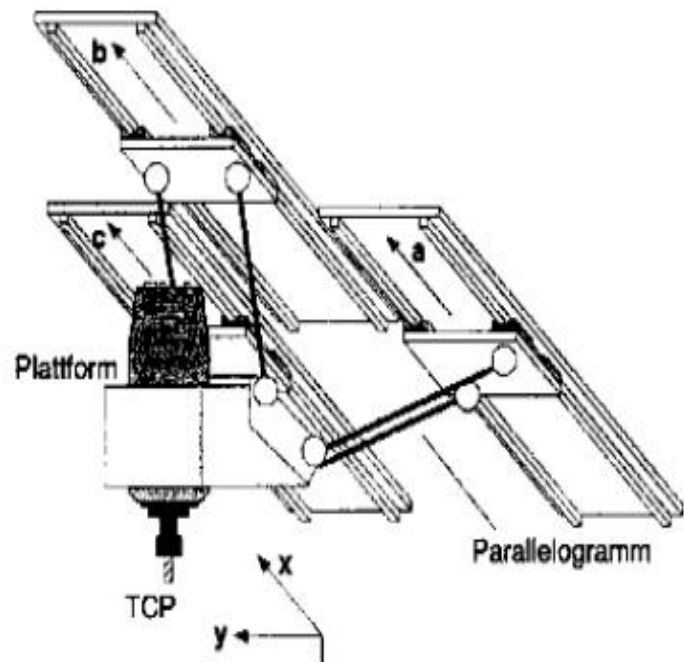


Figure I.20 : Machine Triaglide.

I.9.6. La machine UraneSX de la société Renault Automation/Com :

Qui possède trois degrés de translation. Cette machine, équipée de moteurs linéaires, est capable d'accélérer à 3,5g sur l'ensemble de son volume de travail. Elle a été conçue afin de réaliser spécifiquement des opérations de perçage, lamage et taraudage à grande vitesse [16].



Figure I.21 : Renault automation Urane SX.

Il existe également des machines hybrides ayant une ou plusieurs des caractéristiques suivantes :

- Seul un sous ensemble de la machine est parallèle.
- La machine n'est pas pleinement parallèle (les pattes de la machine comportent plusieurs actionneurs en série).
- La machine comporte une chaîne passive.

I.10. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté un bref historique des robots à structures parallèles et avec un ordre chronologique de leur développement depuis le premier hexapode octaédrique de Gaugh-Stewart en 1947. Ensuite on a donné quelques définitions utiles à l'état de l'art de la robotique parallèle, tout en citant quelques exemples de robots parallèles classés selon le nombre de degrés de liberté. Enfin on termine par la présentation de quelques exemples machine outille .

Chapitre II

Modélisation du robot Delta

II.1. Introduction :	19
II.2. Description et modélisation de Robot Delta :	19
II.2.1. La géométrie de robot Delta :	20
II.2.2. Modélisation cinématique :	22
II.2.3. Performance dynamique :	24
II.3. Conclusion :	26

II.1. Introduction :

La conception des robots nécessitent le calcul de certains modèles mathématique tels que Les modèles de transformations entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire (dans lequel est définie la configuration du robot). On distingue parmi ces modèles :

- Les modèles géométriques direct et inverse ;
- Les modèles cinématiques direct et inverse.

La description d'un robot est une étape importante pour l'élaboration des modèles, qu'ils soient géométriques, cinématiques ou dynamiques. Plusieurs méthodes et notations ont été proposées pour la description des paramètres géométriques des structures : série, arborescentes ou comportant des boucles fermées [17-18-19] .

II.2. Description et modélisation de Robot Delta :

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}).

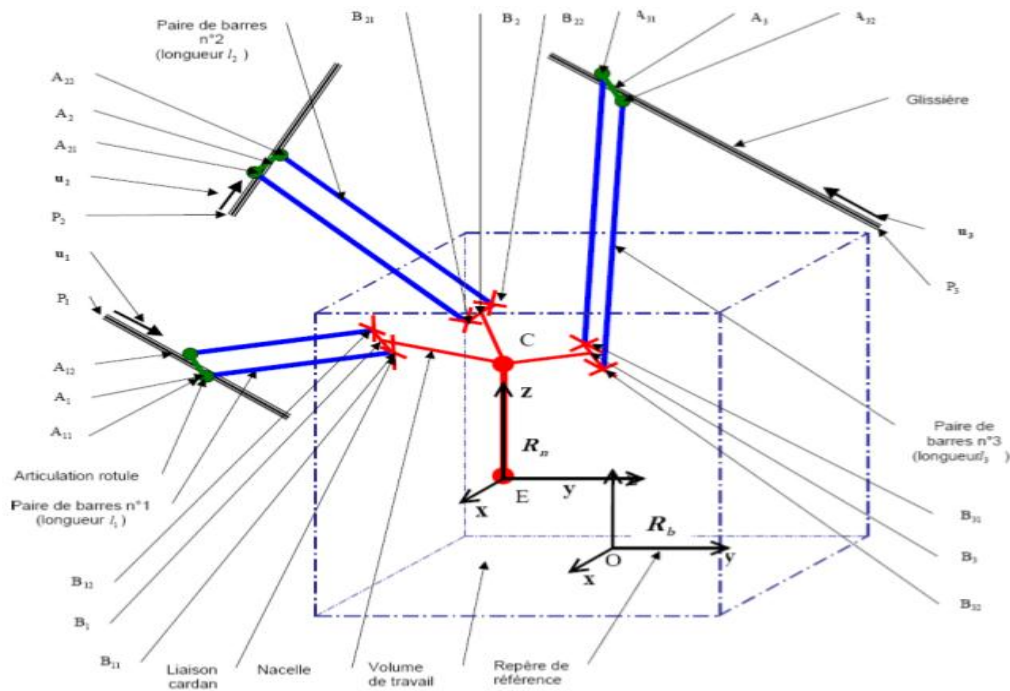


Figure II.1 : Paramétrage de la géométrie de structures de type Delta linéaire .

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.

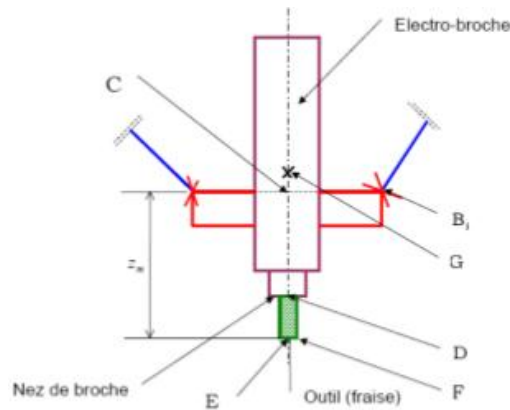


Figure II. 2 : Points de la nacelle.

II.2.1. La géométrie de robot Delta :

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[20-21].

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 [20-22].

Les paramètres géométriques de robot Delta sont présentés dans (Figure II.3).

Coordonnées des points P_i dans le repère fixe :

$$[P_1 \ P_2 \ P_3] = \begin{bmatrix} R & -\frac{R}{2} & -\frac{R}{2} \\ 0 & R\frac{\sqrt{3}}{2} & -R\frac{\sqrt{3}}{2} \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{II.1})$$

Coordonnées des points B_i dans le repère mobile R_n :

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

Composantes des vecteurs u_i dans le repère fixe :

$$[u_1 \ u_2 \ u_3] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{II.3})$$

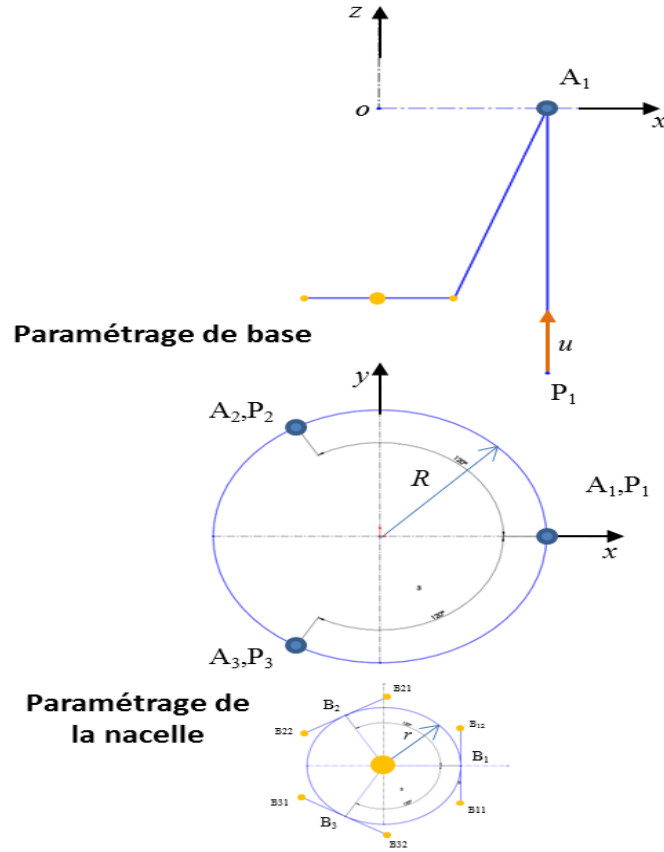


Figure II. 3 : Paramètres géométriques .

Nous obtenons l'expression analytique du modèle géométrique inverse :

$$q_i^2 - q_i[2(x - P_i B_i)u_i] + [(x - P_i B_i)^2 - l_i^2] = 0 \quad (\text{II.4})$$

$$q_i = (x - P_i B_i)u_i + \sqrt{[(x - P_i B_i)u_i]^2 - [(x - P_i B_i)^2 - l_i^2]} \quad (\text{II.5})$$

$$\begin{cases} q_1 = z + \sqrt{L^2 - (r - R + x)^2 - y^2} \\ q_2 = z + \sqrt{L^2 - \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 - \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2} \\ q_3 = z + \sqrt{L^2 - \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 - \left((R - r)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2} \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

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

$$\begin{cases} (r - R + x)^2 + y^2 + (z - q_1)^2 = L^2 \\ \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 + \left((r - R)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2 + (z - q_2)^2 = L^2 \\ \left((R - r)\frac{1}{2} + x\right)^2 + \left((R - r)\frac{\sqrt{3}}{2} + y\right)^2 + (z - q_3)^2 = L^2 \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Le système peut se réécrire :

$$\begin{cases} (A^2 + C^2 + 1)z^2 + 2((C(D - (R - r)) + A * B - q_1) \\ \quad + z + (B^2 + (D - (R - r))^2 + q_1^2 - L^2) = 0 \\ y = Az + B \\ x = Cz + D \end{cases} \quad (\text{II.8})$$

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

La première équation du système admet deux solutions qui correspondent à deux positions de la nacelle. La solution correspondant à la machine étudiée est la position basse. Connaissant z , nous pouvons ensuite calculer x et y de manière unique.

II.2.2. Modélisation cinématique :

Le modèle cinématique établit la relation entre la vitesse de la nacelle en translation et en rotation (que nous noterons \dot{x}) et \dot{q} (vitesse linéaire des actionneurs) pour une position et une orientation données de la nacelle[23-24].

Pour la barre numéro i , nous avons :

$$V_{A_i} \cdot A_i B_i = V_{B_i} \cdot A_i B_i \quad (\text{II.9})$$

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

$$J_q \dot{q} = J_x \dot{x} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$$J_q = \begin{bmatrix} A_1 B_1 \cdot u_1 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 B_2 \cdot u_2 & 0 \\ 0 & 0 & A_3 B_3 \cdot u_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.11})$$

$$\text{et } J_x = \begin{bmatrix} (A_1 B_1)_x & (A_1 B_1)_y & (A_1 B_1)_z \\ (A_2 B_2)_x & (A_2 B_2)_y & (A_2 B_2)_z \\ (A_i B_i)_x & (A_i B_i)_y & (A_i B_i)_z \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

Le modèle cinématique inverse est l'expression de \dot{q} en fonction de \dot{x} . L'écriture du modèle cinématique inverse à partir de (10) est alors :

$$\dot{q} = J_q^{-1} J_x \dot{x} \quad (\text{II.13})$$

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

$$\dot{q} = J^{-1} \dot{x} \quad (\text{II.14})$$

Où J est appelée la matrice Jacobienne.

Le modèle cinématique direct est l'expression de \dot{x} en fonction de \dot{q} . Le modèle cinématique direct s'écrit:

$$\dot{x} = J \dot{q}$$

Dans le cas de l'architecture choisie, les matrices J_x et J_q s'écrivent :

$$J_x = \begin{bmatrix} r - R + x & y & z - q_1 \\ \frac{1}{2}(R - r) + x & \frac{\sqrt{3}}{2}(r - R) + y & z - q_2 \\ \frac{1}{2}(R - r) + x & \frac{\sqrt{3}}{2}(R - r) + y & z - q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.15})$$

$$J_q = \begin{bmatrix} z - q_1 & 0 & 0 \\ 0 & z - q_2 & 0 \\ 0 & 0 & z - q_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.16})$$

- **Singularité serial** ($|J_q| = 0$)

$$\begin{aligned} |J_q| = 0 &\Rightarrow (z - q_1)(z - q_2)(z - q_3) = 0 \\ &\Rightarrow (z = q_1) \vee (z = q_2) \vee (z = q_3) \end{aligned}$$

Cette singularité apparaît lorsque l'un ou deux ou même trois parallélogrammes deviennent perpendiculaires aux directions des actionneurs linéaires. En d'autres termes, ces configurations sont obtenues lorsque $L = R - r$. Pour les éliminer, il est nécessaire de choisir $L > R - r$.

- **Singularité parallèle ($|J_x| = 0$)**

$|J_x| = 0$, signifie que les trois vecteurs $(B_1 - A_1)^t, (B_2 - A_2)^t, (B_3 - A_3)^t$ sont coplanaires. Pour les éliminer, il faut de choisir $L > R - r$.

II.2.3. Performance dynamique :

Pour pouvoir écrire le modèle dynamique, nous établissons:

- La relation entre \ddot{q} et \ddot{x} .
- La relation entre un effort appliqué sur la nacelle et l'effort résultant sur les moteurs.
- Les masses en mouvement.

Nous recherchons l'expression de \ddot{q} (accélération des moteurs) en fonction de \ddot{x} (accélération désirée de la nacelle). L'expression recherchée s'obtient en dérivant le modèle cinématique par rapport au temps. En dérivant l'équation (II.14), nous obtenons:

$$\ddot{q} = J^{-1}\ddot{x} + J_q^{-1}(\dot{J}_x - \dot{J}_q J^{-1})\dot{x} \quad (\text{II.17})$$

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

$$\dot{J}_x = \begin{bmatrix} \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_1 \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_2 \\ \dot{x} & \dot{y} & \dot{z} - \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.18})$$

$$\dot{J}_q = \begin{bmatrix} \dot{z} - \dot{q}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \dot{z} - \dot{q}_2 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{z} - \dot{q}_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.19})$$

Nous constatons que l'accélération des moteurs est composée de la somme de deux termes:
 $J^{-1}\ddot{x}$ 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.

Nous calculons dans un premier temps la relation qui relie l'effort de poussée des moteurs aux efforts appliqués sur la nacelle du point de vue statique.

$$F_{mot} = {}^t J F_{nac}$$

$$F_{nac} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_x \\ F_z \end{bmatrix} \quad et \quad F_{mot} = \begin{bmatrix} F_{mot1} \\ F_{mot2} \\ F_{mot3} \end{bmatrix}$$

F_{mot} Effort de poussée des moteurs

F_{nac} Torseur des efforts appliqués sur la nacelle.

➤ Masses en mouvement:

La pratique montre que, pour simplifier les calculs, la masse de chaque barre de fixation peut être répartie pour une moitié sur la nacelle et pour l'autre moitié sur le secondaire des moteurs, tandis que son inertie est négligée. La simplification proposée ci-dessus nous donne les masses corrigées:

Masse corrigée de la nacelle :

$$M_{nac} = M_1 + 6 \frac{M_b}{2} = M_1 + 3M_b \quad (II.20)$$

Masse corrigée de chaque secondaire de moteur :

$$M_{mot} = M_2 + 2 \frac{M_b}{2} = M_2 + M_b \quad (II.21)$$

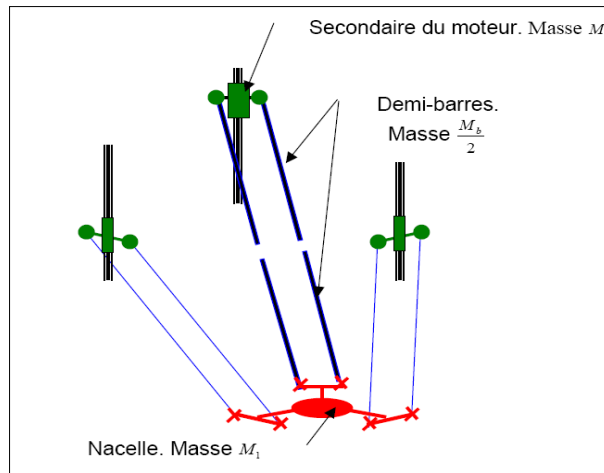


Figure II. 4 : Répartition de la masse des barres.

➤ Energie cinétique de système :

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

$$T = T_{nac} + \sum_1^3 T_{mot} \quad (II.22)$$

L'énergie cinétique de la nacelle est :

$$T_{nac} = \frac{1}{2} M_{nac} \dot{x}^2 = \frac{1}{2} M_{nac} \dot{q}^T J^T J \dot{q} \quad (II.23)$$

L'énergie cinétique de chaque moteur est :

$$T_{mot} = \frac{1}{2} M_{mot} v_{m,i}^2 \quad (II.24)$$

Où :

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

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

Donc $T_{mot} = \frac{1}{2} M_{mot} \dot{q}^T J_{m,i}^T J_{m,i} \dot{q}$ (II.25)

Par conséquent, l'énergie cinétique du robot est:

$$T = \frac{1}{2} M_{nac} \dot{q}^T J^T J \dot{q} + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} M_{mot} \dot{q}^T J_{m,i}^T J_{m,i} \dot{q}$$
 (II.26)

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T I \dot{q}$$

$$T = \frac{1}{2} \dot{q}^T \left(M_{nac} J^T J + \sum_{i=1}^3 \frac{1}{2} M_{mot} J_{m,i}^T J_{m,i} \right) \dot{q}$$
 (II.27)

D'après

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

La matrice masse de robot est donnée par

$$M = J^{-T} I J^{-1}$$

$$M = J^{-T} \left(M_{nac} J^T J + \frac{1}{2} M_{mot} \sum_{i=1}^3 J_{m,i}^T J_{m,i} \right) J^{-1}$$
 (II.28)

II.3. Conclusion :

Nous avons choisi le robot delta et l'agencement correspondent. Et pour cet agencement nous avons fait une modélisation générique de la structure, et enfin la détermination de modèle géométrique, cinématique et dynamique correspondent. Il nous reste que l'optimisation de leurs dimensions qui se fait dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Méthodes d'Optimisation multi-objectifs

III.1. Introduction :	27
III.2. Formulation du problème d'optimisation :	27
III.3. Différentes méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif :	30
III.4. Solution d'un problème d'optimisation multi-objectif.....	33
III.5. Présentation de l'algorithme NSGA II :	34
III.6. Conclusion :	39

III.1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, nous avons formulé quelques problèmes en termes d'optimisation multiobjectif. Compte tenu de la complexité du problème, certains critères ont été considérés comme contraintes limites. Néanmoins, cette formulation présente le risque de perte de solutions optimales. Dans le présent chapitre, nous proposons une formulation générale du problème d'optimisation multiobjectif qui prend en compte les critères de performance souhaités.

III.2. Formulation du problème d'optimisation :

Dans notre travail, le problème d'optimisation multi-objectif (conception optimale) de robots parallèles peut être résumé comme suit:

Ce qui a pour rôle de trouver la meilleure dimension des paramètres géométriques du robot qui assure l'obtention de critères de performance (grand espace de travail dextérité avec une accélération maximale de l'organe terminal) par rapport à des contraintes différentes.

III.2.1. Les critères de performance :

a) La performance cinématique :

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

$$c_j = \text{cond}(J) = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (\text{III.1})$$

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

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

L'indice d'isotropie cinématique est retenu comme indice de mesure des performances cinématiques du robot parallèle, parce que l'isotropie est une propriété importante dans les applications qui exigent de la précision.

b) la performance dynamique :

Pour mesurer la performance cinématique, nous calculons le conditionnement de la matrice masse de robot

$$c_m = \text{cond}(M) \quad (\text{III.2})$$

Il est à noter que l'indice d'isotropie cinématique et dynamique dépendent largement de la configuration et des paramètres géométriques du robot. Nous utilisons les indices globaux

η_J et η_M (très souvent utilisée pour comparer les différentes structures), qui sont définies par les moyennes des indices locaux sur l'espace de travail accessible.

$$\eta_J = \frac{\int c_j dE}{\int dE} \quad (III.3)$$

$$\eta_M = \frac{\int c_m dE}{\int dE} \quad (III.4)$$

c) Espace de travail :

L'espace de travail E est l'un des facteurs les plus importants pour la conception de robots parallèles [25-26]. 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. Par conséquent, le problème que nous posons ici est la suivante:

Le but de ce travail est de trouver un vecteur de paramètres géométriques P^* qui maximise l'espace de travail du robot parallèle E_{dex} toMPut en respectant une contrainte fondée sur un critère cinétostatique (exemple: le nombre de conditionnement de la matrice Jacobienne).

Nous allons choisir un espace de travail régulier (un cube), dans la première étape, on sélectionne de nombre aléatoire des points (par utilisation de méthode de Monte Carlo) basé sur la solution du modèle cinématique inverse. Puis nous déterminons le conditionnement de la matrice Jaacobienne dans chaque point. Par conséquent, la fonction objective est:

$$E_{dex} = \{Point \in E_T \cdot \text{Cond}J \leq \text{Cond}J_{max}\}$$

D'où

$$e_t = \frac{n_p(E_{dex})}{n_p(E_T)} \quad (III.5)$$

III.2.2. Variables et contraintes :

1) Limite de l'espace de travail et variables de conception

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

$$X_{es} = \begin{cases} -0.15 \leq x \leq 0.15 \\ -0.15 \leq y \leq 0.15 \end{cases}$$

2. Limites des variables de conception

$$(X_{c,i})_{min} \leq X_{c,i} \leq (X_{c,i})_{max}, i = 1, \dots, n$$

$$X_c = \{L, R, r, D\}$$

- R : Rayon de la base fixe
- r : Rayon de la nacelle
- L : Longueur des barres
- D_b : Diamètre de section des barres

3. Limites cinématiques articulaires :

$$|\dot{q}_j| \leq (\dot{q}_j)_{max}, j = 1,2,3 \text{ et } |\ddot{q}_j| \leq (\ddot{q}_j)_{max}, j = 1,2,3$$

4. Limites de forces extérieures :

Les forces extérieures agis sur la nacelle, qui sont les forces de coupes, ne dépassent pas une limite données.

$$|(F_{ext})_j| \leq (F_{ext})_{max}, j = 1,2,3$$

1) Forces des Moteur :

Les forces fournies par les moteurs doivent être compatibles avec les limites de performances attendues (vitesses, accélérations et charge autorisées) en tout point de l'espace de travail.

L'expression des forces des moteurs est donnée par :

$$F_{mot} = M_{mot}\ddot{q} + M_{nac} {}^tJ\ddot{x} + {}^tJ F_{ext} \quad (III.6)$$

$$\text{avec } F_{mot} \leq (F_{mot})_{ad}$$

5. $M_{mot}\ddot{q}$ 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).
6. ${}^tJ F_{ext}$ Composante de l'effort moteur due aux efforts extérieurs (principalement les efforts de coupe) appliqués à la nacelle.
7. ${}^tJ F_{nac,acc,D} = M_{nac} {}^tJ\ddot{x}$: Composante de l'effort moteur due à l'accélération de la masse de la nacelle (M_{nac}).

2) La rigidité des barres :

Comme nous avons présenté précédemment que toutes les articulations sont considérées parfaitement rigides.

Par construction, les barres sont sollicitées uniquement en traction-compression. Ces sollicitations restent suffisamment petites pour que les problèmes liés au flambement ne soient pas présents. La déformation d'une de ces barres est :

$$Df_b = \frac{F_b L}{SE} \quad (\text{III.7})$$

Avec :

8. F_b : Effort de traction-compression dans la barre
9. L : Longueur initiale de la barre
10. S : Surface d'une section droite de la barre
11. E : Module d'Young du matériau dans lequel sont réalisées les barres

Cette déformation ne faut pas dépasser une valeur admissible trop petite $Df_b \leq (Df_b)_{ad}$ pour éviter la grande erreur de déplacement de la nacelle, qui influé négativement sur la rigidité de la machine.

- 3) L'absence de la configuration singulière :

Les configurations singulières sont des postures particulières de l'organe terminal où la rigidité naturelle des manipulateurs parallèles subit une grande détérioration.

III.3. Différentes méthodes utilisées pour la résolution des problèmes d'optimisation multi objectif :

Un problème multi objectif est caractérisé par l'inexistence d'une solution optimale. Le décideur peut choisir à partir d'un ensemble de solutions optimales une solution qui n'est pas meilleure que toutes les autres. Dès lors, la résolution d'un problème d'optimisation multi objectif, ne consiste pas à trouver une solution optimale mais l'ensemble des compromise optimaux possibles entre les différents objectifs (les solutions de Pareto) qui contient les solutions satisfaisantes pour lesquelles il n'est pas possible de faire un classement. Les principales méthodes (techniques) utilisées pour traiter les problèmes d'optimisation multi objectif, peuvent être classées en trois grandes familles :

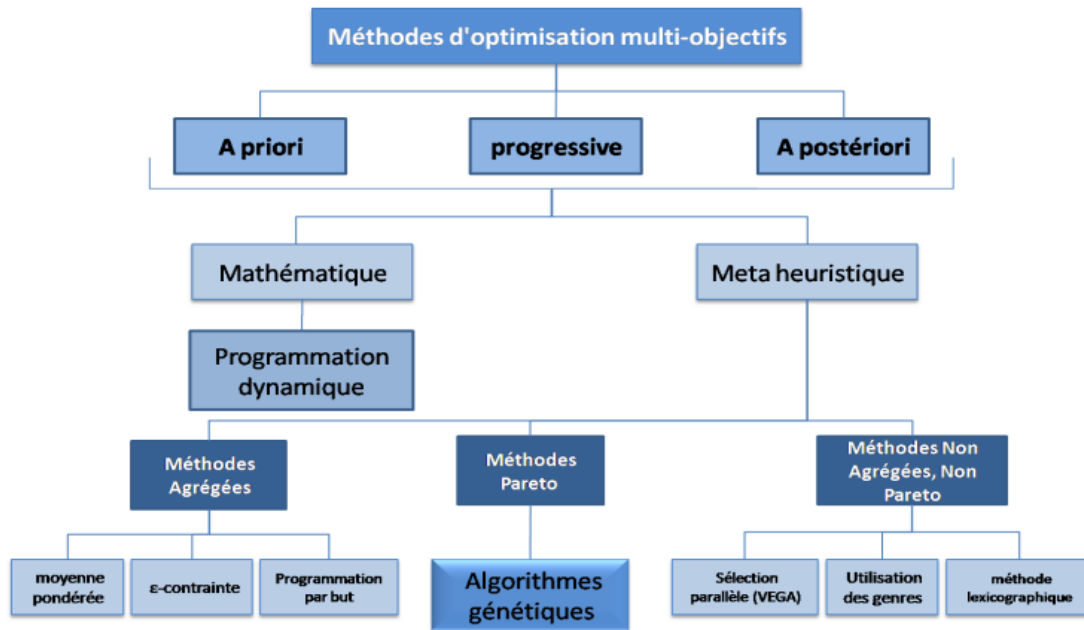


Figure III.1 : Classification des méthodes d'optimisation multi-objectifs.

III.3.1. Les méthodes d'optimisation *a priori*

Les solutions les plus intuitives pour résoudre des problèmes multi-objectifs consistent souvent à combiner les différentes fonctions objectives en une fonction d'utilité suivant les préférences du décideur. Dans ce cas le décideur est supposé connaître a priori le poids de chaque objectif afin de les mélanger dans une fonction unique. Cela revient à résoudre un problème simple objectif.

- La méthode d'agrégation des fonctions objectifs
- La méthode du compromis (la méthode \mathcal{E} -contrainte)
- La méthode du but à atteindre (Goal attainment)
- La méthode du but programmé (Goal programming)

III.3.2. Les méthodes progressives :

Dans ces méthodes, les processus de décision et d'optimisation sont alternés. Par moment, le décideur intervient de manière à modifier certaines variables ou contraintes afin de diriger le processus d'optimisation. Le décideur modifie ainsi interactivement le compromis entre ses préférences et les résultats. Les méthodes méta-heuristiques peuvent classer en trois catégories, des méthodes agrégées, des méthodes Pareto et des méthodes non agrégées non Pareto. Ce classement adopte un point de vue plus théorique articulé autour des notions d'agrégation et d'optimum de Pareto.

- La méthode de Fandel
- Autres méthodes progressives :

Il existe d'autres méthodes progressives permettant de traiter des problèmes d'optimisation multicritère. Nous pouvons citer par exemple : La méthode du compromis par substitution, la méthode STEP , la méthode de Jahn, la méthode de Geoffrion, etc. La présentation du principe de toutes ces méthodes progressives, plus complexes que les méthodes *a priori*, serait trop longue. Le lecteur trouvera dans [27]. tous les détails nécessaires à leur compréhension.

III.3.3. Les méthodes d'optimisation *a posteriori* :

Le décideur prend sa décision d'après un ensemble de solutions calculées par un solveur. Dans ce cas la qualité de la décision dépend du choix de la méthode de résolution. Car celle-ci va devoir donner un ensemble de résultats le plus représentatif de l'espace des objectifs efficaces.

- **Le recuit simulé :**

Cette méthode trouve ses origines dans le domaine de la métallurgie comme un traitement qui consiste à chauffer un matériau à une température suffisante pour assurer son équilibre physico-chimique et structurel. En effet, pour qu'un métal retrouve une structure proche du cristal parfait (l'état cristallin correspond au minimum d'énergie de la structure atomique du métal), nous le portons à une température élevée, puis nous le laissons refroidir. Lors du refroidissement, les atomes de la matière s'organisent entre eux de manière à privilégier les configurations les plus stables, ils passent donc des configurations de haute énergie à des configurations de faible énergie. Cependant, si le niveau d'énergie total du métal est suffisamment élevé, les atomes trouvent l'énergie nécessaire pour changer de configuration et de passer à des configurations moins stables ayant un niveau d'énergie plus élevé. Ce passage se fait selon la loi de *Boltzman* qui dit qu'à la température T , la probabilité P de passage d'un groupe d'atomes se trouve à un niveau d'énergie E_1 à un niveau d'énergie supérieur E_2 , d'écart $dE = E_2 - E_1$, est donnée par :

$$P = e^{\frac{-dE}{kT}} \quad (\text{III.8})$$

K : Constante de *Boltzman*.

Au fur et à mesure que la température baisse, les atomes auront une ressource d'énergie plus faible pour passer à des configurations instables, en conséquence le passage vers les configurations instables devient de plus en plus difficile et les atomes prennent que des configurations stables, conduisant le matériau à prendre son énergie minimale. Ce processus métallurgique a été transposé à l'optimisation et a donné une méthode simple mais très efficace.

- Algorithme du recuit simulé
- Algorithme de la méthode recherche Tabou

III.4. Solution d'un problème d'optimisation multi-objectif

Alors que dans le cas d'un problème d'optimisation mono-objectif, il n'existe qu'un seul optimum global avec éventuellement plusieurs solutions correspondantes, ce n'est plus le cas pour un problème d'optimisation multi-objectif. Il faut donc utiliser une autre notion d'optimum. La plus communément admise est l'optimalité Pareto. On parle alors d'optimum Pareto.

III.4.1. Optimum de Pareto :

Au XIX ième siècle, Vilfredo Pareto, un mathématicien italien, formule le concept suivant : dans un problème multi-objectif, il existe un équilibre tel que l'on ne peut pas améliorer un critère sans détériorer au moins un des autres critères. Cette équilibre a été appelé optimum de Pareto. Un point x est dit Pareto-optimal s'il n'est dominé par aucun autre point appartenant à E . Ces points sont également appelés solutions non inférieures ou non dominées.

III.4.2. La notion de dominance :

$x \in E$ domine $x' \in E$ si $\forall i, f_i(x) \leq f_i(x')$ avec $\exists i$ t e l q u e $f_i(x) < f_i(x')$

Dans l'exemple ci-dessous, les points 1,3 et 5 ne sont dominés par aucun autre. Alors que le point 2 est dominé par le point 1, et que le point 4 est dominé par les points 3 et 5.

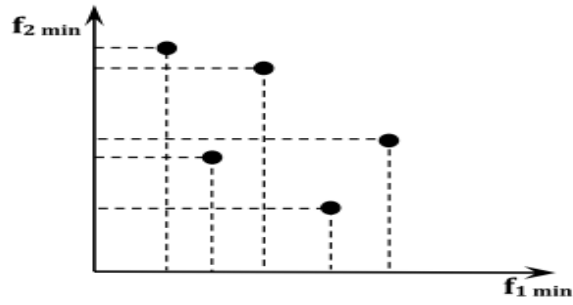


Figure III.2 : Exemple de dominance .

III.4.3. La frontière de Pareto :

La frontière de Pareto est l'ensemble de tous les points Pareto-optimaux. Les figures ci-dessous présentent pour un problème à deux objectifs les quatre frontières de Pareto en fonction du désir de l'utilisateur de minimiser ou maximiser les objectifs. Dans l'exemple de la Figure III.3, la frontière de Pareto est composée des points 1,3 et 5.

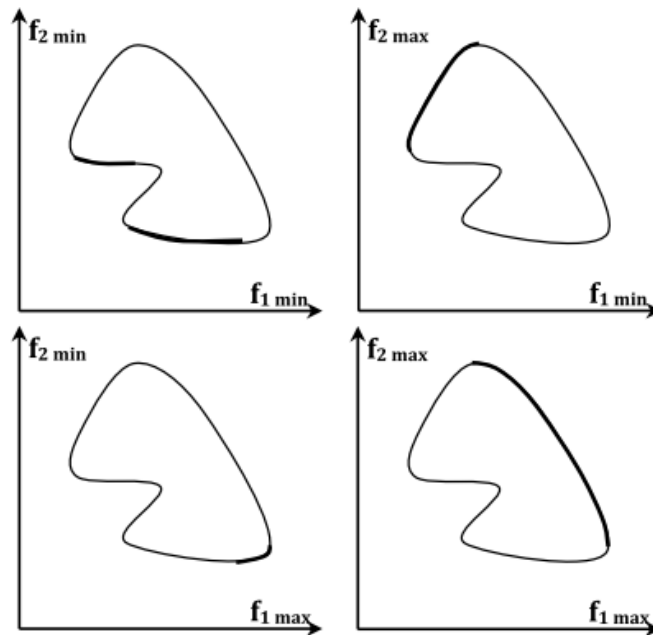


Figure III.3 : Exemples de frontière de Pareto .

III.5. Présentation de l'algorithme NSGA II :

III.5.1. Non dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA) :

Dans la méthode proposée par Sri vinas et Deb en 1993 [28], le calcul de la fitness s'effectue en séparant la population en plusieurs groupes en fonction du degré de domination au sens de Pareto de chaque individu.

- Algorithme de la fonction de notation

a) Dans la population entière, on recherche les individus non dominés. Ces derniers constituent la première frontière de Pareto.

b) On leur attribue une valeur de fitness factice. Cette valeur est supposée donner une chance égale de reproduction à tous ces individus. Mais pour maintenir la diversité dans la population, il est nécessaire d'appliquer une fonction de sharing sur cette valeur.

c) Ensuite, ce premier groupe d'individus est supprimé de la population.

d) On recommence cette procédure pour déterminer la seconde frontière de Pareto. La valeur factice de fitness attribuée à ce second groupe est inférieure à la plus petite fitness après application de la fonction de sharing sur le premier groupe. Ce mécanisme est répété jusqu'à ce que l'on ait traité tous les individus de la population.

L'algorithme se déroule ensuite comme un algorithme génétique classique. Srivinas et Deb utilisent une sélection basée sur le reste stochastique. Mais leur méthode peut être utilisée avec d'autres heuristiques de sélections (tournoi, roulette pipée, etc.).

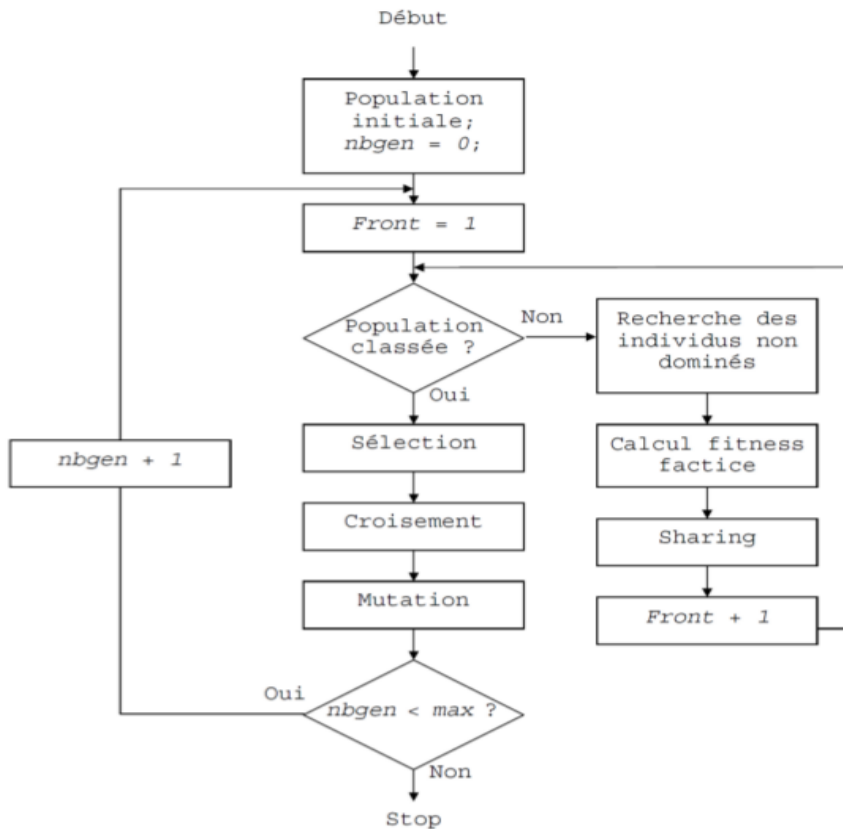


Figure III.4 : Schéma de fonctionnement de NSGA.

• **Critique :**

Cette méthode paraît moins efficace en temps de calcul que la méthode MOGA car le temps de calcul de la notation (tri de la population et sharing) est important. Mais l'utilisation d'un sharing sur l'espace d'état et le tri des solutions en différentes frontières semblent plus appropriés à maintenir une grande diversité de la population et à répartir plus efficacement les solutions sur la frontière de Pareto. De plus, cette méthode est applicable dans des problèmes avec un nombre quelconque d'objectifs.

III.5.2. NSGA II :

« NSGA-II » a été proposé par Deb et al. [29] pour répondre aux critiques qui avaient été faites à NSGA : complexité, non élitisme et utilisation du sharing. La complexité de l'algorithme NSGA est notamment due à la procédure de création des différentes frontières. Pour diminuer la complexité de calcul de NSGA, Deb propose une modification de la procédure de tri de la population en plusieurs frontières.

• **Algorithme :**

a) Pour chaque solution il calcule deux paramètres :

- n_i , le nombre de solutions qui dominent la solution i
- S_i , l'ensemble des solutions que la solution i domine.

b) Il identifie les points tels que $n_i = 0$. Ces points forment la frontière F_1 .

c) Pour chaque élément i de F_1 , il visite l'ensemble S_i , et il retranche 1 au n_j de chaque élément j de S_i .

d) Il recommence en j jusqu'à ce que tous les points soient traités.

L'autre critique sur NSGA est l'utilisation du sharing, méthode qui exige le réglage d'un ou plusieurs paramètres et qui est également forte consommatrice de calculs. Dans NSGA II, Kalyanmoy Deb remplace la fonction de sharing par une fonction de crowding. Il attribue deux caractéristiques à chaque individu :

• i_{rank} représente le rang de non domination de l'individu. Cette caractéristique dépend de la frontière à laquelle appartient l'individu.

• *i distance* représente la distance de crowding de l'individu et permet d'estimer la densité de la population autour de lui.

Pour estimer la densité au voisinage d'une solution i , il calcule la distance moyenne sur chaque objectif, entre les deux points les plus proches situés de part et d'autre de la solution. Cette quantité appelée *i distance* sert d'estimateur de taille du plus large hypercube incluant le point i sans inclure un autre point de la population. Cette distance de crowding va être utilisée pour guider le processus de sélection.

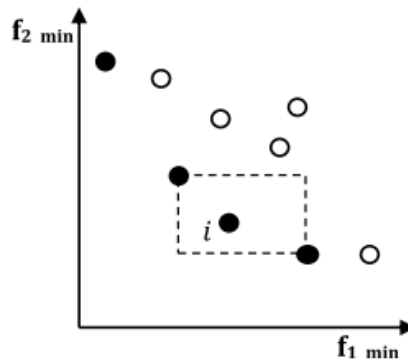


Figure III.5 : Calcul de la distance de crowding.

Pour répondre à la critique de non élitisme, Deb utilise dans cette méthode une sélection par tournoi et modifie la procédure de passage entre deux générations. Si deux solutions sont sélectionnées pour participer au tournoi, la solution de plus bas rang i_{rank} sera retenue. Mais si les deux rangs sont identiques, il est préférable d'utiliser le point situé dans une région dépeuplée, c'est-à-dire avec une valeur *i distance* importante. Deb définit sa notion de préférence entre deux solutions de la façon suivante :

$$i \geq j \text{ si } (i_{rank} < j_{rank}) \text{ ou } ((i_{rank} = j_{rank}) \text{ et } (i_{distance} > j_{distance}))$$

NSGA-II fonctionne de la manière suivante : sa population R_t , où t est le numéro de la génération courante, est divisée en deux sous-populations P_t et Q_t . Les tailles de P_t et Q_t sont égales à N et la taille de R_t est donc $2N$. La sous-population P_t correspond aux parents et Q_t aux enfants après la phase de recombinaison. Nous allons maintenant présenter les principales étapes d'une génération de NSGA II. Les principales étapes d'une génération t de l'algorithme sont [30]:

- Etape 1 : Combiner les populations de parents et d'enfants et créer $R t = P t \cup Q t$. Appliquer un tri non-dominé sur $R t$ et identifier les différents

fronts $\mathcal{F} i$, $i = 1, \dots, e tc.$

- Etape 2 : Créer une nouvelle population $P t+1 = \emptyset$. Initialiser $i = 1$. Tant que $|P t+1| + |\mathcal{F} i| < N$, on fait $P t+1 = P t+1 \cup \mathcal{F} i$ et $i = i + 1$.

- Etape 3 : Lorsque toutes les solutions de $\mathcal{F} i$ ne peuvent être intégrées à $P t+1$, on fait un tri sur les distances de crowding et on inclut à $P t+1$ les $N - |P t+1|$ solutions les plus éparpillées en utilisant la distance de crowding dans l'ensemble $\mathcal{F} i$.

- Etape 4 : Créer la population d'enfants $Q t+1$ à partir de $P t+1$ en utilisant la sélection par tournoi à base de crowding et les opérateurs génétiques. Le déroulement d'une génération est résumé dans la (Figure III.6).

Dans l'étape 1, le tri non-dominé utilise la notion de profondeur de dominance. Les distances de crowding de l'étape 2 permettent d'améliorer la diversité de l'ensemble généré durant la recherche. Cette mesure donne l'estimation de la densité de solutions entourant une solution i dans la population. Cette densité est donnée par une approximation du périmètre du cuboïde formé par les voisins appartenant au même ensemble $\mathcal{F} i$ les plus proches de i (Figure III.5). La distance de crowding des solutions d'un ensemble $\mathcal{F} i$ donné se calcule par l'algorithme II-1.

La sélection par tournoi de l'étape 3 fonctionne de la manière suivante. Un individu i possède deux attributs : son rang $r i$ donné par le tri non-dominé et une distance de crowding $d i$. Une solution i gagne le tournoi contre un individu j si l'une des conditions suivantes est vraie :

1. $r i < r j$
2. $r i = r j$ et $d i > d j$.

La première condition assure que la solution choisie appartient à un meilleur ensemble non-dominé. En cas d'égalité, la seconde condition permet de choisir la solution qui apporte le plus de diversification.

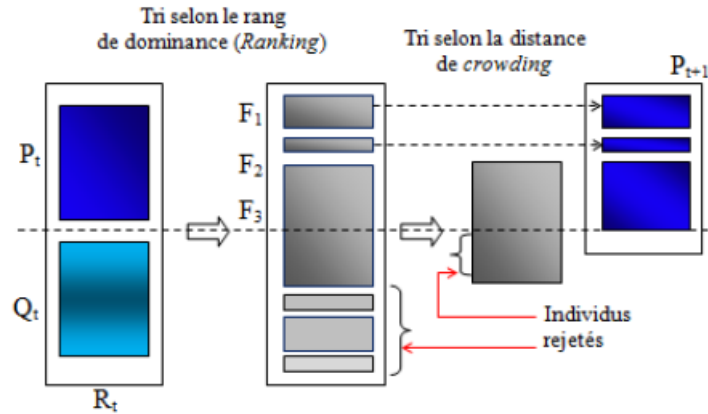


Figure III.6 : Schéma de fonctionnement de NSGA-II.

- **Algorithme de NSGA II**

1. La première génération P_0 de taille N est créée aléatoirement.
2. Sélection par tournoi en utilisant la préférence définie ci-dessus et application des opérateurs de modification pour créer un ensemble d'enfants Q_t de taille N .
3. On mélange P_t et Q_t : $R_t = P_t \cup Q_t$.
4. Calcul de toutes les frontières F_i de R_t et ajout dans P_{t+1} jusqu'à ce que la taille de P_{t+1} soit égale à N .

La solution de NSGA II est l'ensemble des solutions non-dominées de la population finale. Cependant, si le nombre de solutions Pareto optimales est plus grand que N , certaines de ces solutions seront perdues lors de la recherche. Pour palier à ce problème, une archive a été ajoutée et permet de conserver l'ensemble des solutions potentiellement Pareto optimales trouvées au cours de l'exécution de l'algorithme. Cette archive n'est utilisée que dans un but de stockage et les solutions qui s'y trouvent ne sont jamais utilisées durant le déroulement de l'algorithme.

III.6. Conclusion :

Dans cette partie, nous avons utilisé optimiser notre problème d'optimisation multi-objectif. Nous avons formulé le problème d'optimisation multi-objectifs, d'après définir tout les paramètres de problème, et les donnés par rapport le robot Delta. L'utilisation de l'algorithme génétique NSGA . II nous donne les résultats présentés d'avant. L'optimisation de notre machine nous donne les dimensions optimales que nous allons utiliser dans le chapitre suivant pour simuler numériquement notre robot Delta.

Chapitre IV

Simulation numérique

IV.1. Introduction :	40
IV.2. Données de l'algorithme génétique et les caractéristiques du robot :	40
IV.3. Résultats et discussions :	41
IV.4. Conclusion :	47

IV.1. Introduction :

L'optimisation qui se fait dans le chapitre précédent, nous permet de choisir la dimension de notre robot d'après les valeurs des paramètres géométriques. Dans cette partie, nous allons faire une évolution de quelques paramètres de robot, avec MATLAB.

IV.2. Données de l'algorithme génétique et les caractéristiques du robot :

TABLE I
Données de l'algorithme NSGA II

Paramètres	Valeurs
Taille de la population	80 Individus
Nombre de générations	80 générations
Pression de sélection	1.6
Probabilité de mutation	0.2

TABLE II
Caractéristiques du robot

	Paramètre	Valeur	
		Min	Max
Espace de recherche	x (m)	-0.15	0.15
	y (m)	-0.15	0.15
	R (m)	0.5	0.7
	r (m)	0.1	0.3
	L (m)	0.8	1.7
	D_b (m)	0.006	0.008
	$ \dot{q}_j _{max}$ (m/s)	0.2	
	$ \ddot{q}_j _{max}$ (m/s ²)	0.2	
	$(F_{ext})_{max}$ (N)	500	
	$CondJ_{max}$	4	
Paramètres de robot	(M_1) Masse de Nacelle (kg)	1	
	(M_2) Masse de Moteur (kg)	0.5	
	Module d'élasticité des barres (N/mm ²)	210000	
	$(Df_b)_{ad}$ (mm)	0.1	
	$(F_{mot})_{ad}$ (N)	500	

IV.3. Résultats et discussions :

D'après l'exécution du programme de l'algorithme génétique NSGA II sous Matlab, donne les résultats graphiques qui sont présentées dans (Figure IV.1) qui représente La frontière de Pareto en 2D qui représente la solution de la meilleure itération, et(Figure IV.2) qui représente l'effet de (L) sur les fonctions objectives.

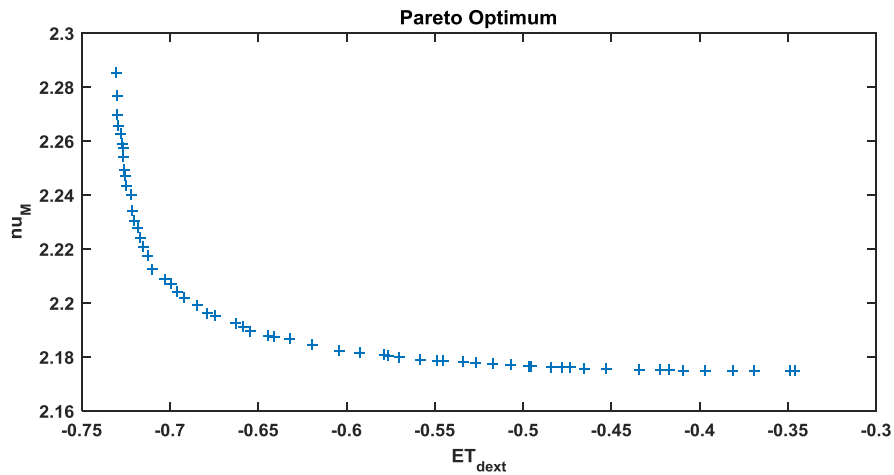


Figure IV.1 : frontière de Pareto entre l'espace de travail dextérité et η_M .

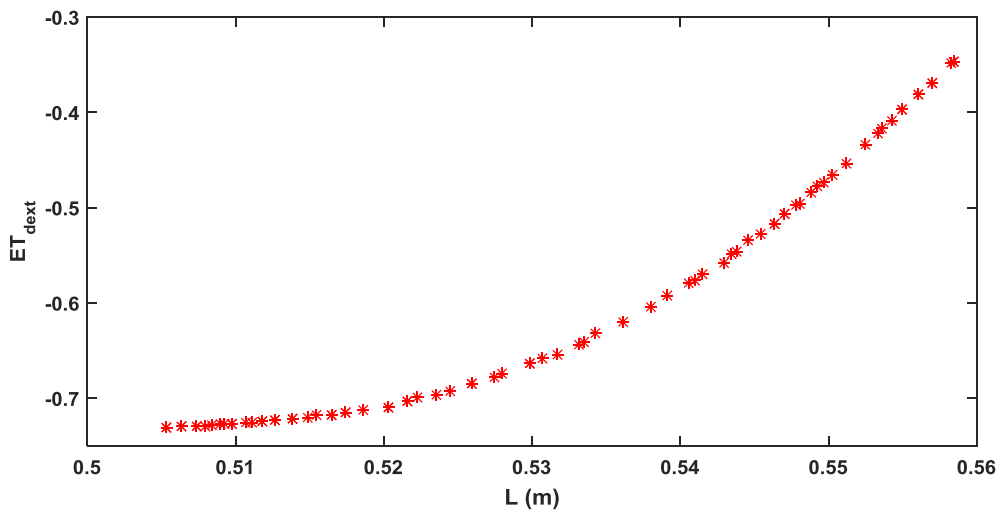


Figure IV.2 : représente l'effet de L sur les fonctions ET dest.

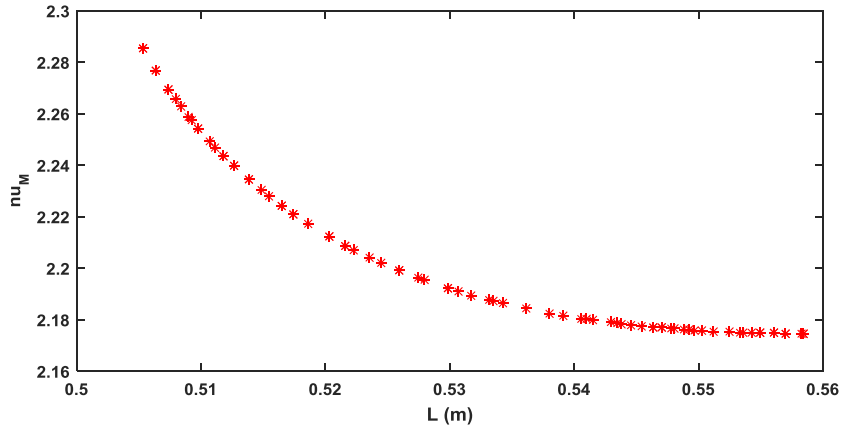


Figure IV.3 : représente l'effet de L sur les fonctions η_M .

Le choix des paramètres géométriques optimisés du compromis obtenu entre les différents objectifs qui contient les meilleures solutions, il sera fait selon l'ordre d'importance des critères (préférences du concepteur) .

Cette solution va refléter son compromis vis-à-vis des différentes fonctions objectif. Dans notre cas, nous avons préféré d'avoir de meilleure espace de travail dextérité

e_t	η_M	R	R	L
0,73	2,29	0,35	0,06	0.5053

Par ailleurs, un autre choix favorisant performances dynamiques

e_t	η_M	R	R	L
0.3464	2.1747	0,35	0,06	0.5584

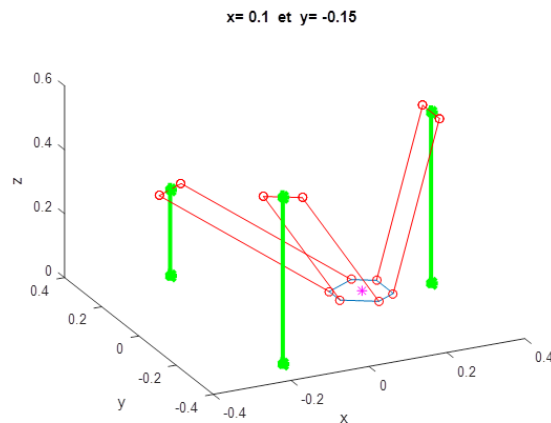


Figure IV.4 : Représentation de robot Delta sous MATLAB .

Pour préférer avoir de meilleures performances cinématiques et dynamiques.
Représentation de l'espace de travail

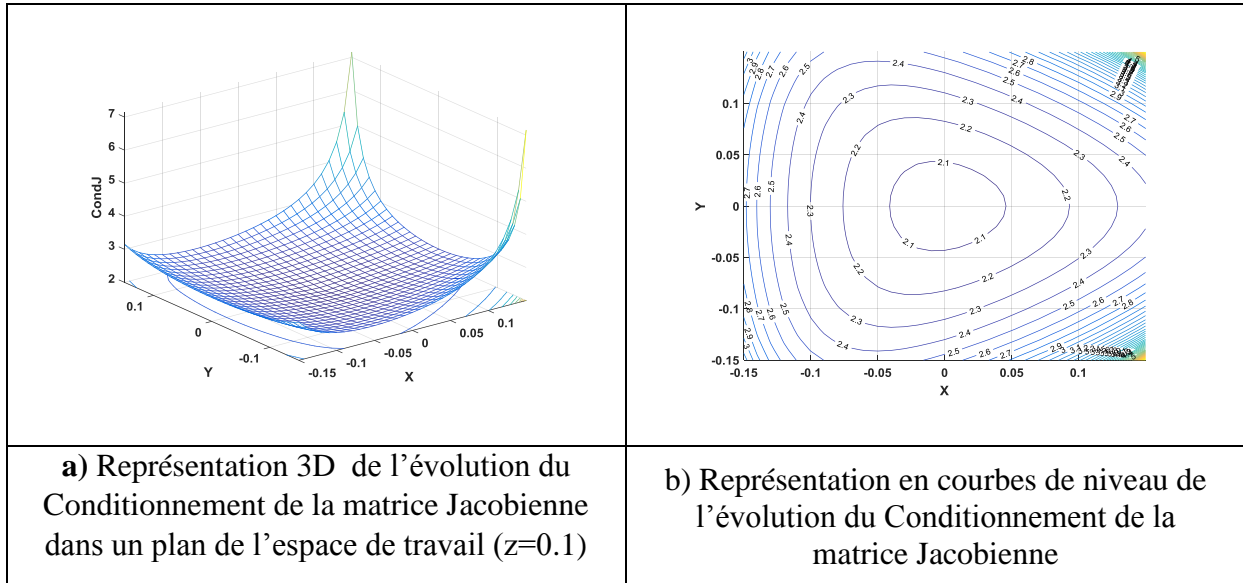


Figure IV.5 : Evolution du Conditionnement de la matrice Jacobienne avec ($L= 0.5053$, $Rb= 0.35$ $Rn=0.06$).

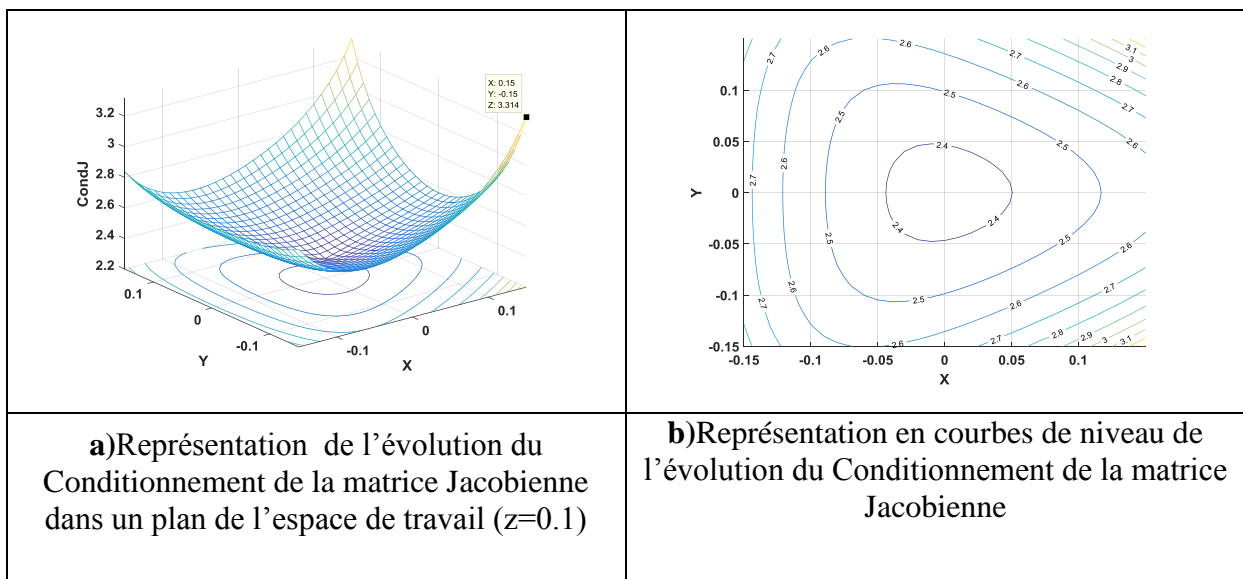


Figure IV.6 : Evolution du Conditionnement de la matrice Jacobienne ($L= 0.5084$ $Rb= 0.35$ $Rn=0.06$).

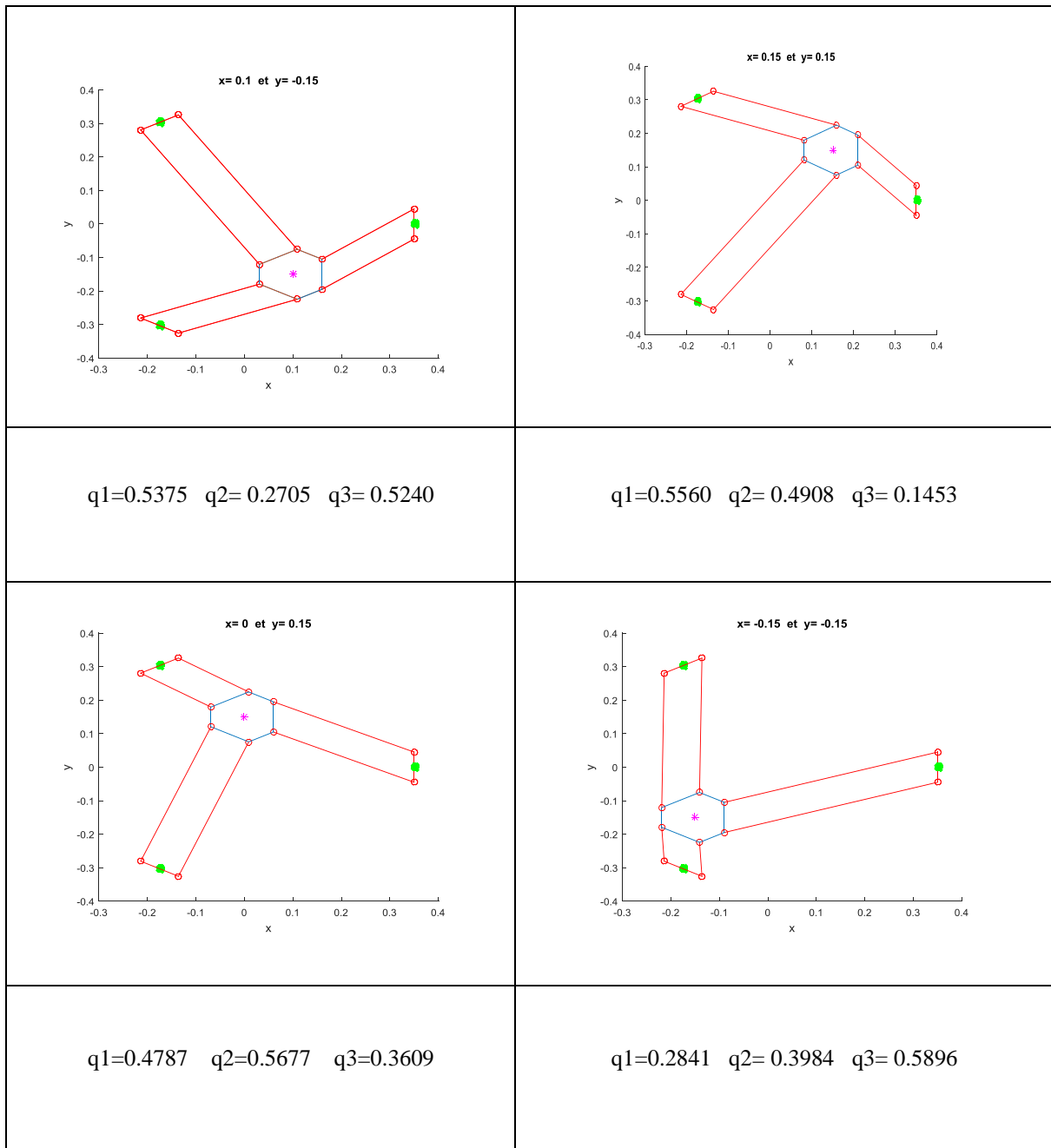


Figure IV.7 : Représentation de quelque positions de robot Delta.

- **Résultat de Simulink sous Matlab :**

Dans cette partie, nous présentons la solution de modelé géométrique et cinématique de robot Delta linéaire. Nous donnons un trajectoire de la centre de la nacelle (figure IV.9:), et nous présentons les évolution de la déplacements (figure IV.12), vitesses (figure IV.13) et accélérations des moteurs (figure IV.14).

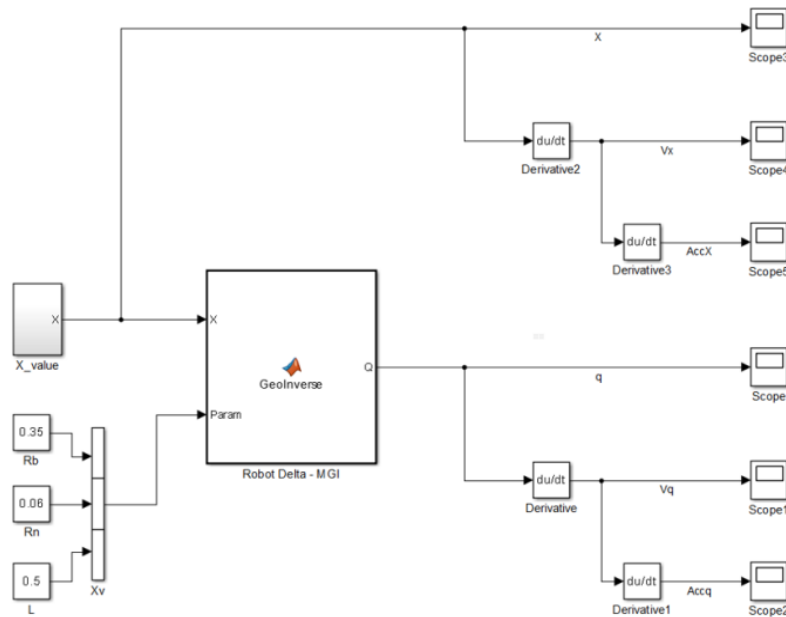


Figure IV.8 : Schéma Plock de robot parallèle .

- Trajectoire de centre de la nacelle

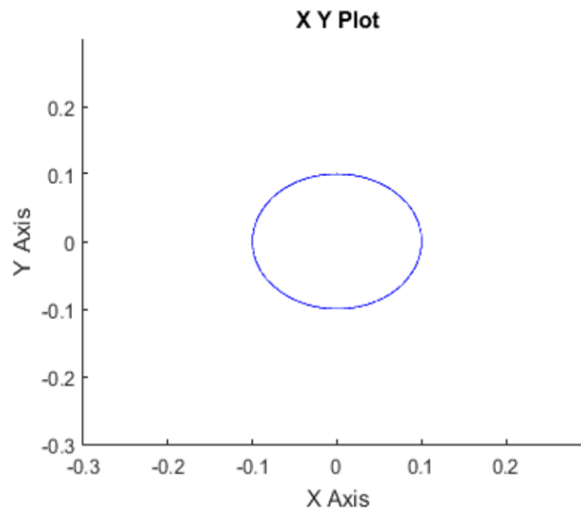


Figure IV.9: le trajectoire de la nacelle.

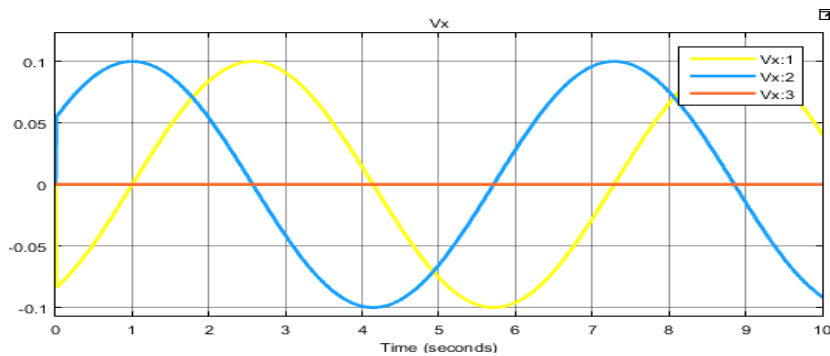


Figure IV.10: vitesse de déplacement de la nacelle.

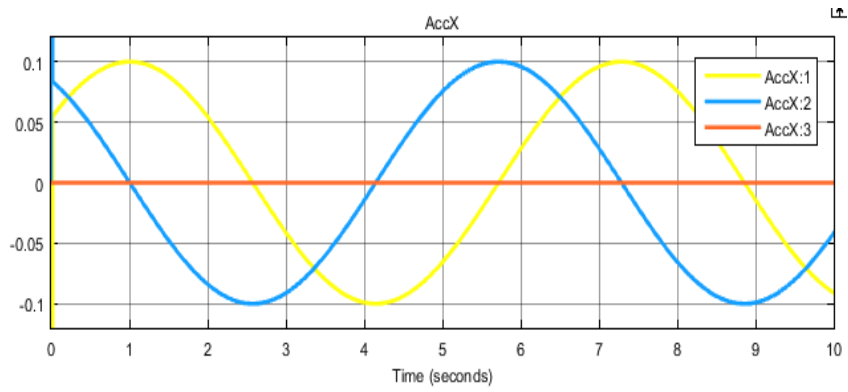


Figure IV.11: Accélération de déplacement de la nacelle.

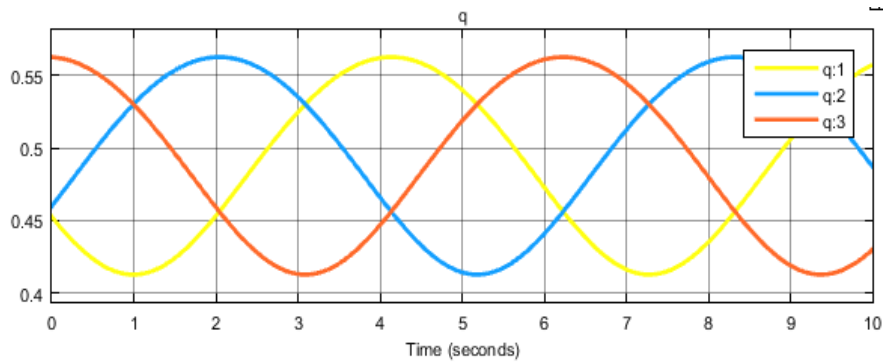


Figure IV.12: Déplacements de moteur.



Figure IV.13: vitesse de moteurs.

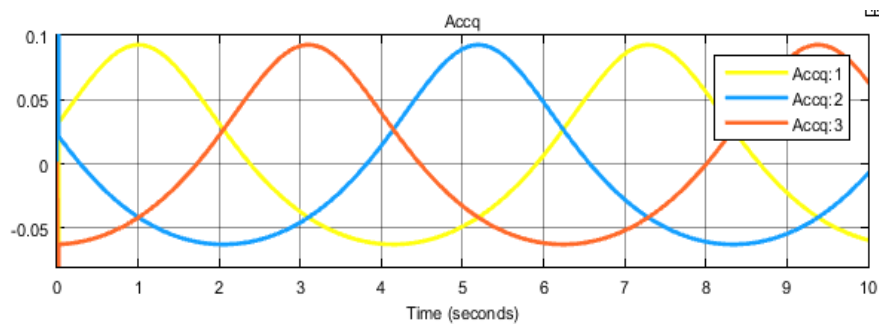


Figure IV.14: Accélération de moteurs.

IV.4. Conclusion :

Dans cette partie, nous avons présenté les résultats de résolution de problème d'optimisation multi-objectifs par l'algorithme génétique NSGA – II. L'approche proposée permet de déterminer une bonne approximation de la compromission (front de Pareto) entre les différents critères de performances qui sont parfois antagonistes. Le front de Pareto obtenu regroupe les meilleures solutions, notre choix de la solution est fait selon d'avoir un grand espace de travail dextérité, qui se traduit par le vecteur de paramètres géométriques [R=0.35 ; r=0.06 ; L=0.5084]. suivi par une simulation de robot delta sous Simulink (Matlab).

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons essayé de résoudre le problème d'optimisation multicritère d'un robot parallèle par l'utilisation d'une méthode capable pour ce type des problèmes qui est l'algorithme génétique NSGA II.

Le choix de l'architecture parallèle adéquate pour une machine-outil se fait après de comparaisons entre les caractéristiques de la machine-outil et les robots parallèles, tels que la performance dynamique, la précision et la rigidité. D'après cela nous avons trouvé seulement quelques architectures parallèles sont candidat en tant qu'architectures de machines-outils. Parmi ces architectures nous prenons le robot d'architecture Delta. Ensuite, nous avons choisi l'agencement de notre machine, afin de faire une modélisation géométrique, cinématique et dynamique de robot Delta linéaire. D'après de sélectionner le type de topologie de la machine, il reste à effectuer une optimisation de ses dimensions.

Dans ce travail, nous avons présenté une méthodologie de conception dimensionnelle optimale des robots parallèles, fondée sur une approche d'optimisation multi-objectif des différents critères de performance, tels que la rigidité, les performances cinématiques et dynamiques, ainsi que l'espace de travail dextérité à l'aide des algorithmes génétiques.

La qualité de résultat montre que l'algorithme génétique est capable pour résoudre des problèmes d'optimisation multi-objectifs complexe avec grand nombres des variables sous des contraintes compliqués avec un temps de calcul faible. Les performances du modèle proposé demeurent en effet perfectibles en améliorant notamment la précision et la rapidité de l'algorithme génétique lui-même.

Finalement, nous concluons par les perspectives suivantes : de généraliser cette application à tout genre de problèmes surtout les problèmes d'optimisation qui ont plus de deux objectifs.

References

- [1] O. Company and F. Pierrot, "Modelling and design issues of a 3-axis parallel machine-tool," *Mechanism and Machine Theory*, vol. 37, pp. 1325-1345, 2002.
- [2] J.-P. Merlet, *Parallel robots* vol. 74: Springer, 2001.
- [3] E. F. Fichter, D. R. Kerr, and J. Rees-Jones, "The Gough-Stewart platform parallel manipulator: A retrospective appreciation," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 223, pp. 243-281, 2009.
- [4] R. Bricard, "Mémoire sur la théorie de l'octaèdre articulé", *Journal de Mathématiques pures et appliquées*, Liouville, tome 3, pages 113–148, 1897.
- [5] Gough V. E., "Contribution to discussion of papers on research in automotive stability, control and tyre performance", in *Proc. Auto. Div., Institute of mechanical engineering*, 1956-1957.
- [6] Merlet J.-P., *Parallel robots*, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherland, 2000.
- [7] Stewart D., A platform with six degrees of freedom. *Proc. Inst. Mech. Engr*, Vol.180, Pt 1(No 15): 371-386, 1965.
- [8] Clavel, R. (1991). *Conception d'un robot parallèle rapide à 4 degrés de liberté*. PhD thesis, EPFL, Lausanne, Switzerland.
- [9] *Analyse et modélisation des robots manipulateurs*. Hermès Science Publications.
- [10] Merlet J.-P., *Les robots parallèles*, Hermès, Paris, 1997.
- [11] Clavel R., "DELTA, fast robot with parallel geometry", *PRO. Int. Symposium on industrial robots*, avril 1988, p. 91-100.
- [12] Gough V. E., "Contribution to discussion of papers on research in automotive stability, control and tyre performance", in *Proc. Auto. Div., Institute of mechanical engineering*, 1956-1957.
- [13] Stewart D., A platform with six degrees of freedom. *Proc. Inst. Mech. Engr*, Vol.180, Pt 1(No 15): 371-386, 1965.

- [14] Merlet J.-P., Les robots parallèles, Hermès, Paris, 1997.
- [15] Pierrot F., "Robots pleinement parallèles légers : conception, modélisation et commande", Thèse de doctorat, université Montpellier II, 1991.
- [20] 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, pp. 209-225, 2004.
- [21] Q. L. Ai, S. J. Zu, and F. Xu, "Review of kinematics and singularity of parallel manipulator," *Zhejiang Daxue Xuebao (Gongxue Ban)/Journal of Zhejiang University (Engineering Science)*, vol. 46, pp. 1345-1359, 2012.
- [22] O. Company, "Machines-outils rapides rapides à structure parallèle. Méthodologie de conception, applications et nouveaux concepts," 2000.
- [23] S. Kucuk, "A dexterity comparison for 3-DOF planar parallel manipulators with two kinematic chains using genetic algorithms," *Mechatronics*, vol. 19, pp. 868-877, 2009.
- [24] M. Mustafa, R. Misuari, and H. Daniyal, "Forward Kinematics of 3 Degree of Freedom Delta Robot," in *Research and Development, 2007. SCOReD 2007. 5th Student Conference on*, 2007, pp. 1-4.
- [25] A. Kosinska, M. Galicki, and K. Kedzior, "Determination of parameters of 3-dof spatial orientation manipulators for a specified workspace," *Robotica*, vol. 21, pp. 179-183, 2003.
- [26] 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, pp. 3250-3255
- [27] Collette, Y. and Siarry, P. (2002). Optimisation multiobjectif . Eyrolles.
- [28] Srivinas N. and Deb K., "Multiobjective Optimization using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms", Technical Report, Department of Mechanical Engineering, Institute of Technology, India, 1993.
- [29] Dorigo M. and Stützle T., "Ant Colony Optimization", MIT Press, 2004.
- [30] Nicolas J., « Modélisation et résolution approchée de problème de tournées multi-objectif », thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.