



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
La République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de L'Enseignement Supérieur & la Recherche  
Scientifique  
جامعة عبد الحميد بن باديس – مستغانم  
Université Abdel Hamid Ben Badis – Mostaganem  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الهندسة الميكانيكية  
Département Génie Mécanique



N° d'ordre : M...../GM/2021

## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

*Thème*

**Génération de trajectoire d'un robot industriel  
entre deux points sous contraintes cinématiques**

Présenté par :

- ❖ BENGUENEB Bendehiba
- ❖ BETTAHAR Abdallah

Soutenu le 12 / 07 / 2021 devant le jury composé de :

Président	Pr. Ramdane ZENASNI	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Dr. Mohamed SAHNOUNE	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr. Abdelmadjid FLITTI	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2020 /2021

---

## Résumé

En robotique pour une tâche point à point seules les positions initiale et finale sont définies. La génération de trajectoire, dans ce cas, consiste à définir une fonction d'interpolation qui doit vérifier les conditions aux limites et respecter les limites cinématiques de vitesses et des accélérations des actionneurs. Ce travail s'inscrit dans le cadre et vise à étudier quatre lois d'interpolation qui permettent de générer la trajectoire entre deux positions articulaires sous des contraintes cinématiques. Ces quatre lois sont : la loi Bang-Bang, la loi trapézoïdale en vitesse, le lissage de la loi trapézoïdale en vitesse et l'interpolation polynomiale de degré cinq. Un programme est élaboré sous l'environnement Matlab qui permet de calculer les paramètres des mouvements et de visualiser les résultats.

**Mots-clés :** génération, trajectoire, robot, manipulateurs, articulaire, bang-bang, trapèze, vitesses et accélérations.

## Abstract

In robotics, for a point-to-point task, only the initial and final positions are defined. The trajectory generation, in this case, consists in defining an interpolation function which must check the boundary conditions and respect the kinematic limits of speeds and accelerations of the actuators. This work falls within the framework and aims to study four laws of interpolation, which make it possible to generate the trajectory between two joint positions under kinematic constraints. These four laws are: the Bang-Bang law, the trapezoidal law in speed, the smoothing of the trapezoidal law in speed and polynomial interpolation of degree five. A program is developed in the Matlab environment, which allows the calculation of movement parameters and the visualization of the results.

**Keywords :** generation, trajectory, robot, manipulators, articular, bang-bang, trapezoid, speeds and accelerations.

## ملخص

في الروبوتيات، لمهمة نقطة إلى نقطة، يتم تحديد المواضع الأولية والنهائية فقط. يتم إنشاء المسار، في هذه الحالة، عن طريق تحديد دالة الاستقطاب، والتي يجب أن تتحقق الشروط الحدية وتحترم السعة الحركية للسرعات ولتسارعات المحركات. يندرج هذا العمل في هذا الإطار و الذي يهدف إلى دراسة أربعة قوانين للاستقطاب، والتي تجعل من الممكن إنشاء مسار بين موقعين في ظل القيود الحركية. هذه القوانين الأربعة هي: قانون بانغ-بانغ، وقانون شبه المنحرف للسرعة، وتنعيم قانون شبه المنحرف في السرعة واستقطاب متعدد الحدود من الدرجة الخامسة. تم تطوير برنامج في بيئة ماتلاب، والذي يسمح بحساب خواص الحركة وعرض النتائج.

### الكلمات المفتاحية:

إنشاء، مسار، ذراع آلية، مفصلية، بانغ بانغ، شبه منحرف، سرعات وتسارع.

---

---

# REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier profondément Dieu, le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, ainsi que la santé pour réaliser ce modeste travail.

Nous adressons nos remerciements à notre Encadreur, Monsieur **Abdelmadjid FLITTI**, enseignant chercheur au département de Génie Mécanique faculté Science et Technologie, Université ABDELHAMID IBN BADIS de Mostaganem, pour son aide précieuse et ses conseils qui ont été bénéfiques dans la réalisation de ce mémoire.

Tout notre respect et nos remerciements vont vers les membres du jury qui vont pleinement consacrer leur temps et leur attention afin d'évaluer notre travail. Nous tenons à remercier vivement Professeur **Ramdane ZENASNI** d'avoir accepté de présider le jury de ce mémoire.

Nos remerciements vont, également, au Docteur **Mohamed SAHNOUNE** d'avoir accepté d'examiner ce Mémoire.

Nous désirons aussi remercier l'ensemble de l'équipe pédagogique du département du **Génie Mécanique** pour leur écoute et encadrement durant tous notre cursus.

---

---

# *Dédicaces*

*Quand il y a la soif d'apprendre, tout vient à point à qui sait attendre.*

*Aucune dédicace à mes très chers parents ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce qu'ils méritent pour tous les sacrifices qu'ils n'avaient cessés de faire depuis ma naissance, durant mon enfance, ma scolarité et même à l'âge adulte, j'espère que votre bénédiction m'accompagne toujours.*

*A mes très chers frères, et les familles BETTAHAR.*

*A tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à mon instruction, Veuillez trouver l'expression de mon respect le plus profond et ma considération la plus sincère.*

*A tous les étudiants de la promotion Construction Mécanique 2021.*

*A mes chers amis BENZOURA OMAR FAROUK et BENHALIMA FAROUK ABDLHALIM.*

*A BENGUENEB BENDEHIBA qui a accepté sans aucune hésitation pour être mon binôme afin de mener à bien ce modeste travail*

BETTAHAR Abdallah

---

---

# *Dédicaces*

**A** mes chers parents, pour exprimer ce qu'ils méritent pour tous les sacrifices qu'ils ont consentis à maintes reprises depuis la naissance et l'éducation jusqu'à l'âge adulte, je dédie cet humble acte. Que Dieu les préserve et prolonge leur vie avec santé et bien-être, si Dieu le veut.

**A** mes très chers frères, et les familles *BENGUENEB*.

**A** tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à mon instruction, Veuillez trouver l'expression de mon respect le plus profond et ma considération la plus sincère.

**A** tous les étudiants de la promotion *Construction Mécanique 2021*.

**A** mes chers amis *BENZOURA OMAR FAROUK* et *BENHALIMA FAROUK ABDLHALIM*.

**A** *BETTAHAR ABDALLAH* qui a accepté sans aucune hésitation pour être mon binôme afin de mener à bien ce modeste travail.

**BENGUENEB Bendehiba**

---

# SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES.....	III
LISTE DES TABLEAUX .....	V
LISTE DES SYMBOLES .....	VI
INTRODUCTION .....	1
<u>CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES ROBOTS MANIPULATEURS</u> .....	2
I.1. Introduction .....	2
I.2. Types de robots.....	2
I.3. les robots manipulateurs sériels .....	4
I.3.1. Constituants d'un robot manipulateur industriel .....	4
I.3.2. Terminologies .....	5
I.3.2.1 Articulations .....	5
I.3.2.2 Degrés de libertés.....	6
I.3.2.3 Espace articulaire .....	6
I.3.2.4 Espace opérationnel .....	6
I.3.2.5 volume du travail .....	6
I.3.3 Architectures cinématiques .....	6
I.3.4 Performance des robots .....	8
I.3.4.1. Précision .....	8
I.3.4.2. Répétabilité.....	9
I.3.4.3. Performances dynamiques.....	9
I.3.4.4. Charge utile.....	9
<u>CHAPITRE II. LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES ROBOTISEES</u> .....	10
II.1. Introduction .....	10
II.2. Applications industrielles robotisées .....	10
II.2.1. Soudage par points et soudage au laser .....	10
II.2.2. La peinture, le revêtement et l'étanchéité .....	12
II.2.3. La manipulation des pièces et sélection des outils .....	12
II.2.4. Assemblage .....	13
II.2.5. L'inspection et l'assurance de la qualité .....	14
II.2.6. Entretien et réparation.....	15
II.3. Programmation des robots industriels .....	15
II.3.1. Programmation en ligne .....	16
II.3.2. Programmation hors-ligne.....	17

<b>CHAPITRE III. GENERATION DE TRAJECTOIRE D'UN ROBOT INDUSTRIEL ENTRE DEUX POINTS SOUS CONTRAINTES CINEMATQUES</b> .....	18
III.1.Introduction .....	18
III.2. Trajectoires point-à-point dans l'espace articulaire .....	19
III.3. Principe de la génération de trajectoire entre deux points dans l'espace articulaire .....	19
III.4. La loi Bang-Bang .....	20
III.4.1.Principe de la loi Bang-Bang .....	20
III.4.2. présentation des résultats issus de l'implantation de la loi Bang-bang sous Matlab .....	22
III.5. La loi trapézoïdale en vitesse .....	25
III.5.1.Principe de la loi trapézoïdale en vitesse .....	25
III.5.2. présentation des résultats issus de l'implantation de la loi trapézoïdale sous Matlab....	26
III.6. Lissage de la loi trapézoïdale en vitesse .....	28
III.6.1.Principe du lissage de la loi trapézoïdale en vitesse.....	28
III.6.2. présentation des résultats issus de l'implantation du lissage la loi trapézoïdale sous Matlab .....	29
III.7. La loi polynomiale de degré cinq .....	32
III.7.1.Principe de la loi polynomiale de degré cinq .....	32
III.7.2. présentation des résultats issus de l'implantation de la loi polynomiale de degré cinq sous Matlab.....	32
CONCLUSION .....	35
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....	36

# LISTE DES FIGURES

## CHAPITRE I

<b>Figure I.1 :</b> Robot sériel (Robot RV-2AJ de Mitsubishi).....	2
<b>Figure I.2 :</b> le Robot parallèle (FlexPicker ) dédié aux applications alimentaires du type .....	3
<b>Figure I.3 :</b> Robot ASIMO de Honda [6]. .....	3
<b>Figure I.4 :</b> Schématisation d'un robot sériel [11].....	4
<b>Figure I.5 :</b> Constituants d'un robot manipulateur. ....	5
<b>Figure I.6 :</b> Symboles des articulations rotoïde et prismatique [2].....	6
<b>Figure I.7 :</b> Les robots cartésiens [24]. ....	7
<b>Figure I.8 :</b> Robot SCARA (Sankyo) [24] .....	7
<b>Figure I.9 :</b> Robot cylindrique(Seiko) [24]. ....	7
<b>Figure I.10:</b> Robot sphérique (Fanuc) [24]. ....	8
<b>Figure I.11:</b> Robot anthropomorphe (Kawasaki) [24]. ....	8

## CHAPITRE II

<b>Figure II.1:</b> Robot industriel du soudage par points [22].....	10
<b>Figure II.2:</b> Robot industriel soudage au laser [23].....	11
<b>Figure II.3:</b> Robot industriel du Peinture [19].....	12
<b>Figure II.4:</b> Robot industriel de la manipulation des pièces [29]. ....	13
<b>Figure II.5:</b> Pinces avec deux et trois doigts [14].....	13
<b>Figure II.6:</b> Ligne d'assemblage industrielle robotisé [26].....	14
<b>Figure II.7:</b> Robot industriel d'inspection et d'essais de la qualité [25].....	14
<b>Figure II.8:</b> Robot de réparation dans une zone industrielle [16].....	15
<b>Figure II.9:</b> boîte à boutons pour l'apprentissage du robot.....	16

## CHAPITRE III

<b>Figure III.1:</b> Trajectoire de référence à suivre par un manipulateur. ....	18
<b>Figure III.2:</b> Soudure par points. ....	19
<b>Figure III.3:</b> Loi de Bang Bang [8]. ....	21
<b>Figure III.4:</b> Robot PUMA 560 [33]. ....	22
<b>Figure III.5:</b> Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec la loi Bang-Bang pour le cas étudié. ....	23
<b>Figure III.6:</b> Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec la loi Bang-Bang pour le cas étudié. ....	24
<b>Figure III.7:</b> Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec la loi Bang-Bang pour le cas étudié. ....	24
<b>Figure III.8:</b> la loi trapézoïdale en vitesse [8]. ....	25
<b>Figure III.9:</b> Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec la loi trapézoïdale pour le cas étudié. ....	27



**Figure III.10:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec la loi trapézoïdale pour le cas étudié. .... 27

**Figure III.11:** Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec la loi trapézoïdale pour le cas étudié..... 28

**Figure III.12:** Lissage de la loi trapézoïdale en vitesse [8]..... 29

**Figure III.13:** Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec lissage de la loi trapézoïdale pour le cas étudié..... 30

**Figure III.14:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec lissage de la loi trapézoïdale pour le cas étudié..... 31

**Figure III.15:** Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec lissage de la loi trapézoïdale pour le cas étudié..... 31

**Figure III.16:** Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec la loi polynomiale de degré cinq pour le cas étudié. .... 33

**Figure III.17:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec la loi polynomiale de degré cinq pour le cas étudié ..... 33

**Figure III.18:** Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec la loi polynomiale de degré cinq pour le cas étudié ..... 34

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau III. 1:</b> variables articulaires des positions initiales et finale et les limites cinématiques du robot PUMA560 [18]. .....	22
<b>Tableau III. 2:</b> Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par la loi Bang-Bang. ....	23
<b>Tableau III. 3 :</b> Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par la loi trapézoïdale. ....	26
<b>Tableau III. 4:</b> Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par le lissage de la loi trapézoïdale. ....	30
<b>Tableau III. 5 :</b> Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par le lissage de la loi la loi polynomiale de degré cinq. ....	32

# LISTE DES SYMBOLES

<b>Symboles</b>	<b>Identification</b>
PUMA	Programmable Universal Machine for Assembly
ASIMO	Advanced Step in Innovative Mobility
$\mathbf{q(i)}$	Vecteur des coordonnées articulaires initiales
$\mathbf{q(f)}$	Vecteur des coordonnées articulaires finales
$\mathbf{Kv}$	Vecteur des vitesses articulaires maximales
$\mathbf{Ka}$	Vecteur des accélérations articulaires maximales
$(\mathbf{n})$	Nombre de degré de liberté
$\mathbf{r(t)}$	La fonction d'interpolation.
$\mathbf{D}$	Vecteur de la distance parcourue entre les deux points
$\mathbf{t_f}$	Durée du mouvement
$\mathbf{\tau}$	La durée des phases d'accélération et de freinage

# INTRODUCTION

Pour faire face à une concurrence féroce, plusieurs entreprises, même en Algérie, ont été poussées à la robotisation de ses lignes de productions. A titre d'exemple, la Fédération internationale de robotique (**I. F. R.**) a recensé, au cours de l'année 2018, l'installation de plus de 400 000 unités à travers le monde entier [1]. L'intégration accrue des robots dans le domaine industriel est non, seulement, justifiée par l'assurance de la continuité de la qualité mais aussi par la réduction des coûts ainsi que des délais. En effet, selon une étude de l'Institut de technologie du Massachusetts (**M. I. T.**), publiée en 2020, chaque nouveau robot installé réduit l'emploi de l'ordre de 0,18 à 0,34 % sur la population totale [2]. Presque la quasi-totalité des robots industriels sont des robots sériels de plusieurs degrés de liberté.

Ainsi, de nos jours, les robots industriels sont omniprésents dans l'industrie, assurant l'exécution de diverses tâches. Pour certaines applications industrielles, comme par exemple le chargement et le déchargement (Pick and place), le robot est appelé à déplacer son organe terminal d'une position initiale donnée à une position finale donnée [3]. La trajectoire entre ces deux positions, dans ce cas, est libre [3]. Pour assurer ce mouvement, le contrôleur du robot doit calculer et envoyer les consignes sous formes de positions, de vitesses et d'accélération aux différents actionneurs [4]. Cette fonction s'appelle la génération de trajectoire.

La génération de trajectoire est, donc, la définition d'une fonction d'interpolation qui répond à certaines contraintes. C'est dans ce contexte que s'inscrit ce travail, qui vise à étudier quatre lois de génération de trajectoire entre deux positions articulaires sous les contraintes cinématiques et d'élaborer pour chaque loi un programme sous l'environnement Matlab qui permet de faire les calculs et de visualiser les résultats.

En vue de mener à bien notre étude, ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre porte sur les généralités sur les robots manipulateurs.
- Le deuxième chapitre est réservé à la présentation de quelques applications industrielles.
- Le troisième chapitre est consacré à l'étude des quatre lois et la présentation des résultats obtenus.

# CHAPITRE I. GENERALITES SUR LES ROBOTS MANIPULATEURS

## I.1. Introduction

Les robots sont des machines automatique polyvalentes constituées d'une structure mécanique à plusieurs degrés de liberté commandées en position à l'aide d'un système de commande. Ses machines ont généralement les propriétés suivantes [5, 6]:

- Mouvements variables et programmés pour l'exécution d'une variété de tâches,
- Reprogrammable,
- Capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés,
- Possède un certain niveau d'intelligence,
- Interaction avec son environnement.

En réalité, dans un monde qui progresse de jour en jour, la définition du robot change non seulement d'une norme à une autre, mais peut être modifiée, pour la même norme, d'une version à une autre. Ce qui a conduit un pionnier de la robotique, comme Joseph Engelberger, à déclarer en 1980 : « Je ne peux pas définir un robot, mais je le sais quand j'en vois un » [5, 7].

## I.2. Types de robots

Les robots sont, généralement, classés selon l'architecture de la structure mécanique et /ou selon la méthode de locomotion en plusieurs familles. Les principales familles sont les suivantes :

- **Les Robots sériels** : La structure mécanique est une chaîne cinématique, composée d'une série de corps, reliant la base fixe à l'organe terminal mobile [8]. Ce sont les robots les plus rencontrés dans le domaine industriel.



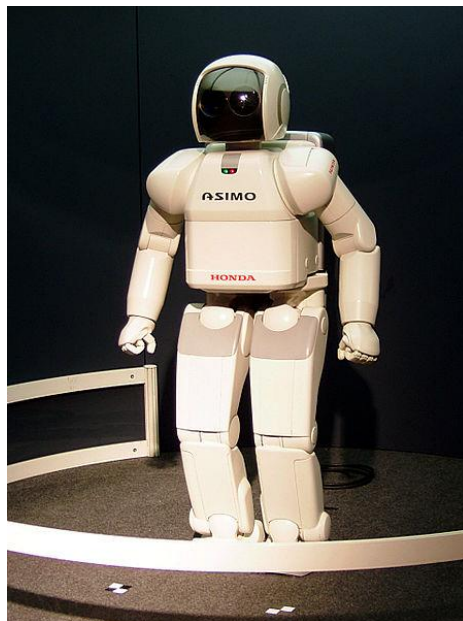
**Figure I.1** : Robot sériel (Robot RV-2AJ de Mitsubishi).

- **Robots parallèles :** La structure mécanique est composée de au moins de deux chaînes cinématiques séparées assurant la liaison entre base fixe et un organe terminal mobil [8] appelé « la nacelle ». cette architecture leurs permette d'atteindre des vitesses très élevées. Ce qui les rend un choix idéal pour certaines application industrielles de type « pick and place » surtout dans l'industrie agroalimentaire.



**Figure I.2 :** le Robot parallèle (FlexPicker ) dédié aux applications alimentaires du type « Pick& Place » [9]

- **Robots humanoïdes :** Les robots humanoïdes sont des robots ayant l'apparence d'un être humain. Certains auteurs préfèrent utiliser l'appellation « **robots bipèdes** » pour cette famille du faite que la structure mécanique peut comporter seulement qu'un un torse avec deux jambes.



**Figure I.3 :** Robot ASIMO de Honda [10].

- **Les robots mobiles :** la plupart des robots mobiles sont des robots mobiles à roues. Ils peuvent accomplir plusieurs tâches.

### I.3. les robots manipulateurs sériels

Les robots sériels sont des robots ayant une chaîne cinématique, le plus souvent ouverte, composée de  $n+1$  corps rigides  $C_i$  mis en série, reliés entre eux par  $n$  liaisons motorisées [11] appelées articulations. Chaque articulation assure d'une part la liaison entre deux corps successifs et de l'autre part la réduction du mouvement du corps postérieur par rapport à son antérieur en un nombre réduit de degrés de liberté. Généralement, les articulations de ces robots permettent un seul mouvement [12].

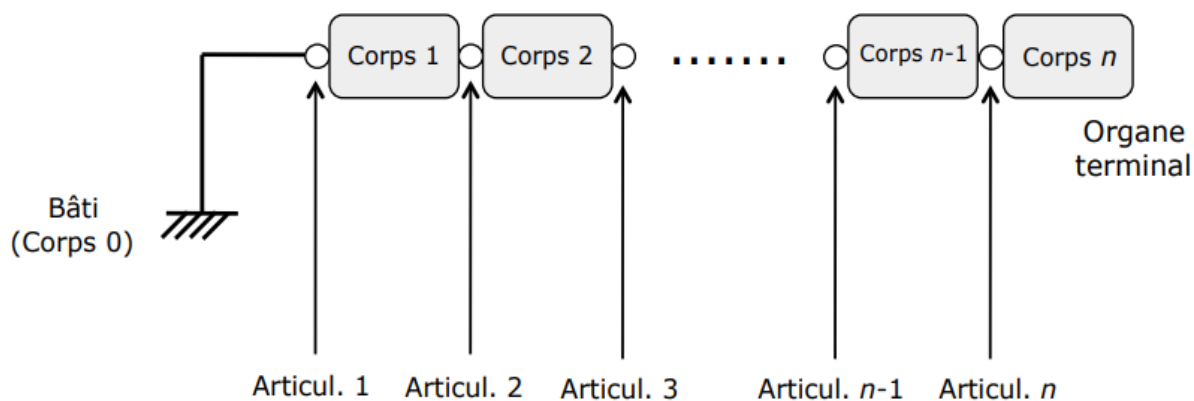


Figure I.4 : Schématisation d'un robot sériel [15]

La norme ISO:8373 définit un robot industriel comme « un robot programmable sur trois axes ou plus, qui peut être fixé sur place ou mobile, destiné à être utilisé dans des applications d'automatisation industrielle » [13]. Les trois premiers degrés de liberté du robot définissent le porteur du robot tandis que les degrés restants définissent le poignet du robot [6].

#### I.3.1. Constituants d'un robot manipulateur industriel

Un robot manipulateur industriel est constitué des éléments suivants :

- **Le bras manipulateur :** c'est la structure mécanique polyarticulée qui comprend les jonctions, les articulations, et d'autres éléments de structure du robot. le bras est doté d'actionneurs, qui suite à des consignes du système de commande, déplacent les différents corps de la structures mécanique à la position désirée. Les actionneurs sont peuvent être des servomoteurs, des moteurs pas à pas, des actionneurs pneumatiques ou des vérins hydrauliques [6].
- **Organe terminal (outil) :** l'organe terminal, ou l'outil, est le dispositif spécialisé, qui fixé à l'extrémité libre de la structure mécanique, pour exécuter une tâche spécifique en réponse aux signaux que lui envoie le système de commande ou sous l'impulsion des mouvements du robot.

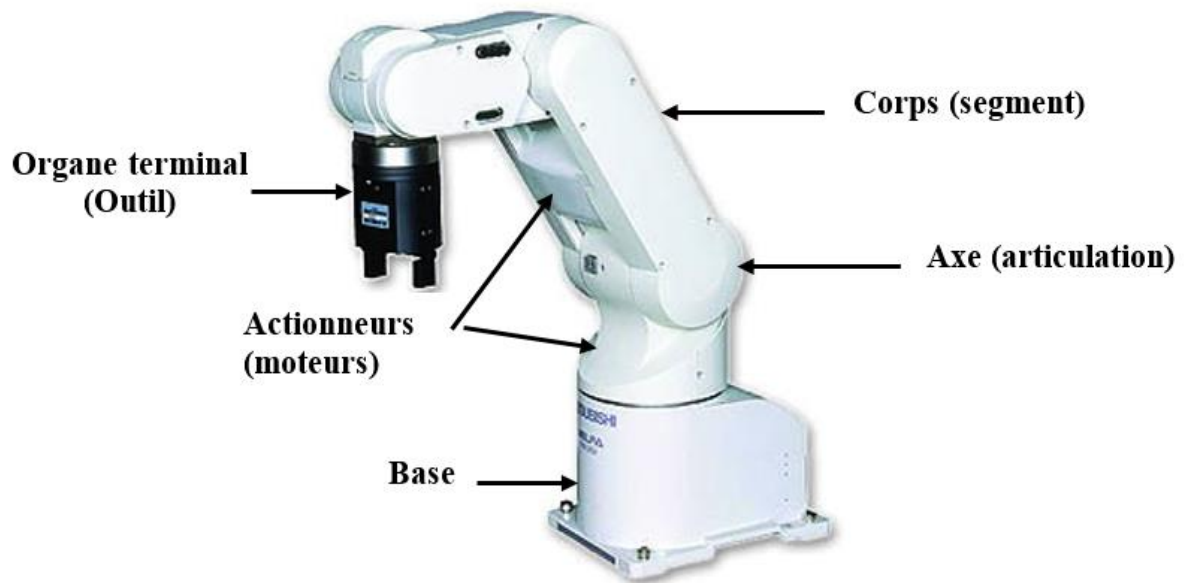


Figure I.5 : Constituants d'un robot manipulateur.

- **La partie de commande ou le contrôleur du robot :** elle est liée au bras du robot par des câbles électriques. Elle a pour rôle de donner des consignes aux actionneurs à partir de la fonction de perception et des ordres de l'utilisateur [6].
- **Capteurs :** les capteurs sont utilisés pour recueillir des informations sur l'état interne du robot ou pour communiquer avec l'environnement extérieur.

### I.3.2. Terminologies

#### I.3.2.1 Articulations

Pour les robots sériels, comme on a signalé précédemment, les articulations réduisent le nombre de degrés de liberté entre deux corps successifs à un. Ainsi, logiquement pour ces robots, les deux types d'articulations suivants sont rencontrés :

- **Articulation prismatique :** Il s'agit d'une articulation de type glissière, notée "**P**" Réduisant le mouvement entre deux corps à une translation le long d'un axe commun [6]
- **Articulation rotoïde :** Il s'agit d'une articulation de type pivot, notée "**R**" Réduisant le mouvement entre deux corps à une rotation autour d'un axe qui leur est commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe [6]



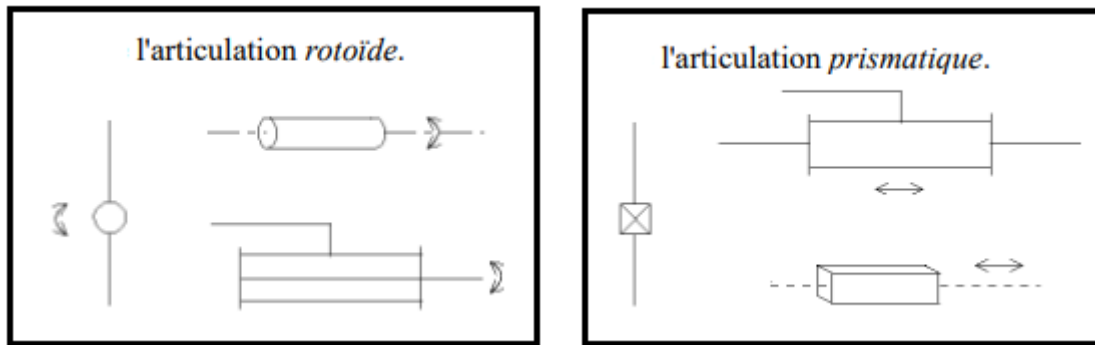


Figure I.6 : Symboles des articulations rotoïde et prismatique [6].

### I.3.2.2 Degrés de libertés

Le nombre de degrés de liberté d'un robot sériel est égal à son nombre d'axes (d'articulations). Ainsi un robot à 5 articulations est un robot à cinq degrés de liberté .ce qui renseigne à la fois sur son potentiel et sa complexité

### I.3.2.3 Espace articulaire

L'espace articulaire est l'espace qui a pour référence le repère lié à chaque articulation motorisée du robot. Les coordonnées associées sont appelées coordonnées articulaires. [14]

### I.3.2.4 Espace opérationnel

L'espace opérationnel est l'espace qui a pour référence le repère lié à l'organe terminal du robot. Les coordonnées associées sont appelées coordonnées opérationnelle. [14]

### I.3.2.5 volume du travail

L'ensemble des points atteignables par l'organe terminal du robot définissent un volume 3D appelé volume (ou espace) du travail du robot. La nature et la taille de ce volume dépend du types d'articulations du robot, de la disposition de ces articulations, des longueurs des segments et des débattements de ces articulations. [15]

## I.3.3 Architectures cinématiques

La nature et la disposition des axes du porteur des robots sériels définissent leurs architectures cinématique. L'architecture d'un robot industriel figure parmi l'une des cinq familles suivantes.

- **Les robots cartésiens :** le porteur de ces robots est constitué de 3 axes prismatiques perpendiculaires 2 à 2, cette configuration offrent les avantages suivants [16] : une grande rigidité, une bonne précision, des vitesses et des accélérations importantes et une modélisation facile. En revanche, Leur espace de travail est relativement réduit par rapport à leur encombrement.

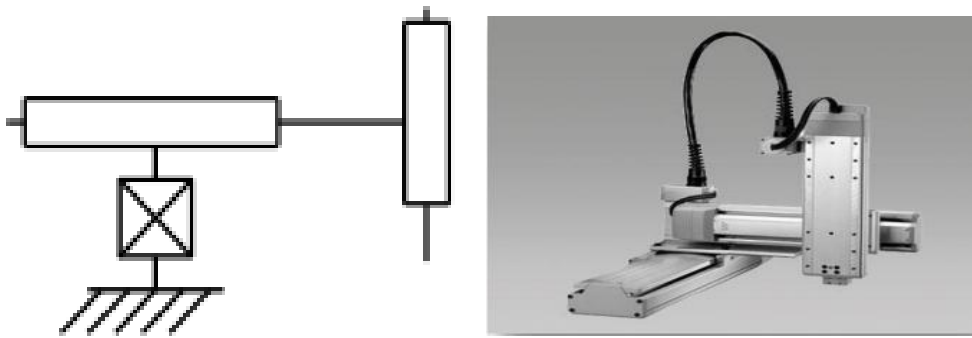


Figure I.7 : Les robots cartésiens [28].

- **Les robots SCARA (Sélective Compliance Articulated Robot Arm)** : le porteur de ces robot est constitué de deux articulation rotoïdes et une troisième prismatique d'axes parallèles. Le volume de travail de ce robot est torique. Comme ce type de robot est à la fois précis et rapide, il est largement utilisé dans les opérations d'assemblage.

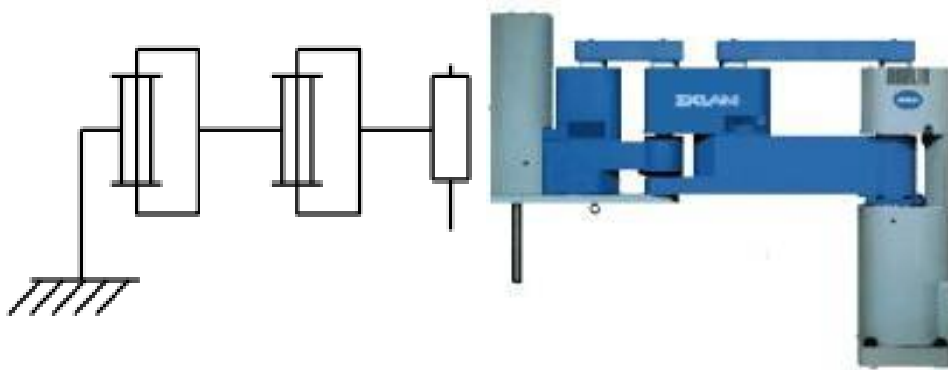


Figure I.8 : Robot SCARA (Sankyo) [28]

- **Les robots cylindriques** : les deux premiers axes du porteurs de ces robots sont rotoïde et prismatique d'axes parallèles, et le troisième axe est prismatique d'axe perpendiculaire aux deux premiers. Le volume de travail est cylindrique.

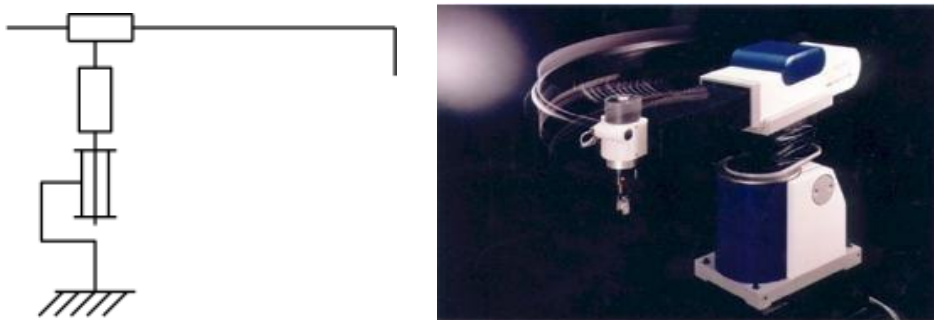


Figure I.9 : Robot cylindrique(Seiko) [28].

- **Les robots sphériques** : le porteur de ces robots est du type RRP. Les axes de ces articulations sont perpendiculaires 2 à 2. leurs espace de travail est sphérique. Ils sont caractérisés par leur grande charge utile.

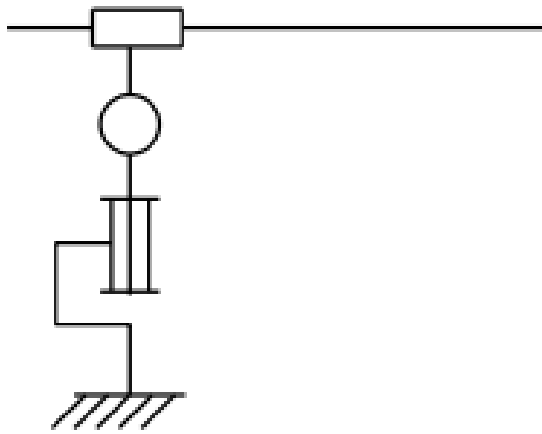


Figure I. 10: Robot sphérique (Fanuc) [28].

- **Les robots anthropomorphes :** Ces types de porteur reproduisent la structure d'un bras humain. Le porteur anthropomorphe est constitué de trois articulations rotoïdes, l'axe de la deuxième articulation est parallèle à celui de la troisième. Ces deux axes sont tous les deux perpendiculaires à l'axe de la première. Cette morphologie c'est la plus rencontrée pour les robots industriels.

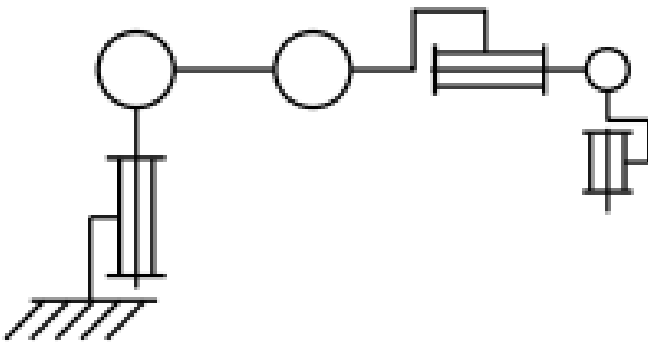


Figure I.11: Robot anthroporphe (Kawasaki) [28].

### I.3.4 Performance des robots

#### I.3.4.1. Précision

La précision est l'écart entre la position commandée et le barycentre des positions réellement atteintes par l'organe terminal du robot. On dit que le positionnement absolu est imprécis lorsqu'il dépasse 1mm, alors on a l'une des erreurs suivantes : [15]

- -Erreurs de modèle géométrique.
- -Erreurs de quantification de la mesure de position.
- -Flexibilité.

### I.3.4.2. Répétabilité

La répétabilité d'un robot est l'erreur maximale de positionnement répété de l'outil en tout point de son espace de travail. En général, la répétabilité ne doit pas dépasser 0.1 mm [17]

### I.3.4.3. Performances dynamiques

- Vitesse maximale : C'est la vitesse de translation ou de rotation de chaque axe du robot. Souvent les constructeurs donnent une vitesse maximale de l'outil ou de l'organe terminal [17]
- Accélération maximale : Elle dépend de l'inertie, donc de la position du robot. Pour chaque axe, cette accélération est donnée dans la configuration la plus défavorable (inertie maximale, charge maximale) [17]

### I.3.4.4. Charge utile

C'est la charge qui garantit une durée de vie la plus longue possible. Donc, c'est la charge maximale que peut porter le robot sans perturber ni la répétabilité ni les performances dynamiques du robot. Cette charge utile est nettement inférieure à la charge maximale que peut porter le robot et est directement dépendante des actionneurs [17]

# CHAPITRE II. LES APPLICATIONS INDUSTRIELLES ROBOTISEES

## II.1. Introduction

L'augmentation de la compétitivité des entreprises, dans un monde industriel cruel, passe par la rationalisation des coûts de production, l'augmentation des cadences et l'assurance de la continuité de la qualité. Ces exigences, de plus en plus sévères, ont poussées les entreprises à implanter des robots dans leurs lignes de production. De plus, les robots industriels, offrent d'autres avantages tels que :

- La réduction des charges sociales,
- La flexibilité de la gestion de production,
- La diminution des stocks et encours,
- Un retour sur investissement inférieur à deux ans.

De nos jours, les lignes de production robotisées sont devenues plus complexes, impliquant plusieurs robots et des chaînes d'assemblage multi produits [18]. Cependant, les bénéfices escomptés, de cette automatisation, motivent les ingénieurs dans leurs travaux fastidieux de la mise en place de ces lignes [19].

## II.2. Applications industrielles robotisées

Les robots sont omniprésents dans le secteur industriel. Assurant l'exécution de diverses tâches sans se plaindre. Les principales applications industrielles sont les suivantes :

### II.2.1. Soudage par points et soudage au laser

#### Soudage par points

C'est sans doute, l'application industrielle robotisées la plus rencontrée [18] surtout dans l'industrie Automobile. Le soudage par points est, normalement, effectué par un pistolet de soudage.



**Figure II.1:** Robot industriel du soudage par points [22].

Dans le soudage par points, l'assemblage de deux tôles est réalisé en un ensemble de points, où la chaleur générée par un immense courant électrique provoque la fusion [18].

Les performances des robots industriels destinés au soudage par points doivent respecter les plages de variations suivantes [18]:

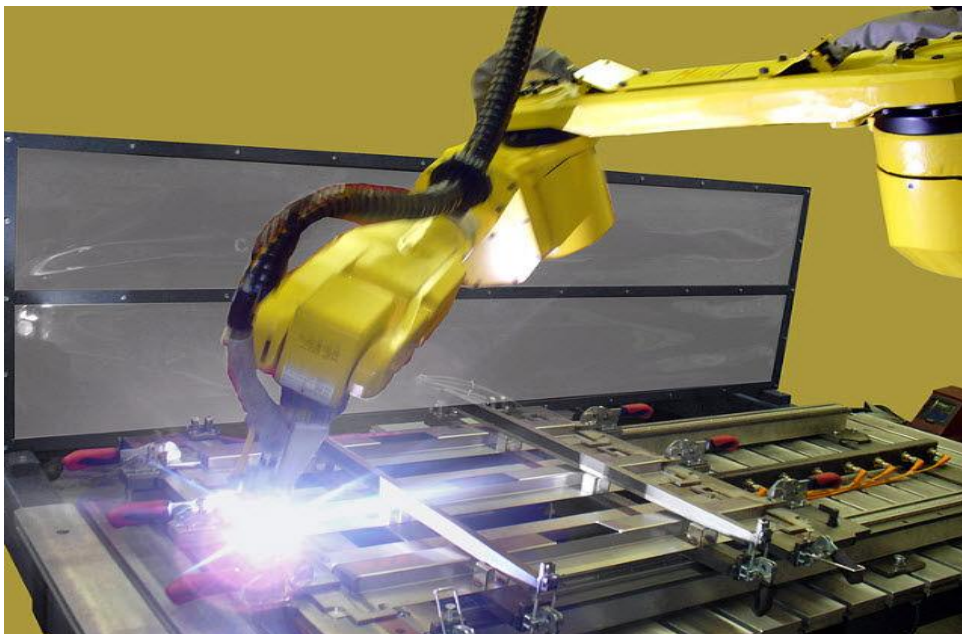
- Une charge utile : 40 - 100 kg
- Les couples moteurs : 120 - 240 Nm
- Une vitesse linéaire : 0,5–1,5 m/s
- Une vitesse articulaire : 60-180 degrés / seconde
- Une précision : 0,5 ou 1 mm
- Une répétabilité : 1,5 ou 2 mm.

### Soudage au laser

Le soudage au laser haut puissance a été largement utilisé dans l'industrie comme alternative au soudage par points et à l'arc en raison de sa productivité élevée et de son excellente qualité de soudage. Le laser, un faisceau de lumière hautement cohérent, peut être focalisé sur un très petit point, donnant lieu à des densités de puissance élevées supérieures à  $10^6 \text{ W / cm}^2$  [18]. À ces densités, une énergie est délivrée par le faisceau si rapidement, tel que les mécanismes de transferts thermiques n'ont pas le temps de l'éliminer. Sous l'effet de cette dernière, le matériau du substrat s'évapore [18]

Cette technique de soudage offre par rapport la précédente les avantages suivants [18]:

- Intégrité constante de la soudure.
- Accès unilatéral.
- Largeurs des cordons de soudure réduites.
- Zones de déformation thermique réduites.
- Augmentation de la résistance structurelle.
- Traitement à grande vitesse.



**Figure II.2:** Robot industriel soudage au laser [23].

En revanche, cette technique présente plusieurs inconvénients qui ont rétrécissent implication dans le secteur industriel [18]. Les principaux désavantages du soudage par laser sont les suivants [14]:

- Encombrement du générateur de faisceau laser et nécessité de le monter sur le bras du robot.
- Investissement en capital élevé.
- Précision accrue.

### II.2.2. La peinture, le revêtement et l'étanchéité

Dans l'industrie, les robots font désormais partie intégrante des applications de peinture par pulvérisation, de revêtement et d'étanchéité [18]. Les robots dédiés à ces applications fonctionnent des conditions opérationnelles pénibles et nuisibles à la santé des êtres humains.

Les robots de peinture conventionnels sont composés de trois composants de base : une unité de commande, un manipulateur et une unité hydraulique [18].



**Figure II.3:** Robot industriel du Peinture [19].

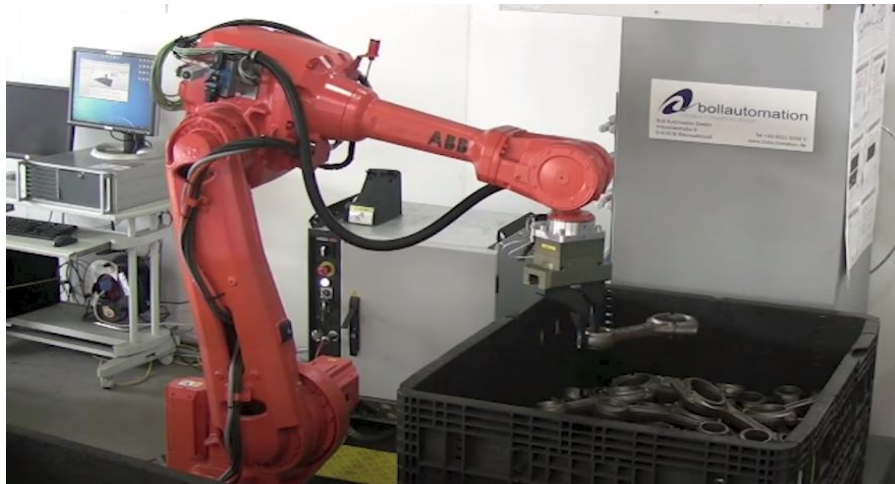
Les avantages de l'utilisation des robots pour la peinture sont multiples. Tout d'abord, les quantités de peinture ou de solvants utilisées sont réduites, ce qui limite notablement l'impact sur l'environnement. En effet, la qualité de la trajectoire du robot associée au contrôle du processus d'application permet d'optimiser les épaisseurs spécifiées avec un minimum de variation, assurant une qualité accrue des pièces, une diminution des quantités de peinture utilisées et une baisse conséquente des coûts [18].

### II.2.3. La manipulation des pièces et sélection des outils

L'utilisation de robots industriels pour manipuler des outils ou des pièces est désormais un domaine établi de la pratique industrielle. La manutention par robot est utilisée pour des tâches telles que le chargement et le déchargement de machines-outils et de machines de moulage sous pression, ainsi que pour le déplacement de composants d'un système de transport à un autre [18].

### Manipulation des pièces

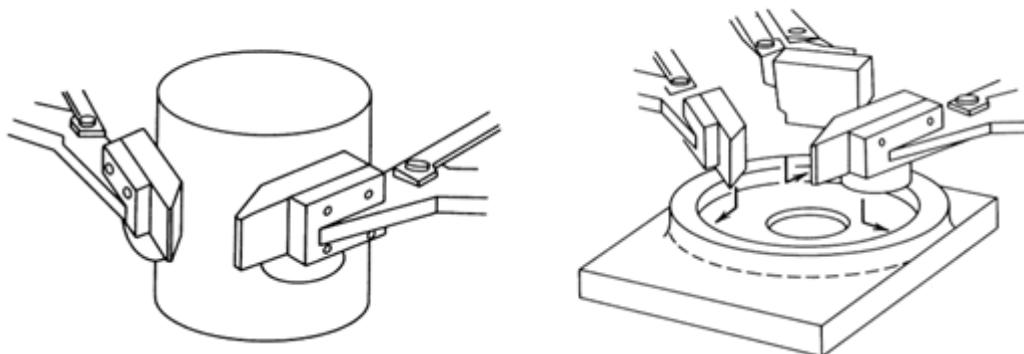
Les robots utilisés pour la manipulation dans les cellules d'usinage peuvent être montés directement sur la machine-outil châssis ou juste à côté de la machine-outil. Comme ils peuvent être montés sur des piédestaux. Un piédestal est un dispositif qui sert non seulement non seulement à fixer le robot, mais il permet également de le maintenir à une hauteur définie et de le déplacer si nécessaire. Les porteurs des robots fixés sur les piédestaux peuvent être soit cylindriques ou bien anthropomorphiques. La charge utile de ces robots est comprise entre 40 et 120 kg [18].



**Figure II.4:** Robot industriel de la manipulation des pièces [29].

### Sélection des pièces

Des pinces avec deux ou trois doigts sont utilisées pour saisir les pièces. Ces pinces ont des mâchoires contrôlables en continu pour une manipulation en douceur de pièces délicates [18].



**Figure II.5:** Pinces avec deux et trois doigts [14].

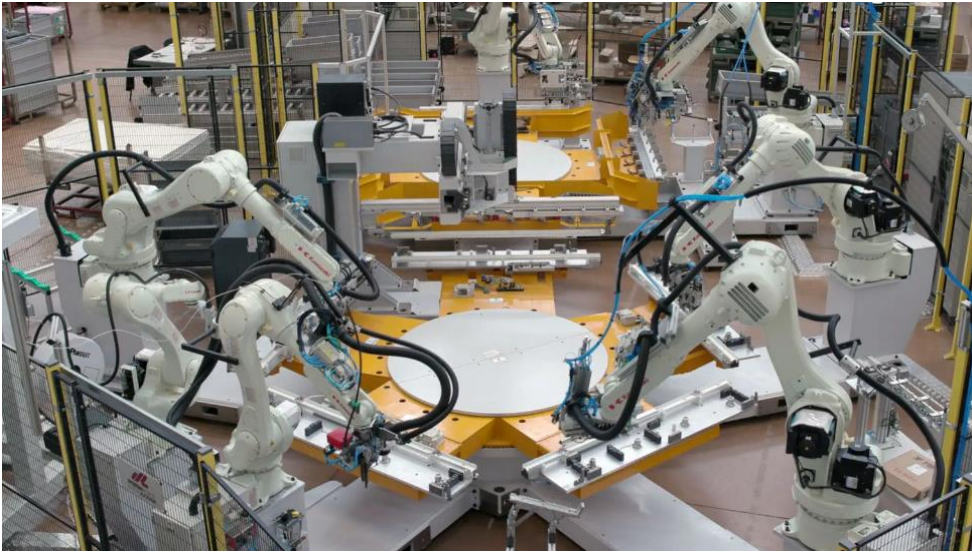
### II.2.4. Assemblage

Il est reconnu depuis longtemps que l'assemblage automatique de pièces par des robots est l'une des tâches les plus délicates et les plus difficiles de la robotique industrielle [18]. En effet, ces applications sont affrontées aux deux problèmes suivants :

- la planification et le contrôle de trajectoire pour l'ensemble du processus d'assemblage
- la réduction des forces de réaction apparaissant entre les pièces à assembler.



Afin d'offrir davantage de flexibilité aux opérations d'assemblage robotisées, un système de vision et/ou des convoyeurs peuvent être intégrés.

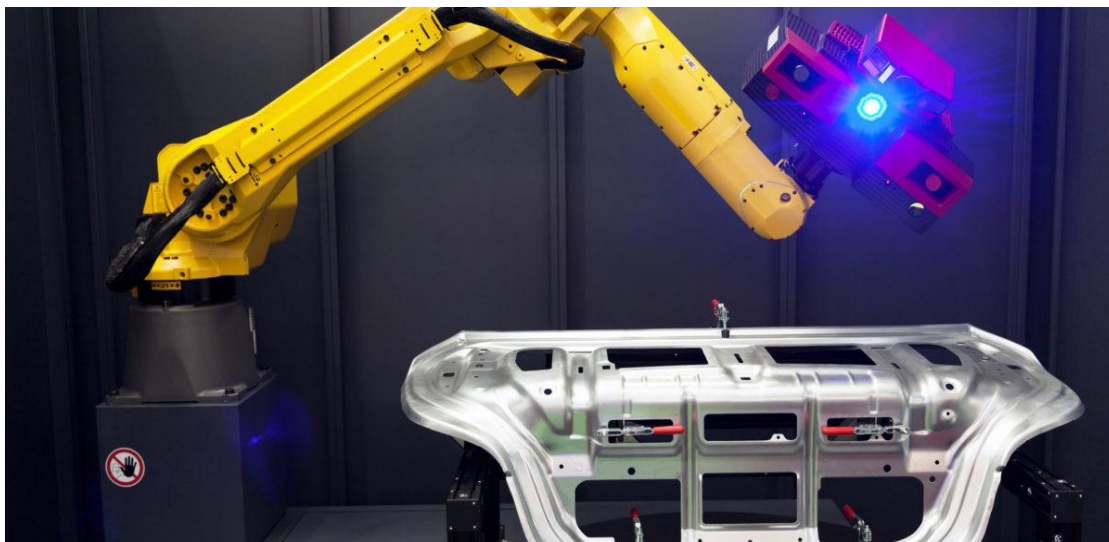


**Figure II.6:** Ligne d'assemblage industrielle robotisée [26].

### II.2.5. L'inspection et l'assurance de la qualité

Une « inspection » consiste à vérifier si un produit ou un composant respecte les spécifications requises et convient à l'utilisation prévue. La robotisation de cette tâche permet d'assurer la qualité des produits. De plus, l'inspection robotisée permet de :

- Réduire les coûts.
- Augmenter la rentabilité.
- Diminuer les taux / coûts de rejet.
- Augmenter la fidélisation des clients.
- Augmenter la satisfaction client.



**Figure II.7:** Robot industriel d'inspection et d'essais de la qualité [25].

### II.2.6. Entretien et réparation



**Figure II.8:** Robot de réparation dans une zone industrielle [16].

La maintenance à l'aide des robots est une application qui présente d'importantes singularités par rapport aux autres applications industrielles robotisées [18]. En effet, les environnements des robots de maintenance sont souvent plus dynamiques et imprévisibles. De plus, mêmes les tâches, confiées à ces robots, peuvent être imprévisibles en termes de nature et de fréquence [14].

Les robots dédiés à ces applications peuvent être autonomes ou commandés par téléopération. Ils sont, généralement, utilisés dans les industries suivantes [14] :

- Maintenance des réacteurs nucléaires.
- Maintenance ferroviaire.
- Maintenance aéronautique.
- Maintenance des installations sous-marines.
- Maintenance des installations dans l'industrie pétrochimique.

### II.3. Programmation des robots industriels

La flexibilité du robot est conditionnée dans une large mesure par les types de mouvements et d'opérations qui peuvent être programmés dans l'unité de commande et par la facilité avec laquelle les programmes sont introduits et modifiés.

Un système de programmation de robots manipulateurs doit être en mesure de répondre aux exigences suivantes [20]:

- ✓ Générer les mouvements des axes,
- ✓ Synchroniser les mouvements du robot et des autres équipements de l'atelier ou de la cellule de production.
- ✓ Gérer les actions des outils.
- ✓ Gérer les communications entrées/sorties.

- ✓ Intégrer des informations sensorielles dans les primitives de mouvement : ces informations proviennent le plus souvent de simples capteurs tout ou rien (détection de présence, sécurité...).
- ✓ Contrôler l'exécution des programmes.
- ✓ Communiquer avec l'opérateur via une interface appropriée.

En robotique, habituellement, les langages de programmation sont classés dans l'une des deux familles suivante :

- ✓ **La programmation en ligne** : cette programmation est réalisée sur site en utilisant des méthodes de programmation par apprentissage.
- ✓ **La programmation hors ligne** : peut être réalisée grâce à des langages de programmation spécialement conçus pour la robotique tels que VAL, WAVE, AML, MCL et SIGLA ou bien à l'aide de la CFAO robotique. La CFAO permet, d'une part d'optimiser et de valider les trajectoires, et de l'autre part d'engendrer les programmes et de les envoyer vers la baie de commande du robot.

### II.3.1. Programmation en ligne

La programmation par apprentissage consiste à conduire le robot aux positions désirées, puis à enregistrer ces positions. Le plus souvent, un opérateur pilote le robot, lors de la phase d'apprentissage, à l'aide d'une boîte à boutons (teaching box). Cette boîte à boutons permet également de saisir les programmes, de les sauvegarder et de les vérifier [19].



**Figure II.9:** boîte à boutons pour l'apprentissage du robot.

Tous les robots disposent en standard d'une interface d'apprentissage et peuvent être programmés de cette façon. Ce mode de programmation est fortement commandé pour les tâches répétitives.

Le principal avantage de la programmation par apprentissage est la simplicité. En revanche, elle présente les désavantages suivants :

- Nécessité de l'arrêt du site robotisé (arrêt de production).
- Temps de programmation pouvant s'avérer très long si le programme a beaucoup de points.
- Essayer et corriger les trajectoires pour arriver à générer de bonnes trajectoires dus à des problématiques propres à la programmation robotique.

### II.3.2. Programmation hors-ligne

La programmation hors-ligne permet de s'affranchir de ces contraintes en séparant le processus de programmation du robot du processus de production. Ainsi, un robot peut effectuer une tâche de travail alors que son programmeur pourra en même temps, sur un ordinateur dédié, programmer la prochaine tâche via un logiciel de programmation hors-ligne [21].

Les principaux avantages de ce mode de programmation sont les suivants :

- Réduction des temps d'arrêt du robot.
- Augmentation de la sécurité : le programmeur se trouve loin du robot ainsi il n'est pas exposé aux dangers.
- Intégration avec les systèmes CAO / FAO existants.
- Simplification des tâches complexes : L'utilisation d'un langage de programmation informatique de haut niveau pour le système hors ligne facilite la programmation des tâches complexes.
- Vérification des programmes de robot avant l'exécution par la CAO robotique.

Par contre, ce mode de programmation a les inconvénients suivants :

- ✓ coût élevé des logiciels,
- ✓ Nécessite une formation spécialisée,
- ✓ Nécessite la calibration du robot.

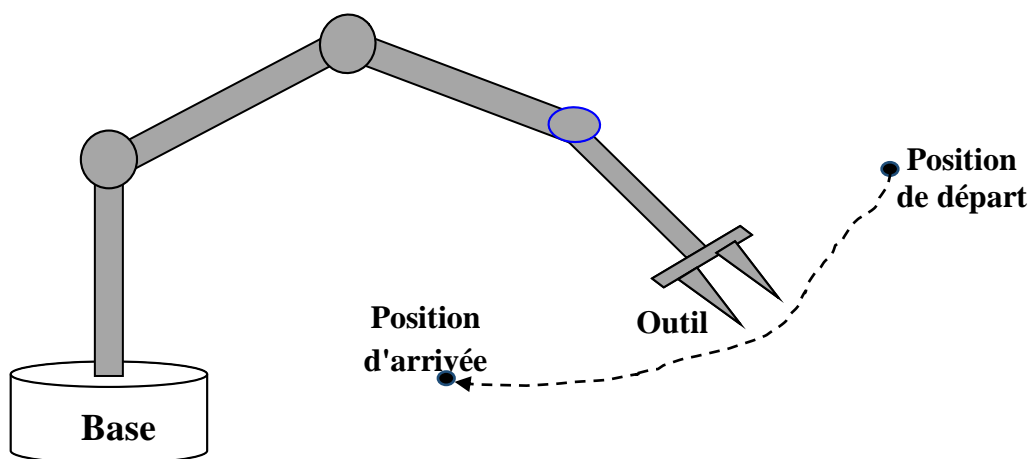
## CHAPITRE III. GENERATION DE TRAJECTOIRE D'UN ROBOT

### INDUSTRIEL ENTRE DEUX POINTS SOUS CONTRAINTES CINEMATQUES

#### III.1.Introduction

La génération de trajectoire, pour l'exécution d'une tâche donnée, consiste à définir les différents points successifs du passage de l'outil du robot en fonction du temps, sous des contraintes cinématiques et/ou dynamiques, pour la réalisation de la courbe cette trajectoires. La définition de ces points peut se faire dans :

- **l'espace articulaire** : la définition des mouvements dans cet espace impose de spécifier une loi de commande à chaque articulation dont les contraintes (limites articulaires en position, en vitesse et en accélération) sont définies dans l'espace articulaire.
- **Soit dans l'espace opérationnel** : dans ce cas la trajectoire est générée dans l'espace opérationnel sous des contraintes cinématiques définies, aussi, dans cet espace. Ici, le recours aux modèles inverses (géométrique, cinématique et dynamique) s'impose pour transformer le mouvement de consigne opérationnel en mouvement de consigne articulaire. Par conséquent, la génération de la trajectoire dans l'espace articulaire est plus rapide à celle dans l'espace opérationnel. Cependant, cette dernière est le choix ultime dans le cas où les tâches ou les obstacles sont définis dans l'espace opérationnel.



**Figure III. 1:** Trajectoire de référence à suivre par un manipulateur.

Dans les deux cas, les quatre classes de génération de mouvements suivantes sont, souvent, distinguées :

- le mouvement entre deux points avec trajectoire libre,
- le mouvement entre deux points en passant par des points intermédiaires, afin d'éviter des obstacles, avec trajectoires libres entre les différents points,
- le mouvement entre deux points avec trajectoire imposée,

- le mouvement entre deux points en passant par des points intermédiaires avec trajectoires imposées entre les différents points.

L'objectif de ce chapitre est d'élaborer des programmes, sous l'environnement Matlab, qui permettent la génération de trajectoire entre deux points d'un robot industriel, sous contraintes cinématiques, dans l'espace articulaire.

### III.2. Trajectoires point-à-point dans l'espace articulaire

La génération des trajectoires point-à-point, dans l'espace articulaire, impose de spécifier, uniquement, les variables articulaires des différents points ainsi que les contraintes cinématiques des différentes articulations (vitesses et accélérations des différents actionneurs). Entre deux points successifs, la trajectoire est libre et le robot part et arrive avec des vitesses nulles.

Ce type de trajectoire est utilisé pour des tâches dans un environnement libre. L'exemple le plus frappant, d'une tâche de ce genre c'est sans doute le soudage par points.

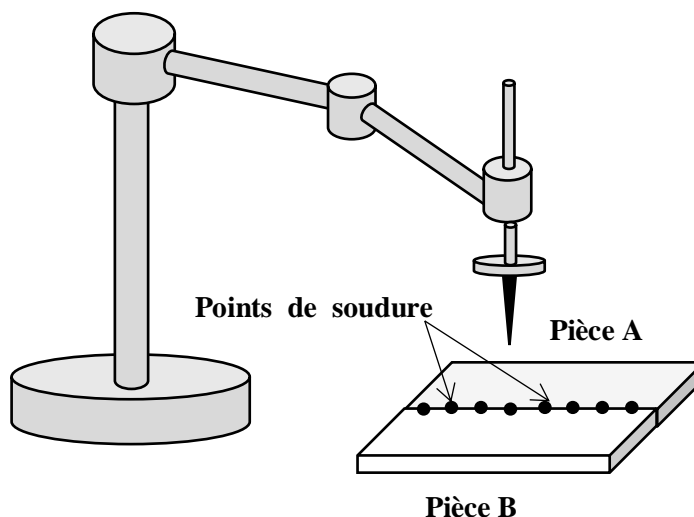


Figure III. 2: Soudure par points.

Pour la tâche de soudure par points, illustrée par la figure III.2, il est clair que le mouvement entre les points de soudure est libre.

### III.3. Principe de la génération de trajectoire entre deux points dans l'espace articulaire

Soit un robot à  $n$  degrés de liberté. La génération d'une trajectoire entre deux positions dans l'espace articulaire consiste tout d'abord à définir les vecteurs des coordonnées articulaires correspondants aux deux postures.

Si les positions initiale et finale sont définies, respectivement, par les vecteurs  $q_i$  et  $q_f$ , la génération du mouvement entre ces deux postures est régie par une loi de la forme suivante :

$$q(t) = q_i + D r(t) \quad \text{Pour} \quad 0 \leq t \leq t_f \quad (\text{III.1})$$

Où :

- $\mathbf{q}(t)$ : vecteur colonne, de taille  $n$ , des variables articulaire à l'instant  $t$ .
- $\mathbf{q}_i$  : vecteur colonne, de taille  $n$ , des variables articulaire correspondant à la position initiale.
- $\mathbf{r}(t)$  : la fonction d'interpolation.
- $D$  : vecteur de la distance parcourue entre les deux points, calculé à l'aide de la relation suivante :
  - $D = \mathbf{q}_f - \mathbf{q}_i$  (III.2)
- $\mathbf{q}_f$  : vecteur colonne, de taille  $n$ , des variables articulaire correspondant à la position finale.
- $t_f$  : durée du mouvement.

La littérature propose plusieurs fonctions d'interpolation, cependant, toutes ces fonctions doivent satisfaire aux conditions aux limites suivantes :

$$\mathbf{r}(0) = \mathbf{0} \quad \text{(III.3)}$$

$$\mathbf{r}(t_f) = \mathbf{1} \quad \text{(III.4)}$$

De plus, cette fonction d'interpolation doit satisfaire aussi aux contraintes cinématiques. Ainsi, si on désigne respectivement par  $\mathbf{K}_v$  et  $\mathbf{K}_a$  les vecteurs des vitesses et accélérations articulaires maximales, cela se traduit pour chaque articulation  $j$  ( $j = 1, \dots, n$ ) par les deux relations suivantes :

$$|D_j| \dot{\mathbf{r}}(t) \leq |K_{vj}| \quad \text{Pour } \mathbf{0} \leq t \leq t_f \quad \text{(III.5)}$$

$$|D_j| \ddot{\mathbf{r}}(t) \leq |K_{aj}| \quad \text{Pour } \mathbf{0} \leq t \leq t_f \quad \text{(III.6)}$$

Ces deux dernières relations montrent que, si  $t_f$  n'est pas définie (c'est le cas le plus fréquent), chaque articulation a une durée propre de mouvement déduite des contraintes cinématiques. D'où la nécessité de synchroniser l'ensemble des articulations sur la plus lente, appelé articulation maître.

Dans ce travail, on se limite à l'étude des fonctions d'interpolation suivante :

- la loi Bang-Bang.
- la loi trapézoïdale en vitesse.
- Lissage de la loi trapézoïdale en vitesse.
- l'interpolation polynomiale de degré cinq.

Chaque loi sera présentée, ainsi que le programme élaboré pour son implantation sous Matlab.

### III.4. La loi Bang-Bang

#### III.4.1.Principe de la loi Bang-Bang

La loi Bang-Bang comporte deux phases de même durée qui est égale à  $\frac{t_f}{2}$ . La première phase est une phase d'accélération constante, alors que la deuxième phase est la phase de freinage constante. Ce qui conduit, donc, à un mouvement continu en position et en vitesse, en revanche, il est discontinu en accélération.

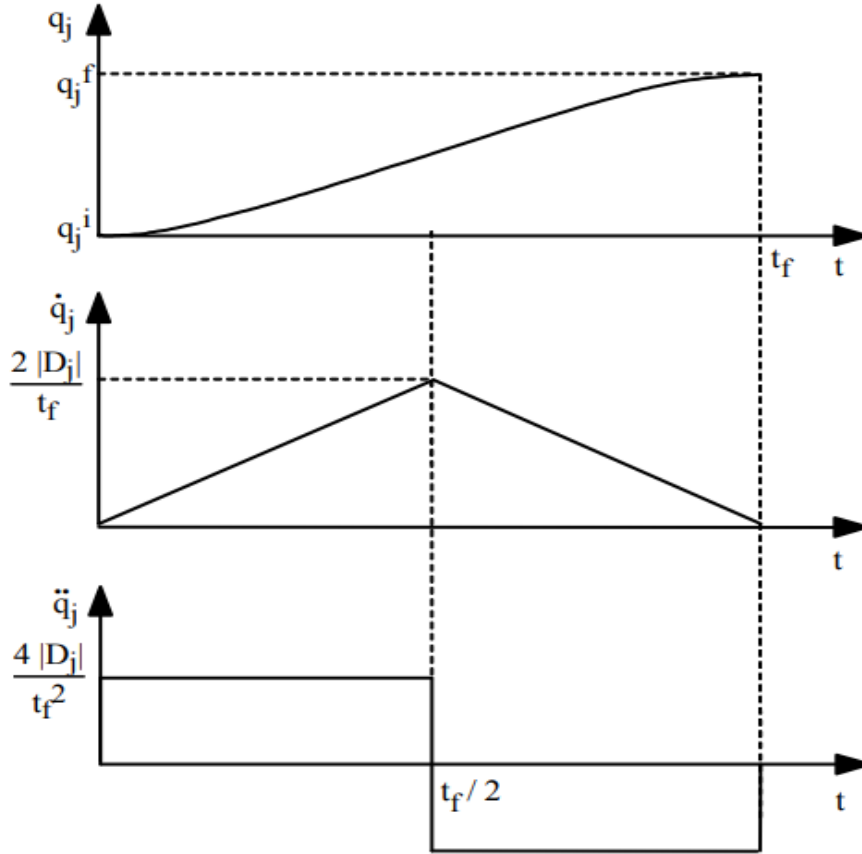


Figure III. 3: Loi de Bang Bang [8].

Pour cette loi, la position articulaire est donnée par la relation suivante :

$$q(t) = \begin{cases} q_i + 2 D \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 & \text{pour } 0 \leq t \leq \left(\frac{t}{t_f}\right) \\ q_i + D \left[ 1 - 4 \left(\frac{t}{t_f}\right) - 2 \left(\frac{t}{t_f}\right)^2 \right] & \text{pour } \left(\frac{t}{t_f}\right) \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

La vitesse et l'accélération maximales de chaque articulation  $j$  sont données par les relations suivantes :

$$|\dot{q}_{jmax}| = \frac{2|D_j|}{t_f} \quad (\text{III.8})$$

$$|\ddot{q}_{jmax}| = \frac{4|D_j|}{t_f^2} \quad (\text{III.9})$$

Ainsi, le temps  $t_{fj}$  mis par l'actionneur  $j$  pour passer de la configuration initiale  $q_j(0)$  à la configuration finale  $q_j(t_{fj})$  à l'expression suivante :

$$t_{fj} = \max \left[ \frac{2|D_j|}{K_{vj}}, 2 \sqrt{\frac{|D_j|}{K_{aj}}} \right] \quad (\text{III.10})$$



Afin de synchroniser les différents axes,  $t_f$  est pris égal au le plus grand  $t_{fj}$ , ce qui se traduit par la relation suivante :

$$t_f = \max[t_{f1}, t_{f2}, \dots, t_{fn}] \quad (III.11)$$

**III.4.2. présentation des résultats issus de l’implantation de la loi Bang-bang sous Matlab**

Afin de tester les différents programmes élaborés, on a pris le robot PUMA 560. C’est un robot anthropomorphique à six degrés de liberté dont toutes les articulations sont rotoïdes

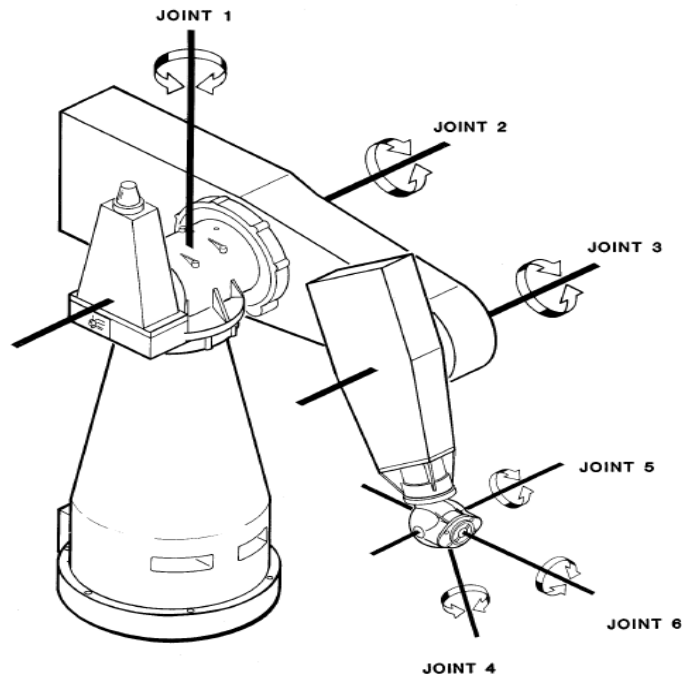


Figure III. 4 : Robot PUMA 560 [37].

Les variables articulaires des positions initiales et finales sont reportées sur tableau III.1. Sur ce même tableau sont données limites de vitesse, d’accélération et du jerk de chaque articulation. Toutes ces valeurs sont tirées du travail de Chettibi [3]. Il reste à signaler que le jerk est la dérivée du vecteur accélération par rapport au temps.

**Tableau III. 1:** variables articulaires des positions initiales et finale et les limites cinématiques du robot PUMA560 [3].

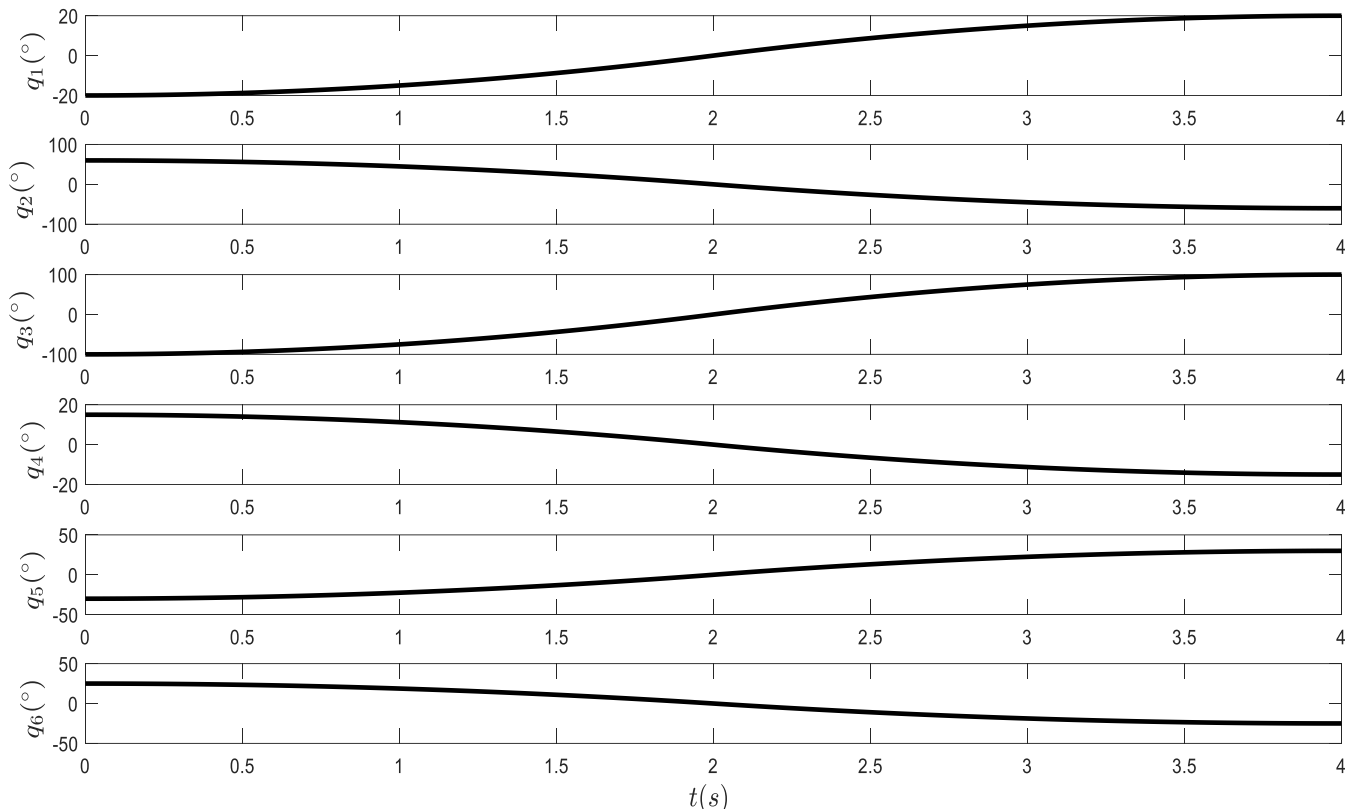
$j$	Unité	1	2	3	4	5	6
$q_j(0)$	(°)	-20	60	-100	15	-30	25
$q_j(t_f)$	(°)	20	-60	100	-15	30	-25
$ K_{vj} $	(°/s)	100	95	100	150	130	110
$ K_{aj} $	(°/s <sup>2</sup> )	45	40	75	70	90	80
$ \ddot{q}_{jmax} $	(°/s <sup>3</sup> )	60	60	55	70	75	70

Le programme élaboré pour la génération des trajectoires articulaires selon la loi Bang-Bang est structuré comme suit :

- 1) introduire les données : vecteurs  $q_i$ ,  $q_f$ ,  $K_v$  et  $K_a$ .
- 2) Calcul du vecteur  $D$  puis des  $t_{fj}$ .

- 3) Calcul de la durée du mouvement  $t_f$ .
- 4) Calcul pour chaque articulation les vecteurs  $q_j(t)$ ,  $\dot{q}_j(t)$  et  $\ddot{q}_j(t)$ .
- 5) Traçage des résultats.

L'injection des données du tableau III.1 dans le programme élaboré pour l'étude de cette loi a conduit aux résultats illustrés par les figures III.5, III.6 et III.7.

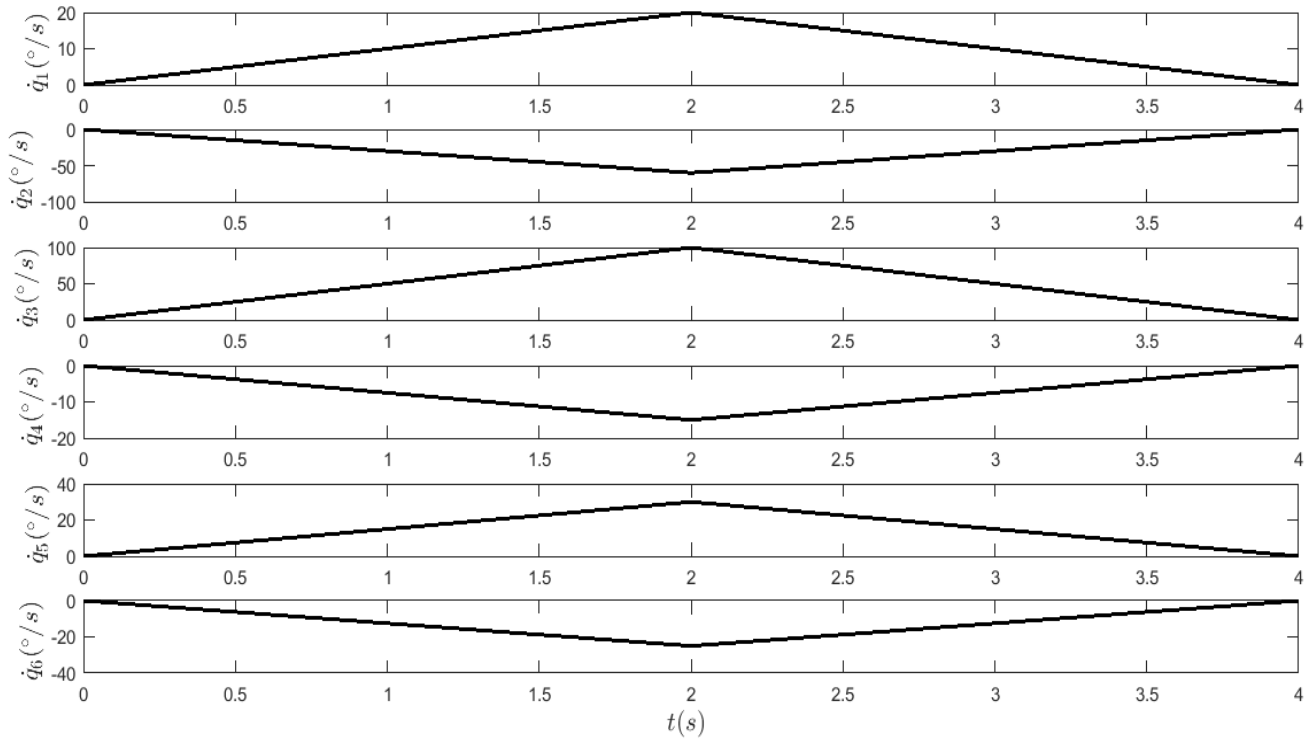


**Figure III. 5:** Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec la loi Bang-Bang pour le cas étudié.

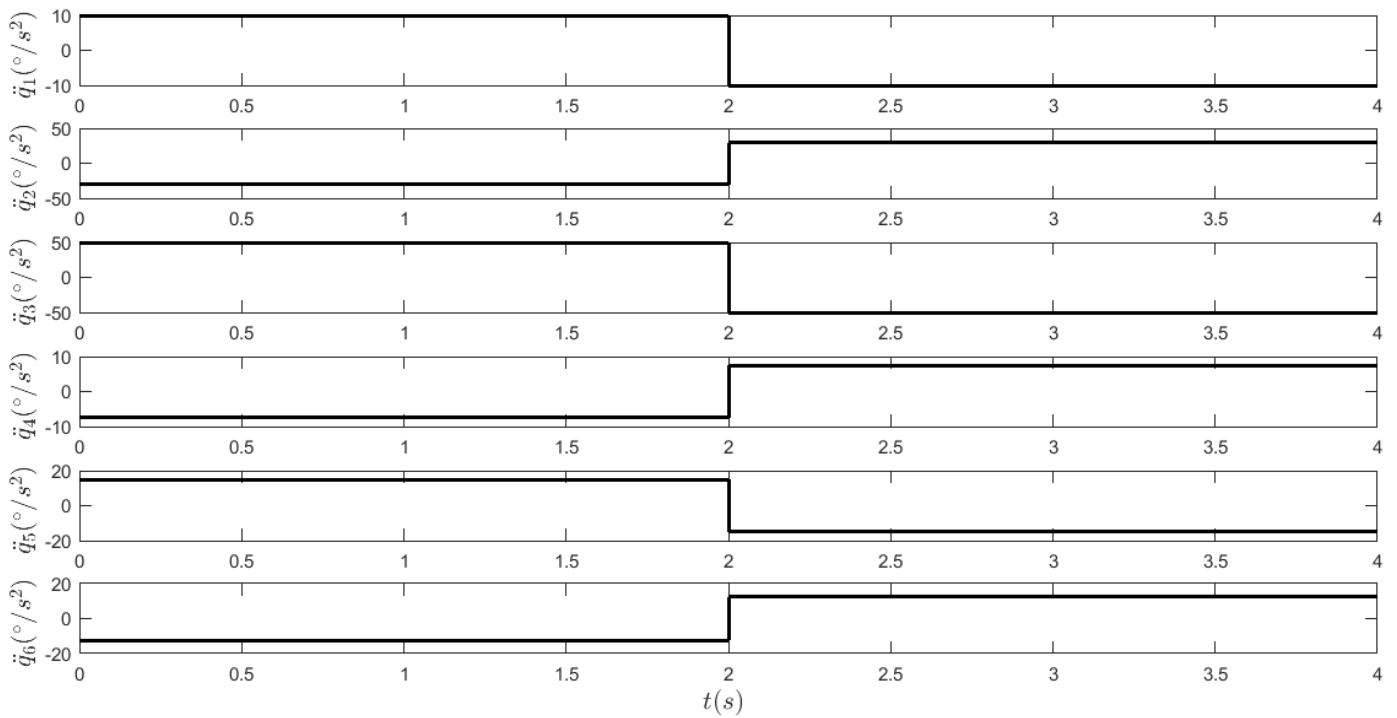
La durée du mouvement  $t_f$  donnée par la loi Bang-Bang pour les valeurs articulaires aux limites pour le cas étudié est égale à 4 s. cette durée a été imposée par troisième articulation qui est la plus lente. Le tableau III.2 donne les vitesses et les accélérations articulaires maximales de chaque articulation. Seule la vitesse du troisième axe est saturée alors que les autres vitesses et accélérations articulaires n'ont pas atteint leurs limites.

**Tableau III. 2:** Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par la loi Bang-Bang.

$j$	Unité	1	2	3	4	5	6
$ \dot{q}_{jmax} $	(°/s)	20	60	<b>100</b>	15	30	25
$ K_{vj} $	(°/s)	100	95	<b>100</b>	150	130	110
$ \ddot{q}_{jmax} $	(°/s <sup>2</sup> )	10	30	50	7.5	15	12.5
$ K_{aj} $	(°/s <sup>2</sup> )	45	40	75	70	90	80



**Figure III. 6:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec la loi Bang-Bang pour le cas étudié.



**Figure III. 7:** Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec la loi Bang-Bang pour le cas étudié.

### III.5. La loi trapézoïdale en vitesse

#### III.5.1.Principe de la loi trapézoïdale en vitesse

La loi trapézoïdale en vitesse cherche à minimiser la durée du mouvement par la saturation, à la fois, de la vitesse et de l'accélération. Ici, on cherche non seulement à synchroniser les axes mais, aussi, à avoir des durées d'accélération et de freinage égales sur toutes les articulations. C'est cette loi qui est le plus souvent implanté sur les contrôleurs de robots industriels.

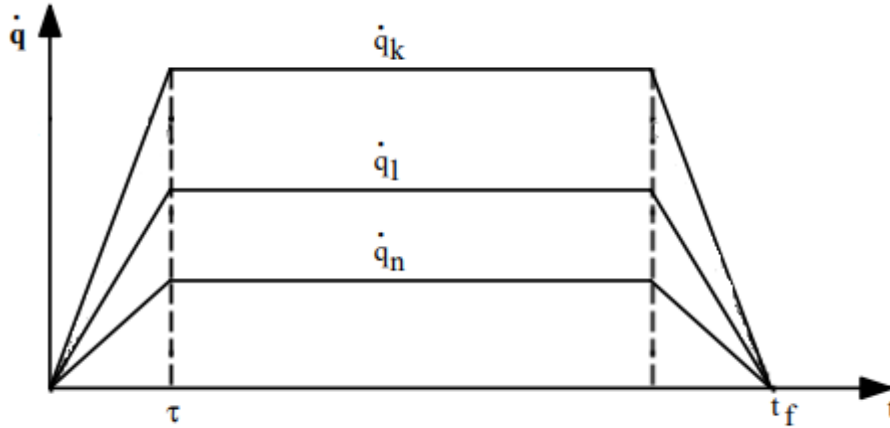


Figure III. 8: la loi trapézoïdale en vitesse [8].

La figure III.8 illustre les variations de la vitesse des accélérations avec la loi trapézoïdale en vitesse. Cependant, le palier vitesse constante n'existe pas toujours. En effet, pour de l'articulation  $j$  son existence est conditionnée par la vérification de la relation suivante :

$$|D_j| > \frac{K_{vj}^2}{K_{aj}} \quad (\text{III.12})$$

Une fois que cette condition n'est pas vérifiée pour une articulation  $j$ , la vitesse maximale qu'elle peut atteindre pour parcourir la distance  $D_j$  est ajustée à l'aide de l'expression suivante :

$$K_{vj} = \sqrt{K_{aj} |D_j|} \quad (\text{III.13})$$

Le mouvement de l'articulation  $j$  par la loi trapézoïdale synchronisée est gouverné par les relations suivantes :

$$q(t) = \begin{cases} q_i + D \frac{t^2}{2\tau(t_f-\tau)} & \text{pour } 0 \leq t \leq \tau \\ q_i + D \frac{(2t-\tau)}{2(t_f-\tau)} & \text{pour } \tau \leq t \leq t_f-\tau \\ q_i + D \left[ 1 - \frac{(t_f-t)^2}{2\tau(t_f-\tau)} \right] & \text{pour } t_f-\tau \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Dans les relations III.15,  $\tau$  représente la durée des phases d'accélération et de freinage. Comme les mouvements sont synchronisés,  $\tau$  aura la même valeur pour tous les axes. La durée correspondante de la phase d'accélération  $\tau$  se calcule à l'aide de l'algorithme suivant :

- 1) Pour  $j=1, \dots, n$
- 2) Si  $D_j \neq 0$   $r=j$  aller à 3) sinon aller à 1)
- 3) Calculer  $\lambda_r$  et  $v_r$  à l'aide des de deux relation suivantes [12] :

$$\begin{cases} \lambda_r = \min \left[ 1, \frac{K_{vj} |D_r|}{K_{vr} |D_j|} \right] \\ v_r = \min \left[ 1, \frac{K_{aj} |D_r|}{K_{ar} |D_j|} \right] \end{cases} \quad \text{pour } j=r+1, \dots, n \quad (\text{III.15})$$

- 4) Calculer  $\tau$  par l'expression suivante [12] :

$$\tau = \frac{\lambda_r K_{vr}}{v_r K_{ar}} \quad (\text{III.16})$$

La durée du mouvement  $t_f$ , avec cette loi, aura, ainsi, l'expression suivant :

$$t_f = \tau + \frac{|D_r|}{\lambda_r K_{vr}} \quad (\text{III.17})$$

### III.5.2. présentation des résultats issus de l'implantation de la loi trapézoïdale sous Matlab

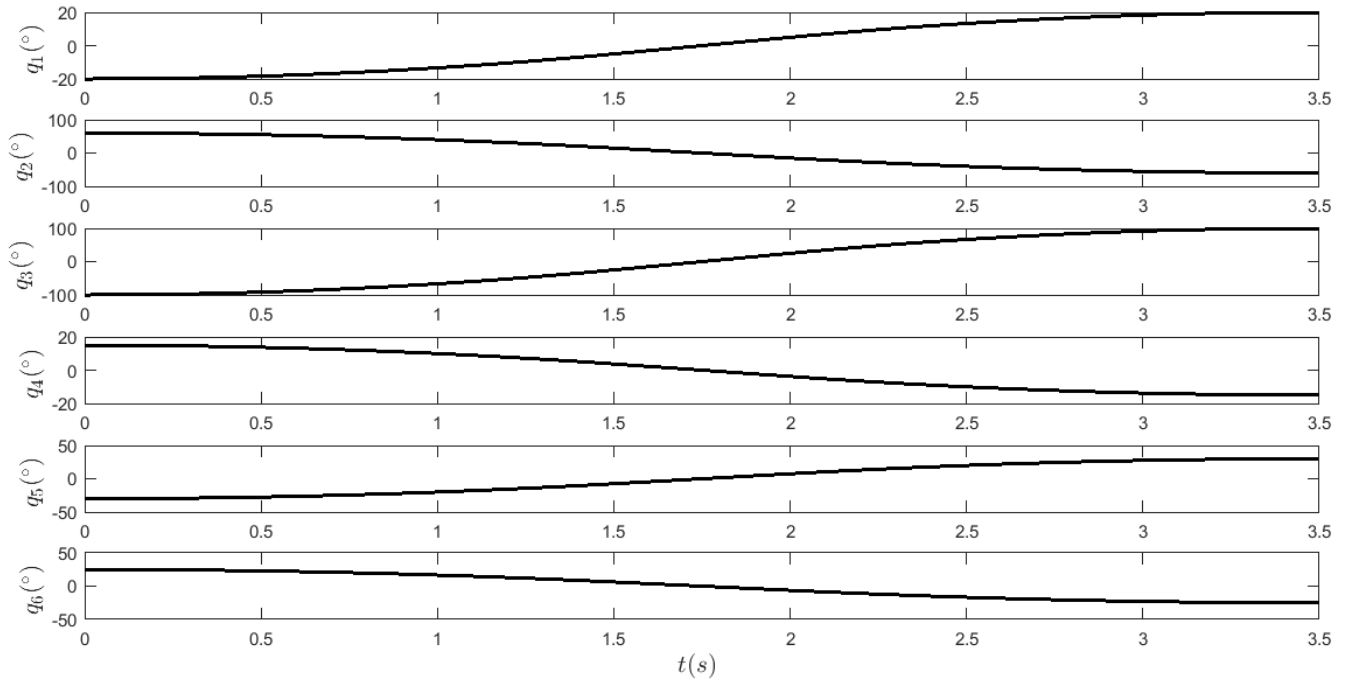
L'implantation réalisée au cours de ce travail de la loi trapézoïdale sous l'environnement Matlab est structuré comme suit :

- 1) introduire les données : vecteurs  $q_i, q_f, K_v$  et  $K_a$ .
- 2) Calcul du vecteur  $D$ .
- 3) Si la relation III.12 n'est pas vérifiée ajuster le vecteur  $K_v$  à l'aide de la relation III.13.
- 4) Pour  $j=1, \dots, n$
- 5) Si  $D_j \neq 0$   $r=j$  aller à 3) sinon aller à 4)
- 6) Calculer  $\lambda_r$  et  $v_r$ .
- 7) Calculer  $\tau$  et  $t_f$ .
- 8) Calcul de la durée du mouvement.
- 9) Calcul pour chaque articulation les vecteurs  $q_j(t), \dot{q}_j(t)$  et  $\ddot{q}_j(t)$ .
- 10) visualisation des résultats.

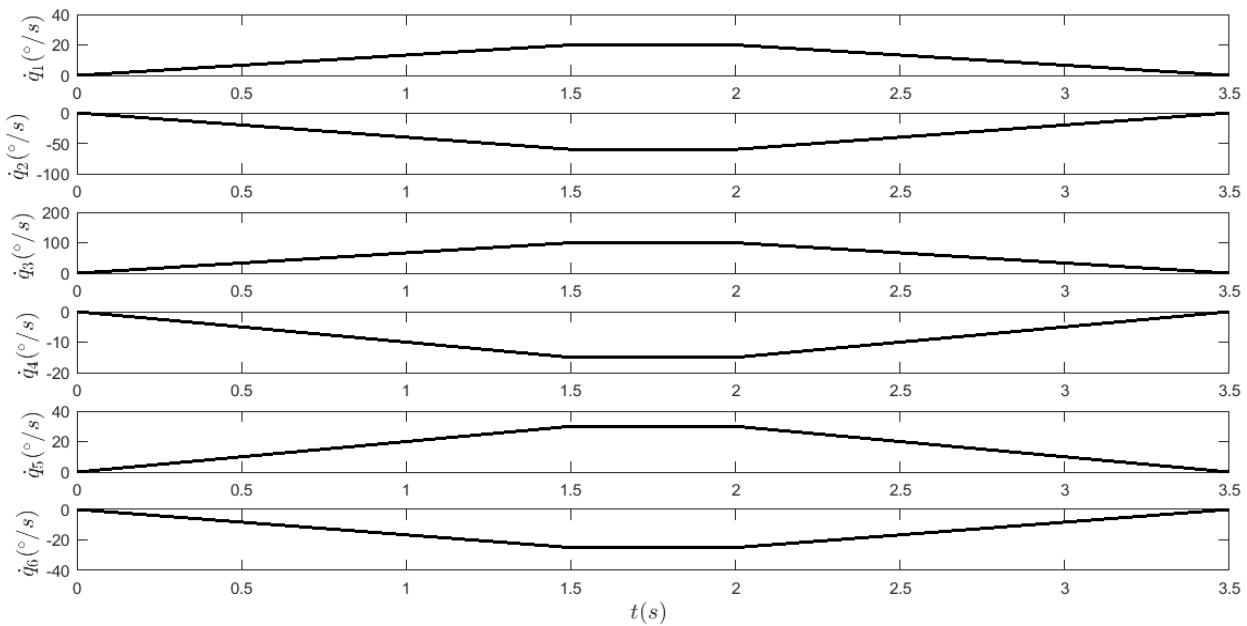
L'introduction des valeurs numériques du tableau III.1 ont conduit aux résultats donnés par le tableau III.3 et illustrés sur les figures III.9, III.10 et III.11

**Tableau III. 3 :** Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par la loi trapézoïdale.

$j$	Unité	1	2	3	4	5	6
$ \dot{q}_{jmax} $	(°/s)	20	60	100	15	30	25
$ K_{vj} $ après ajustage	(°/s)	42.4264	69.2820	100	45.8258	73.4847	63.2456
$ K_{vj} $	(°/s)	100	95	100	150	130	110
$ \ddot{q}_{jmax} $	(°/s <sup>2</sup> )	13.3333	40	66.6667	10	20	16.67
$ K_{aj} $	(°/s <sup>2</sup> )	45	40	75	70	90	80



**Figure III. 9:** Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec la loi trapézoïdale pour le cas étudié.



**Figure III. 10:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec la loi trapézoïdale pour le cas étudié.

Pour le cas étudié, on constate que la relation III.12 n'est pas vérifiée pour toutes les articulations sauf la troisième. Ce qui a imposé d'ajuster les vitesses maximales des articulations en violation cette relation. Cette loi a conduit, à une durée du mouvement  $t_f$  égale à 3.5 s . Ainsi, elle est inférieure à

celle donnée par la loi précédente. La phase de vitesse constante à une durée de 0.5 s. Pour cette loi, la vitesse de la troisième articulation ainsi que l'accélération de la deuxième articulation sont saturées.

Les vitesses articulaires maximales de la loi trapézoïdale sont égales à celle données par la loi Bang-Bang. En revanche les accélérations articulaires de la loi trapézoïdale sont nettement supérieures à celles de la loi Bang-bang.

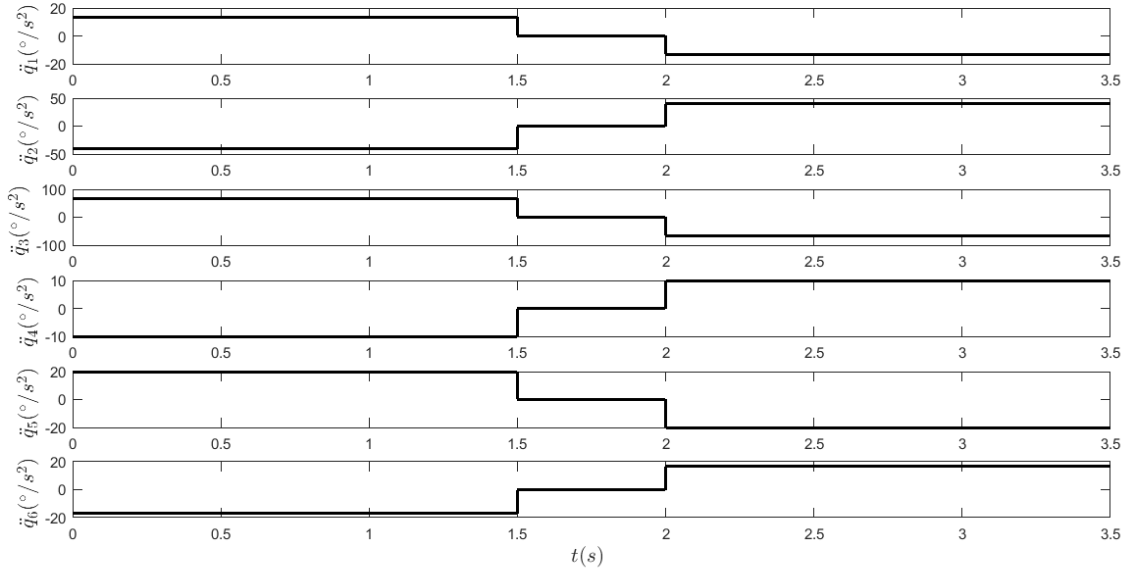


Figure III.11: Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec la loi trapézoïdale pour le cas étudié

### III.6. Lissage de la loi trapézoïdale en vitesse

#### III.6.1.Principe du lissage de la loi trapézoïdale en vitesse

La loi précédente présente l'inconvénient d'avoir une trajectoire discontinue en accélération. Pour pallier à cet handicap, les accélérations et de décélération doivent suivre une loi qui assure que les valeurs aux limites sont nulles. Plusieurs lois peuvent être utilisées pour le lissage de la loi trapézoïdale. Dans ce travail, on a opté pour une accélération qui suit loi du deuxième degré. Ce choix est motivé par la facilité de manipulation de cette loi.

Pour cette loi, la vitesse et l'accélération de la trajectoire de l'articulation  $j$  sont les deux saturées, si la condition suivante est vérifiée :

$$|D_j| > \frac{3 K_{vj}^2}{2 K_{aj}} \quad (III.18)$$

Dans le cas contraire (la relation III18 non vérifiée), Khalil propose de faire un ajustement de la vitesse maximale accessible à l'aide de la relation s'impose :

$$K_{vj} = \sqrt{\frac{2}{3} K_{aj} |D_j|} \quad (III.19)$$

Cependant, Tondu [4] a signalé que si la vitesse est ajustée comme dans le cas précédent (accélération discontinue) cela augmente les accélérations maximales de 50%.

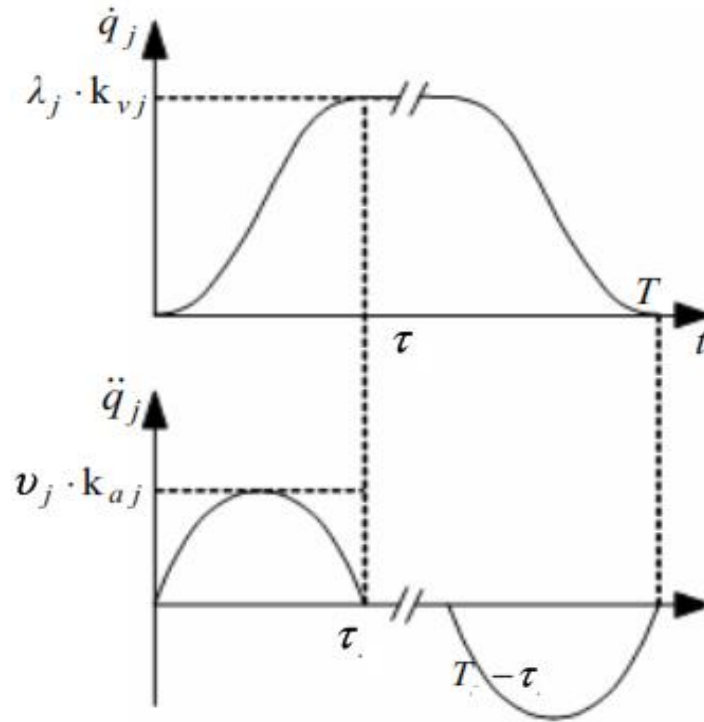


Figure III. 12: Lissage de la loi trapézoïdale en vitesse [8].

Le lissage de la loi trapézoïdale conduit à un mouvement régi par les relations suivantes :

$$q_j(t) = \begin{cases} q_i + D \frac{1}{2(t_f - \tau)} \left( \frac{2t^3}{\tau^2} - \frac{t^4}{\tau^3} \right) & \text{pour } 0 \leq t \leq \tau \\ q_i + D \frac{(2t - \tau)}{2(t_f - \tau)} & \text{pour } \tau \leq t \leq t_f - \tau \\ q_i + D \left[ 1 - \frac{1}{2(t_f - \tau)} \left( \frac{2(t_f - t)^3}{\tau^2} - \frac{(t_f - t)^4}{\tau^3} \right) \right] & \text{pour } t_f - \tau \leq t \leq t_f \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

La durée correspondante de la phase d'accélération  $\tau$  et  $t_f$  se calculent de la même manière que dans la section III.5.1, en remplaçant la relation III.16 par la relation suivante :

$$\tau = \frac{3 \lambda_r K_{vr}}{2 v_r K_{ar}} \quad (\text{III.21})$$

### III.6.2. présentation des résultats issus de l'implantation du lissage la loi trapézoïdale sous Matlab

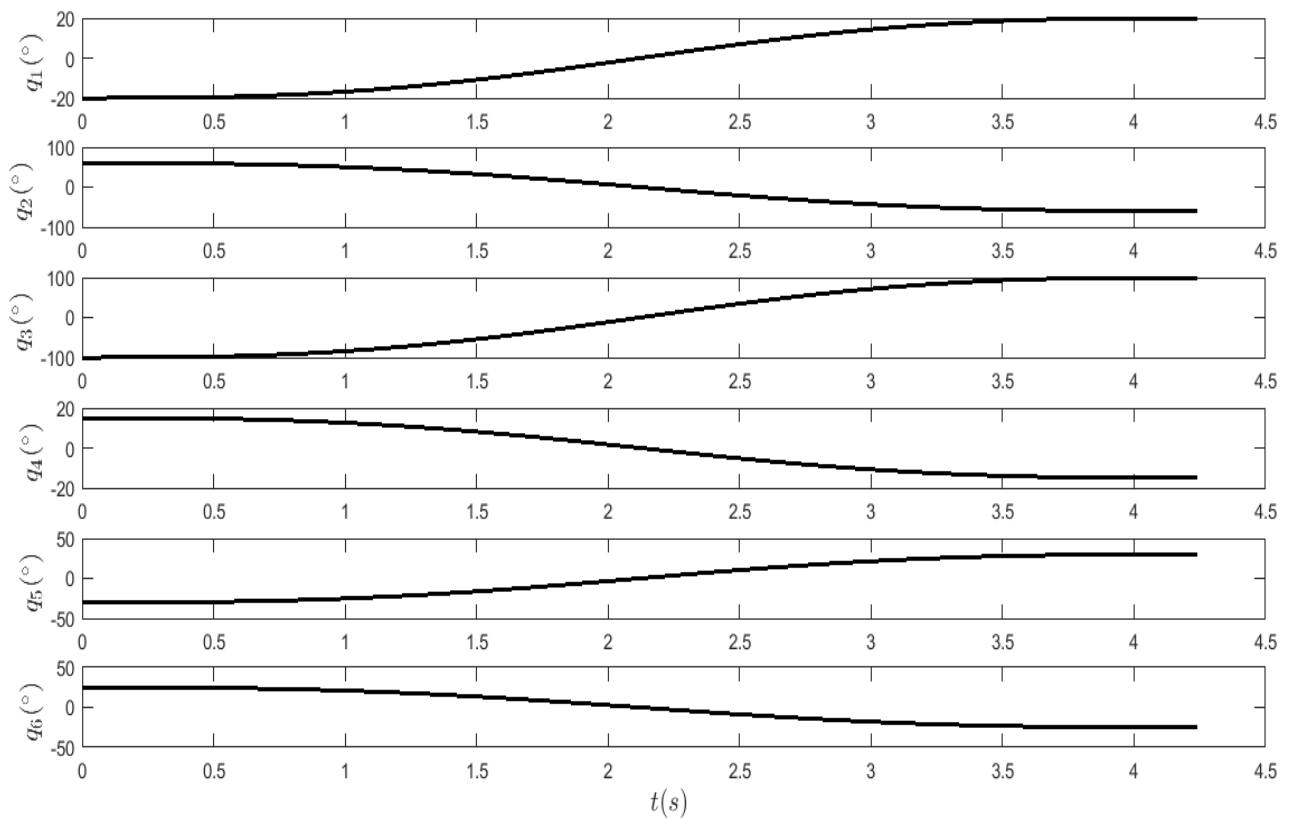
Le programme élaboré pour l'étude du lissage de la loi trapézoïdale sous l'environnement Matlab est structuré de la même manière que celui décrit de la section III.5.1 en changeant seulement dans le point 3) les relations III.12 et III.13 par respectivement par les relations III.18 et III.19.



**Tableau III. 4:** Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par le lissage de la loi trapézoïdale.

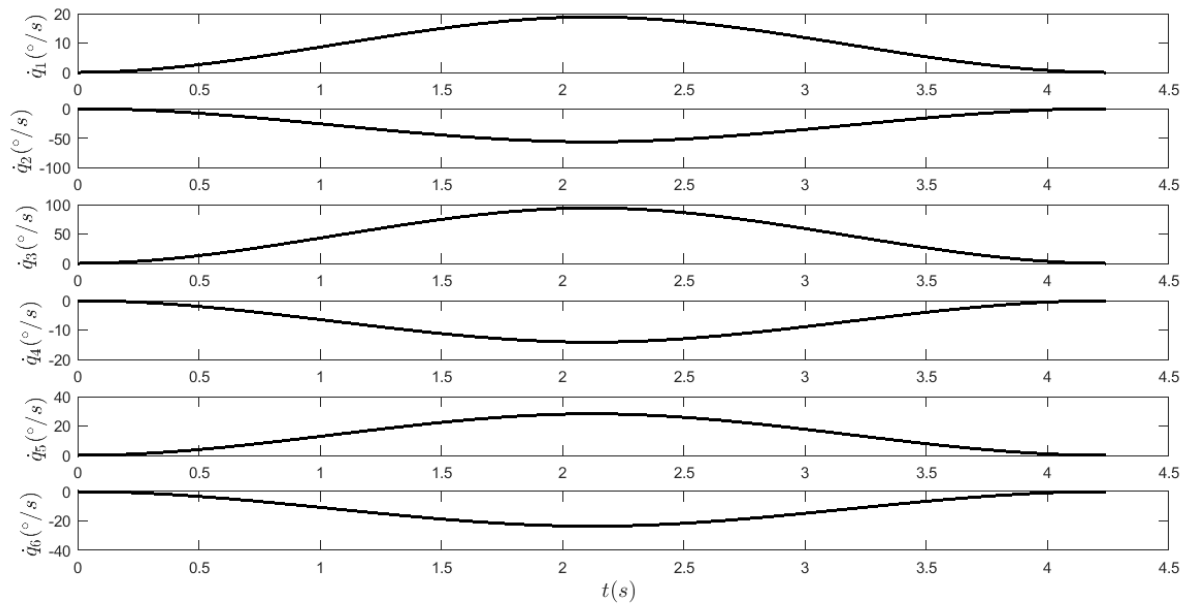
$j$	Unité	1	2	3	4	5	6
$ \dot{q}_{jmax} $	(°/s)	18.8562	56.5685	94.2809	14.1421	28.2843	23.5702
$ K_{vj} $ après ajustage	(°/s)	34.6410	56.5685	<b>100</b>	37.4166	60.0000	51.6398
$ K_{vj} $	(°/s)	100	95	<b>100</b>	150	130	110
$ \ddot{q}_{jmax} $	(°/s <sup>2</sup> )	13.3333	<b>40</b>	66.6667	10	20	16.67
$ K_{aj} $	(°/s <sup>2</sup> )	45	<b>40</b>	75	70	90	80

L'exécution du programme a conduit aux résultats présentés par les figures III.13, III.14 et III.15, ainsi que le tableau III.4. La durée du mouvement  $t_f$  est égale à 4.2426s alors que la phase d'accélération dure 2.1213s. Khalil a signalé que la durée d'accélération  $\tau$  avec lissage est supérieure de 1.5 fois par rapport au cas sans lissage [12].

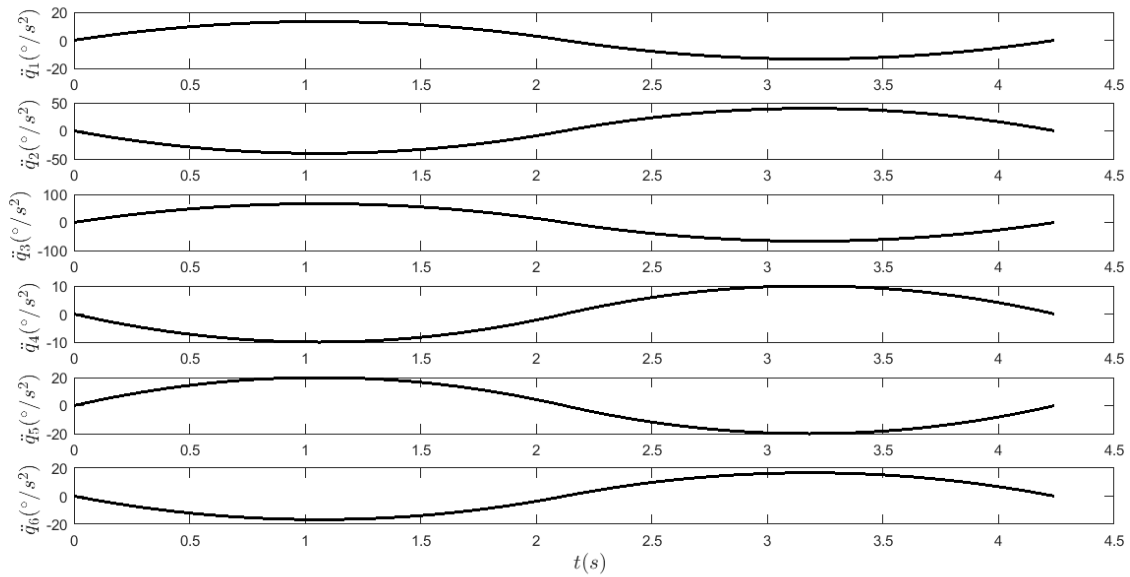


**Figure III. 13:** Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec lissage de la loi trapézoïdale pour le cas étudié

Tout d'abord, sur les figures III.14 et III.15 on remarque l'absence du palier vitesse constante. En effet, ce palier existe si  $t_f > 2\tau$ , chose qui n'est pas réalisée pour notre cas étudié. On remarque aussi que seule la deuxième accélération est saturée. De plus les vitesses maximales articulaires obtenues avec lissage sont inférieures à celles sans lissage.



**Figure III. 14:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec lissage de la loi trapézoïdale pour le cas étudié.



**Figure III. 15:** Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec lissage de la loi trapézoïdale pour le cas étudié

### III.7. La loi polynomiale de degré cinq

#### III.7.1.Principe de la loi polynomiale de degré cinq

Afin d’avoir des trajectoires, non seulement des trajectoires continues en accélération, mais aussi lisses une fonction d’interpolation polynomiale du cinquième degré est utilisée. Le polynôme choisi doit avoir comme contraintes vitesse et accélération nulles aux deux extrémités du parcours. Ainsi, on aboutit à la loi suivante [12] :

$$q(t) = q_i + D \left( 10 \left( \frac{t}{t_f} \right)^3 - 15 \left( \frac{t}{t_f} \right)^4 + 16 \left( \frac{t}{t_f} \right)^5 \right) \quad \text{pour } 0 \leq t \leq t_f \quad (\text{III.22})$$

Avec cette loi, la vitesse et l’accélération maximales de l’articulation  $j$  ont les expressions suivantes :

$$|\dot{q}_{jmax}| = \frac{15|D_j|}{8t_f} \quad (\text{III.23})$$

$$|\ddot{q}_{jmax}| = \frac{10|D_j|}{\sqrt{3} t_f^2} \quad (\text{III.24})$$

Pour synchroniser les différents axes,  $t_f$  est calculé à l’aide de la relation suivante :

$$t_f = \max[t_{f1}, t_{f2}, \dots, t_{fn}] \quad (\text{III.25})$$

avec

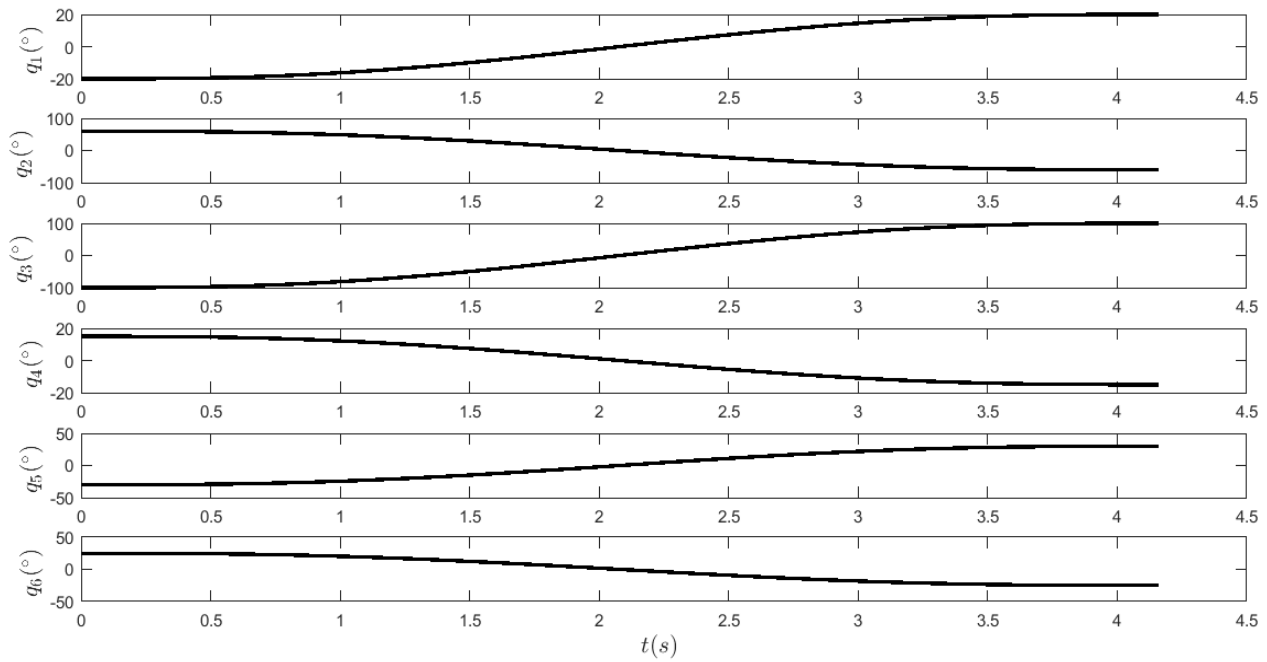
$$t_{fj} = \max \left[ \frac{15|D_j|}{8 K_{vj}}, \sqrt{\frac{10|D_j|}{\sqrt{3} K_{aj}}} \right] \quad j=1, \dots, n \quad (\text{III.26})$$

#### III.7.2. présentation des résultats issus de l’implantation de la loi polynomiale de degré cinq sous Matlab

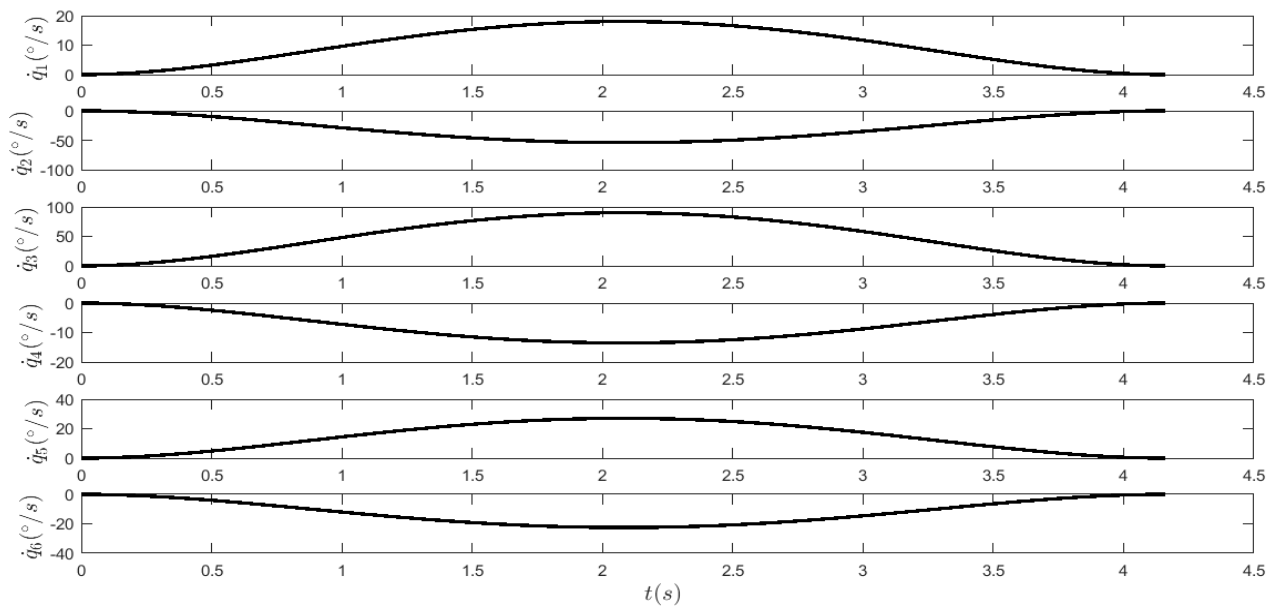
La structuration du programme élaboré pour l’étude de la polynomiale de degré cinq est similaire à celle du programme décrit dans la section III.4.2. Pour l’exemple étudié, le robot Puma 560 avec les données du tableau III.1, les résultats trouvés avec cette loi sont donnés par le tableau III.5 et représentés par les figures III.16, III.17 et III.18.

**Tableau III. 5 :** Tableau des vitesses et accélérations articulaires maximales données par le lissage de la loi la loi polynomiale de degré cinq.

$j$	Unité	1	2	3	4	5	6
$ \dot{q}_{jmax} $	(°/s)	18.0211	54.0633	90.1054	13.5158	27.0316	22.5264
$ K_{vj} $	(°/s)	100	95	100	150	130	110
$ \ddot{q}_{jmax} $	(°/s <sup>2</sup> )	13.3333	39.9999	66.6665	10.0000	20.0000	16.6666
$ K_{aj} $	(°/s <sup>2</sup> )	45	40	75	70	90	80

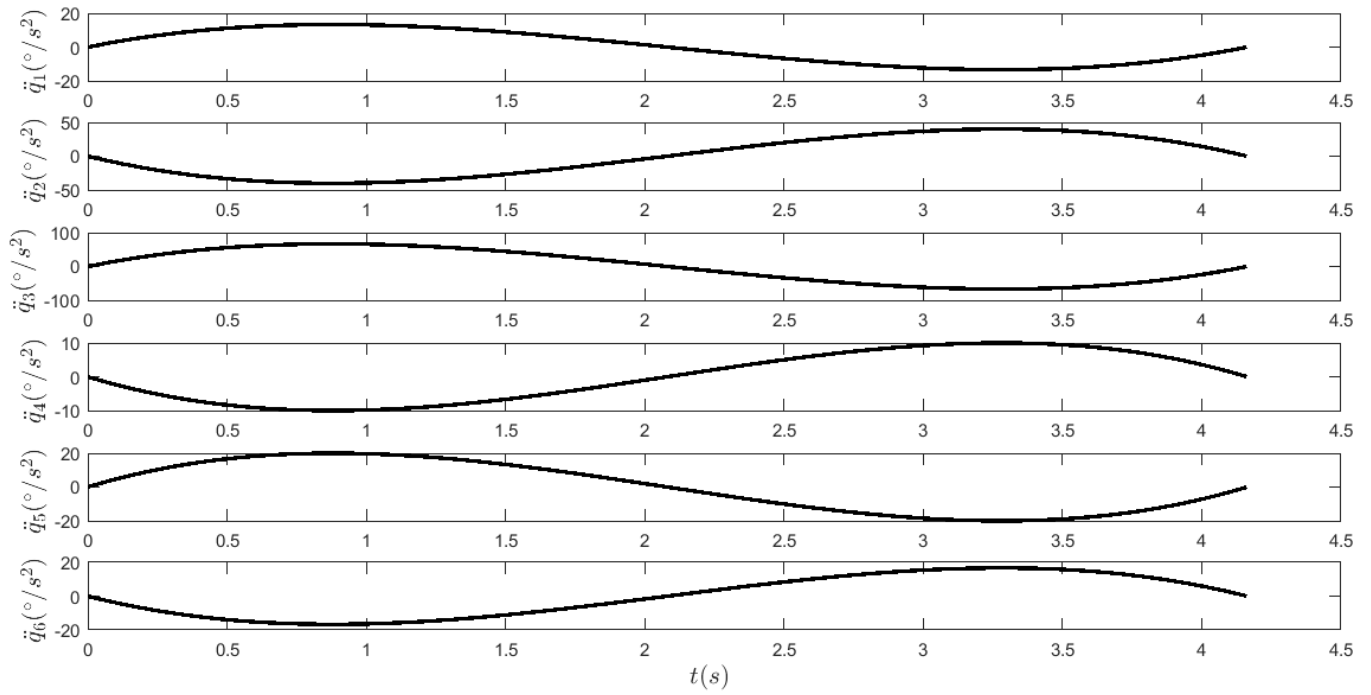


**Figure III. 16:** Evolution des positions articulaires des 6 articulations avec la loi polynomiale de degré cinq pour le cas étudié.



**Figure III. 17:** Evolution des vitesses articulaires des 6 articulations avec la loi polynomiale de degré cinq pour le cas étudié

La durée du mouvement  $t_f$  pour cette loi est égale à 4.1618s elle est inférieure à celle donnée par la loi trapézoïdale avec lissage. Par contre, elle est supérieure aux deux autres trouvées pour les deux autres lois. Ici, presque toutes les vitesses et les articulations ne sont pas saturées.



**Figure III. 18:** Evolution des accélérations articulaires des 6 articulations avec la loi polynomiale de degré cinq pour le cas étudié

# CONCLUSION

La génération de trajectoire est l'opération qui consiste à définir une fonction d'interpolation qui doit répondre à certaines exigences. Pour une tâche point à point, qui est défini dans l'espace articulaire, cette fonction doit répondre aux conditions aux limites ainsi qu'aux contraintes cinématiques (vitesses et accélérations maximales). Les vitesses et les accélérations aux limites doivent être nulles.

La génération de trajectoire dans l'espace articulaire n'exige pas l'utilisation des modèles géométriques directs et inverse ce qui réduit énormément le temps de calculs. De plus, c'est plus facile de respecter les limites physiques des actionneurs.

Au cours de ce travail, on a étudié quatre lois de génération de trajectoire entre deux points, définis dans l'espace articulaire, sous des contraintes cinématiques. Pour les quatre lois les mouvements des axes sont synchronisés afin de diminuer les vibrations. De plus, pour chaque loi un programme est élaboré sous Matlab qui permet, en prenant le robot PUMA 560 comme modèle, de visualiser les résultats.

Au terme de cette étude nous pouvons dégager les constatations suivantes :

- Chaque articulation a une durée propre de mouvement déduite des contraintes cinématiques.
- C'est l'articulation la plus lente qui fixe la durée du mouvement  $t_f$
- La loi trapézoïdale en vitesse conduit à  $t_f$  la plus courte.
- Les vitesses articulaires maximales de la loi trapézoïdale sont égales à celle données par la loi Bang-Bang. En revanche les accélérations articulaires de la loi trapézoïdale sont nettement supérieures à celles de la loi Bang-bang.
- Le lissage de la loi trapézoïdale diminue les vitesses maximales articulaires.
- Toutes les vitesses et les articulations ne sont pas saturées dans la loi de polynôme degré cinq.

Les perspectives ouvertes par cette étude sont les suivantes :

- L'optimisation des trajectoires,
- L'étude de l'effet des lois de commande sur les couples des actionneurs.

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] [En ligne]. Available: [https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive\\_Summary\\_WR\\_2020\\_Industrial\\_Robots\\_1.pdf](https://ifr.org/img/worldrobotics/Executive_Summary_WR_2020_Industrial_Robots_1.pdf). [Accès le 01 07 2021].
- [2] [En ligne]. Available: <https://www.wolterskluwer.com/fr-be/expert-insights/robotisation-of-work-opportunities-and-threats>. [Accès le 01 07 2021].
- [3] T. Chettibi, «Smooth point-to-point trajectory planning for robot manipulators by using radial basis functions,» *Robotic*, vol. 37, p. 539–559., 2018.
- [4] B. Tondu, «Génération des mouvements,» chez *Commande des robots manipulateurs*, Paris, Lavoisier, 2002, pp. 17-68.
- [5] H. d. TagHirad, *Parallel Robots Mechanics and Control*, Taylor & Francis Group, LLC, 2017.
- [6] J.-L. Boimond, ISTIA, Université Angers , [En ligne]. Available: [https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/mastersds\\_cours\\_robot\\_boimond.pdf](https://www.ensta-bretagne.fr/jaulin/mastersds_cours_robot_boimond.pdf). [Accès le 28 05 2021].
- [7] J. Engelberger, *Robotics in Practice.*, New York: AMACOM, 1980..
- [8] B. Mohamed et C. Reymond, «Généralités :Robots sériels et parallèles,» EPLF, 2017.
- [9] [En ligne]. Available: <https://www.zoneindustrie.com/Actualite/Le-premier-robot-Pick-Place-dedie-aux-applications-alimentaires-6619.html>. [Accès le 2021 05 28].
- [10] [En ligne]. Available: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HONDA\\_ASIMO.jpg?uselang=fr](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:HONDA_ASIMO.jpg?uselang=fr). [Accès le 28 05 2021].
- [11] F. Jacques , «Développement d’une loi de commande avancée pour la maîtrise des vibrations des robots sériels à liaisons flexibles,» Thèse de Doctorat Institut Pascal SIGMA Clermont e Université Clermont Auvergne, Clermont-Ferrand, 29/01/2019.
- [12] W. Khalil et . . Dombre, *Modeling Identification and Control of Robots*, Butterworth-Heinemann, 2004.
- [13] «ISO 8373:2012(fr) Robots et composants robotiques — Vocabulaire,» ISO, [En ligne]. Available: <https://www.iso.org/obp/ui/fr/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:fr>. [Accès le 10 10 2020].
- [14] B. Zakaria, *Génération et simulation d’une planification de trajectoire d’un robot SCARA*, ANNABA: UNIVERSITE BADJI MOKHTAR, 2019.
- [15] F. MORBIDI, «Robotique industriel,» Équipe Perception Robotique, Laboratoire MIS , 2018.

- [16] [En ligne]. Available: [http://www-sop.inria.fr/members/Jean-Pierre.Merlet/Cours/subsubsection2\\_1\\_9\\_1\\_1.html#SECTION00191100000000000000](http://www-sop.inria.fr/members/Jean-Pierre.Merlet/Cours/subsubsection2_1_9_1_1.html#SECTION00191100000000000000). [Accès le 29 05 2021].
- [17] O. HEDJEM, Conception et réalisation d'un bras manipulateur, TIZI-OUZOU: UNIVERSITE MOULOUD MAMMER, 2015.
- [18] S. Y. Nof, "Handbook of Industrial Robotics, Second Edition," in *Handbook of Industrial Robotics*, Canada, JOHN WILEY & SONS, INC., 1999, p. 1327.
- [19] Techniques de l'Ingénieur, Robotisation – mode d'emploi, Paris: Symop (Syndicat des entreprises de technologies de production), 2011.
- [20] É. DOMBRE, Programmation des robots, Montpellier, 1998.
- [21] wikipedia, «wikipedia,» août 2016. [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation\\_hors-ligne\\_\(robots\\_industriels\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Programmation_hors-ligne_(robots_industriels)). [Accès le mai 2021].
- [22] J.-M. Munoz, «Recherche & Développement,» 2020. [En ligne]. Available: <https://www.ep.total.com/fr/innovations/recherche-developpement/la-robotique-de-surface-une-cle-pour-les-architectures-du-futur>. [Accès le 2021].
- [23] K. Alouache, «autoalgerie,» 28 avril 2020. [En ligne]. Available: <https://www.autoalgerie.com/wp/actualite/industrie-automobile/seat-un-centre-de-bien-etre-dedie-aux-voitures/>. [Accès le mai 2021].
- [24] M. Zaffagni, «Mobilité,» 2018. [En ligne]. Available: <https://www.cnetfrance.fr/news/apple-devoile-daisy-son-nouveau-robot-de-recyclage-des-iphone-39867256.htm>. [Accès le 2021].
- [25] Mathieu.M, «Robotique,» 26 novembre 2019. [En ligne]. Available: <https://www.generation-nt.com/google-developpe-robot-tri-dechets-actualite-1970831.html>. [Accès le 2021].
- [26] BALLAN-MIRÉ, «Le groupe Laffi soude les compétences,» 9 1 2014. [En ligne]. Available: <https://www.lanouvellerepublique.fr/indre-et-loire/commune/ballan-mire/le-groupe-laffi-soude-les-competences>. [Accès le 2021].
- [27] F. w. s. GmbH, «Robot articulé,» [En ligne]. Available: <https://www.directindustry.fr/prod/foerster-welding-systems-gmbh/product-21138-1059785.html>.
- [28] K. Samir, Conception et Réalisation d'un Bras Manipulateur De Type PUMA, BLIDA: Université SAAD DAHLAB de BLIDA, 2018.
- [29] A. wilson, «The Benefits of Automated Inspection for Quality Control,» CTO & Co-Founder, 19 9 2017. [En ligne]. Available: <https://staging4.sastrarobotics.com/benefits-automated-inspection-quality-control/>.



- [30] «SYSTEM ROBOT AUTOMAZIONE,» [En ligne]. Available: <https://www.directindustry.fr/prod/system-robot-automazione/product-50459-2022525.html>.
- [31] G. France, «GS1 France,» 25 4 2017. [En ligne]. Available: [https://www.youtube.com/watch?v=3y7ZV\\_Cww7k&ab\\_channel=GS1France](https://www.youtube.com/watch?v=3y7ZV_Cww7k&ab_channel=GS1France).
- [32] «Robots articulés industriels,» [En ligne]. Available: <https://www.kollmorgen.com/fr-fr/solutions/robotics/robots-articul%C3%A9s-industriels/>.
- [33] SERVICE DES COMMUNICATIONS, 2018. [En ligne]. Available: <https://www.collegeahuntsic.qc.ca/notre-college/nouvelles/les-nouveaux-laboratoires-de-robotique-industrielle>.
- [34] [En ligne]. Available: [https://fr.freepik.com/photos-premium/scellement-automatique-du-verre-robot-dans-usine-fabrication-intelligente-4-0\\_5410249.htm](https://fr.freepik.com/photos-premium/scellement-automatique-du-verre-robot-dans-usine-fabrication-intelligente-4-0_5410249.htm).
- [35] «Welding,» [En ligne]. Available: <https://grobotics.eu/applications/welding>.
- [36] H. d. I. Robotica. [En ligne]. Available: <https://www.timetoast.com/timelines/robotica-03f0db9c-2657-4876-af5c-4b08e6f5dac4>.
- [37] Puma-Robot-Simulation. [En ligne]. Available: <https://github.com/PascPeli/Puma-Robot-Simulation>.