

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

*Université de Ghardaïa*



N° d'ordre :  
N° de série :

Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique

**Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de**  
**MASTER**

**Domaine :** *Sciences et Technologies*

**Filière :** *Electromécanique*

**Spécialité :** *Maintenance Industrielle*

Par : Ben Ettouati Yacine & Ben Ahmed Saouli lamine

## **Thème**

**L'effet de la Maintenance Préventive des robots industriels au niveau des pièces articulées et axiales sur la productivité de son système de production**

**Soutenu publiquement le 01 /10/2020**

**Devant le jury :**

<b>Zerzor Ali</b>	PRR	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Fiha Khir Amine</b>	MCB	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Fenniche abd errazak</b>	PRC	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2019/2020**

## *Remerciements*

Nos remerciements vont tout premièrement à Dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous 'a donné pour terminer Nos études.

Nous souhaitons tout d'abord à remercier notre encadreur Monsieur Fennich Abderrazake enseignant à l'université de Ghardaïa, pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de sa patience durant la période de l'encadrement.

Nous tenons à remercier les membres de jury, le président monsieur.A.Zerzoz, et monsieur A.FihaKhir, qui ont bien voulu accepter de porter leurs jugements sur ce modeste travail. Ainsi que pour avoir consacré une partie de leur temps précieux pour lire et corriger cette mémoire.

Nous remercions très chaleureusement Nos familles pour le grand soutien et les encouragements Qu'ils nous 'ont donnés durant ces années.

Résumé

# Résumé

## ملخص

لقد تطرقنا من خلال دراستنا النظرية إلى أهمية الوسائل التكنولوجية المتطورة , و المتمثلة في مختلف أنواع الروبوتات , و هذا لما لها من أهمية كبيرة في تحقيق أهدافها في الميادين التي توظف بها , و هذا لما تحتويه من خصائص تجعلها رائدة التكنولوجيا في عصرنا الحالي , كما تطرقنا إلى دراسة أهمية الروبوتات ودورها و مردوديتها في الصناعات الإلكترونية موازاتنا بالحفاظ على لواحق الروبوت , التي تتمثل في قطع غياره , و خاصة القطع المحورية و المفصلية , و التي صحتها هي محور دراستنا , و من خلال هذه الدراسة قمنا باقتراح استراتيجية تصنيع شاملة , تعمل على تعزيز الخصائص الفيزيوكيميائية للقطع المحورية والمفصلية التي قد تزيد من زيادة مدة الصيانة الوقائية للقطع , و من أجل مردودية عالية , و هذا تفاديا للتآكل الناتج عن استمرارية عمل الروبوت , التي قد تؤدي إلى تردي حالته الانتاجية , متفادين بذلك الخسارة المالية والاقتصادية للمؤسسة صاحبة الاستثمار الصناعي

الكلمات الافتتاحية :الروبوت الصناعي , الصيانة الوقائية ,الأجزاء المحورية والمفصلية, تجارب فيزي و كيميائية و حرارية .

## Résumé

Nous avons touché, à travers notre étude théorique, à l'importance des moyens technologiques avancés, représentés par différents types de robots, et cela en raison de leur grande importance dans la réalisation de leurs objectifs dans les domaines dans lesquels ils sont employés, et c'est parce qu'ils contiennent des caractéristiques qui en font le pionnier de la technologie à notre époque actuelle, comme nous l'avons évoqué Etudier l'importance des robots, leur rôle et leur rentabilité dans les industries électroniques en parallèle à la préservation des accessoires du robot, qui sont représentés dans ses pièces détachées, en particulier les pièces axiales et articulées, dont la validité est au centre de notre étude, et à travers cette étude nous avons proposé une stratégie de fabrication globale qui travaille à améliorer Les caractéristiques physicochimiques des pièces axiales et articulaires pouvant allonger la durée de la maintenance préventive des pièces, et ce dans un souci de rentabilité élevée, et ce afin d'éviter la corrosion résultant de la continuité du travail du robot, qui peut nuire à ses conditions de production, évitant ainsi la perte financière et économique de l'institution propriétaire de l'investissement industriel.

Les mots clés : le robot industriel, la maintenance préventive, les pièces axiales et articulées, tests physico-chimiques et thermiques.

## Abstract

We have touched, through our theoretical study, to the importance of advanced technological means, represented by various types of robots, and this is because of their great

## Résumé

---

importance in achieving their goals in the fields in which they are employed, and this is because they contain characteristics that make them the pioneer of technology in our current era, as we touched upon To study the importance of robots, their role and their cost-effectiveness in the electronic industries in parallel to preserving the robot's accessories, which are represented in its spare parts, especially the axial and articulated parts, whose validity is the focus of our study, and through this study we proposed a comprehensive manufacturing strategy that works to enhance The physiochemical characteristics of the axial and joint parts that may increase the period of preventive maintenance of the parts, and for the sake of high cost-effectiveness, and this in order to avoid corrosion resulting from the continuity of the robot's work, which may harm its production condition, thus avoiding the financial and economic loss of the institution that owns industrial investment.

Key words: industrial robots, preventive maintenance, axial and articulated parts, physico-chimiques and thermal tests.

# SOMMAIRE

# Table des matières

---

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux .....	ii
Liste des abréviations.....	iii
Résumé.....	iv
Introduction générale .....	1
<b>Chapitre01 : Généralité sur robot</b>	
1.Introduction :.....	2
2. Historique de l'évolution de la robotique et les robots : .....	2
2.1. Les masques et statues animés de l'antiquité : .....	3
2.2. L'horloge :.....	3
2.3. Des automates de l'orient aux jacquemarts européens :.....	3
2.4. Vers l'âge d'or des automates :.....	4
2.5. La première machine programmable : .....	5
2.6. L'ordinateur, potentielle intelligence du robot ?.....	6
2.7. Le premier bras télé-opéré :.....	6
3. Définition de robot : .....	7
3.1. Les trois lois de la robotique : .....	7
3.2. Le robot : .....	7
4. Les composants de Robots :.....	8
4.1. Manipulateur:.....	8
4.2. Effecteur finale: .....	8
4.3. Actionneurs:.....	9
4.4. Capteurs:.....	9
4.5. Contrôleur:.....	10
4.6. Processeur: .....	10

# Table des matières

---

4.7. Logiciel: .....	11
5. Les types des robots :.....	11
5.1. Les robots manipulateurs :.....	11
5.1.1. Les types des robots manipulateurs .....	12
5.2. Les robots mobiles : .....	14
5.2.1. L'architecture des robots mobiles : .....	15
5.2.2. Les robots à roues :.....	15
5.3. Comparaison des différents types .....	17
6. Domaine d'utilisation des robots :.....	18
6.1. Les robots industriels : .....	18
6.2. Robots domestiques ou ménagers : .....	18
6.3. Robots en médecine et chirurgie : .....	18
6.4. Le système chirurgical Da Vinci : .....	18
7. Avantages et inconvénients des robots :.....	20
8. Conclusion : .....	21

## Chapitre 02 : les robots industriels

1. Introduction :.....	22
2. Définition d'un robot industrielle :.....	22
3. Historique : .....	22
3.1. L'évolution industrielle de la robotique :.....	22
4. Programmation des robots industriels : .....	29
4.2. Programmation Hors Ligne : .....	29
4.3. Trois types de mouvement possibles : .....	29
4.4. Chaîne numérique pour la programmation des robots Génération de trajectoires complexes (position + orientation) : .....	31
5. Modélisation des robots industriels flexibles.....	31

# Table des matières

---

6. Les éléments constitutifs d'un robot industriel : .....	33
6.1. Unité informationnelle : .....	33
6.2. Unité opérationnelle : .....	33
6.3. La structure mécanique articulée : .....	33
7. Commande des axes (dans l'espace articulaire) : .....	35
7.1. Chaîne de commande d'un robot industriel : .....	35
8. Architecture des robots industrielle : .....	37
8.1. Vocabulaire : .....	37
9. Différents types des robots industriels : .....	39
9.1. Les robots SCARA : .....	39
9.2. Les robots cylindriques : .....	40
9.3. Les robots sphériques : .....	41
9.4. Les robots Cartésiens : .....	41
9.5. Les robots parallèles : .....	42
9.6. Les robots anthropomorphes : .....	43
10. Utilisation des robots industrielle : .....	44
10.1. Tâches simples : .....	44
10.2. Tâches complexes : .....	44
11. Critère de choix d'un robot industriel : .....	45
12. les rôles des robots industriels : .....	46
13. Conclusion : .....	46

## Chapitre 03 : la maintenance des robots industriels

1. Introduction : .....	47
2. Définition de la maintenance : .....	47
3. Les types de maintenance : .....	47
3.1. La maintenance corrective : .....	47

# Table des matières

---

3.2. La maintenance préventive :.....	47
4. schéma de maintenance : .....	48
5. Stratégie de maintenance :.....	49
6. La maintenance de robot industriel :.....	49
6.1. La définition de la maintenance robotique :.....	49
6.2. La maintenance corrective :.....	49
6.3. La maintenance préventive :.....	50
6.3.1. Marché mondial de la maintenance préventive des robots 2020-2026 ABB, FANUC, KUKA, SCOTT, Yaskawa Motoman : .....	51
6.3.2. exemple de maintenance préventive de robot FANUC: .....	52
7. Importance de la maintenance de robot industrielle :.....	54
8. La Relation entre la maintenance préventive et l'industrie mécanique:.....	54
9. les défauts impact sur la performance de robot industrielle : .....	54
9.1. Commande.....	54
9.2. Calibration .....	54
9.3. Jeu dans les liaisons : .....	54
9.4. Déformation des éléments :.....	55
9.5. Défauts déforme :.....	57
9.6. Les défauts de montage ou de positionnement :.....	57
10. Identification des défauts de l'axe2 : .....	57
11. L'effet des défauts pour le rendement de robot : .....	61
12. Conclusion : .....	62

## **Chapitre04 : la rentabilité de la maintenance préventive des pièces axiales et articulées sur la productivité**

1. Introduction :.....	63
2. les pièces axiales et articulées :.....	63
2.1. Précisons la notion d'articulation : .....	65

# Table des matières

---

2.2. robot 6 axes :.....	66
2.3. Avantages :.....	67
2.4. Intégration de robot à 6 axes :.....	67
2.5. le rôle de pièces axiales et articulées : .....	67
2.6. Importance au regarder de la rentabilité des robots industrielle :.....	68
3. Degré de libertés – architecture :.....	68
3.1. Positionnement d'un solide dans l'espace :.....	68
3.2. Liaison :.....	70
3.3. Mécanismes : .....	70
4. la méthodologie de fabrication de ces pièces :.....	72
4.1. fabrication par tournage : .....	72
I. Définitions de tournage : .....	72
II. pièces : .....	73
III. principales opérations d'usinage en tournage : .....	73
4.2. fabrication par fraisage :.....	73
I. Définitions de fraisage :.....	73
II. Pièces : .....	74
III. Principales opérations d'usinage en fraisage : .....	74
4.3. fabrication par moulage :.....	75
II. Types de moulage :.....	75
III. Principales opérations de moulage : .....	75
4.4. Fabrications par impression 3D : .....	76
I. Définitions d'impression 3D :.....	76
II. Fonctionnement d'une imprimante 3D :.....	77
4.5. Fabrication par frittage :.....	77
I. Définitions : .....	77
II. Le frittage laser :.....	78

# Table des matières

---

III. Fonctionne la technologie de frittage : .....	79
5. Etude théorique :... ..	80
6. propriétés mécanique et test réalisé pour des pièces dans le cadre de la résistance des matériaux : .....	80
6.1. Essai de traction pour la détermination de la résistance à la traction et de l'allongement de rupture : .....	81
6.2. Essai de compression pour la détermination des courbes de fluage : .....	82
6.3. Essais de flexion pour l'étude du comportement de déformation : .....	84
6.4. Essai de torsion pour l'étude du comportement plastique des matériaux : .....	85
6.5. Essai de cisaillement pour l'étude de la capacité de charge contre le cisaillement : .....	87
7. expériences de dureté (vicker, rockwell, brinell) : .....	88
7.1. la dureté : .....	88
7.2. Principe de l'essai de dureté Brinell : .....	88
7.3. Principe de l'essai de dureté Vickers : .....	89
7.4. Principe de l'essai de dureté Rockwell : .....	90
8. Les traitements thermiques : .....	90
8.1. Définition : .....	90
8.2. Chauffage des pièces : .....	91
8.3. Gammes des traitements thermiques de l'acier : .....	92
□ Le recuit : .....	93
□ La trempe : .....	94
□ Le revenu : .....	94
8.4. Etalonnage des fours : .....	95
8.5. Exécution des traitements thermiques : .....	95
9. le but de ces expériences : .....	96
10. Quelques des métaux proposés : .....	97
11. problème résultant d'un manque de respect à l'égard la maintenance préventive : .....	98

# Table des matières

---

12. objective de maintenance préventive :.....	99
13. le plan d'entretien proposé :.....	99
14. Conclusion .....	100
Conclusion générale.....	102
Bibliographie.....	A
Annexe.....	a

# Liste des figures

---

## Liste des figures

### Chapitre01 :

Figure 1.1 : L'horloge de Ctésibios.....	3
Figure 1.2 : L'automate d'Al Jazari .....	4
Figure 1.3 : Le canard développé par Jacques de Vaucanson .....	4
Figure 1.4 : Machine à tisser.....	5
Figure 1.5 : Le premier ordinateur .....	6
Figure 1.6 : Les différents types des robots.....	8
Figure 1.7 : Un bras manipulateur.....	8
Figure 1.8 : Effecteur finale d'un manipulateur.....	9
Figure1.9 : Différents actionneurs d'un robot .....	9
Figure 1.10 : Différents capteurs d'un robot.....	10
Figure 1.11 : Un contrôleur utiliser pur commander un robot.....	10
Figure1.12 : Le logiciel qui commande le robot.....	11
Figure 1.13 : L'espace de travail de robot cylindrique.....	12
Figure 1.14 : L'espace de travail de robot rectiligne.....	12
Figure 1.15 : L'espace de travail de robot sphérique .....	13
Figure 1.16 : L'espace de travail de robot articulé.....	14
Figure 1.17 : L'espace de travail de robot SCARA .....	14
Figure 1.18 : Architecture d'un robot mobile .....	15
Figure1.19 : Robot de type unicycle .....	16
Figure1.20 : Robot de type tricycle.....	16
Figure1.21 : Robot de type voiture.....	17
Figure1.22 : Robot de type omnidirectionnel .....	17
Figure 1.23 : Robot chirurgical Da Vinci .....	18
Figure 1.24 : Robot infirmier RIBA.....	19

## Liste des figures

---

Figure 1.25 : Robot patient Hanako Showa.....20

### Chapitre02 :

Figure 2.1 : Film de Charlie Chaplin "Modern Times" .....23

Figure 2.2 : Les premiers robots industriels .....23

Figure 2.3 : Les robots industriels développés entre 1973 et 1974.....24

Figure 2.4 : Les robots industriels RE15 et Nachi .....25

Figure 2.5 : Le développement de la robotique entre 1981 et 1984.....25

Figure 2.6 : Les robots industriels KuKa, Delta et FlexPicker .....26

Figure 2.7 : Les robots industriels RoboLoop, NX100 et l'interface de communication  
WiTP.....27

Figure 2.8 : Les robots industriels LVC, LWR et KR AGILUS.....27

Figure 2.9 : Les robots industriels vendus entre 1998 et 2017 .....28

Figure2.10 : point to point .....30

Figure2.11 : LIN.....30

Figure2.12 : CIRC (Circulaire) .....31

Figure2.13 : Chaîne numérique pour la programmation .....31

Figure 2.14 : Structure fonctionnelle d'un robot.....33

Figure2.15 : Structure sériel.....34

Figure 2.16 : Structure fermée. ....35

Figure 2.17 : chaîne de commande d'un robot industriel. ....36

Figure 2.18 : Commande individuelle des axes. ....37

Figure 2.19 : Représentation d'une articulation rotoïde.....37

Figure 2.20 : Représentation d'une articulation prismatique.....38

Figure 2.21 : Architecture des robots. ....39

Figure 2.22 : Schéma de Les robots SCARA. ....39

## Liste des figures

---

Figure 2.23 : Le robot sankyo.....	40
Figure 2.24 : Le robot cylindrique. ....	40
Figure 2.25 : Robot Seiko.....	40
Figure 2.26 : Le robot sphérique.....	41
Figure 2.27 : Robot FANUC.....	41
Figure 2.28 : Robot Cartésien. ....	42
Figure 1.29 : Le robot Toshiba.....	42
Figure 2.30 : Robot FESTO.....	42
Figure 2.31 : Robot anthropomorphe. ....	43
Figure 2.32 : Robot FANUC.....	43
Figure 2.33 : Robot ABB.....	43
Figure 2.34 : Robot soudeurs à l'arc.....	44
Figure 2.35 : Robot soudeurs Par points.. ....	44
Figure 2.36: Robot pompiste. ....	45
Figure 2.37: Robot de construction. ....	45

### Chapitre03 :

Figure3-1 : les types de maintenance .....	48
Figure3.2 : robot FANUC.....	52
Figure3.3 : Jeu dans les liaisons.....	55
Figure3.4 : La précision du robot dans l'identification de la cible .....	55
Figure3.5 : Quelques erreurs et leurs sources. ....	56
Figure3.6 : Système de compensation de gravité par ressorts. ....	58
Figure3.7 : Configuration du robot pour l'identification des défauts de l'axe2. ....	58
Figure3.8 : L'erreur de position de l'axe2. ....	59
Figure3.9 : Les couples appliqués sur l'axe2. ....	59
Figure3.10 : L'erreur de position de l'axe2. ....	60

## Liste des figures

---

Figure3.11 : Défaut de transmission du mouvement de l'axe2. ....	60
Figure3.12 : Une signature typique de l'erreur d'un réducteur de type Harmonic Drive. ....	61
Figure3.13 : La composante principale du défaut de transmission de mouvement. ....	61

### Chapitre04 :

Figure4.1 : roulement axiale. ....	63
Figure4.2 : pièces axiale de robot industriel. ....	64
Figure4.3 : pièces articulée. ....	64
Figure 4.4 : Articulation prismatique et Articulation rotoïde. ....	65
Figure4.5 : robot industrielle 6 axis. ....	67
Figure4.6 : Positionnement d'un solide dans l'espace. ....	68
Figure 4.7 : d'orientation d'un repère. ....	69
Figure4.8 : Fabrication par tournage. ....	72
Figure4.9 : transfert de pièces par tournage. ....	73
Figure4.10 : principe de tournage. ....	73
Figure4.11 : fraisage. ....	74
Figure4.12 : transfert de pièces par fraisage. ....	74
Figure4.13 : principe de fraisage. ....	74
Figure4.14 : principe de moulage. ....	75
Figure4.15 : impression 3D. ....	76
Figure4.16 : principe de fonctionnement d'une imprimante 3D. ....	77
Figure4.17 : frittage laser. ....	78
Figure4.18 : frittage laser. ....	79
Figure4.19 : essai de traction classique. ....	81
Figure4.20 : Diagramme contrainte-déformation. ....	81
Figure4.21 : une courbe caractéristique de déformation et de contrainte. ....	82
Figure4.22 : essai de compression. ....	83
Figure4.23 : Diagramme contrainte-écrasement. ....	83
Figure4.24 : une courbe caractéristique d'écrasement et de contrainte. ....	84
Figure4.25 : Procédure de l'essai de flexion à trois points. ....	85
Figure4.26: Contrainte en flexion avec courbe des forces transversales et du moment de flexion. ....	85
Figure4.27 : essai de torsion. ....	86

## Liste des figures

---

Figure4.28 : Procédure de l'essai de torsion.....	86
Figure4.29 : Procédure de l'essai de cisaillement à double section. ....	87
Figure4.30 : Procédure d'essai et mesure optique de l'empreinte laissée. ....	89
Figure4.31 : Procédure d'essai et mesure optique de l'empreinte laissée. ....	89
Figure4.32 : Procédure d'essai et mesure de la profondeur de pénétration. ....	90
Figure4.33: la courbe de chauffage.....	92
Figure4.34 : le cycle thermique d'un recuit.....	93
Figure4.35 : le cycle de revenu.....	94
Figure4.36 : étalonnage du four à 850°C. ....	95
Figure4.37 : photos du four des traitements thermiques. ....	96

# Liste des tableaux

---

## Liste des tableaux

Tableau 1.1: Les avantages et des inconvénients des différents types de robots à roues .....	18
Tableau 2.1: Les plus gros marchés mondiaux .....	29
Tableau 4.1: la notion de degré de liberté et articulation.....	66
Tableau 4.2: Classification des traitements thermiques.....	91
Tableau 4.3 : présente la maintenance préventive et les matériaux suggérés pour la fabrication.....	100

# Liste des abréviations

---

## Liste des abréviations

**HLA** : Hybride Assistée Limbe.

**FAO** : Fabrication Assistée par Ordinateur.

**CFAO** : Conception et fabrication assistée par ordinateur.

**PTP** : Point to point.

**LIN** : Linéaire.

**CIRC** : Circulaire.

**SMA** : Structure Mécanique Articule.

**SCAR**: Sélective Cmpliance Articulated Robot for assembly.

**DDL** : Degré De Liberté.

**CAN** : Les Convertisseurs Analogiques Numériques.

**CNA** : Les Convertisseurs Numériques Analogiques.

**PLA** : Poly Lactique L'acide.

**ABS** : Acrylonitrile Butctieme Styrène.

**DMLS** : Frittage Laser Direct de Métal.

**SLA** : Stereotithographie : Impression 3D par photopolymeryation.

Introduction générale

## **Introduction Général**

Grâce au développement des technologies d'intelligence artificielle et aux avancées technologiques.

Les robots font également partie intégrante de la vie humaine en raison de leur contribution à de nombreux domaines de la vie, notamment médicaux, industriels et militaires.

Les robots les plus fréquemment utilisés aujourd'hui sont des robots industriels pour leur contribution à la production et pour jouer des rôles difficiles et dangereux que les humains ne peuvent pas remplir.

Cependant, ce dernier est exposé à plusieurs problèmes pouvant affecter ses performances, ce qui conduit à l'arrêt de la production pour cela. Il est impératif d'intervenir et de mettre en œuvre une maintenance préventive pour éviter la dégradation des performances du robot et préserver ses pièces.

Par conséquent, notre étude s'est concentrée sur la maintenance préventive, les pièces les plus vulnérables aux dysfonctionnements, que sont les pièces axiales et articulées.

Cette étude est composée quatre chapitre le Premier chapitre que représentera des généralités sur les robots leurs domaines d'utilisation et leurs différents types.

Le deuxième chapitre nous donnerons une description technique su robot industrielle, ainsi le concept de la marche robotique et l'état de l'art sur la modélisation et programmation de robot industrielle

Le troisième chapitre consacré généralité de la maintenance et détaillant la maintenance de robot industrielle est leur types de défaut.et le quatrième chapitre étude technique des pièces articulées et axiales et la méthode de fabrication du ces pièces, et l'exaction la maintenance préventive dessus.

# **Chapitre 01 : Généralités sur les robots**

## Chapitre 1 :

### Généralités sur les robots

#### 1. Introduction

##### **D'après l'association Française de Normalisation (AFNOR)**

« Un robot est un manipulateur commandé en position, reprogrammable, polyvalent, à plusieurs degrés de libertés, capable de manipuler des matériaux, des pièces, des outils et des dispositifs spécialisés, au cours du 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.

La relation entre l'homme et le robot, l'homme crée des robots de plus en plus évolués et autonomes pour se soulager des tâches fastidieuses, répétitives ou dangereuses, la robotique a besoin de structures mécaniques et électriques, et d'une variété de capteurs, il doit imiter les cinq sens humains

Dans ce premier chapitre, nous commençons par quelques définitions de base. Ensuite, nous présentons les composants technologiques du robot ainsi que la classification des robots et les domaines d'utilisation Enfin, nous donnons une conclusion complète sur le robot.

#### 2. Historique de l'évolution de la robotique et les robots

Durant plusieurs millénaires, les automates ont reposé sur des ressorts, engrenages et autres mécanismes, ce qui ne les a pas empêchés d'atteindre une grâce qui force l'admiration. Et puis l'informatique est venue changer la donne en permettant de stocker de très larges quantités d'informations et de séquences d'actions dans une petite puce. Le robot est ainsi arrivé à une sophistication telle qu'il peut désormais tenter de trouver par lui-même la solution de certains problèmes. [1]

L'histoire des robots a ainsi traversé les étapes suivantes :

### **2.1. Les masques et statues animés de l'antiquité**

L'origine des masques et statues animés remonte à l'Égypte ancienne où l'on a recensé un masque à l'effigie de Thot (tête d'Ibis) ou d'Horus (tête de faucon) qui pareillement semblent doués de mouvement. Ce qui caractérise ces divers artefacts, c'est que l'automatisme y est caché, mis à profit par des castes religieuses pour assurer leur pouvoir sur le peuple comme sur les souverains. [1]

### **2.2. L'horloge**

C'est en 246 avant J.C. que nous trouvons la trace du premier inventeur d'envergure, un dénommé Ctésibios qui habite la ville d'Alexandrie. Ctésibios est parvenu à créer une horloge si précise que son cadran fait exactement un tour par année solaire ! Pour la première fois, il existe une parfaite concordance entre un instrument de mesure humain et un phénomène issu du monde physique extérieur. [1]

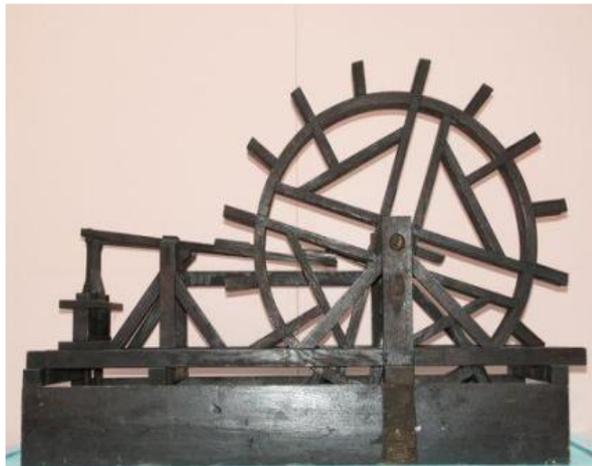


Figure 1.1 L'horloge de Ctésibios

### **2.3. Des automates de l'orient aux jacquemarts européens**

Les arabes sont les premiers à mettre en pratique à une grande échelle les techniques décrites par le mathématicien et mécanicien grec Héron d'Alexandrie (et aussi par Phyllo de Byzance). Dès 809, Charlemagne reçoit de la part du sultan Haroun Al Rachid un automate mécanique. [1]

Puis, lors des huit expéditions en Orient menées à l'occasion des Croisades - de 1096 à 1291 - les européens découvrent de visu l'étonnant raffinement des horloges à eau réalisées par Al Jazari pour le compte de ce même Haroun Al Rachid.

Pour obtenir un écoulement constant de l'eau, Al Jazari a développé un système d'une rare ingéniosité, inspiré d'un système inventé par Archimède. La plus grande de ses horloges mesure 3,3 mètres de hauteur et 1,35 mètre de largeur. [1]

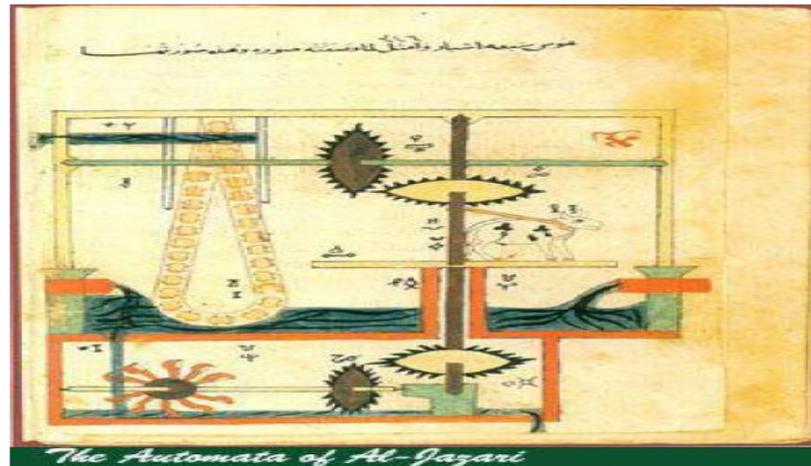


Figure 1.2 L'automate d'Al Jazari

## 2.4. Vers l'âge d'or des automates

Le 18ème siècle apparaît comme l'âge d'or des automates. L'un des grands inventeurs d'engins mécaniques de l'époque est le protégé du roi Louis XV, Jacques de Vaucanson (1709 - 1792). Il développe un " canard mécanique " qui force l'admiration. Celui-ci " allonge le cou pour aller prendre le grain dans la main, l'aval, le digère " Après avoir transformé l'aliment en bouillie, il le rejette par les voies ordinaires, pleinement digéré. Les créations que réalise Vaucanson tel le joueur de flûte qui exécute onze airs différents et aussi celle de ses disciples séduisent l'Europe entière et s'exportent aux Etats-Unis. [1]

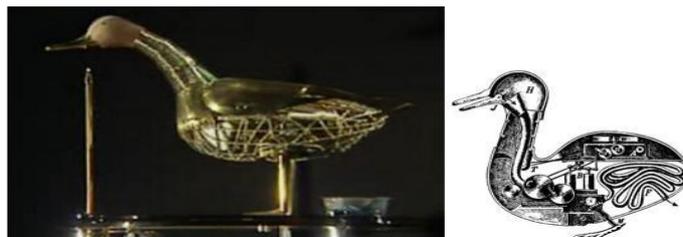


Figure 1.3 Le canard développé par Jacques de Vaucanson

## 2.5. La première machine programmable

La mode veut que l'on s'habille à la chinoise, avec des tenues de soie bardées de motifs complexes. Pour les tisserands lyonnais, la réalisation de telles étoffes représente un casse-tête de taille.

Basile Bouchon se penche sur le problème, et il a réussi de développer une machine à tisser dont son mécanisme utilise une bande de papier perforé pour contrôler le passage des aiguilles dans le tissu. Ce procédé mis au point en 1729 est automatisé par Vaucanson en 1745.

Le tisserand Joseph-Marie Jacquard a ensuite l'idée de séparer les cartes perforées portant le modèle à réaliser, de la machine elle-même.

Produit en milliers d'exemplaires, le métier à tisser Jacquard qu'il inaugure en 1801 devient la première machine automatisant le traitement de l'information et opérant une distinction entre la machine et le programme qu'elle utilise. Il ouvre ainsi la voie aux ordinateurs et robots capables d'opérer par eux-mêmes. [1]



Figure 1.4 : Machine à tisser

## 2.6. L'ordinateur, potentielle intelligence du robot ?

Niels Bohr a décrit dans ses travaux publiés vers 1913 que l'électron peut déplacer d'un atome à l'autre une vitesse vertigineuse. D'où l'idée de créer des circuits exploitant cette incroyable mobilité. En 1937, Turing énonce les principes d'une machine qui calculerait à la vitesse de l'électronique, et serait donc capable de traiter d'énormes volumes d'informations codées sous la forme booléenne (0 et 1). L'arrivée des ordinateurs est appelée à jouer un rôle majeur dans l'élaboration des machines intelligentes que sont les robots.

Sous l'impulsion de Turing, un premier ordinateur apparaît en 1943. Sa puissance de calcul est mise à contribution dans la guerre et joue un rôle décisif en facilitant le décryptage du code Enigma mis au point par les nazis pour leurs échanges de messages. [1]

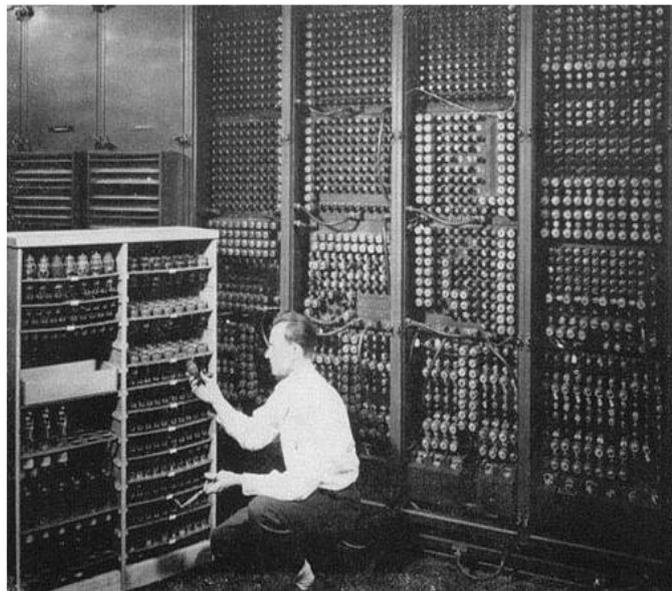


Figure 1.5 : Le premier ordinateur

## 2.7. Le premier bras télé-opéré

C'est en Lorraine en 1954, à Argonne qu'un chercheur du nom de Raymond Goertz a l'idée de rationaliser les bras de télé-opération en assujettissant leurs articulations à des moteurs électriques. Grâce à un tel système, l'opérateur peut désormais se trouver à plusieurs centaines de mètres du lieu

Où il manipule des éléments dangereux : les commandes qu'il transmet à la pince sont transmises par les fils électriques. [1]

### 3. Définition

Écrivain tchèque, Karel Capek, dans son drame, introduit le mot robot au monde en 1921. Il est dérivé du mot tchèque robota qui signifie "travailleur forcé". Isaac Asimov l'écrivain russe de la science-fiction, a inventé le mot robotique dans son histoire "Habillage", publié en 1942, pour désigner la science consacrée à l'étude des robots. [2]

Avant définir qu'est-ce qu'un robot nous citerons les trois lois qui ont été développés par Isaac Asimov, et qui sont régissant le comportement d'un robot

#### 3.1. Les trois lois de la robotique

- Un robot ne peut blesser un humain ni, par son inaction, permettre qu'un humain soit blessé.
- Un robot doit obéir aux ordres donnés par les humains, sauf si de tels ordres se trouvent en contradiction avec la première loi.
- Un robot doit protéger sa propre existence aussi longtemps qu'une telle protection n'est pas en contradiction ni avec la première et/ou ni avec la deuxième loi. [3]

#### 3.2. Le robot

C'est une machine pouvant manipuler des objets en réalisant des mouvements variés dictés par un programme aisément modifiable.

Programmer un robot consiste, dans un premier temps, à lui spécifier la séquence des mouvements qu'il devra réaliser.

Certains robots sont dotés de "sens" ; c'est-à-dire d'un ensemble plus ou moins important d'instruments de mesure et d'appréciation (caméra, thermomètre, télémètre, ...) permettant au programme du robot de décider du mouvement le mieux adapté aux conditions extérieures. Par exemple: si un robot mobile muni d'une caméra ut amené à se déplacer dans un local inconnu, on peut le programmer pour qu'il contourne tout obstacle qui entraverait sa route.

On essaie également de doter des robots d'un dispositif d'intelligence artificielle afin qu'ils puissent faire face à des situations imprévues et nouvelles (le robot pourrait acquérir une certaine "expérience").



Figure 1.6 : Les différents types des robots

#### 4. Les composants de Robots

Un robot, en tant que système, se compose des éléments, qui sont intégrés ensemble pour former un ensemble. La plus par des robots contient les éléments suivants:

**4.1. Manipulateur:** c'est le corps principal du robot qui comprend les jonctions, les articulations, et d'autres éléments de structure du robot. Il convient de noter ici que le manipulateur seul n'est pas un robot. [8]

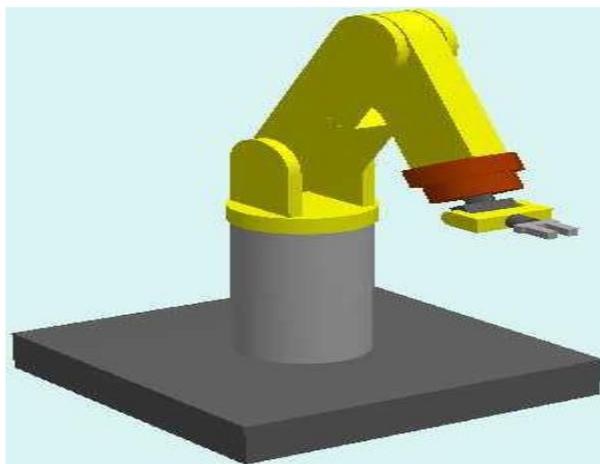


Figure 1.7 : Un bras manipulateur

**4.2. Effecteur finale :** cette partie est reliée à la dernière jonction (main) d'un manipulateur qui gère généralement les objets, établit des connexions à d'autres machines ou effectue les tâches requises. [8]

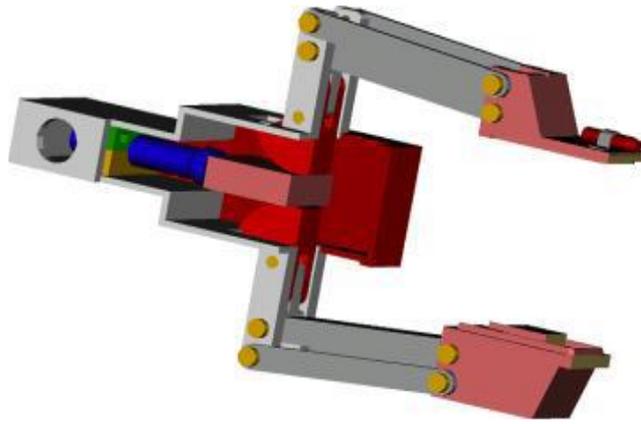


Figure 1.8 : Effecteur finale d'un manipulateur

**4.3. Actionneurs** : les actionneurs sont les «muscles» de manipulateurs. Le contrôleur envoie des signaux aux actionneurs, qui, à son tour, déplacent les articulations du robot et des jonctions, les types communs des actionneurs sont les servomoteurs, les moteurs pas à pas, les actionneurs pneumatiques et les vérins hydrauliques. Les actionneurs sont sous le contrôle du contrôleur. [8]



Figure1.9 : Différents actionneurs d'un robot

**4.4. Capteurs** : les capteurs sont utilisés pour recueillir des informations sur l'état interne du robot ou pour communiquer avec l'environnement extérieur. Comme chez l'humain, le dispositif de commande de robot doit connaître l'emplacement de chaque lien du robot afin de connaître la configuration du robot. Toujours comme vos principaux sens de la vue, le toucher, l'ouïe, le goût, et

La parole, les robots sont équipés de dispositifs sensoriels externes comme un système de vision, le toucher et les capteurs tactiles, synthétiseur de parole, et grâce à eux le robot peut communiquer avec le monde extérieur. [8]

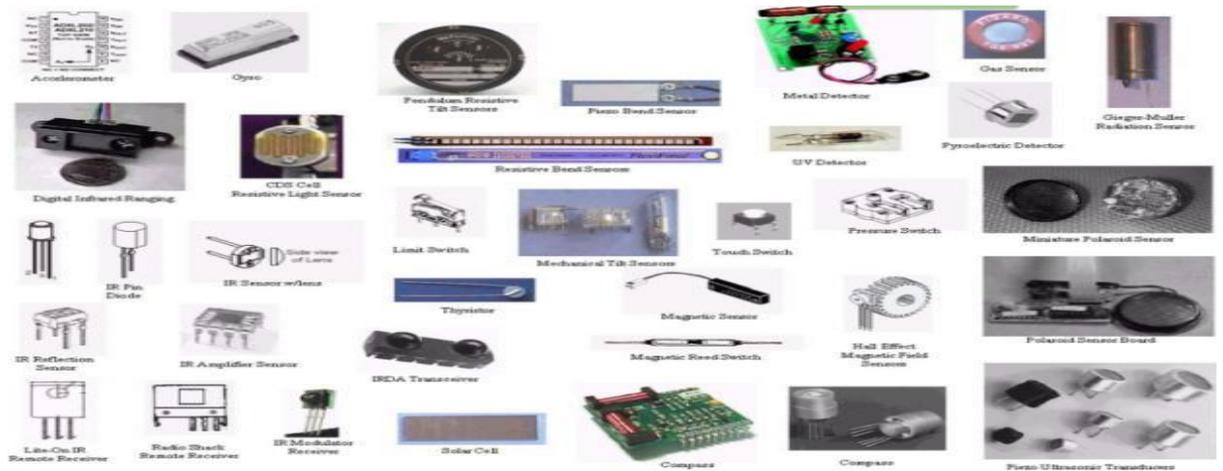


Figure 1.10 : Différents capteurs d'un robot

**4.5. Contrôleur** : le contrôleur est plutôt proche de votre cerveau; même si elle n'a pas la puissance du cerveau; il contrôle toujours vos mouvements. Le contrôleur reçoit les données de l'ordinateur (le cerveau du système), commande les mouvements des actionneurs, et coordonne les mouvements avec les informations envoyées par les capteurs.

**4.6. Processeur** : le processeur est le cerveau du robot. Il calcule les mouvements des articulations du robot, détermine combien et à quelle vitesse chaque joint doit se déplacer pour atteindre l'emplacement et la vitesse souhaitée, et supervise les actions coordonnées du contrôleur et les capteurs. Dans certains systèmes, le contrôleur et le processeur sont intégrés ensemble en une seule unité, et dans d'autres cas, ce sont des unités séparées. [8]

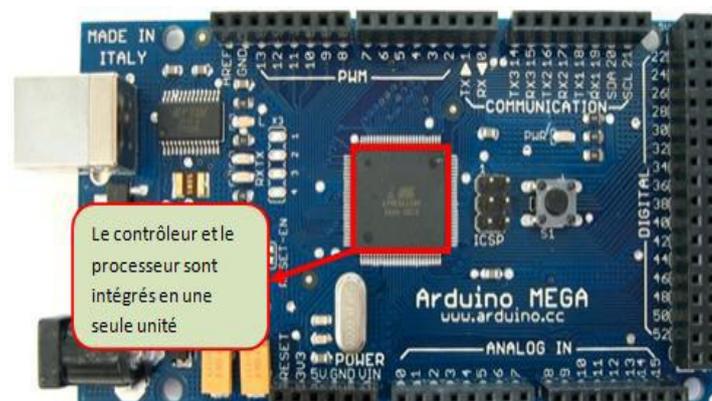


Figure 1.11 : Un contrôleur utilisé pour commander un robot

**4.7. Logiciel :** trois groupes de logiciels sont utilisés dans un robot. L'un est le système d'exploitation qui exploite le processeur. Le second est le logiciel robotique qui calcule la motion nécessaire de chaque joint du robot basée sur des équations cinématiques. Ces informations sont envoyées au dispositif de commande. Ce logiciel peut être à différents niveaux, de la langue de la machine aux langues sophistiqués utilisés par les robots modernes. Les troisième groupes est la collection d'application - orientée les routines et les programmes développés pour utiliser le robot ou ses périphériques pour des tâches spécifiques telles que l'assemblage, le chargement de machines, la manutention et les routines de vision. [8]

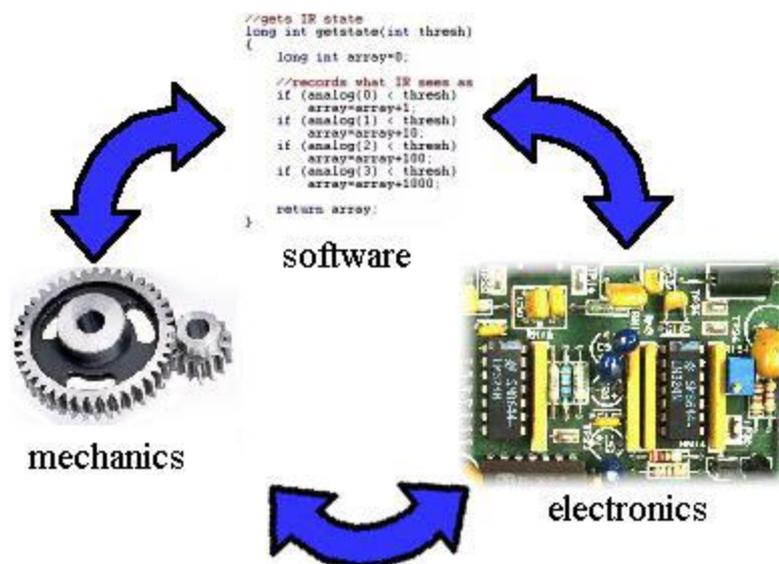


Figure1.12 : Le logiciel qui commande le robot

## 5. Les types des robots

Il existe deux grandes familles de robots sont :

- Les robots manipulateurs.
- Les robots mobiles.

### 5.1. Les robots manipulateurs

Un robot manipulateur est en forme d'un bras et se compose d'un certain nombre de segments qui est conçu pour manipuler ou déplacer des matériaux, outils et pièces sans contact humain direct. Ils sont des dispositifs qui permettent aux humains d'interagir avec des objets dans un environnement en toute sécurité. Les robots

manipulateurs sont utilisés dans des applications industrielles pour s'effectuer efficacement des tâches telles que l'assemblage, soudage, traitement de surface, et le forage.

### 5.1.1. Les types des robots manipulateurs

Les robots manipulateurs viennent sous plusieurs formes. Les formes se répartissent en en cinq grandes catégories :

- Robots cylindriques
- Robots rectilignes
- Robots sphériques
- Robots articulés
- Robots SCARA

#### a) Robots cylindriques

Le robot cylindrique a deux axes de mouvement, un pour le mouvement en haut et bas. La rotation se fait par la jonction à la base. De plus, le bras horizontal peut se déplacer à l'intérieur et à l'extérieur, ce qui donne un troisième axe de mouvement limitée. [6]

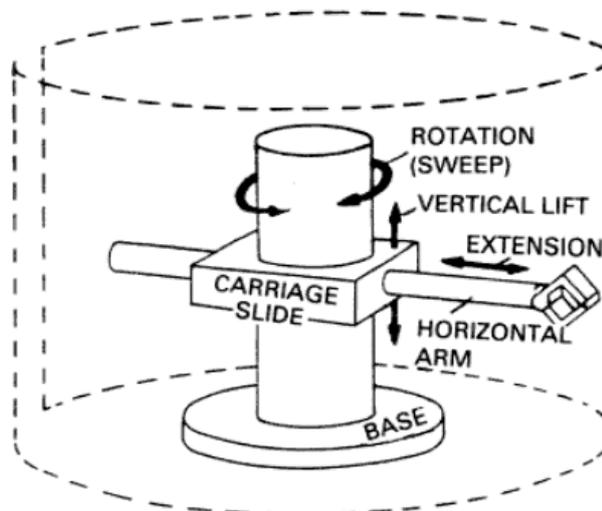


Figure 1.13 : L'espace de travail de robot cylindrique

### b) Robots rectilignes

Les robots rectilignes a trois axes de mouvement (x, y, z). Pour cette raison, le robot rectiligne est parfois appelé Robot cartésien. Ces robots sont exploités par vérin pneumatique. [6]

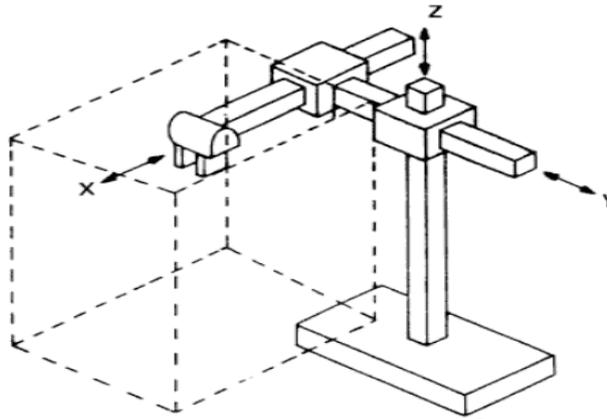


Figure 1.14 : L'espace de travail de robot rectiligne

### c) Robots sphériques

Le robot sphérique est de grande taille avec un bras télescopique qui assure un mouvement à l'intérieur ou à l'extérieur. Les mouvements de base du robot sphérique sont de rotation (à la base) et angulairement en haut ou en bas (sur le bras). [6]

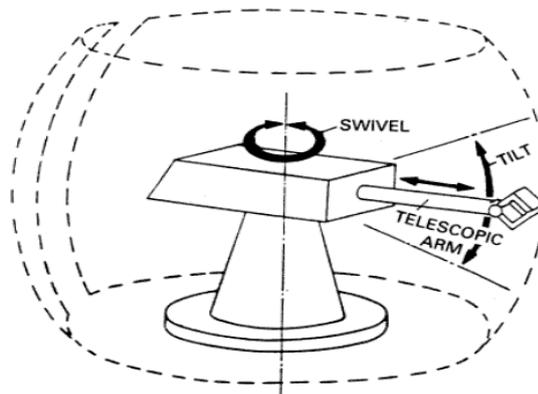


Figure 1.15 : L'espace de travail de robot sphérique

### d) Robots articulés

Le bras articulé du robot ressemble à un bras humain. Il se compose de deux éléments, nommés l'avant-bras et le bras supérieur. Ce type de robot n'a généralement pas besoin d'un lieu séparé. [7]

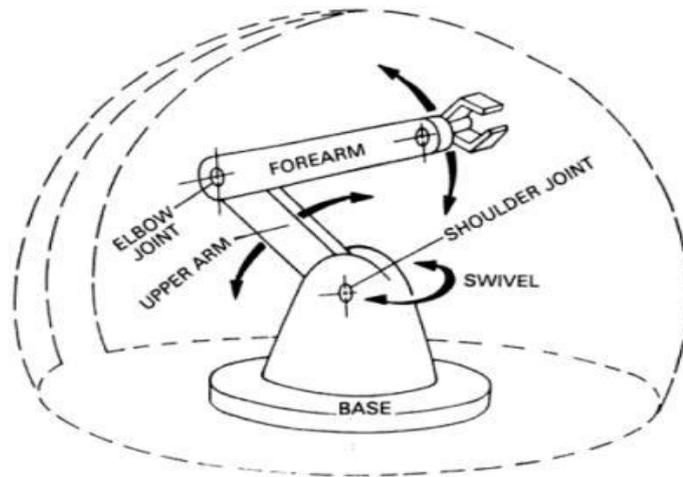


Figure 1.16 : L'espace de travail de robot articulé

### e) Robots SCARA

Un robot SCARA est défini dans la norme ISO 8373: 1994, No.3.15.6, en tant que «robot comporte deux liaisons pivots parallèles pour fournir conformément à un plan sélectionné».et peut être considérée comme un cas particulier d'un robot cylindrique. Le terme «SCARA» signifie «Sélective Compliance Arm for Robot Assembly». (Autre interprétation comprennent «Sélective Compliance Articulated for Robot Assembly»). [5]

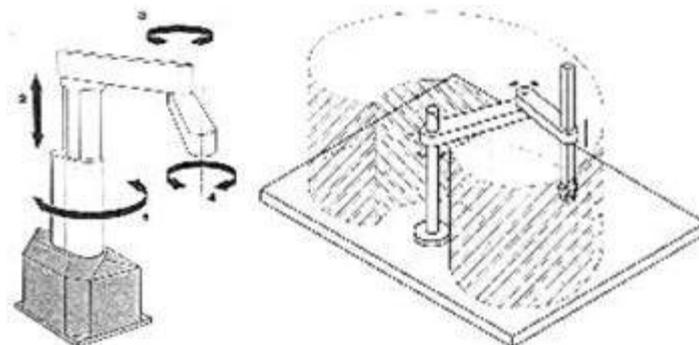


Figure 1.17 : L'espace de travail de robot SCARA

## 5.2. Les robots mobiles

Un robot mobile est celui qui peut se déplacer dans son environnement de façon indépendante. Pour ce faire, le robot doit pouvoir naviguer, et la portée et la précision de navigation requise varie en fonction de la taille du robot et du type de sa tâche.

### 5.2.1. L'architecture des robots mobiles

L'architecture des robots mobiles se structure en quatre éléments :

- La structure mécanique et la motricité
- Les organes de sécurité
- Le système de traitement des informations et gestion des tâches.
- Le système de localisation.

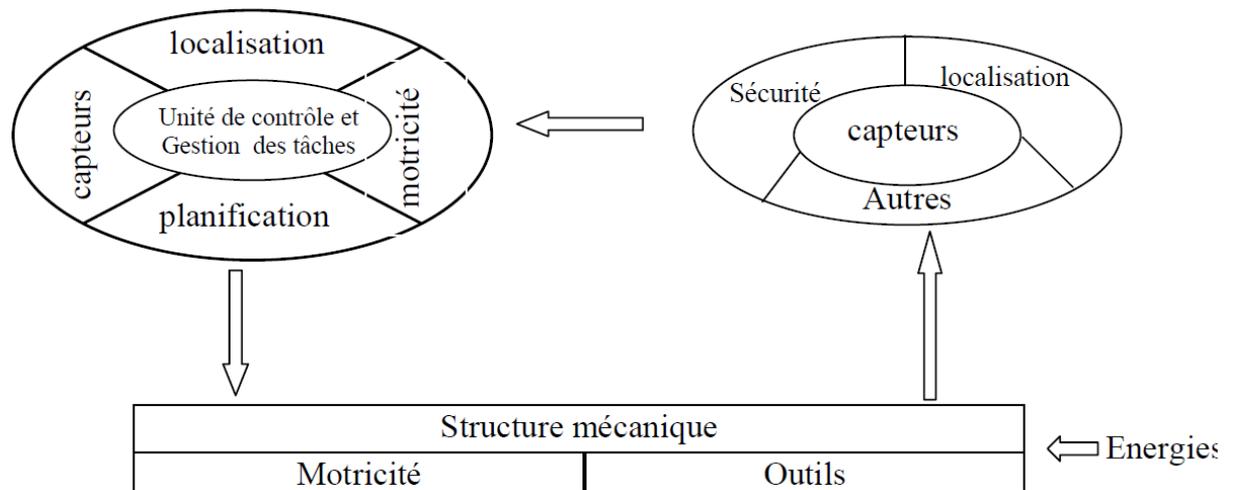


Figure 1.18 : Architecture d'un robot mobile

### 5.2.2. Les robots à roues

Il existe plusieurs classes de robots à roues déterminées, principalement, par la position et le nombre de roues utilisées.

Nous citerons ici les quatre classes principales de robots à roues.

#### a) Robot unicycle

Un robot de type unicycle est actionné par deux roues indépendantes, il possède éventuellement des roues folles pour assurer sa stabilité. Son centre de rotation est situé sur l'axe reliant les deux roues motrices.

C'est un robot non-holonome, en effet il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues de locomotion.

Sa commande peut être très simple, il est en effet assez facile de le déplacer d'un point à un autre par une suite de rotations simples et de lignes droites. [4]

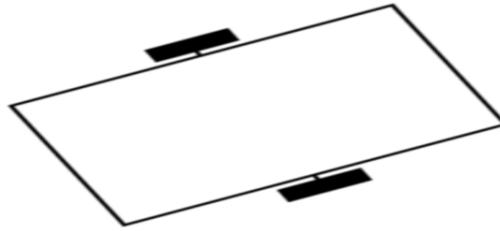


Figure1.19 : Robot de type unicycle

### b) Robot tricycle

Un robot de type tricycle est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et d'une roue centrée orientable placée sur l'axe longitudinal. Le mouvement du robot est donné par la vitesse des deux roues fixes et par l'orientation de la roue orientable. Son centre de rotation est situé à l'intersection de l'axe contenant les roues fixes et de l'axe de la roue orientable.

C'est un robot non-holonome. En effet, il est impossible de le déplacer dans une direction perpendiculaire aux roues fixes. Sa commande est plus compliquée. Il est en général impossible d'effectuer des rotations simples à cause d'un rayon de braquage limité de la roue orientable. [4]

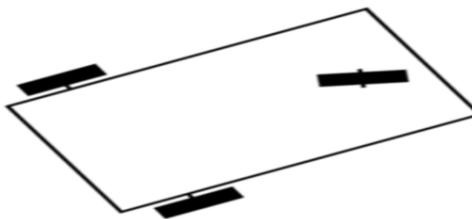


Figure1.20 : Robot de type tricycle

### c) Robot voiture

Un robot de type voiture est semblable au tricycle, il est constitué de deux roues fixes placées sur un même axe et de deux roues centrées orientables placées elles aussi sur un même axe.

Le robot de type voiture est cependant plus stable puisqu'il possède un point d'appui supplémentaire.

Toutes les autres propriétés du robot voiture sont identiques au robot tricycle, le deuxième pouvant être ramené au premier en remplaçant les deux roues avant par une seule placée au centre de l'axe, et ceci de manière à laisser le centre de rotation inchangé. [4]

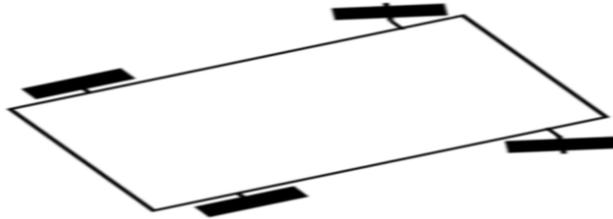


Figure1.21 : Robot de type voiture

#### d) Robot omnidirectionnel

Un robot omnidirectionnel est un robot qui peut se déplacer librement dans toutes les directions. Il est en général constitué de trois roues décentrées orientables placées en triangle équilatéral.

L'énorme avantage du robot omnidirectionnel est qu'il est holonome puisqu'il peut se déplacer dans toutes les directions. Mais ceci se fait au dépend d'une complexité mécanique bien plus grande. [4]

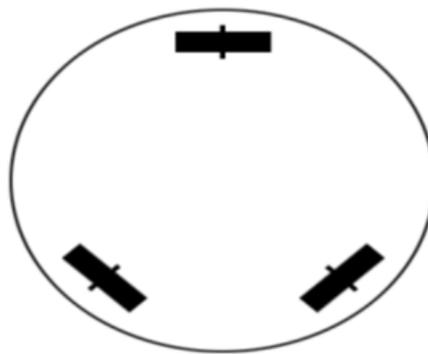


Figure1.22 : Robot de type omnidirectionnel

### 5.3 : Comparaison des différents types

Nous pouvons observer dans le tableau ci-dessous un récapitulatif des avantages et des inconvénients des différents types de robots à roues

Type du robot	Avantage	Inconvénient
unicycle	* Stable * Rotation sur soi-même * Complexité mécanique faible	* Non-holonome
Tricycle	* Complexité mécanique modérée	* Non-holonome * Peu stable * Pas de rotation sur soi-même
Voiture	* Stable * Complexité mécanique modérée	* Non-holonome * Pas de rotation sur soi-même
Omnidirectionnel	* Holonome * Stable * Rotation sur soi-même	* Complexité mécanique importante

Tableau 1.1 Les avantages et des inconvénients des différents types de robots à roues

## 6. Domaine d'utilisation des robots

**6.1. Les robots industriels :** robots industriels sont des robots utilisés dans un environnement de fabrication industrielle. Ils sont utilisés dans la fabrication des automobiles, des composants et des pièces électroniques, des médicaments et de nombreux produits

**6.2. Robots domestiques ou ménagers :** Robots utilisés à la maison. Ce type de robots comprend de nombreux appareils très différents, tels que les aspirateurs robotiques, robots nettoyeurs de piscines, balayuses, nettoyeurs gouttières et autres robots qui peuvent faire différentes tâches. En outre, certains robots de surveillance et de télé présence pouvaient être considérées comme des robots ménagers se il est utilisé dans cet environnement.

**6.3. Robots en médecine et chirurgie :** Les robots semblent avoir de l'avenir à l'hôpital. Robodoc aide à réaliser certaines opérations de chirurgie. Le robot infirmier est encore en projet. Le cyber squelette HAL aide les personnes à se déplacer. Et le robot patient permet aux futurs chirurgiens-dentistes d'apprendre à soigner sans faire de dégâts...

**6.4. Le système chirurgical Da Vinci :** Le robot chirurgical permet d'opérer à distance, soit dans la même pièce avec une machine comme intermédiaire, soit d'un endroit très éloigné, ce qui peut être très utile souvent.



Figure 1.23 : Robot chirurgical Da Vinci

Les infirmiers du futur : Les infirmiers qui portent et déplacent les malades seront des robots. En fait, ils ne sont pas prévus pour un avenir si lointain: ils fonctionnent déjà!

Le robot infirmier peut prendre un patient dans ses bras, le porter et le déposer dans un fauteuil.

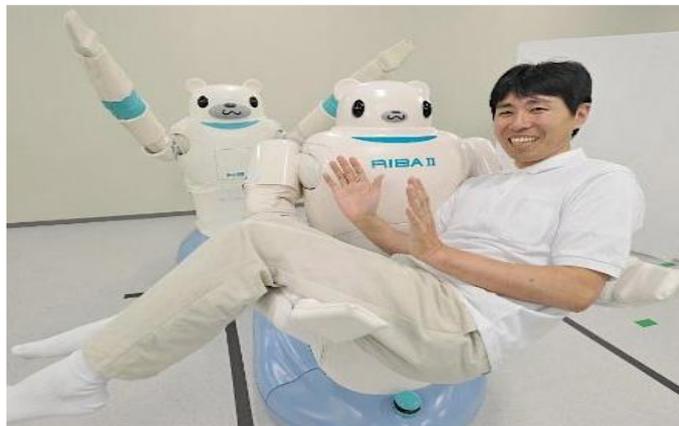


Figure 1.24 : Robot infirmier RIBA

Le robot patient : L'actroïde Simroid assez réaliste réagit quand l'opérateur le touche à un endroit sensible. Il permet ainsi de réaliser un apprentissage du métier sans frais.

Hanako Showa est une initiative similaire. Grâce à des capteurs implémentés dans ses dents artificielle, le robot peut réagir aux actes du praticien novice, émettre des

gémissements ou bouger les bras quand on lui "fait mal". Il peut même communiquer grâce à un procédé de synthèse vocal.



Figure 1.25: Robot patient Hanako Showa

## 7. Avantages et inconvénients des robots

Un système robotique consiste non seulement des robots mais aussi d'autres dispositifs et systèmes qui sont utilisés avec le robot pour effectuer la tâche nécessaire. Les avantages des robots sont: [9]

Robotique et automatisation peut dans de nombreuses situations d'accroître la productivité, la sécurité, l'efficacité, la qualité et la cohérence des produits.

Les robots peuvent travailler dans un environnement dangereux, sans le besoin de soutien de la vie, ou les préoccupations concernant la sécurité.

Robots n'ont pas besoin de l'éclairage, la climatisation, de ventilation et de protection contre le bruit.

Robots travailler continuellement, sans ressentir une fatigue ou l'ennui, et ne nécessitent pas une assurance médicale ou de vacances.

Les robots sont de précision répétable à tous les moments, sauf si quelque chose arrive à eux ou ils s'usent.

Les robots peuvent être beaucoup plus précis que les humains. Précision linéaire d'un robot typiquement est de 20 à 10 microns.

L'inconvénient des robots est qu'ils manquent de capacité de réagir en cas d'urgence, à moins que les situations comprises et les réponses sont inclus dans le système. Les mesures de sécurité nécessaires pour s'assurer qu'ils ne lèsent pas les opérateurs et n'endommagent les machines qui travaillent avec eux. Inconvénients des robots comprennent: [9]

- Réponse inadéquate ou mal.
- Le manque de pouvoirs prendre une décision.
- Consommation de l'énergie.
- Ils peuvent causer des dommages à des autres appareils, et la blessure de l'homme.

Bien que les robots ont de bonnes certaines caractéristiques mais aussi ont ces caractéristiques limités comme la capacité à degré de liberté, la dextérité, capteurs, système de vision et la réponse en temps réel. Les robots sont coûteux en raison du: coût initial de l'équipement, le coût d'installation, le besoin de périphériques, le besoin de formation et la nécessité de la programmation.

## **8. Conclusion**

Les robots industriels les plus utilisés ont des tâches moins compliquées par rapport aux robots mobiles. Ils ont un rôle important dans les applications industrielles en effectuant des tâches complexes et dangereuses.

## **Chapitre 02 : Les Robots industrielles**

## Chapitre 2

### Les Robots industrielles

#### 1. Introduction

Un système robotique est une machine m´écatronique programmable disposant de moyens de perception, d’interprétation et d’action qui lui permettent d’agir sur un environnement physique.

Ce cours concerne plus particulièrement la robotique manufacturière, c’est-à-dire les robots manipulateurs destinés à des tâches de soudure, de peinture, de manutention, d’emballage-conditionnement, etc. L’objectif est de fournir un ensemble minimal de connaissances pour comprendre le fonctionnement d’un robot industriel, son comportement et son implantation

#### 2. Définition d’un robot industrielle

Un robot est un dispositif mécanique poly-articulé mus par des actionneurs et commandé par un contrôleur accomplissant automatiquement une grande variété des tâches qui sont généralement considérées comme dangereuses, pénibles répétitives et impossibles pour les humains ou dans un but d’une plus grande efficacité.

#### 3. Historique [10]

- 1947 : Premier manipulateur électrique télé-opéré.
- 1954 : Premier robot programmable.
- 1961 : Utilisation d’un robot industriel, commercialisé par la société UNIMATION (USA), sur une chaîne de montage de General Motors.
- 1961 : Premier robot avec contrôle en effort.
- 1963 : Utilisation de la vision pour commander un robot.

##### 3.1. L’évolution industrielle de la robotique

Le terme robot provient du mot slave «robota » qui a comme signification : travail, corvée ou force. Il a été créé par l’écrivain Karel Capek dans les années 20, dans sa pièce de théâtre "Romum’s Universal Robots" pour affecter des machines automatiques destinées à remplacer l’homme pour réaliser des tâches complexes, ce qui lui permet d’imaginer une personnalité intelligente créée artificiellement. A l’époque, les gens pensaient généralement que le robot

était quelque chose de destructeur et sombre ce qui soulevait de nombreuses questions : sont-ils dangereux ? Comment pouvons-nous les utiliser ?

A quel point vont-ils voler notre travail ? Même Charlie Chaplin a montré dans son film "Modern Times" en 1936, les côtés sombres et négatifs d'un monde hautement automatisé. Ce qui a déclenché un important débat sur l'automatisation et la robotisation des usines américaines. Un autre argument efficace pour augmenter ce débat : le film "Sleeper" en 1973, dans lequel Woody Allen s'était déguisé en robot. Malgré l'apparition de ce concept robotique, il a fallu attendre l'arrivée des ordinateurs en 1940 pour que les robots fassent réellement leur apparition. Le terme "Robotique" désigne l'utilisation des robots.

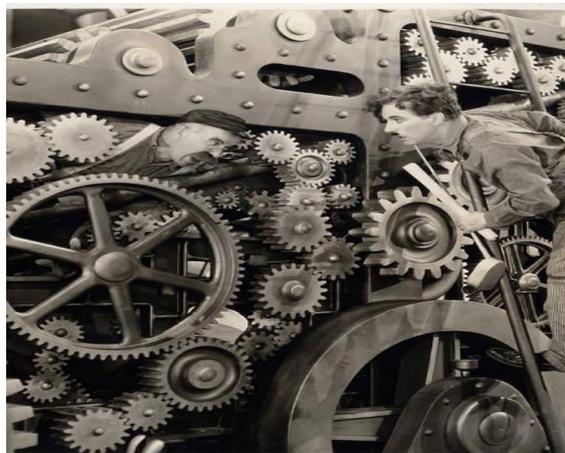


Figure 2.1 : Film de Charlie Chaplin "Modern Times"

En 1962, le premier robot cylindrique dénommé "Versatran" a été présenté par l'entreprise AMF : (American Machine and Foundry) à l'usine de Ford voir la figure 2.2.



**Le premier robot industriel**



**Versatran**

Figure 2.2 : Les premiers robots industriels

En 1969, Victor Scheinman a conçu le Stanford Arm comme prototype pour ses recherches.

En 1970, une conférence internationale "International Symposium on Industrial Robots" (ISIR) a eu lieu à Chicago, USA. Cette conférence a fourni l'occasion à des ingénieurs et des chercheurs du monde entier de partager leurs idées et de présenter leurs travaux dans le domaine de la robotique.

En 1997, cette conférence a changé de nom pour devenir "International Symposium on Robots" (ISR) afin d'inclure d'autres technologies robotiques comme les robots de service. Jusqu'à aujourd'hui, l'ISR représente un point de rencontre pour tous les sujets industriels techniques et scientifiques liés à la robotique.

En 1973 la société allemande Kuka a présenté son propre robot, Famulus. Il fut le premier robot à six axes moteurs électromécaniques. Dans la même année, le premier robot industriel possédant un capteur de vision dynamique a été développé pour déplacer des objets puisqu'il avait pour fonction d'attacher des boulons sur un moule, Hitachi.

En 1974, la société suédoise ASEA, qui se nomme ABB aujourd'hui, a créé le premier robot industriel commandé par un microprocesseur. C'est un robot entièrement électrique, IRB 6, développé par Cincinnati Milacron et appelé l'outil de demain, T3.



Figure 2.3 : Les robots industriels développés entre 1973 et 1974

En 1978, la société allemande Reis Robotics a développé le premier robot industriel à 6 axes avec un système de contrôle intégré, RE15. Il servait à charger et décharger des pièces métalliques dans un système de moulage sous pression.

En 1979, la société japonaise Nachi a créé un robot industriel piloté par un moteur électrique en remplaçant les actionneurs hydrauliques. Ce robot permet d'assurer le soudage par point.

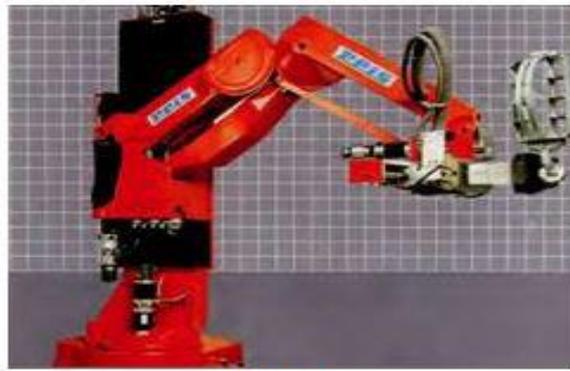
**RE 15****Nachi**

Figure 2.4 : Les robots industriels RE15 et Nachi

Précisément, la brillante industrielle de la robotique a commencé dans les années 80. En effet, en 1981, Takeo Kanade de l'Université "Carnegie Mellon" a mis en service un robot industriel avec des moteurs électriques installés directement sur ses articulations. Cela a servi à éliminer les mécanismes de transmission du mouvement entre les moteurs et les articulations. En effet, le robot a eu la possibilité de se déplacer librement et facilement ce qui a augmenté son espace de travail, sa rapidité ainsi que sa précision en comparaison avec les robots précédents. La même année, une société américaine a mis en place le premier robot industriel portique, Gantry. Gantry est capable de fournir une amplitude de mouvement plus importante que les robots de type piédestal.

En 1984, le premier robot SCARA à pilotage direct a été créé en évitant aussi les systèmes complexes de transmission de mouvement. Grâce à la simplicité du mécanisme, le robot AdaptOne devient très robuste dans les opérations d'automatisation industrielle continue, en conservant toujours la haute précision.

En 1985, la société allemande Kuka a introduit un nouveau manipulateur en forme de Z, dont la conception ne se base pas sur le parallélogramme traditionnel. Il possède 6 degrés de liberté dans l'espace cartésien donc trois translations et trois orientations.

**Bras piloté directement****Gantry****Adept**

Figure 2.5 : Le développement de la robotique entre 1981 et 1984

En 1992, le premier robot pour des applications d'emballage a été créé, le robot Delta.

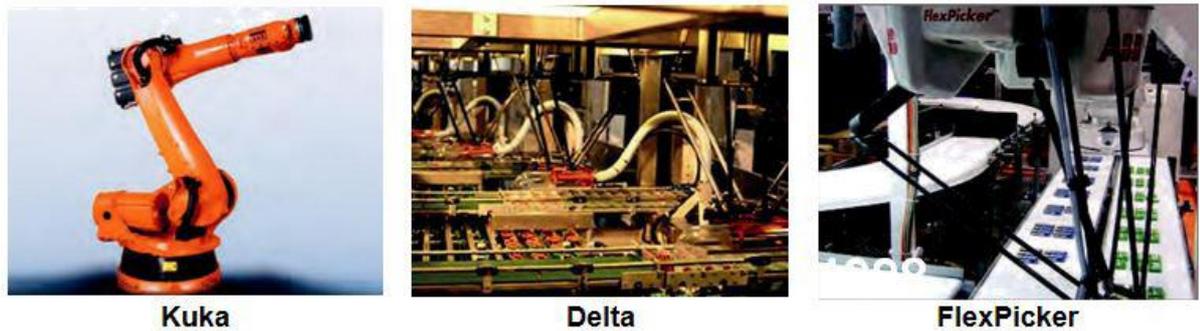


Figure 2.6 : Les robots industriels KuKa, Delta et FlexPicker

En 1998, en se basant sur le robot parallèle Delta développé six ans avant, un robot FlexPicker a été créé par Raymond Clavel au sein de la société suédoise ABB. C'était le robot de picking le plus rapide du monde, avec la capacité de choisir 120 objets dans une minute. Il était capable de choisir et lâcher les objets à une vitesse de 10 m/s. La même année, le système de " RoboLoop " a été lancé en Suisse par Güdel. Il permet à des robo-transporteurs de suivre des voies et de circuler dans des boucles fermées, ce qui a créé des nouvelles possibilités pour l'automatisation d'usine. Les systèmes de contrôle du robot ont également eu des développements continus avec l'évolution de la robotique.

En 2004, la société japonaise Motomann a introduit un système de contrôle amélioré, NX100, qui permet de fournir un contrôle synchronisé de quatre robots. Le NX100 est ainsi capable de contrôler jusqu'à 38 axes à partir d'un écran tactile. Ce système de programmation est basé principalement sur un système d'exploitation WindowsCE. En 2006, la société italienne de robotique, Comau, a développé un premier système, sous forme d'une interface basée sur une programmation : Wireless Teach Pendant (WiTP). Ce système permet la communication des données traditionnelles entre le robot et la centrale sans fil, tout en assurant la sécurité absolue. Dans la même année, la société allemande Kuka a présenté le premier robot léger, Light Weight Robot (LWR), en coopération avec l'institut de robotique et mécanique DLR. La structure externe du robot léger LWR est en aluminium. Ce robot ne pèse que 16 kg, alors qu'il est capable de porter des charges utiles qui peuvent aller jusqu'à 7kg. Cela le rend certainement éco-énergétique et portable. Grâce à son poids et ses capteurs intégrés, ce robot est capable d'exécuter une large gamme de tâches différentes et surtout il est très adapté pour les tâches d'assemblage et de manutention.

En 2010, la société japonaise FANUC, a présenté le premier robot commandé par un système d'apprentissage. Ce système s'appelle : Learning Vibration Control (LVC). Il permet au robot d'apprendre éventuellement ses caractéristiques de vibration afin d'augmenter les vitesses et les accélérations. Cet apprentissage permet de supprimer la vibration du robot, ce qui introduit une réduction remarquable du temps de déplacement de son organe terminal.



Figure 2.7 : Les robots industriels RoboLoop, NX100 et l'interface de communication WiTP

En 2012, la société allemande KuKa, a lancé une nouvelle série de robots KR AGILUS. Il pèse seulement de 6 à 10 kg. Avec la série KR AGILUS, Kuka établie une gamme complète de petits robots. En effet, leurs performances sont originales dans cette catégorie de charge utile. Il peut avoir 6 axes, destemps de cycle courts, des vitesses très élevées, un système d'alimentation d'énergie intégré, et cela dans toutes les positions où il est installé au sol, au mur, ou même au plafond. Tous les modèles KR AGILUS sont pilotés identiquement par le contrôleur KRC4, c'est la technologie de commande universelle utilisé pour tous les modèles de robots Kuka. Ce modèle répond bien à la sécurisé nécessaire, comme il permet de simplifier absolument la coopération efficace entre les humains et les machines. Ce qui déclenche un concept d'automatisation totalement nouveau. [11]



Figure 2.8 : Les robots industriels LVC, LWR et KR AGILUS

En 2012, les robots industriels vendus en France atteignent 2956 unités, alors qu'en 2013 ce nombre a connu une légère baisse (2161). Par conséquent, le nombre total de robots vendus entre 1998 et 2013 atteint 32 301 unités, en France. Ce qui est relativement faible par rapport au nombre de robots vendus en Allemagne, qui en comptait 167579 unités dans la même période, ce qui représente environ 18000 robots vendus par année.

En 2016, le nombre mondial de robots industriels installés dans des usines est de 1828000 unités. D'après les estimations de la fédération internationale de la robotique(IFR), ce nombre passera à environ 3 053 000 robots en 2020 selon les estimations. Cela représente une croissance continue entre 2018 et 2020, avec une moyenne de 14 % par an. Ainsi, d'ici 2020, plus de 1,7 million de robots industriels seront mis en service dans tous les secteurs industriels

à travers le monde. Suite au développement de la robotique, c'est notamment l'industrie automobile qui introduit ces robots. Ces robots industriels sont des bras articulaires commandés par un ordinateur pour effectuer une tâche sur différentes chaînes de montage (pulvérisation de peinture, soudage etc). L'évolution de la robotique jusqu'à aujourd'hui montre qu'il se produira dans quelques années "la singularité". Il n'y aura plus aucune différence entre les hommes et les robots.

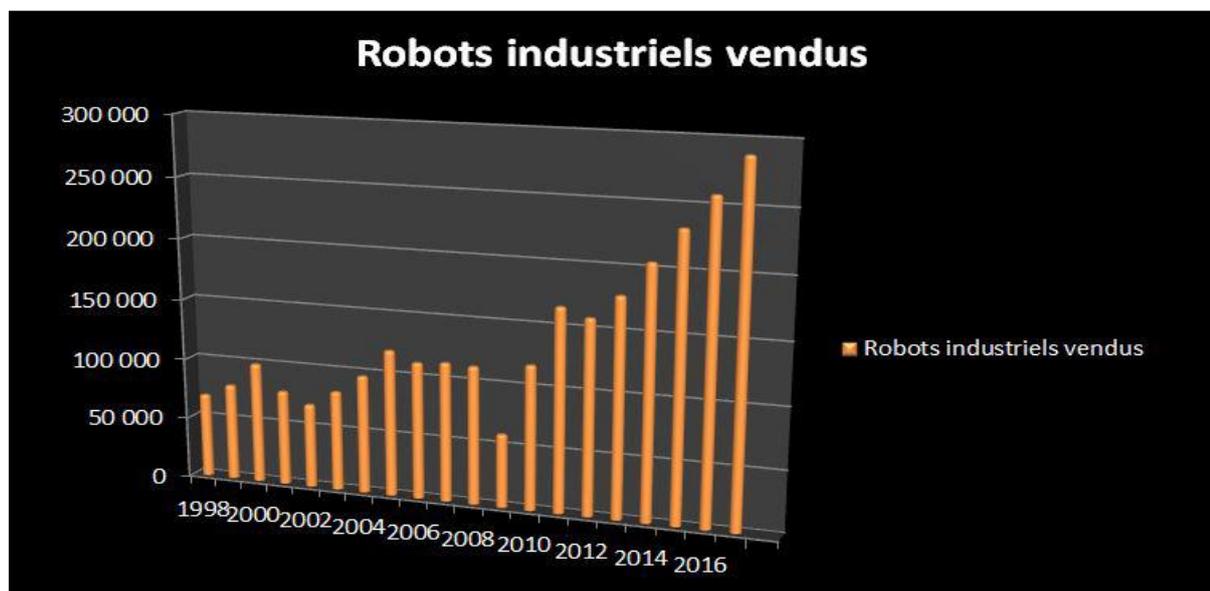


Figure 2.9 : Les robots industriels vendus entre 1998 et 2017

L'installation des robots dans plusieurs usines de fabrication répond éventuellement à la demande des clients pour exiger une production flexible, rapide et économique. Les plus gros marchés mondiaux sont cités dans le tableau ci-dessous. Les ventes de ces marchés représentent 74% du nombre total des robots vendu en 2016.

Pays	Les robots industriels vendus
La chine	87.000
La Corée du sud	41.400
Japon	38.600
états-Unis	31.400
Allemagne	20.039

Table 2.1 : les plus gros marchés mondiaux

#### 4. Programmation des robots industriels [12]

Deux modes de programmation :

##### 4.1. Programmation par apprentissage

Les points sont parcourus en manuel et enregistrés au fur et à mesure

➤ **Avantage**

- Facile à mettre en œuvre pour faire des opérations simples
- Accessibles au plus grand nombre
- Mise au point de l'enchaînement des trajectoires plus simple

➤ **Inconvénients**

- Complexité limitée des trajets et des formes

##### 4.2. Programmation Hors Ligne

Les trajets sont générés à l'aide d'un logiciel externe de FAO

➤ **Avantage**

- Possibilité d'envoyer des fichiers de plusieurs milliers de lignes

➤ **Inconvénient**

- Compatibilité de la chaîne CFAO nécessaire

##### 4.3. Trois types de mouvement possibles

- I. **PTP (Point To Point)** : L'outil se déplace suivant le chemin le plus rapide. Le trajet du robot entre P1 et P2 n'est pas connu à l'avance

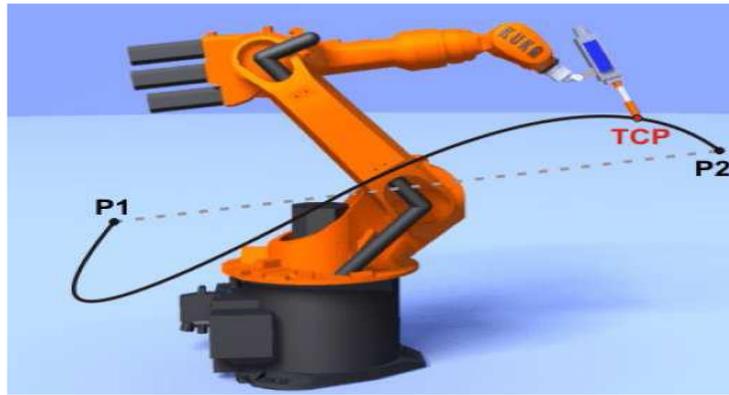


Figure2.10 : point to point

- ✓ Risque de collision
- ✓ Non maîtrise du trajet
- ✓ Pas de risque de singularité sur le trajet

**II. LIN (Linéaire) :** Le trajet suivi par l'outil est une ligne droite entre P1 et P2



Figure2.11 : LIN

- ✓ Maîtrise des points de passages
- ✓ risque de singularité sur le trajet

**III. CIRC (Circulaire) :** L'outil se déplace suivant un arc de cercle qui s'appuie sur 3 points à définir

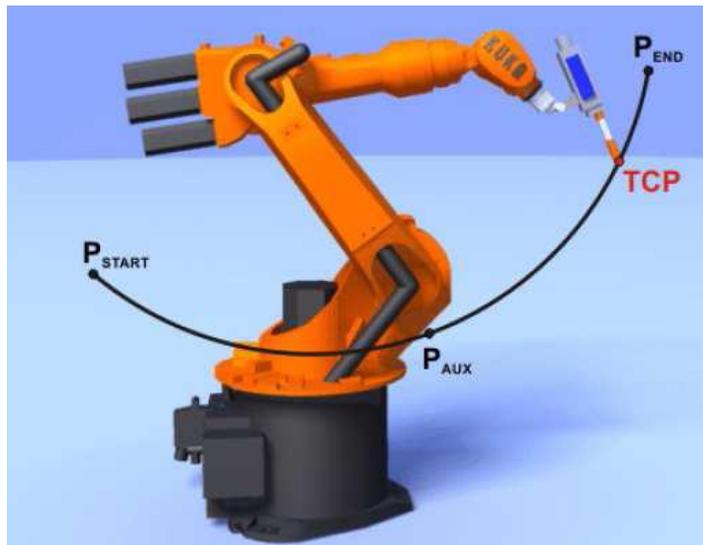


Figure2.12 : CIRC (Circulaire)

- ✓ Maîtrise des points de passages
- ✓ Peu risque de singularité sur le trajet

#### 4.4. Chaîne numérique pour la programmation des robots Génération de trajectoires complexes (position + orientation) [12]

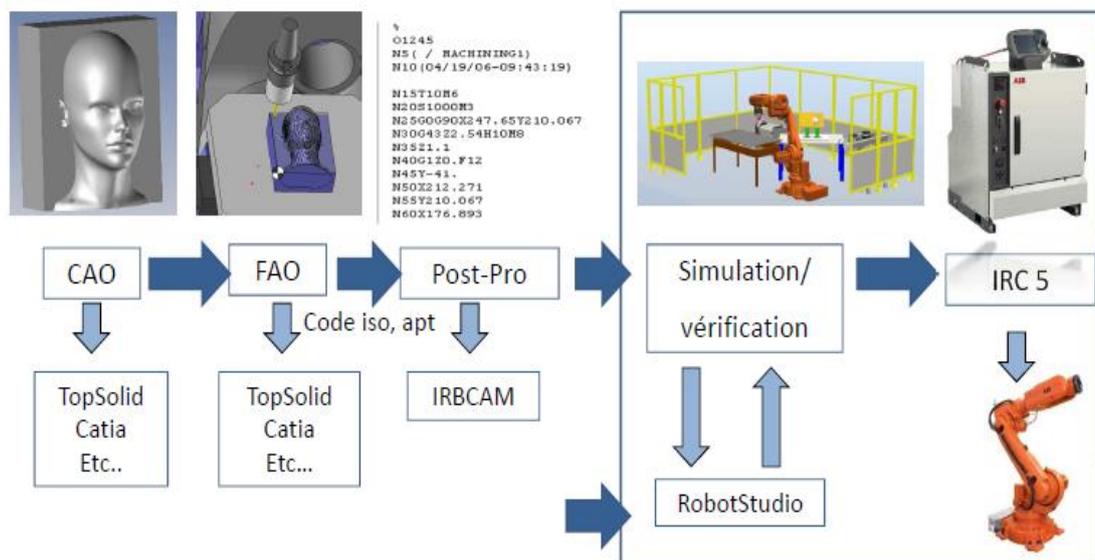


Figure2.13 : Chaîne numérique pour la programmation

#### 5. Modélisation des robots industriels flexibles

Les auteurs de [13], [14] et [15] ont décrit dans ces travaux de recherche les Modèles de robot les plus utilisés. [16] a présenté les méthodes et les principes fondamentaux utilisés pour la modélisation qui représente l'outil théorique principal pour concevoir, piloter, planifier et

commander un système robotique réel. La première recherche sur la modélisation des robots industriels avec des transmissions flexibles a été étudiée dans les ouvrages suivants [17], [18]. Ces études ont été appliquées sur le robot manipulateur GEP-50. Avec les robots industriels, la flexibilité dépend éventuellement du type de transmission de mouvement utilisé au niveau des articulations. Il existe des systèmes de transmission qui augmentent la flexibilité comme par exemple les systèmes de transmission à câble, les courroies, les trains d'engrenages épicycloïdaux, les longues tiges et les réducteurs «harmonic drive ». Ces systèmes de transmissions sont généralement utilisés pour garantir un taux de réduction élevé ou pour améliorer l'efficacité dynamique vu qu'ils consistent à placer les actionneurs à proximité immédiate de la base du robot. Cependant, sous des contraintes d'efforts importants, les composantes du robot deviennent intrinsèquement flexibles. L'élasticité provoquée dans les modèles à articulations flexibles est concentré principalement dans la transmission mécanique entre les corps rigides et les moteurs [19]. La flexibilité doit être prise en compte lorsque le robot exécute certaines applications qui nécessitent une grande force de travail. Un modèle simplifié d'une transmission flexible a été établi par Spong en 1987 [20]. Il a considéré la flexibilité au niveau d'une articulation comme un ressort de torsion linéaire. Ce modèle dépend d'une constante de proportionnalité qui s'appelle "la constante de rigidité".

En se basant sur le modèle dynamique établi par Spong, Khorasani a proposé un modèle couplé rigide-flexible, où le terme d'amortissement et l'engrenage harmonique ont été pris en compte [21]. Le modèle simplifié, d'une articulation flexible développée par Spong est applicable uniquement dans le cas de grands rapports de démultiplication vu que dans cette situation, les effets inertiels pouvaient être négligeables. C'est pour cette raison que [22] a proposé un modèle complet d'une articulation flexible en tenant compte du couplage entre les corps et les moteurs du robot [22]. Les caractéristiques non linéaires d'une transmission du mouvement dans une articulation peuvent influencer considérablement la précision du modèle du robot. Ces caractéristiques contiennent principalement les efforts non linéaires et les frottements. Les efforts non linéaires peuvent éventuellement être considérés dans le modèle d'une articulation flexible en remplaçant son expression linéaire par une fonction non linéaire où l'élasticité est représentée par un ressort non linéaire. D'autres termes non linéaires comme l'hystérésis, l'amortissement non linéaire et le jeu peuvent être ajoutés au modèle dynamique d'un robot à articulations flexibles afin d'avoir un modèle relativement complet [23].

En 1995, Bridges a proposé un modèle dynamique d'un robot flexible qui est relativement précis et qui s'est avéré être stable. Les erreurs cinématiques, les flexibilités non linéaires et les frottements ont été pris en considération dans ce modèle. Comme il a établi un modèle détaillé

d'une articulation flexible en décrivant son élasticité par un certain nombre de ressorts-amortisseurs multidimensionnels localisés [23].

## 6. Les éléments constitutifs d'un robot industriel

Un robot n'a de sens que dans un environnement qu'il modifie. Et ainsi, on peut distinguer trois ensembles interactifs dans un robot en fonctionnement : l'unité informationnelle ; l'unité opérationnelle et la structure mécanique articulée. [24]

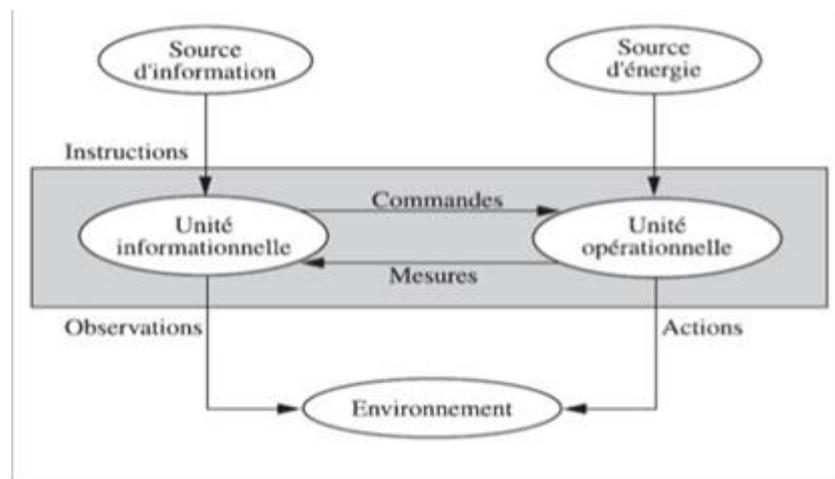


Figure 2.14 : Structure fonctionnelle d'un robot.

### 6.1. Unité informationnelle

Cette partie reçoit les instructions décrivant la tâche à accomplir, les mesures relatives à l'état interne de la structure mécanique qui constitue le bras manipulateur et les observations concernant son environnement. Elle élabore en conséquence les commandes de ses différentes articulations en vue de l'exécution de ses tâches. Les systèmes actuels fonctionnent en interaction permanent selon le cycle information-décision-action. [24]

### 6.2. Unité opérationnelle

Cette unité représente les actions commandées en empruntant la puissance nécessaire à la source d'énergie. En effet, ça constitue le robot physique, qui intègre la structure mécanique (segments, articulations, architecture,...), les modules d'énergie (amplificateurs, variateurs, servovalves...), les convertisseurs d'énergie (moteurs, vérins...), les chaînes cinématiques de transmission mécanique (réducteurs, vis à billes, courroies crantées ....), les capteurs de

proprioceptifs placés sur chaque axe pour mesurer en permanence leur position et leur vitesse, et enfin l'effecteur, ou organe terminal, qui est en interaction avec l'environnement.[24]

### 6.3. La structure mécanique articulée

De point de vu mécanique, Un robot manipulateur est constitué généralement par deux sous-ensembles distincts :

Un organe terminal qui est le dispositif destiné à manipuler des objets, et une structure mécanique articulée (SMA), constituée d'un ensemble de solides reliés entre eux, généralement les uns aux autres où chaque solide est mobile par rapport au précédent. Cette mobilité s'exprime en termes de degrés de liberté (ddl) qui est par définition le nombre de mouvements indépendants possibles d'un solide 1 par rapport au solide qui lui est directement relié 2.

Une structure mécanique articulée peut être représentée par une architecture composée de plusieurs chaînes de corps rigides assemblés par des liaisons appelées articulations. Les chaînes peuvent être dites soit ouvertes ou en série dans les quelles tous les corps ont au plus deux liaisons, ou bien arborescentes où au moins l'un des corps a plus de deux liaisons. Les chaînes peuvent aussi être fermées dans lesquelles l'organe terminal est relié à la base du mécanisme par l'intermédiaire de plusieurs chaînes. [25]

- Structure mécanique articulée à chaîne cinématique simple :

C'est une chaîne cinématique dont chaque membre possède un degré de connexion (nombre de liaisons mécaniques) inférieur ou égal à deux. Un robot sériel est formé d'une chaîne cinématique simple dont la base et l'organe effecteur possèdent un degré de connexion d'un (c'est-à-dire qu'il n'est relié qu'à un seul corps) et les autres éléments un degré de connexion de deux. (Figure 2.11)



Figure2.15 : Structure sériel.

- Structure mécanique articulée à chaîne cinématique fermée :

C'est une chaîne cinématique dont l'un des membres, différent de la base, possède un degré de connexion supérieur ou égal à trois. (Figure 2.12)

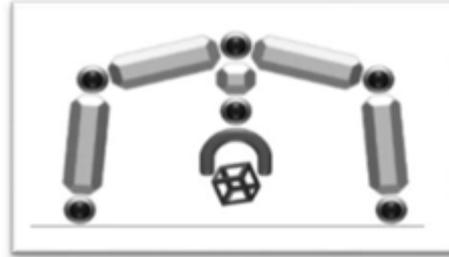


Figure 2.16 : Structure fermée.

## 7. Commande des axes (dans l'espace articulaire)

La commande des axes dans l'espace articulaire a pour objectif d'asservir la position articulaire  $q(t)$  sur la trajectoire  $q_d(t)$  précédemment calculée.

Sur la plupart des robots industriels, les axes sont asservis séparément ainsi que le présente la section suivante, mais les effets négligés peuvent intervenir pour dégrader les performances des asservissements, notamment aux vitesses importantes (l'augmentation de la vitesse des axes a notamment pour effet l'augmentation de la contribution des efforts centrifuges). Il existe des lois de commande qui permettent de prendre en compte efficacement et sans approximation la dynamique totale du robot, mais celles-ci sont plus complexes et gourmandes en temps de calcul.

### 7.1. Chaîne de commande d'un robot industriel

La chaîne de commande d'un robot industriel est composée des éléments suivants :  
[30]

- le calculateur est chargé de calculer les consignes de couple ou de vitesse des actionneurs. Il est constitué d'une unité centrale, d'une unité de stockage, d'interfaces de communications (série, Ethernet, etc.), et de ports d'entrées/sorties (CAN, CNA, E/S numériques, compteurs, etc.).

- les actionneurs mettent la structure en mouvement. Il s'agit le plus souvent d'actionneurs électromagnétiques mais des actionneurs hydrauliques peuvent être utilisés pour des robots portant de très fortes charges. Les éléments périphériques du robot (préhenseurs mécaniques, préhenseurs par dépression, etc.) utilisent principalement des actionneurs pneumatiques. Dans le cas des actionneurs électromagnétiques, des variateurs assurent la régulation du couple ou de la vitesse du moteur (généralement par une régulation du courant). Les variateurs gèrent aussi la sécurité ((bas niveau)) du robot (protection contre les surcharges, protection contre une défaillance interne du variateur, gestion des fins de course, gestion des arrêts d'urgence).
- les transmissions transmettent le mouvement des actionneurs à la structure (avec généralement un facteur de réduction).
- la structure mécanique réalise le mouvement.
- les capteurs proprioceptifs mesurent des grandeurs internes au robot (positions, vitesses, couples, forces).
- des capteurs extéroceptifs peuvent renseigner le calculateur sur son environnement (ouverture d'une porte, etc.) ou permettre de réaliser une commande référencée capteur (commande en force, asservissement visuel, etc.).

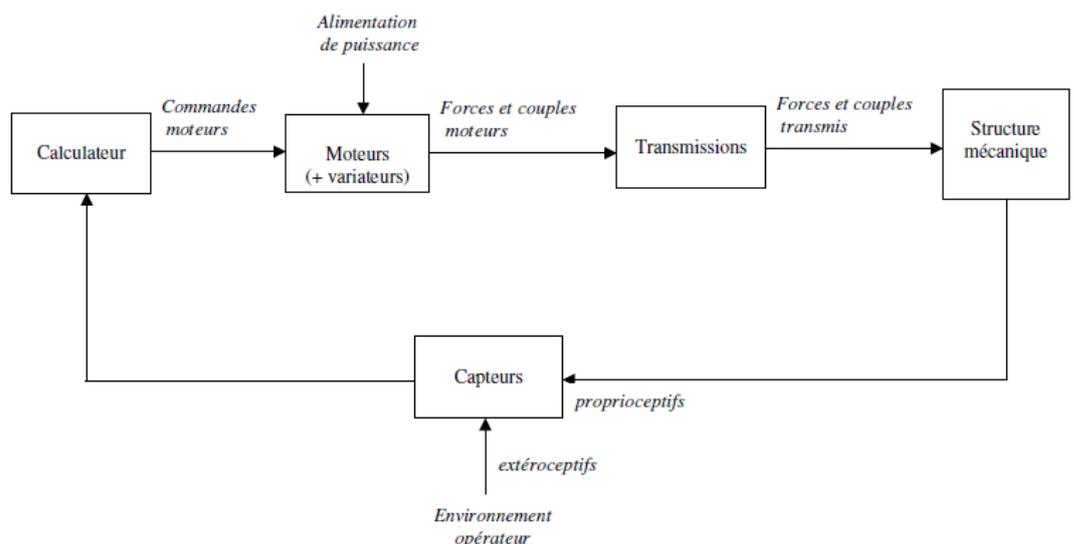


Figure 2.17 : chaîne de commande d'un robot industriel.

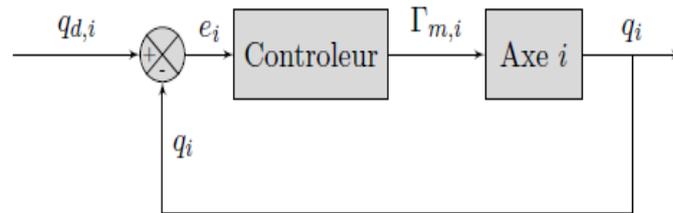


Figure 2.18 : Commande individuelle des axes.

## 8. Architecture des robots industrielle

### 8.1. Vocabulaire

- La base :

La base du manipulateur est fixée sur le lieu du travail. Ceci est le cas de la quasi-totalité des robots industriels.

- Le porteur :

Le porteur représente l'essentiel du système mécanique articulé, il a pour rôle d'amener l'organe terminal dans une situation donnée imposée par la tâche (la situation d'un corps peut être définie comme la position et l'orientation d'un repère attaché à ce corps par rapport à un repère de référence). Il est constitué de Segment et d'articulation. La mobilité d'une articulation  $0 \leq m \leq 6$  est telle que :

Lorsque  $m = 1$ , ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple :

Soit rotoïde, soit prismatique. [26]

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 commun. La situation relative entre les deux corps est donnée par l'angle autour de cet axe. [26]

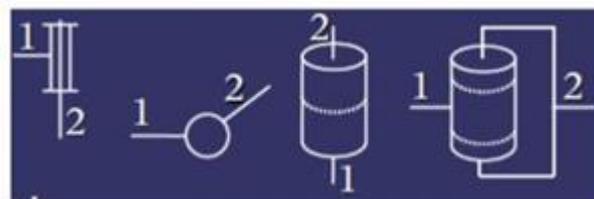


Figure 2.19 : Représentation d'une articulation rotoïde.

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. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe. [17]

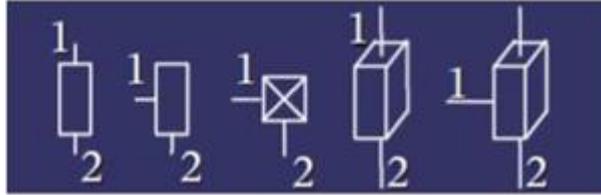


Figure 2.20 : Représentation d'une articulation prismatique.

- L'actionneur :

Les actionneurs utilisent fréquemment des moteurs électriques à aimant permanent, à courant continu, à commande par l'induit. On trouve de plus en plus de moteurs à commutation électronique (sans balais), ou, pour de petits robots, des moteurs pas à pas.

Pour les robots devant manipuler de très lourdes charges (par exemple, une pelle mécanique), les actionneurs sont le plus souvent hydrauliques, agissant en translation (vérin hydraulique) ou en rotation (moteur hydraulique). [26]

- L'organe terminal(Effecteur) :

Ça regroupe tout dispositif destiné à manipuler des objets (dispositifs de serrage, dispositifs magnétiques, à dépression, ...), ou à les transformer (outils, torche de soudage, pistolet de peinture, ...). En d'autres termes, il s'agit d'une interface permettant au robot d'interagir avec son environnement. [26]

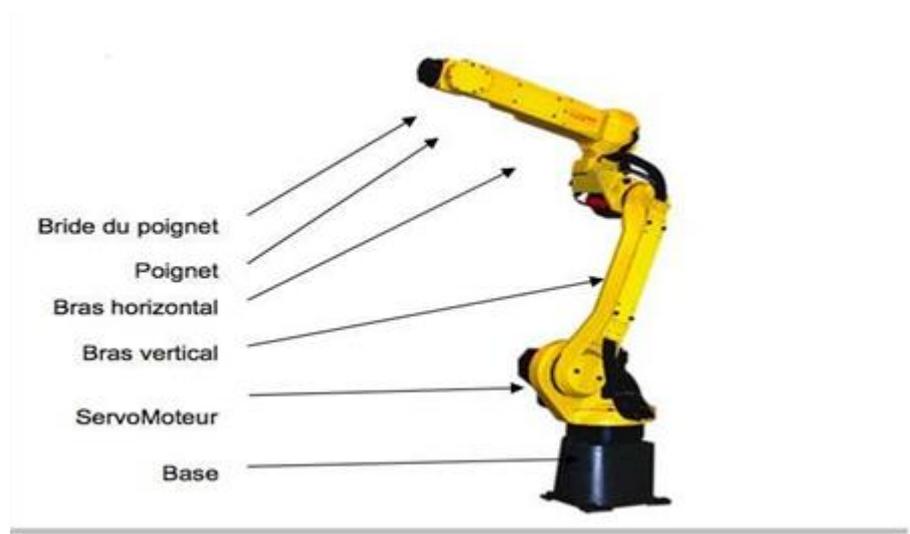


Figure 2.21 : Architecture des robots.

## 9. Différents types des robots industriels

### 9.1. Les robots SCARA

Un robot SCARA (Selective Compliance Articulated Robot for Assembly) se distingue par la caractéristique suivante:

- Caractéristiques : [27]
  - 3 axes, série, RRP, 3 DDL.
  - Espace de travail cylindrique.
  - Précis.
  - Très rapide.

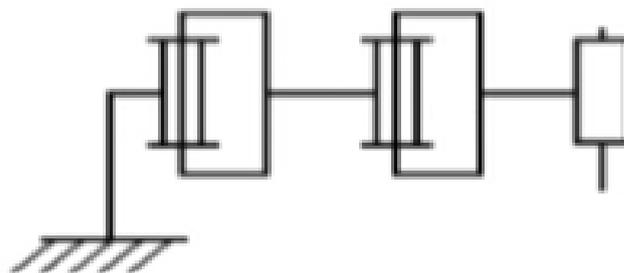


Figure 2.22 : Schéma de Les robots SCARA.

Exemples :



Figure 2.23 : Le robot sankyo.

## 9.2. Les robots cylindriques

Les robots cylindriques peuvent être décrits comme suit :

- Caractéristiques : [18]
  - 3 axes, série, RPP, 3 DDL.
  - Espace de travail cylindrique.
  - Très rapide.

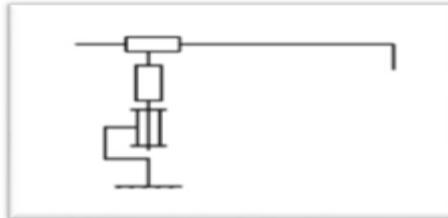


Figure 2.24 : Le robot cylindrique.

Exemples :



Figure 2.25 : Robot Seiko.

### 9.3. Les robots sphériques

Ce sont des robots spécifiés par les caractéristiques suivantes :

- Caractéristiques : [27]
  - 3 axes, série, RRP, 3 DDL.
  - Espace de travail sphérique.
  - Grande charge utile.

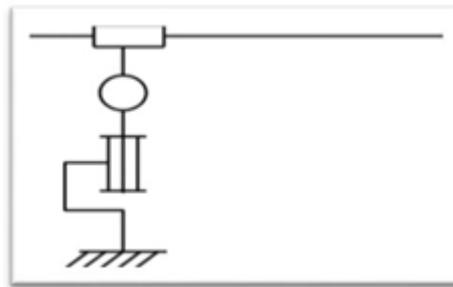


Figure 2.26 : Le robot sphérique.

Exemples :



Figure 2.27 : Robot FANUC.

### 9.4. Les robots Cartésiens

Les robots cartésiens sont définis par différentes caractéristiques suivantes :

- Caractéristiques : [27]
  - 3 axes  $\perp$  2 à 2, série, PPP, 3 DDL.
  - Très bonne précision.

- Lent.

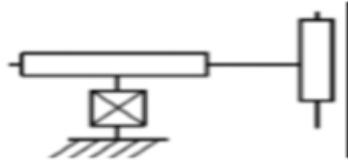


Figure 2.28 : Robot Cartésien.

Exemple :



Figure 1.29 : Le robot Toshiba.

## 9.5. Les robots parallèles

Les robots parallèles ce sont des robots caractérisés par :

- Caractéristiques : [27]
  - Plusieurs chaînes cinématiques en parallèle.
  - Espace de travail réduit.
  - Précis (grande rigidité de la structure).
  - Rapide.

Exemples :



Figure 2.30 : Robot FESTO.

## 9.6. Les robots anthropomorphes

- Caractéristiques : [27]
  - Reproduisent la structure d'un bras humain.
  - 6 axes, série, 6R, 6 DDL

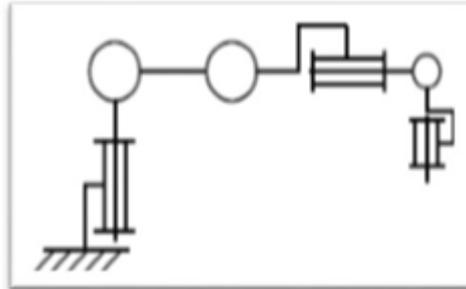


Figure 2.31 : Robot anthropomorphe.

Exemples :

- ✓ Architecture standard : [27]



Figure 2.32 : Robot FANUC.

- ✓ Architecture à parallélogramme : [27]



Figure 2.33 : Robot ABB.

## 10. Utilisation des robots industrielle

### 10.1. Tâches simples

On distingue plusieurs domaines d'application des robots surtout dans le domaine industriel, notamment :

- La grande majorité des robots est utilisée pour des tâches simples et répétitives.
- Les robots sont programmés une fois pour toute au cours de la procédure d'apprentissage.
- Critères de choix de la solution robotique :
  - ✓ La tâche est assez simple pour être robotisée.
  - ✓ Les critères de qualité sur la tâche sont importants.
  - ✓ Pénibilité de la tâche (peinture, charge lourde, environnement hostile, ...). [28]

Exemples :



Figure 2.35 : Robot soudeurs Par points.



Figure 2.34 : Robot soudeurs à l'arc.

### 10.2. Tâches complexes

C'est dans le cas où le robot effectue des tâches sensibles et qui nécessitent plus de précision et de robustesse et on distingue notamment la robotique de service. [28]

- Robotique de service :



Figure 2.36: Robot pompiste.



Figure 2.37: Robot de construction.

## 11. Critère de choix d'un robot industriel

Un robot doit être choisi en fonction de l'application qu'on lui réserve. Voici quelques paramètres à prendre, éventuellement, en compte : [28]

- La charge maximum transportable (de quelques kilos à quelques tonnes), à déterminer dans les conditions les plus défavorables (en élongation maximum).
- L'architecture de la structure mécanique articulée, le choix est guidé par la tâche à réaliser.
- Le volume de travail, est accessible par l'outil du robot qui peut balayer l'outil, le volume dépend de la géométrie du robot, de la longueur du segment et du débattement des articulations.
- 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, 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  $< 0.1$  mm
- La vitesse de déplacement (vitesse maximum en élongation maximum), accélération.
- La masse du robot.
- Le coût du robot.
- La maintenance.

## 12. les rôles des robots industriels

Les robots industriels sont chargés de l'exécution de nombreux rôles : [29]

- La manipulation de produits à haute cadence.
- Les opérations de packaging avec des manipulations de produits et d'emballage .
- L'assemblage de produits dans le secteur automobile. Pharmaceutique et cosmétique .
- Les opérations de palettisation industrielle.

## 13. Conclusion

Les robots industriels sont des machines polyvalentes utilisées principalement pour l'automatisation industrielle afin d'améliorer la flexibilité, la productivité et la qualité des produits. D'autres raisons favorisant l'utilisation de robots industriels sont l'élimination des travaux désagréables et dangereux et la réduction des coûts. En effet, la commande et le contrôle du mouvement d'un système robotique sont les compétences clés pour fabriquer le robot, augmenter et développer ses performances, améliorer la sécurité lors de son utilisation.

Il est donc nécessaire d'intervenir en maintenance pour maintenir et rétablir l'état de robot industriel pour accomplir la fonction requise.

## Chapitre 03 : Maintenance des robots industriels

## Chapitre 3

### Maintenance des robots industriels

#### 1. Introduction

Les robots industriels ont toujours besoin de l'aide humaine, car ils les entretiennent en cas de dommage, y compris une maintenance préventive au niveau des pièces axiales et articulées pour maintenir les performances de leurs fonctions et augmenter la durée de vie.

#### 2. Définition de la maintenance

La maintenance est l'ensemble de toutes les actions techniques, administratives et de management durant le cycle de vie d'un bien, destinées à le maintenir ou à le rétablir dans un état dans lequel il peut accomplir la fonction requise.

Une fonction requise est une fonction, ou un ensemble de fonctions d'un bien considérées comme nécessaires pour fournir un service donné. [31]

#### 3. Les types de maintenance

##### 3.1. La maintenance corrective

C'est la maintenance exécutée après détection d'une panne et destinée à remettre un bien dans un état dans lequel il peut accomplir une fonction requise. [31]

##### 3.2. La maintenance préventive

C'est la maintenance exécutée à des intervalles prédéterminés ou selon des critères prescrits et destinée à réduire la probabilité de défaillance ou la dégradation du fonctionnement d'un bien. [31]

###### ➤ La maintenance préventive systématique

C'est la maintenance préventive exécutée à des intervalles de temps préétablis ou selon un nombre défini d'unités d'usage mais sans contrôle préalable de l'état du bien. [31]

➤ **La maintenance préventive conditionnelle**

C'est la maintenance préventive basée sur une surveillance du fonctionnement du bien et/ou des paramètres significatifs de ce fonctionnement intégrant les actions qui en découlent. [31]

➤ **La maintenance préventive prévisionnelle**

C'est la maintenance préventive conditionnelle exécutée en suivant les prévisions extrapolées de l'analyse et de l'évaluation de paramètres significatifs de la dégradation du bien. [31]

**4. schéma de maintenance [31]**

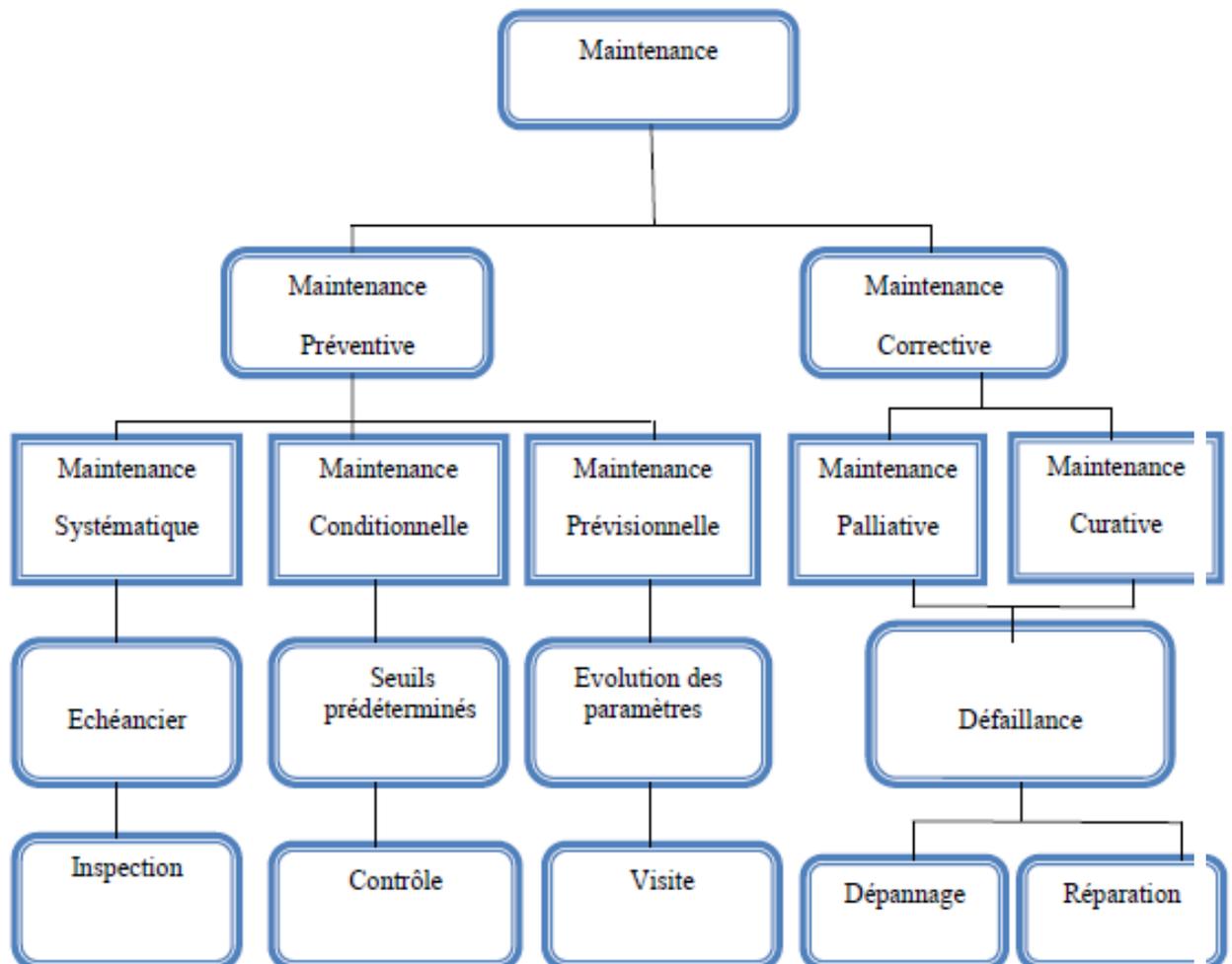


Figure3.1 : les types de maintenance

## 5. Stratégie de maintenance

"La stratégie de maintenance est une méthode de management utilisée en vue d'atteindre les objectifs de maintenance." [31]

Les choix de stratégie de maintenance permettent d'atteindre un certain nombre d'objectifs de maintenance :

- ✓ Développer, adapter ou mettre en place des méthodes de maintenance.
- ✓ Élaborer et optimiser les gammes de maintenance.
- ✓ Organiser les équipes de maintenance.
- ✓ Internaliser et/ou externaliser partiellement ou totalement les tâches de maintenance  
Définir, gérer et optimiser les stocks de pièces de rechange et de consommables.
- ✓ Etudier l'impact économique (temps de retour sur investissement) de la modernisation ou de l'amélioration de l'outil de production en matière de productivité et de maintenabilité.

## 6. La maintenance de robot industriel

### 6.1. La définition de la maintenance robotique

Toutes actions curatives ou préventives effectuées sur un robot industriel suite à sa mise en place et assurant la pérennité et la longévité de sa fonction.

La maintenance de vos robots industriels peut être effectuée par la société qui a mis en place vos cellules robotiques ou par un prestataire de service externe. [32]

### 6.2. La maintenance corrective

➤ Le service d'assistance téléphonique :

Les fournisseurs de robots ont mis en place des services de hotline téléphonique. Des ingénieurs et techniciens sont à l'écoute des utilisateurs et répondent aux questions. Les solutions de télémaintenance peuvent être utilisées pour se connecter au robot, diagnostiquer l'origine d'une panne et parfois même résoudre le problème à distance. [32]

➤ Les pièces de rechange :

La loi européenne oblige les fabricants de machine à maintenir un stock de pièces de rechange pour une durée de dix ans minimums. Chez les fournisseurs de

robots, des spécialistes en pièces de rechange sont là pour conseiller les clients et proposer des réponses adaptées à leurs besoins spécifiques. [32]

- Stock délocalisé de pièces détachées •

Stock de pièces détachées consignées

- Liste de pièces de rechange de première urgence •

Livraison de pièces de rechanges 24 h/24, 7 j/7 •

Réparations de pièces de rechange Voici quelques exemples de solutions que sauront vous proposer les fournisseurs de robots

➤ Les formations :

Il est important de sensibiliser et de préparer le personnel à ce nouvel outil de production. Cette étape est primordiale et essentielle à la réussite de l'intégration du robot dans l'entreprise

Les constructeurs et distributeurs de robots industriels proposent des formations adaptées aux applications et au niveau des stagiaires : [32]

- Formation d'utilisation (conducteurs/opérateurs
- Formation de programmation de base
- Formation de perfectionnement
- Formation de maintenance
- Formation à des applications dédiées

### **6.3. La maintenance préventive**

La maintenance est effectuée à des intervalles prédéterminés ou sur la base de critères prescrits et vise à réduire la probabilité de défaillance ou de détérioration.

La maintenance préventive consiste en des inspections régulières, une maintenance régulière (comme le graissage des pièces mécaniques) et un remplacement prédéfini des composants. Les activités sont divisées en niveaux (ordinaire effectué par un utilisateur formé, extraordinaire effectué par un spécialiste du produit) [32]

### 6.3.1. Marché mondial de la maintenance préventive des robots 2020-2026 ABB, FANUC, KUKA, SCOTT, Yaskawa Motoman



Les prévisions du marché de la maintenance préventive des robots à l'horizon 2026 se composent de faits complets ainsi que de l'évaluation des principaux fabricants, de la gamme de produits, du type et des utilisateurs finaux. Le rapport Robot Préventive Maintenance contient des détails précieux qui peuvent être segmentés en fonction de la zone de production de Robot Préventive Maintenance, des principales entreprises et du type de produit, afin de proposer un examen bien préparé et facile à appréhender de l'entreprise Robot Préventive Maintenance. Le rapport sur le marché de la maintenance préventive des robots aborde l'approche combative des principaux acteurs du marché de la maintenance préventive des robots, basée principalement sur le revenu des ventes, les besoins des clients, le profil de l'entreprise, les techniques commerciales utilisées sur le marché de la maintenance préventive des robots afin d'aider les secteurs du marché en plein essor. Pour faire des choix d'entreprise critiques.

Ce rapport sur le marché mondial de la maintenance préventive des robots est une analyse d'études approfondies dans le but de proposer des solutions pour développer des stratégies d'entreprise à but lucratif. Il fournira en outre une assistance en termes de tendances émergentes et de chances d'évolution au sein de l'entreprise. De plus, le rapport aide à déterminer chacun des obstacles notables au développement et à détecter les tendances au sein

des différents secteurs de consommation du marché mondial de la maintenance préventive des robots. Rassembler des enregistrements historiques et actuels d'actifs fiables exceptionnels et en Le rapport sur le marché de la maintenance préventive des robots projette des approches et des idées cruciales ainsi que les dernières perceptions d'un nouveau plan de l'industrie mondiale du marché de la maintenance préventive des robots avant d'estimer sa faisabilité. Dans l'ensemble, le rapport présente un aperçu exhaustif de l'industrie du marché mondial de la maintenance préventive des robots 2020-2026 couvrant tous les aspects pertinents. Le rapport utilise différents types d'analyses pour calculer la croissance des leaders mondiaux du marché de la maintenance préventive des robots. Il explore également les derniers développements tout en évaluant la croissance des futurs acteurs internationaux du marché de la maintenance préventive des robots. Il fournit des informations cruciales telles que le portefeuille de produits, la catégorisation des revenus et une analyse des acteurs dominants du marché mondial de la maintenance préventive des robots. Fonction de tous les facteurs et développements. [33]

Le rapport sur le marché mondial de la maintenance préventive des robots offre des informations détaillées sur les principaux acteurs du marché

- ABB
- FANUC
- KUKA
- SCOTT
- Yaskawa Motoman

### 6.3.2. Exemple de maintenance préventive de robot FANUC

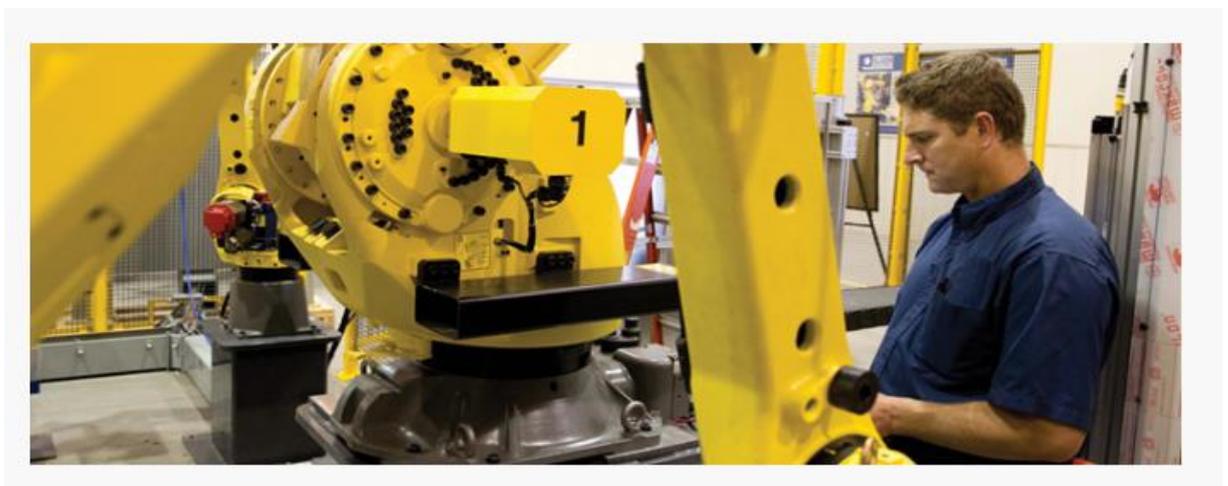


Figure3.2 : robot FANUC.

### **I. À quelle fréquence les robots a-t-il besoin d'entretien?**

La maintenance du robot doit faire partie intégrante de votre plan de maintenance global. Bien que les spécifications du fabricant diffèrent, la maintenance préventive du robot FANUC est recommandée par le fabricant après 3850 heures d'utilisation ou une année civile, selon la première éventualité. Pour les autres fabricants, la maintenance des robots industriels peut être recommandée jusqu'à toutes les 10 000 heures. Notez, cependant, que la maintenance de base de l'automatisation industrielle doit être effectuée plus fréquemment, aussi souvent que les contrôles quotidiens pour le nettoyage de la surface du capteur et les contrôles visuels. [34]

### **II. Que se passe-t-il si les robots ne sont pas réparés ?**

Sans maintenance du robot, des problèmes peuvent survenir rapidement. Ceux-ci inclus : [34]

- Mauvais fonctionnement, que ce soit en raison de capteurs et optiques sales, de fuites de liquide ou d'autres problèmes.
- Défauts de pièces.
- Des vitesses de production plus lentes.
- Durée de vie réduite des composants et des équipements.

### **III. Ai-je vraiment besoin d'un plan de maintenance de robot ?**

Oui. Les plans tels qu'un plan de maintenance du robot FANUC ne sont pas seulement importants pour la qualité du produit fini, ils sont essentiels à la productivité. Les robots mal entretenus peuvent prendre plus de temps pour effectuer des opérations, ou peuvent conduire à des reprises ou à une augmentation des rejets de pièces. Plus important encore, la maintenance peut prolonger la durée de vie de votre équipement de manière exponentielle, vous aidant à voir un fort retour sur investissement, à la fois en équipement et en maintenance. [34]

**Remarque :** Si la maintenance planifiée peut interrompre la production pendant une courte période, ce n'est rien comparé au temps de production que vous perdriez si le robot s'arrêtait de fonctionner.

## 7. Importance de la maintenance de robot industrielle

Un dysfonctionnement, une panne, un arrêt de production ou une casse peut avoir des effets catastrophiques sur l'organisation globale de votre industrie. [32]

La maintenance de vos installations robotique permet :

- De marginaliser le risque de panne de vos robots industriels.
- D'optimiser votre retour sur investissement grâce à des robots ayant une meilleure durée de vie.
- D'anticiper les arrêts de production dû à une défaillance et ainsi assurer une productivité constante de vos cellule robotique.
- D'anticiper des actions correctives pour assurer une homogénéité dans le temps de votre production.
- De garder un niveau de sécurité maximum...

## 8. La Relation entre la maintenance préventive et l'industrie mécanique

L'industrie mécanique, avec ses diverses conditions, peut jouer un grand rôle dans la rentabilité des pièces fabriquées, et ce rôle est de prolonger la durée de vie de ces pièces, et donc nous pouvons prolonger la période de maintenance préventive, et cela dans le cas où toutes les conditions nécessaires sont disponibles et remplies lors de la fabrication de ces pièces.

## 9. les défauts impact sur la performance de robot industrielle [35]

**9.1. Commande :** Le système de control du robot ne fonctionne pas correctement, ce qui affecte les performances du robot.

**9.2. Calibration :** Erreurs du robot dans les coordonnées, qui fait son travail sans précision.

**9.3. Jeu dans les liaisons :** Cet espace entre les deux pièces résulte d'une usure due à un frottement constant. Cela conduit à la faiblesse du matériau et à l'érosion de ses parties. Ce vide provoque un mouvement instable et des vibrations permanentes.

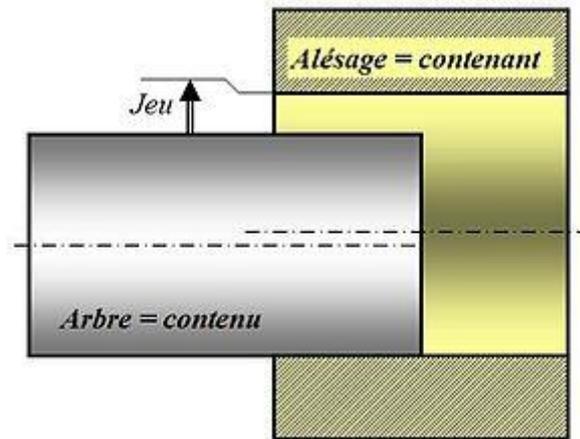


Figure3.3 : Jeu dans les liaisons.

### 9.4. Déformation des éléments

C'est une déformation qui se produit sur les éléments en raison de facteurs naturels et mécaniques tels que l'influence du climat chaud et des facteurs mécaniques représentés dans la température et la forte pression et la qualité non spécifique du matériau de fabrication, ce qui affecte la précision du robot dans ses tâches industrielles.

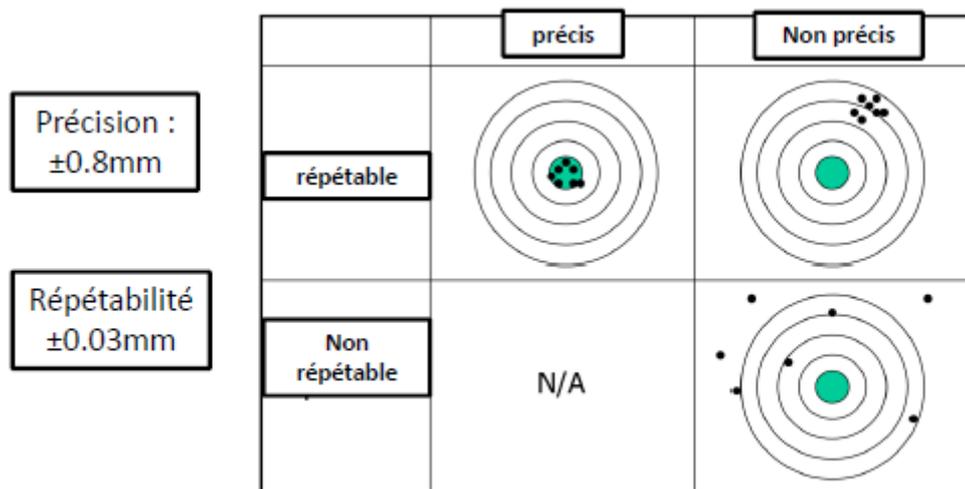


Figure3.4 : La précision du robot dans l'identification de la cible

➤ Hiérarchisation des sources d'erreur :

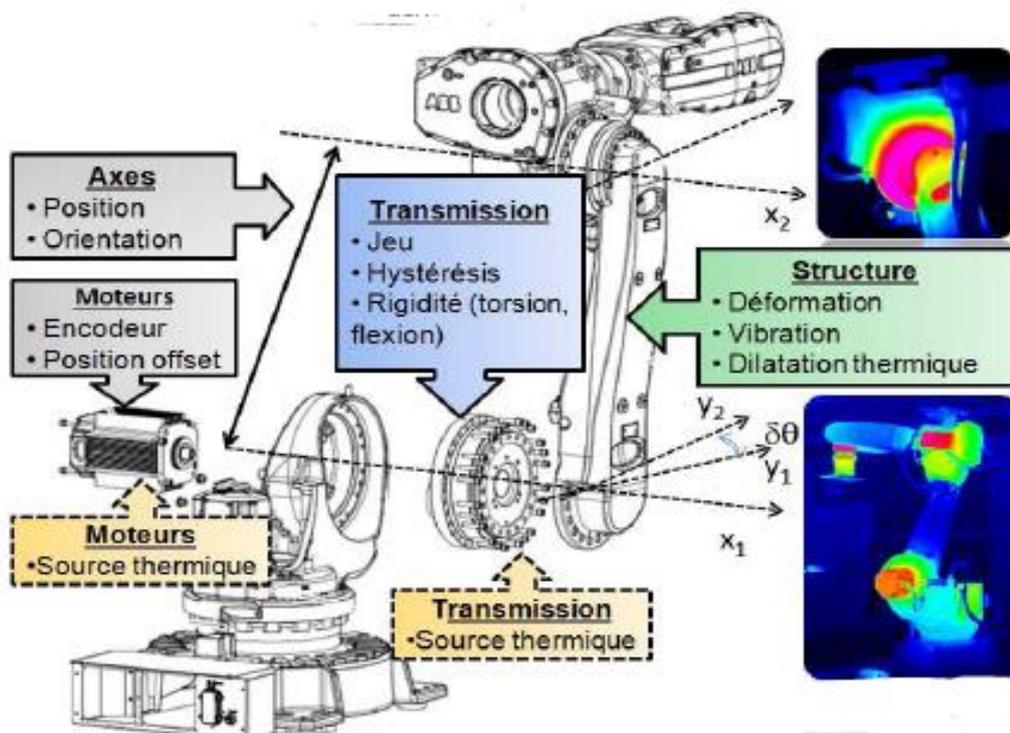
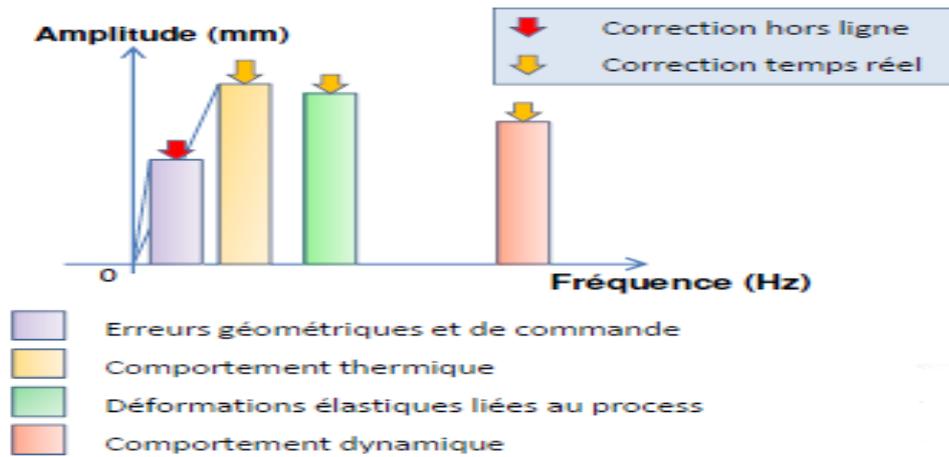


Figure3.5 : Quelques erreurs et leurs sources.

### 9.5. Défauts déforme

Ce sont les erreurs liées aux défauts dimensionnels que ce soit dans la forme générale des éléments de transmission (roues dentées) ou dans la forme des profils des dentures comme par exemple :

1. Excentricité (erreur de faux-rond) :

Ce défaut est dû à la non-concentricité entre les axes de rotation de l'engrenage et l'arbre auquel l'engrenage est attaché. Ce défaut produit une modulation d'amplitude harmonique à la vitesse de rotation de sortie du réducteur. [36]

2. Erreurs de pas :

Cette erreur est due au défaut de positionnement angulaire des dentures.

3. Erreurs de profil :

Cette erreur est due à la différence entre les profils théoriques des dentures et leurs profils réels.

### 9.6. Les défauts de montage ou de positionnement

Ces défauts sont le résultat d'erreurs dans l'assemblage qui produisent des écarts de positionnement relatif (position et orientation) entre les axes de rotation des composants du réducteur. Ces défauts engendrent une variation du rapport de réducteur. Ils proviennent principalement de : [36]

1. Défauts d'entraxe :

Ces défauts sont dus à la différence entre la distance théorique entre les axes de rotation des engrenages et la distance réelle après l'assemblage. Cet écart modifie la géométrie du contact entre les dentures et engendre erreurs harmoniques dont les fréquences défont l'étage de réduction. [36]

2. Défauts d'inclinaison :

Ces défauts sont issus de l'erreur de parallélisme entre les axes des roues. Ils modifient également la géométrie du contact des dentures et engendrent des erreurs harmoniques d'amplitude généralement plus faible que les précédents. [36]

## 10. Identification des défauts de l'axe2

Dans le cas des robots manipulateurs, la gravité pose un problème car elle oblige à utiliser des actionneurs puissants ou/et des systèmes de réduction surdimensionné [37]. Afin de remédier à ce problème, les manipulateurs sont équipés de systèmes de compensation de gravité (équilibrage).

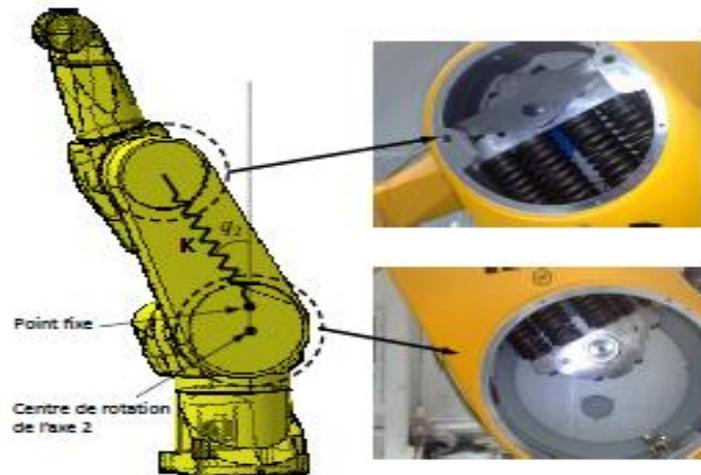


Figure3.6 : Système de compensation de gravité par ressorts.

Dans le cas de notre Staubli RX170BH, l'axe 2 du robot est équipé d'un système d'équilibrage à ressorts. Ce système est composé de quatre ressorts dont la longueur varie non linéairement en fonction de l'angle de rotation  $q_2$  de l'axe 2. Ces ressorts de compensation génèrent un couple d'équilibrage opposé au couple généré par les éléments composants du robot situés en aval de cet axe : bars 3 munis de leurs contrepoids, bars 4 et poignet. Ainsi le couple à générer par le moteur de l'axe 2 doit être au minimum égale au couple résiduel issu de la différence entre le couple de masses et le couple du système de compensation.

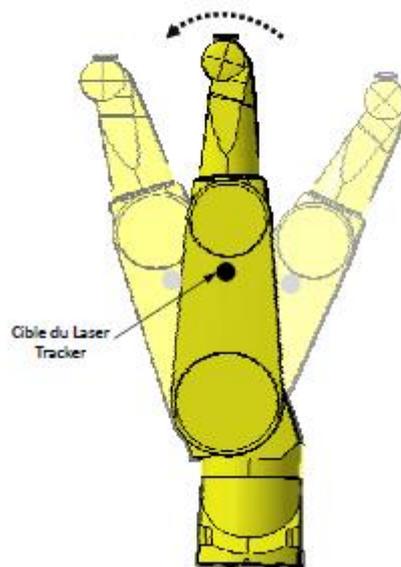


Figure3.7 : Configuration du robot pour l'identification des défauts de l'axe 2.

L'identification du défaut de l'axe 2 a été réalisée suite : nous avons fait varier l'angle de rotation de l'axe 2 du robot d'une position initiale de  $-50^\circ$  à une position finale de  $50^\circ$  avec un

pas angulaire de  $0.05^0$ . Un arrêt est mesuré par un laser tracker. La différence entre la position réelle et la position théorique nous permet de calculer l'erreur de justesse angulaire se l'axe. L'erreur de position mesurée par le laser tracker.

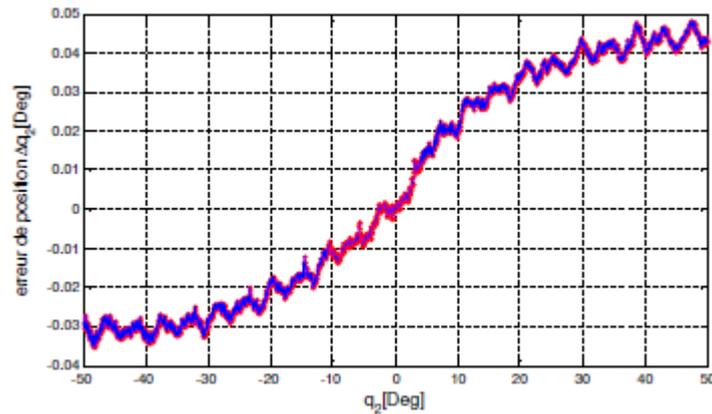


Figure3.8 : L'erreur de position de l'axe2.

A partir de cette figure, nous pouvons mettre en avant deux types de défaut :

- Le défaut de souplesse  $dq_2^{\text{stiff}}$  issu de la déformation élastique en torsion de l'axe sous l'effet du couple résiduel. Ce défaut est de l'ordre de quelques centièmes de degré.
- Le défaut de transmission  $dq_2^{\text{gear}}$ . Ce défaut issu de la chaîne cinématique de l'articulation, est de l'ordre de quelques millièmes de degré.

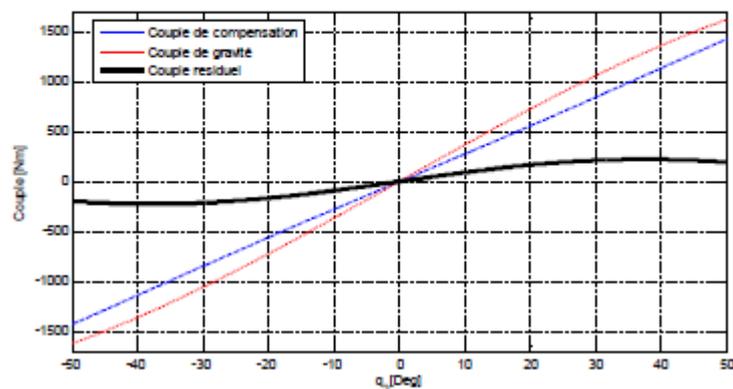


Figure3.9 : Les couples appliqués sur l'axe2.

Pour séparer les défauts de transmission, nous avons calculé le couple résiduel à partir des données du modèle de masses du robot et du modèle du système de compensation de gravité

par ressort (raideur et pré charge du robot). la figure montre ces couples dans la plage des mesures. Cette mesure permet d'ailleurs d'identifier la raideur de l'axe2. On constate que le profil général de l'erreur de justesse angulaire relevée colle parfaitement à une constante multiplicative près au profil du couple résiduel. Cela confirme notre hypothèse de départ d'une raideur constante caractérisant la souplesse axiale. Nous avons alors calculé le déplacement du a la souplesse  $dq_2^{stif f}$ . On notera traversée de jeu mécanique de  $0.011^0$ , correspondant à un changement de sens du couple résiduel. le défaut de transmission  $dq_2^{gear}$  s'écrit donc comme la différence entre  $dq_2$  et  $dq_2^{stif f}$  comme le montre la figure pour une plage  $30^0$  correspondant a la zone de travail la plus fréquente du robot .

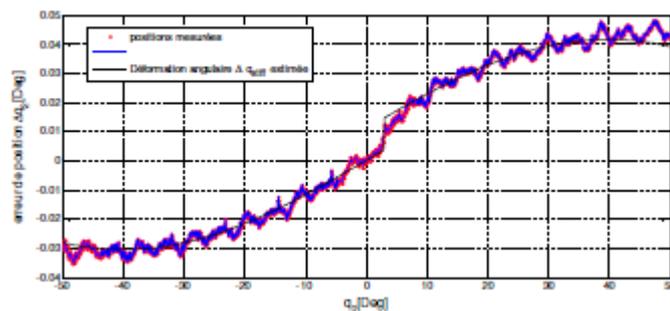


Figure3.10 : L'erreur de position de l'axe2.

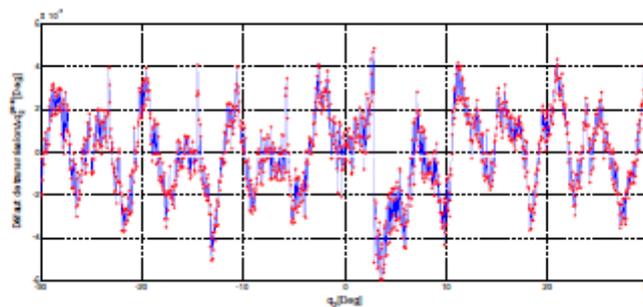


Figure3.11 : Défaut de transmission du mouvement de l'axe2.

Classiquement ce défaut de transmission des réducteurs de type Harmonic drive se compose d'un harmonique qui se répète deux fois pour chaque tour de l'entrée du réducteur [38]. Cet harmonique est entaché par des défauts de faible amplitude de fréquences élevées dus aux irrégularités de forme et de placement des dents. Il s'agit principalement d'un problème d'excentricité provenant des erreurs d'assemblage. Cette excentricité implique alors une variation du contact des dents. Le rapport de réduction devient alors variable.

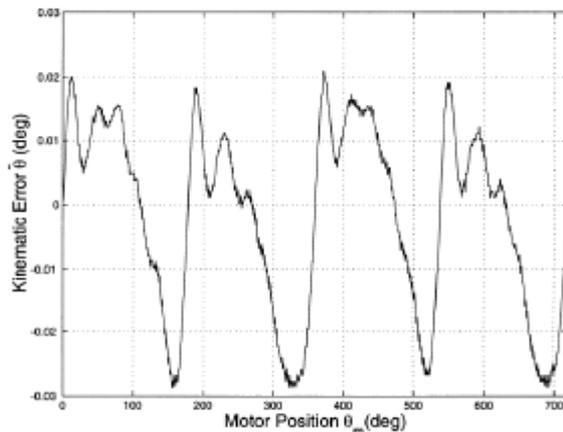


Figure3.12 : Une signature typique de l'erreur d'un réducteur de type Harmonic Drive.

Pour confirmer ce phénomène nous avons modélisé ce défaut par la fonction  $a \sin(b\Theta + c)$ , où les coefficients  $a$ ,  $b$  et  $c$  sont obtenus par une approximation au sens des moindres carrés.  $\Theta$  est l'angle de rotation à l'entrée du réducteur Staubli JCS. Le calcul de la fréquence  $b$  correspond bien à 2 cycles/tour de l'entrée de réducteur. La fonction sinus issue de l'approximation montre que ce défaut est la composante principale du défaut de transmission. Cette fonction peut être considérée comme un modèle représentatif de ce défaut.

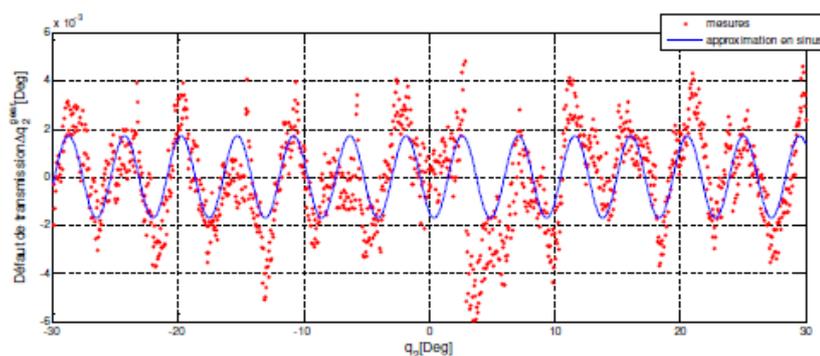


Figure3.13 : La composante principale du défaut de transmission de mouvement.

## 11. L'effet des défauts pour le rendement de robot

- Sous-estimé la durée de vie de robot.
- Minimiser la cadence de production de votre robot.
- Augmentation des défaillances et maximiser le taux d'arrêt.

- Dégradation du niveau sécurité de robot.
- Augmenter de vibrations, qui conduisent à des difficultés de contrôle.
- Plus consommation de pièces rechanges.
- Elevé de cout de maintenance robotique.

## **12. Conclusion**

En maintenant un programme d'entretien préventif régulier, vous prolongez considérablement la durée de vie de votre robot.

Nous étudions les pièces axiales et articulées en raison de leur grande mobilité et du rôle actif qu'elles ont dans un robot industriel.

**Chapitre 04 : La rentabilité de la  
maintenance préventive des pièces  
articulées et axiales sur la productivité**

## Chapitre 04

### La rentabilité de la maintenance préventive des pièces articulées et axiales sur la productivité

#### 1. Introduction

Les pièces articulées et axiales sont toujours soumises à des frottements et des pressions qui les affectent négativement, ces pièces sont donc soumises à une maintenance préventive pour les entretenir, et ces pièces sont également soumises à des expériences thermomécaniques et physicochimiques pour les choisir comme les meilleures pièces résistantes aux dommages.

#### 2. les pièces axiales et articulées

C'est l'une des principales sources dans les composants du robot industriel nécessaire à l'accomplissement de ses différentes tâches industrielles. Qui permettent de tourner au degré de liberté de chaque robot.

##### A. Pièces axiales

L'axe étend la portée verticale du robot. Il permet au bras supérieur de s'élever et de s'abaisser. Sur certains modèles articulés, il permet au bras supérieur d'atteindre l'arrière du corps, élargissant encore l'enveloppe de travail. Cet axe donne au bras supérieur le meilleur accès à la pièce.



Figure4.1 : roulement axiale.

## B. Pièces articulées

Une révolte (également appelée articulation à goupille ou articulation à charnière) est une paire cinématique à un degré de liberté utilisée dans le mécanisme. Les joints de pivotement fournissent une fonction de rotation à un seul axe utilisée dans de nombreux endroits et des mécanismes de pliage, et d'autres dispositifs de rotation à un seul axe.



Figure4.2 : pièces axiales de robot industriel.



Figure4.3 : pièces articulées.

Les pièces axiales et articulées diffèrent d'un robot à l'autre : comprenant un robot 3 axes et un robot 4 axes et 6 axes

## 2.1. Précisons la notion d'articulation

Une articulation lie deux corps successifs en limitant le nombre de degré de liberté de l'un par rapport à l'autre. Soit  $m$  le nombre de degré de liberté résultant, encore appelé mobilité de l'articulation. La mobilité d'une articulation est telle que :  $0 < m < 6$  (4.1)

Lorsque  $m = 1$  ; ce qui est fréquemment le cas en robotique, l'articulation est dite simple : soit rotoïde, soit prismatique. [39]

### ➤ 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 (voir la figure suivante).

### ➤ 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. La situation relative entre les deux corps est mesurée par la distance le long de cet axe (voir la figure suivante).

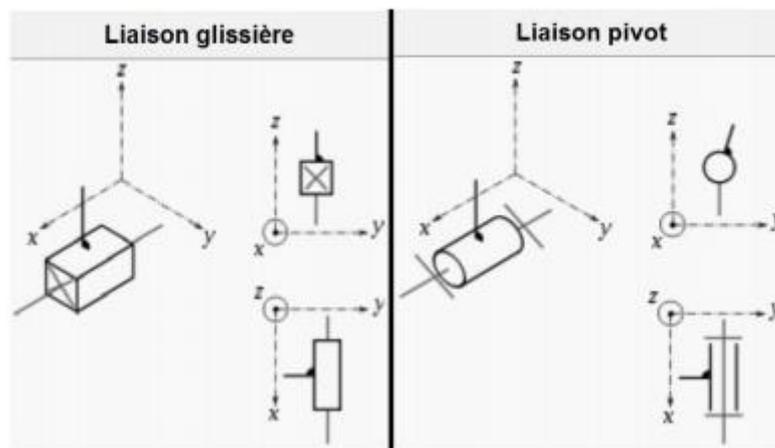


Figure 4.4 : Articulation prismatique et Articulation rotoïde.

Le tableau suivant relie entre la notion de degré de liberté et articulation.

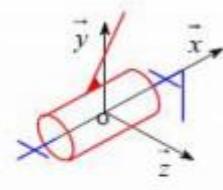
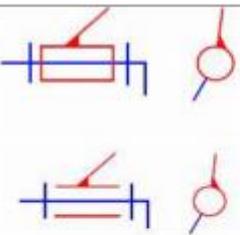
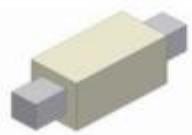
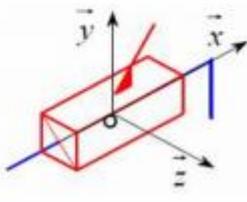
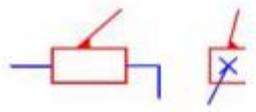
Liaison	Schéma 3D	Schéma 2D	Degrés de liberté										
<p>Liaison Pivot d'axe (<math>O, \vec{x}</math>)</p> 			<table border="0"> <tr> <td>Translation</td> <td>Rotation</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>Rx</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><i>1 degré de liberté</i></td> </tr> </table>	Translation	Rotation	0	Rx	0	0	0	0	<i>1 degré de liberté</i>	
Translation	Rotation												
0	Rx												
0	0												
0	0												
<i>1 degré de liberté</i>													
<p>Liaison Glissière d'axe (<math>O, \vec{x}</math>)</p> 			<table border="0"> <tr> <td>Translation</td> <td>Rotation</td> </tr> <tr> <td>Tx</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td colspan="2"><i>1 degré de liberté</i></td> </tr> </table>	Translation	Rotation	Tx	0	0	0	0	0	<i>1 degré de liberté</i>	
Translation	Rotation												
Tx	0												
0	0												
0	0												
<i>1 degré de liberté</i>													

Tableau 4.1 : la notion de degré de liberté et articulation.

## 2.2. Robot 6 axes

Robotique Automation System utilise des robots à 6 axes, également connus sous le nom de robots articulés, dans l'automatisation flexible sur des machines de moulage par injection de plastique horizontales et verticales pour une flexibilité accrue dans les opérations en amont et en aval, l'utilisation d'une plus grande enveloppe de travail et pour traiter l'espace au sol ou le plafond. Contraintes de hauteur. [40]

Les robots à 6 axes, ou robots articulés, permettent un mouvement articulé et interpolé vers n'importe quel point de l'enveloppe de travail:

- ✓ Axe 1 - Fait pivoter le robot (à la base du robot)
- ✓ Axe 2 - Extension avant / arrière du bras inférieur du robot
- ✓ Axe 3 - Relève / abaisse le bras du robot
- ✓ Axe 4 - Fait tourner le bras supérieur du robot (rouleau de poignet)
- ✓ Axe 5 - Lève / abaisse le poignet du bras du robot
- ✓ Axe 6 - Fait tourner le poignet du bras du robot

Le mouvement est entraîné par des servomoteurs. Un système de contrôle contrôle la puissance fournie à chaque moteur et le mouvement précis du robot.

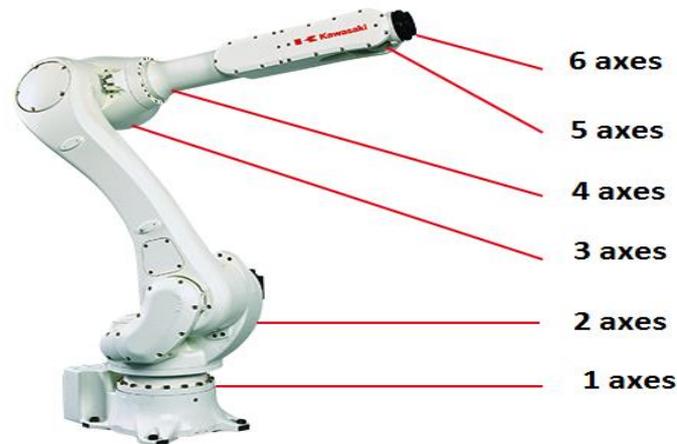


Figure4.5 : robot industrielle 6 axis.

### 2.3. Avantages

Les robots articulés, ou robots à 6 axes, sont plus faciles à aligner sur plusieurs plans, faciles à utiliser et à entretenir, et peuvent être facilement redéployés vers différents types de robots industriels [40]

### 2.4. Intégration de robot à 6 axes

Robotique Automation System représente une large gamme de robots 6 axes de haute qualité des fabricants suivants à intégrer dans nos solutions d'automatisation de moulage par injection de plastique clé en main afin de vous garantir toujours le robot adapté à vos besoins d'automatisation. [40]

- ABB Robotics
- Robots Epson
- Robotique FANUC

### 2.5. Le rôle de pièces axiales et articulées

- le robot l'utilise pour accéder à son espace de travail.
- Les pièces axiales et articulées sont généralement disposées en chaîne, avec une axiale soutenant l'autre plus dans la chaîne
- Contrôle de la trajectoire du robot grâce au mouvement coordonné des articulations du manipulateur

- Les pièces axiales et articulées déterminent le nombre de mouvement indépendants que l'effecteur d'extrémité peut déplacer.

## 2.6. Importance au regarder de la rentabilité des robots industrielle

Les robots articulés à six axes sont utilisés lorsque des mouvements complexes, un temps de cycle plus rapide et une répétition élevée sont des priorités. Ces robots se composent de six axes rotatifs avec codage absolu. Cela permet des itinéraires illimités. Les applications incluent la capture et la localisation, la manutention des pièces, l'assemblage, les machines légères, l'inspection, la numérisation. [40]

## 3. Degré de libertés – architecture

### 3.1. Positionnement d'un solide dans l'espace

La position d'un solide dans l'espace requiert 6 paramètres indépendants (cf. figure suivante)

- 3 paramètres indépendants définissent la position d'un point, noté P, du solide (coordonnées cartésiennes, cylindriques, sphériques, ..., dans la base du repère fixe),
- 3 paramètres indépendants déterminent l'orientation du solide autour du point P (angles d'Euler, paramètres d'Euler, ...). [41]

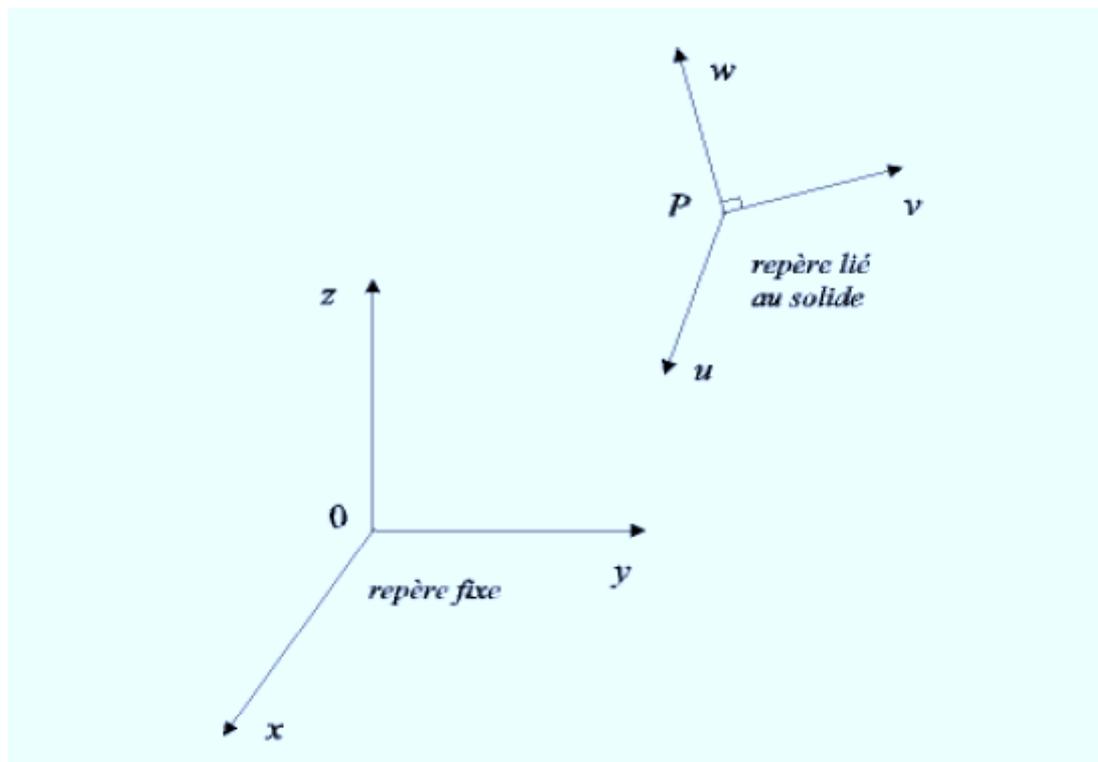


Figure4.6 : Positionnement d'un solide dans l'espace.

Exemple d'orientation d'un repère (utilisation des angles d'Euler) :

L'orientation d'un repère orthonormé (lié au solide) par rapport au repère fixe est spécifiée par 3 angles  $\psi$  (psi),  $\theta$  (thêta) et  $\varphi$  (phi), correspondant à une séquence de 3 rotations (cf. figure suivante). De tels angles sont très utilisés en mécanique. Ils permettent une définition minimum de l'orientation (3 paramètres), par contre, ils appréhendent difficilement le cas de composition de mouvement.

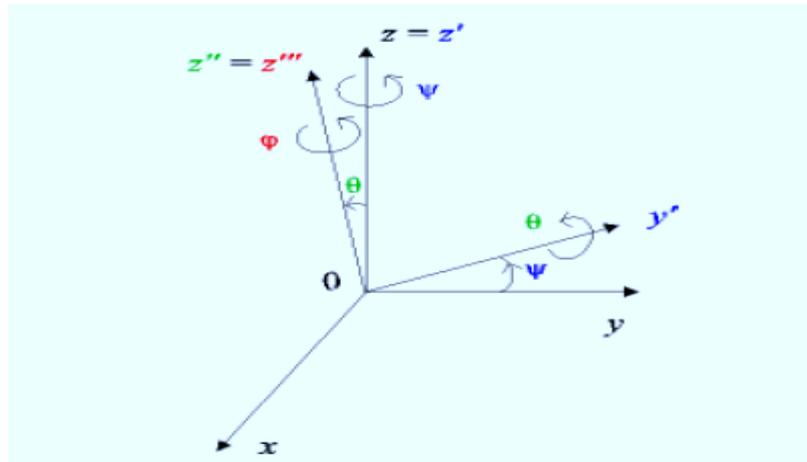


Figure 4.7 : d'orientation d'un repère.

Les angles sont définis dans le cas présent, selon la convention (z, y, z), comme suit :

- On fait une rotation d'un angle  $\psi$ , appelé lacet (yaw en anglais), autour de l'axe Oz,
- On fait une rotation d'un angle  $\theta$ , appelé tangage (pitch en anglais), autour de l'axe Oy',
- On fait une rotation d'un angle  $\varphi$ , appelé roulis (roll en anglais), autour de l'axe Oz''.

On verra en TP que l'on dispose via la console du robot de la situation (position et orientation) du repère terminal (outil), à travers les coordonnées X, Y, Z du point d'origine du repère terminal (i.e., la flasque) et des angles d'Euler ( $\psi$ ,  $\theta$ ,  $\varphi$ ) selon la convention (z, y, z) pour le robot Stäubli RX 90 (cf. Manuel Formation V+1 (CS7), p.3-19, ..., 3-22), selon la convention (x, y, z) pour le robot FANUC ARC ou LR

Un solide peut également être repéré par les coordonnées de 3 points (non situés sur une droite du solide). Il en résulte 9 paramètres (3 coordonnées par point) non indépendants (3

équations expriment l'invariabilité de la distance entre les 3 points). Notons que de par le lien établi par ces équations, il reste 6 paramètres indépendants.

On dit qu'un solide situé dans l'espace possède 6 degrés de liberté (d.d.l.). Réciproquement, il faut 6 variables de commande indépendantes pour placer de manière quelconque un solide dans l'espace. En pratique, les robots les plus courants sont dotés de 6 d.d.l., i.e., d'au moins 6 actionneurs, ce qui permet de spécifier de manière quelconque la situation (position et orientation) de leurs organes terminaux. [41]

### 3.2. Liaison

Une liaison entre 2 solides indéformables (en théorie) limite le d.d.l. d'un solide par rapport à l'autre. On appelle d.d.l. de la liaison le nombre de paramètres indépendants permettant de définir la localisation (position et orientation) d'un solide par rapport à l'autre dans tout déplacement (compatible avec la liaison). [41]

Exemples :

- Un cube sur un plan a 3 d.d.l: 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan, 1 pour déterminer son orientation dans le plan.
- Une sphère sur un plan a 5 d.d.l: 2 pour fixer les coordonnées d'un point dans le plan, 3 pour déterminer son orientation dans le plan.
- Une porte par rapport au mur a 1 d.d.l.

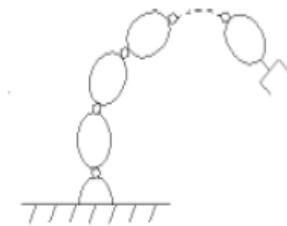
### 3.3. Mécanismes

On appelle mécanisme un ensemble de solides reliés 2 à 2 par des liaisons. On distingue 2 types de mécanismes : [41]

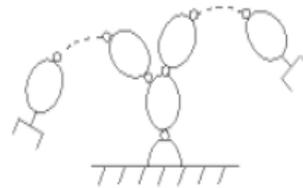
- Les mécanismes en chaîne simple ouverte (ou en série). Lorsque l'on parcourt le mécanisme, on ne repasse jamais 2 fois sur la même liaison, ou sur le même solide. Ce type de système est le plus répandu.
- Les mécanismes en chaîne complexe, i.e., tout ce qui n'est pas en série (au moins un solide avec plus de 2 liaisons). De tels systèmes se subdivisent en 2 groupes : les chaînes structurées en arbre, et les chaînes fermées (dont l'avantage est d'être a priori plus rigide, plus précis, capable de manipuler de lourdes charges). A titre d'exemple, le pantographe<sup>7</sup> est un mécanisme en chaîne fermée.

Pour représenter un mécanisme, on dispose de 2 méthodes :

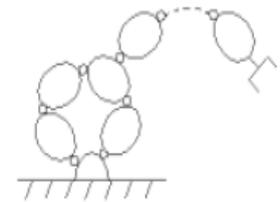
- Le schéma cinématique : On utilise la représentation normalisée des liaisons pour représenter le mécanisme, soit en perspective, soit en projection.
- Le graphe, non normalisé. A titre d'exemples, considérons quelques mécanismes :



*chaîne simple ouverte*



*chaîne structurée en arbre*

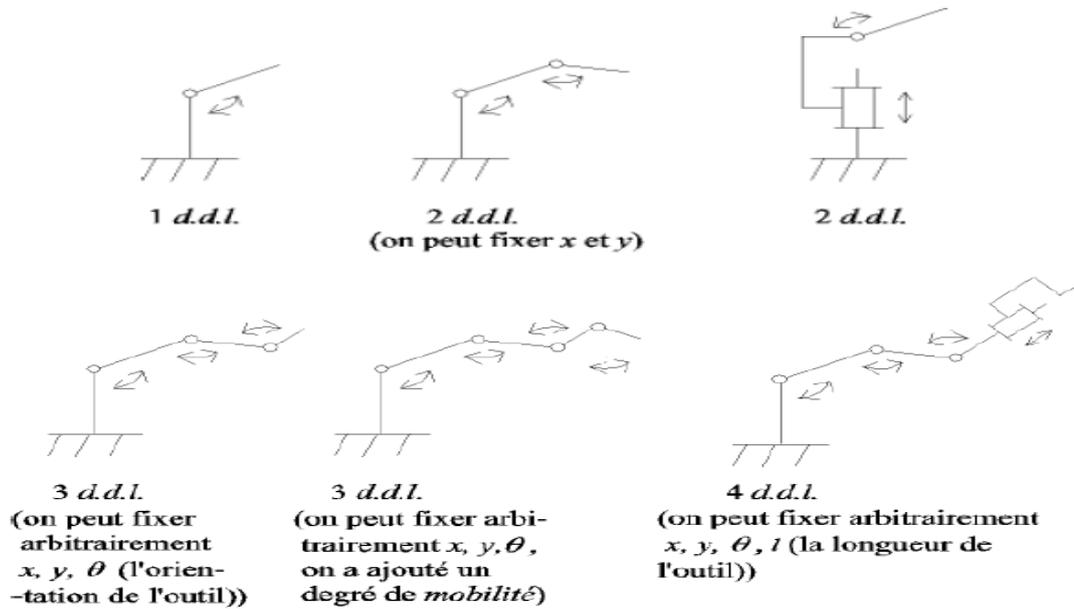


*chaîne fermée*

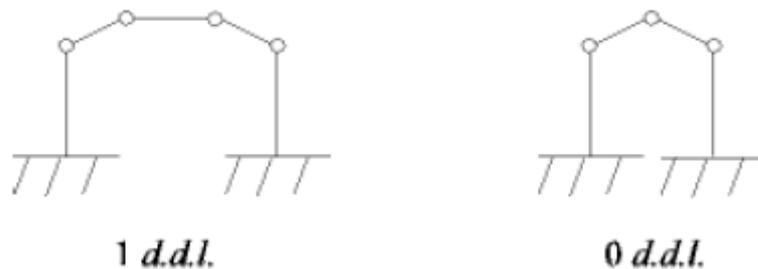
**Définition (degré de liberté, d.d.l.) :** Le nombre de d.d.l. d'un mécanisme est le nombre de paramètres indépendants qui permettent de définir la position du mécanisme à un instant donné du mouvement. [41]

### Exemples

- Chaînes simples ouvertes



➤ Chaînes complexes :



**Définition (redondant) :** Un robot est redondant lorsque le nombre de d.d.l. du mécanisme est inférieur au nombre d'articulations indépendantes (motorisées). Cette propriété permet de préserver les capacités de déplacement de l'organe terminal en présence d'obstacles, le (ou les) d.d.l. supplémentaire(s) autorisant leur contournement. [41]

## 4. la méthodologie de fabrication de ces pièces

### 4.1. Fabrication par tournage

#### I. Définitions de tournage

Le tournage est un procédé d'usinage permettant l'obtention des surfaces de révolution intérieures et extérieures, des surfaces planes ainsi que d'autres surfaces telles que celles obtenues par filetage... [42]



Figure4.8 : Fabrication par tournage.

## II. pièces



Figure4.9 : transfert de pièces par tournage.

## III. principales opérations d'usinage en tournage [43]

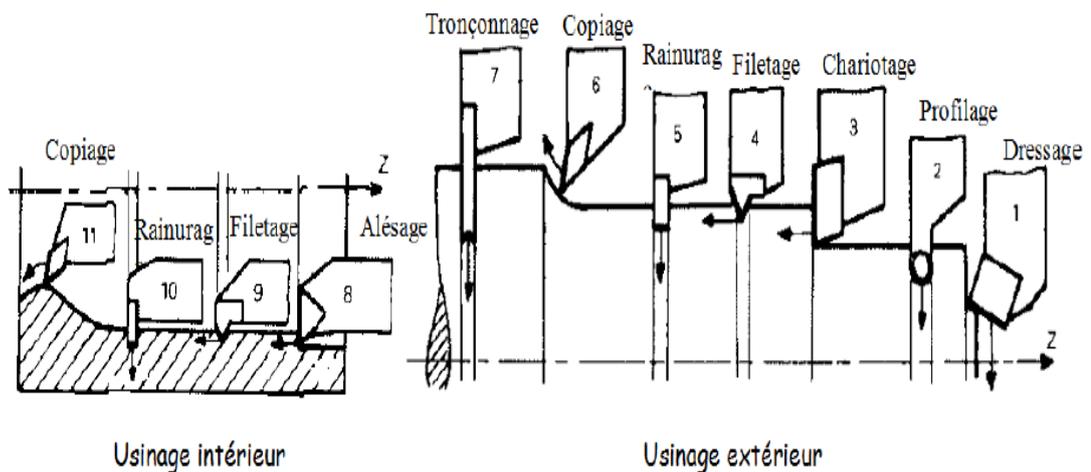


Figure4.10 : principe de tournage.

## 4.2. Fabrication par fraisage

### I. Définitions de fraisage

Le fraisage est un procédé d'usinage réalisable sur des machines-outils appelées fraiseuses. Il permet la réalisation des pièces prismatiques ou de révolution, de profils spéciaux tel qu'hélices, cames, engrenages... [44]



Figure4.11 : fraisage.

### II. Pièces

**PIÈCE BRUTE**



**PIÈCE USINÉE**



Figure4.12 : transfert de pièces par fraisage.

### III. Principales opérations d'usinage en fraisage [43]

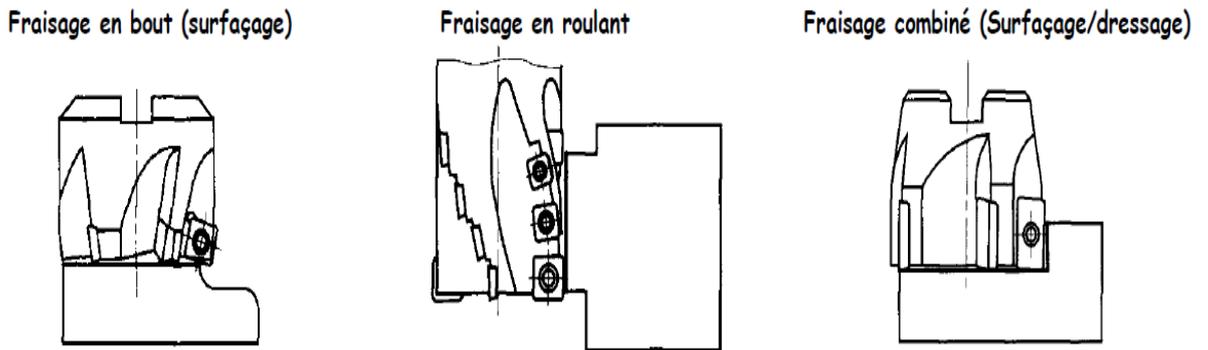


Figure4.13 : principe de fraisage.

### 4.3. Fabrication par moulage

#### I. Définitions de moulage

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit, consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à obtenir). Le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule. [45]

#### II. Types de moulage

- Moulage en sable.
- Moulage métallique ou moulage permanent.
- Procédés spéciaux de moulage.

#### III. Principales opérations de moulage

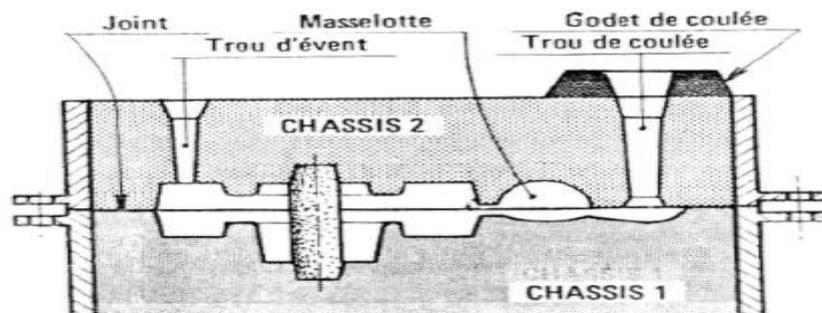


Figure4.14 : principe de moulage.

## 4.4. Fabrications par impression 3D

### I. Définitions d'impression 3D

Cette technique consiste à déposer couche par couche un filament de matière thermoplastique fondu à 200°C (en moyenne) qui en se superposant donne forme à l'objet. La tête d'impression se déplace selon les coordonnées X, Y et Z (longueur, largeur et hauteur) transmises par un fichier 3D correspondant au modèle 3D de l'objet à imprimer. Limitée pendant longtemps à des matériaux de type plastique tels que les classiques PLA et l'ABS, l'impression 3D voit arriver de nouveaux filaments composites à base de métal (cuivre, bronze...), de fibres de carbone et même de bois. Plus rarement certaines machines utilisent des cires ou des polycarbonates [46].

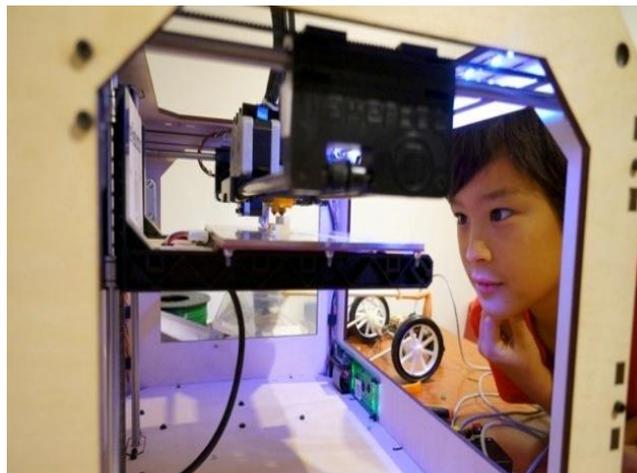


Figure4.15 : impression 3D.

Les avantages de l'impression 3D s'y retrouvent souvent :

- Design complexe / Géométries filaires / Mécanisme indémontable
- Rapidité, réduction du temps d'assemblage
- Optimisation topologique / Allègement
- Petite série
- Personnalisation de masse
- Remote Production

## II. Fonctionnement d'une imprimante 3D

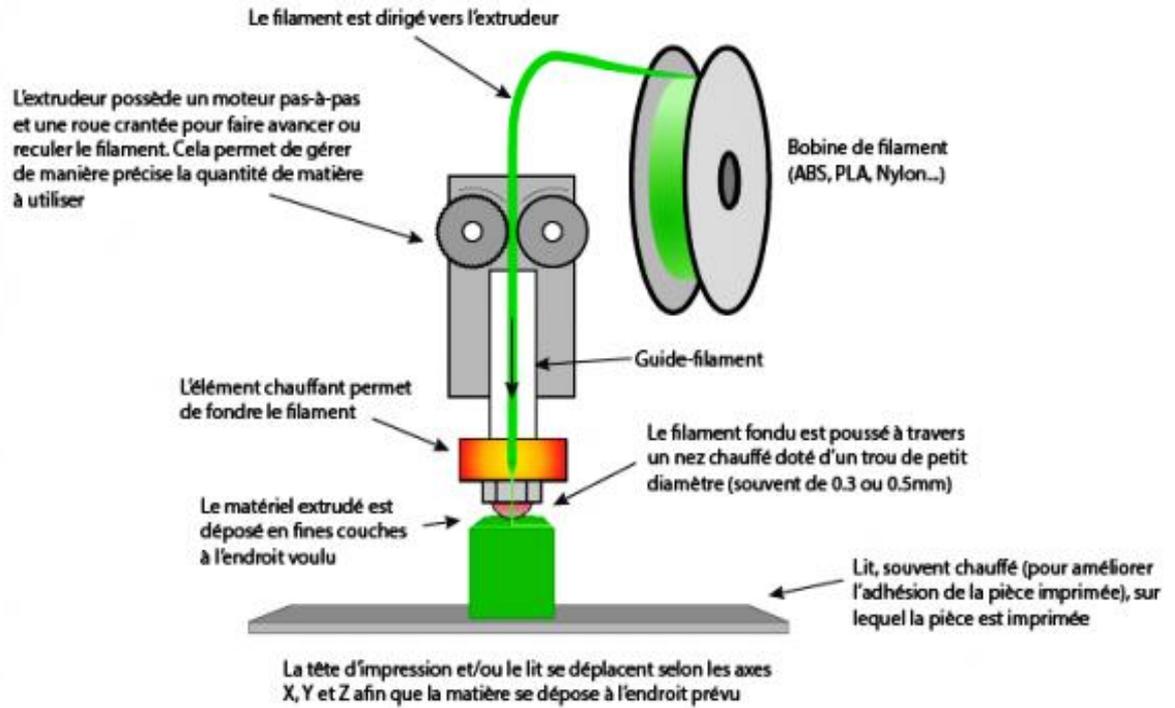


Figure4.16 : principe de fonctionnement d'une imprimante 3D.

### 4.5. Fabrication par frittage

#### I. Définitions

Le frittage est un traitement thermique qui permet aux particules de se lier entre elles pour former une structure cohérente et solide, en utilisant des mécanismes de transfert de matière qui se produisent souvent à l'échelle atomique. Le collage conduit à une amélioration des propriétés mécaniques de la structure et à une diminution de l'énergie du système [47].

- Il permet de maîtriser la densité de la matière ; comme on part d'une poudre et que celle-ci ne fond pas, on peut maîtriser la taille des grains de poudre (granulométrie) et la densité du matériau, selon le degré de compactage initial des poudres ou l'utilisation de dopants, ou l'adjonction de liants.

- Il permet d'obtenir des matériaux durs mais fragiles, à porosité contrôlée, inertes chimiquement (faible réactivité chimique et bonne tenue aux corrosions) et thermiquement ;
- Il permet de maîtriser les dimensions des pièces produites : comme il n'y a pas de changement d'état, les variations de volume, de dimensions, sont peu importantes par rapport à la fusion (absence de phénomène de retrait).

## II. Le frittage laser

Les particules de poudre se dissolvent sous l'influence de la chaleur et finissent par fusionner les unes avec les autres. Une nouvelle couche de poudre fine est ensuite étalée et durcie à nouveau par laser et fixée à la première. Ceci est répété plusieurs fois jusqu'à ce que votre portion soit terminée. Ensuite, votre partie de la poudre libre est soulevée et le corps est brossé, puis poncé ou poncé à la main pour la finition [47].

La poudre la plus utilisée pour ce type d'impression est le polyamide. De couleur blanche, ce matériau est en fait du nylon. Il donnera à votre objet une surface respirant qui pourra également être repeinte si vous souhaitez lui donner de la couleur. D'autres ingrédients tels que du verre ou de la poudre de céramique peuvent également être utilisés. Les fabricants utilisent souvent une combinaison des deux types de poudres pour obtenir plus de succès.

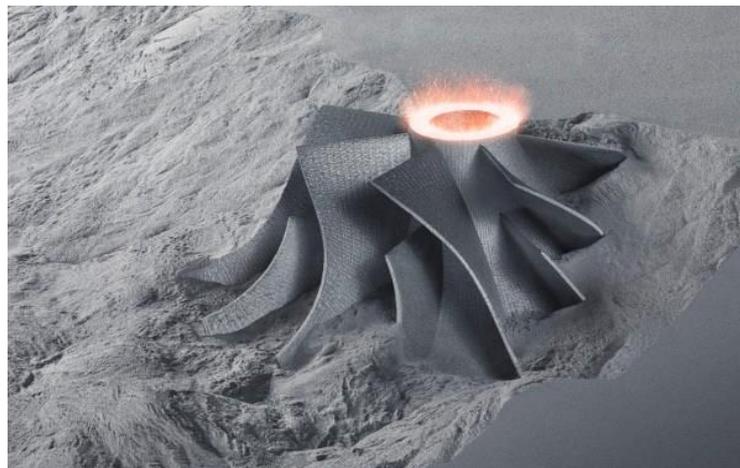


Figure4.17 : frittage laser.

Sur le même principe on retrouve aussi le DMLS qui est l'abrégié de Direct Métal Laser Sintering. Ce procédé permet de réaliser des objets en métal en fusionnant cette fois une poudre de fines particules métalliques. Presque tous les métaux peuvent être utilisés, cela va du cobalt au titane en passant par l'acier et des alliages comme l'Inconel.

Même si sa précision d'impression est inférieure au SLA, le frittage laser permet de fabriquer des pièces avec un niveau de détail assez élevé (0.1mm) et à géométrie complexe. De plus la poudre restante qui n'aura pas été passée au laser pourra être réutilisée la fois suivante. Généralement les pièces obtenues avec ce processus demande davantage de finitions (ponçage, peinture, vernis...) que le SLA du fait de son rendu un peu granuleux.

### III. Fonctionne la technologie de frittage

Le système de miroirs galvo haute précision à focalisation dynamique ajuste constamment la forme du rayon laser pour garantir une forme circulaire du laser sur la totalité de la surface de fabrication. Cette fonctionnalité permet de garantir un niveau de précision très élevé et une haute qualité de surface sur toutes les pièces quelle que soit leur position sur la plateforme.

Une fois qu'une couche de poudre est frittée, la plateforme de fabrication est abaissée de la hauteur d'une épaisseur de couche. Une nouvelle couche de poudre, étalée uniformément sur la plateforme par un rouleau rotatif avec un système bidirectionnel permettant de réduire le surplus de poudre non utilisé. Le processus est répété jusqu'à ce que la pièce soit complète.

L'élément clé du processus de frittage laser est sa stabilité thermique exceptionnelle. Cette stabilité est assurée par un système de chauffage de l'enceinte sur huit zones, combiné à des chauffages complémentaires sur le piston, les bords de la cuve et des bords de la plateforme de fabrication. L'ensemble est piloté par un système de contrôle intelligent pour garantir les meilleures propriétés mécaniques des pièces fabriquées et la répétabilité du processus sur une gamme très large de matériaux. [47]



Figure4.18 : frittage laser.

**Remarque :** La fabrication mécanique de pièces axiales et articule par impression 3D et frittage permettent de maintenir ses performances, notamment

- Maintenir l'équilibre des pièces en évitant les matériaux vides
- Rend les pièces résistantes au frottement pour éviter la corrosion
- Augmenter l'efficacité de coupe
- Résistant à la chaleur
- Une augmentation de l'équilibre structurel, physicochimique et mécanique

## **5. Etude théorique**

A travers cette étude, nous traiterons un ensemble de tests mécanique, thermique et chimique, afin de valoriser les propriétés physicochimiques des parties axiales et articulaires au niveau de la structure du robot.

Et sur la base des résultats de ces tests, sur la base desquels la qualité du matériau est choisie, et ceci en fonction d'un ensemble de caractéristiques sous couvert du test de résistance du matériau et des tests thermiques et sur cette base et en étudiant les résultats de ces tests nous préparons et fabriquons les pièces détachées étudiées , afin de les rendre plus solides résistant au frottement et à la corrosion, et a une durée de vie plus longue dans le système dans lequel vous travaillez.

## **6. propriétés mecanique et test realise pour des pieces dans le cadre de la resistance des materiaux**

L'essai des matériaux étudie le comportement des matériaux soumis à différentes sollicitations. Il s'agit pour l'essentiel d'observer le rapport qui existe entre les forces appliquées et la déformation, ainsi que les sollicitations limites résultantes entraînant une défaillance des composants. [48]

Les valeurs caractéristiques obtenues par les méthodes d'essai mécanique sont utilisées dans le développement des matériaux, la conception des composants, ainsi que dans l'application de l'assurance qualité. Afin de caractériser aussi précisément que possible les propriétés des matériaux, on dispose d'une série de méthodes d'essai normalisées:

## 6.1. Essai de traction pour la détermination de la résistance à la traction et de l'allongement de rupture

L'essai de traction est considéré comme étant la principale méthode des essais destructifs des matériaux. Dans ce dernier, l'éprouvette normalisée de coupe transversale connue est soumise à une force de croissance relativement faible dans la direction longitudinale jusqu'à la rupture. Avant que la striction ne débute, l'éprouvette présente un état de contrainte axiale. Le diagramme force-allongement enregistré permet d'illustrer le rapport qui existe entre la contrainte et la déformation. [48]

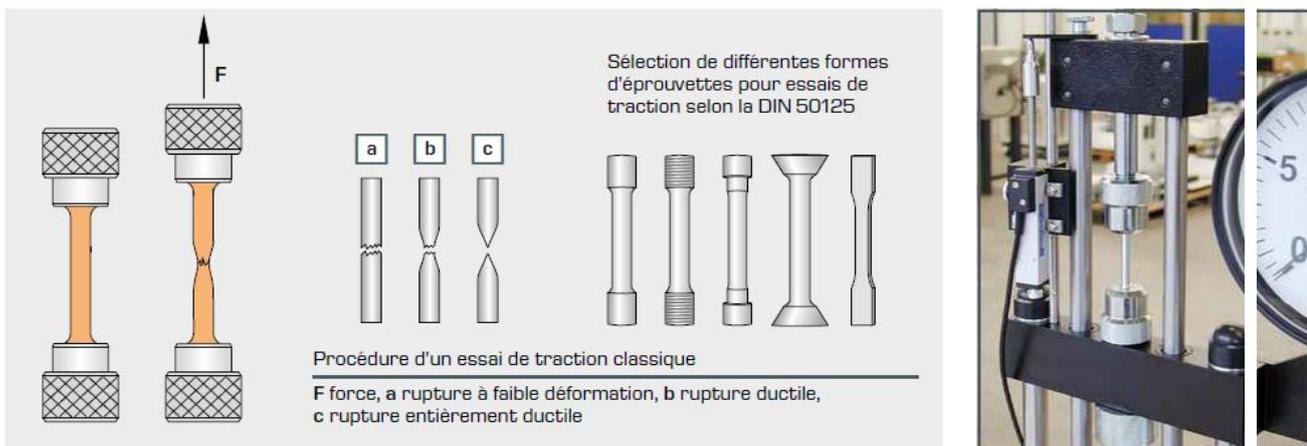


Figure4.19 : essai de traction classique.

### A. Diagramme contrainte-déformation

Le diagramme contrainte-déformation met très bien en évidence les différences de comportement des matériaux, et fournit les valeurs caractéristiques de résistance à la traction  $R_m$ , limite d'élasticité  $R_e$ , limite de proportionnalité  $R_p$ , allongement de rupture  $A$  et module d'élasticité  $E$ .

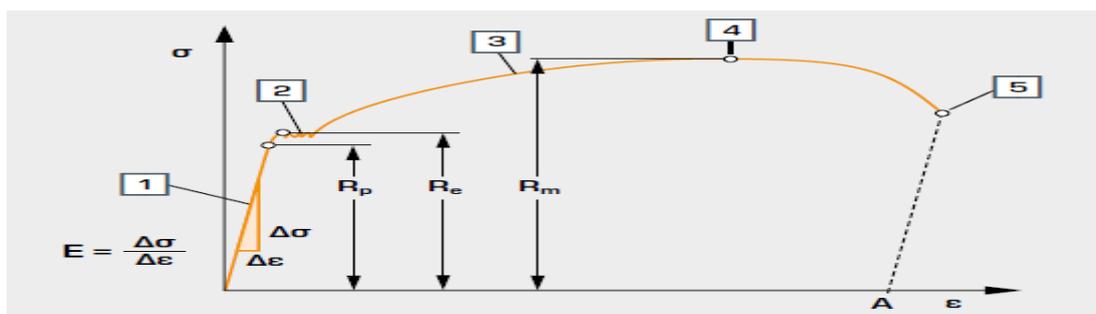


Figure4.20 :Diagramme contrainte-déformation.

Les données :

$\sigma$  : contrainte,  $\varepsilon$  : déformation, **R<sub>p</sub>** : limite de proportionnalité, **R<sub>e</sub>** : limite d'élasticité, **R<sub>m</sub>** : résistance à la traction, **A** : allongement de rupture **1** : droite de Hooke, **2** : déformation de Lüders, **3** : plage de renfort, **4** : début de la striction, **5** : rupture

- Chaque matériau a une courbe caractéristique de déformation et de contrainte.

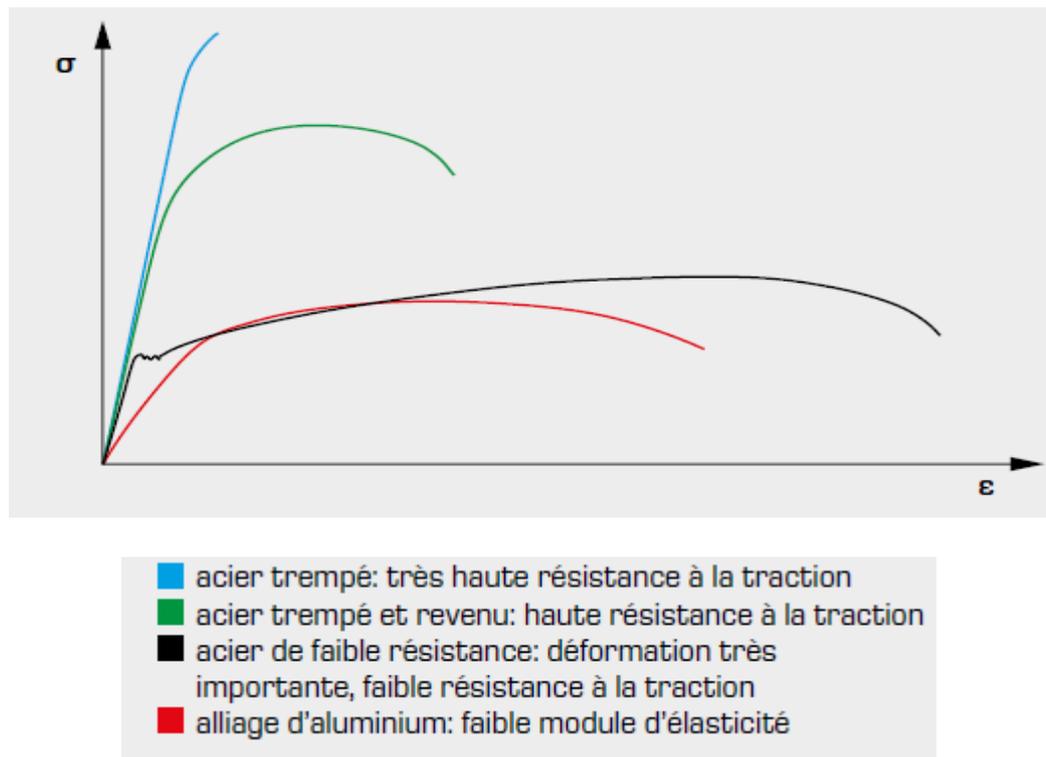


Figure4.21 : une courbe caractéristique de déformation et de contrainte.

## 6.2. Essai de compression pour la détermination des courbes de fluage

Les essais de compression tiennent une place moins importante que les essais de traction dans le contrôle des matériaux métalliques. Mais ils sont toutefois essentiels pour l'étude de matériaux tels que les pierres naturelles, les briques, le béton, le bois de chauffage, etc. Lors de ces essais, l'éprouvette normalisée de coupe transversale connue est soumise à une force de croissance faible dans la direction longitudinale jusqu'à la rupture. L'éprouvette présente un état de contrainte axiale. Le diagramme force-trajectoire enregistré permet d'illustrer le rapport qui existe entre la contrainte et l'écrasement. Le diagramme contrainte-écrasement met très bien en évidence les différences de comportement des matériaux, et fournit les valeurs

caractéristiques de résistance à la compression, de limite d'écrasement à 0,2%, ainsi que de contrainte de fluage de compression. [48]

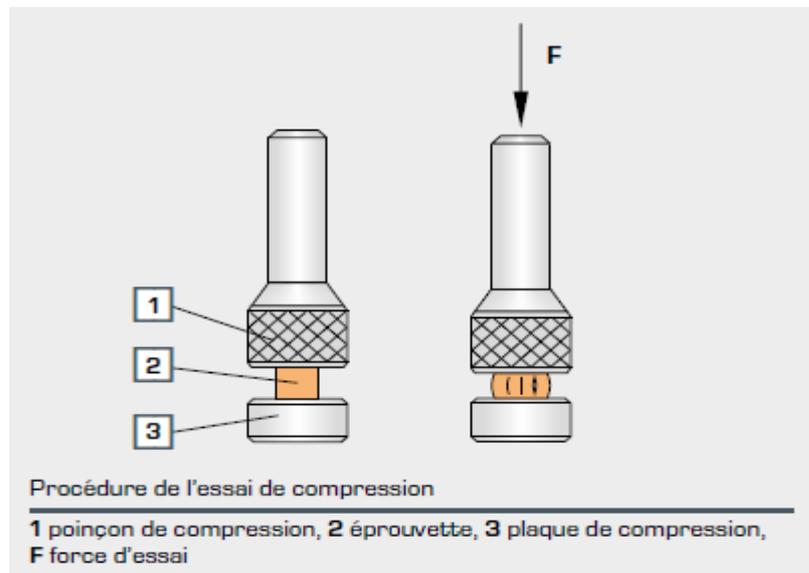


Figure4.22 : essai de compression.

## B. Diagramme contrainte-écrasement

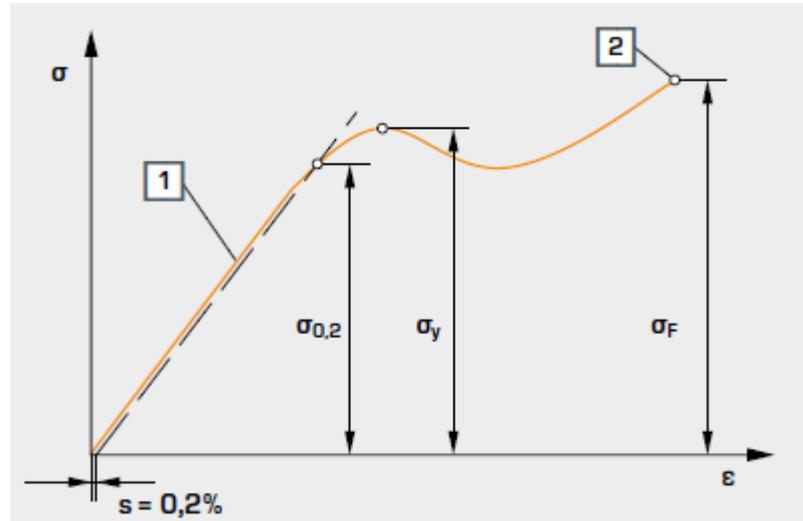


Figure4.23 : Diagramme contrainte-écrasement.

Les données :

$\sigma$  : contrainte,  $\varepsilon$  : écrasement,  $s$  : limite d'écrasement à 0,2%,  $\sigma_y$  : contrainte de fluage de compression,  $\sigma_F$  : résistance à la compression, **1** : plage élastique, **2** : rupture

- Chaque matériau a une courbe caractéristique d'écrasement et de contrainte.

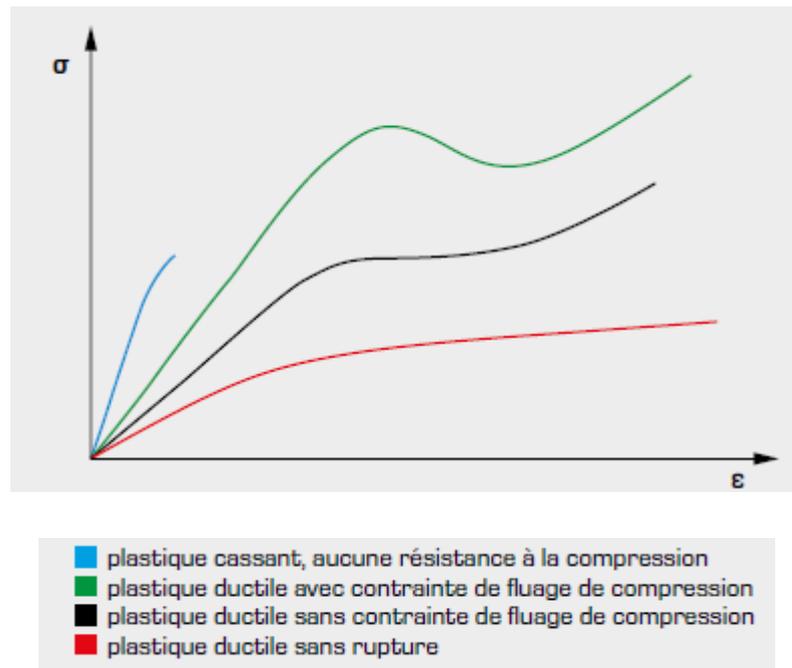


Figure4.24 : une courbe caractéristique d'écrasement et de contrainte.

### 6.3. Essais de flexion pour l'étude du comportement de déformation

Le cas de charge de flexion le plus étudié dans les essais des matériaux est l'essai de flexion à trois points. Il s'agit d'étudier une poutre logée sur deux appuis, et soumise au milieu à une charge unique. L'essai de flexion démontre le rapport qui existe entre la charge appliquée sur une poutre en flexion et sa déformation élastique. Il met en évidence l'influence exercée par le module d'élasticité et le moment d'inertie géométrique. [48]

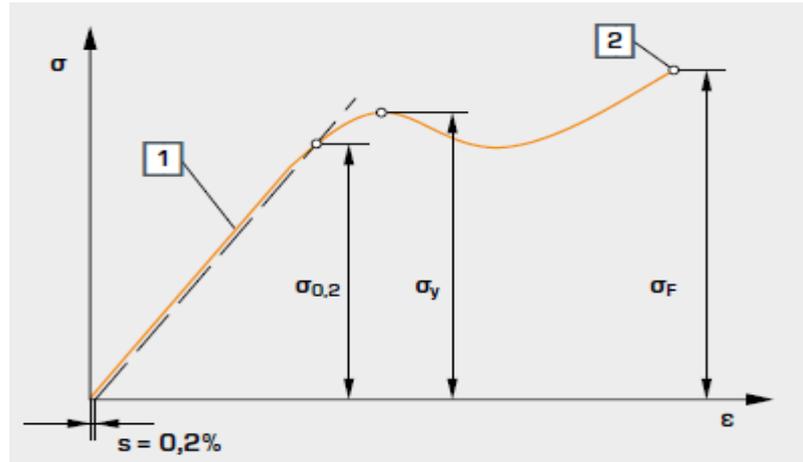


Figure4.25 : Procédure de l'essai de flexion à trois points.

Les données :

**1** : élément de pression, **2** : éprouvette, **3** : deux appuis pour le logement de la poutre, **F** : force d'essai

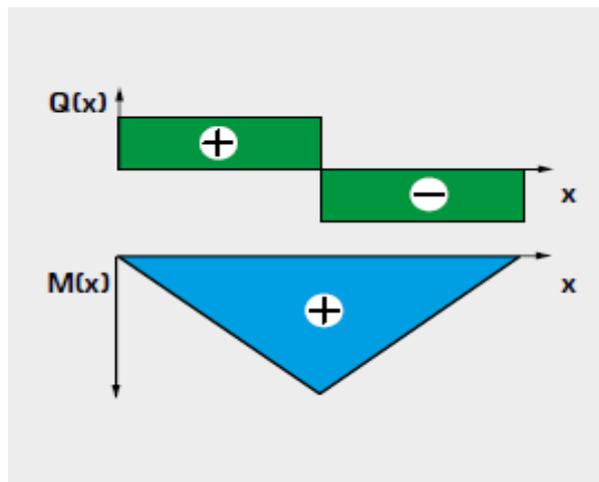


Figure4.26: Contrainte en flexion avec courbe des forces transversales et du moment de flexion.

Les données :

**Q** : effort tranchant, **M** : moment de flexion **x**: distance

#### 6.4. Essai de torsion pour l'étude du comportement plastique des matériaux

Les composants soumis à des mouvements rotatifs sont sollicités en rotation. Cette rotation est également appelée torsion. La résistance de torsion déterminée par l'essai de torsion sert

d'orientation pour connaître la sollicitation admissible du matériau. Cette méthode est utilisée pour les arbres, axes, fils métalliques et ressorts, ainsi que pour évaluer le comportement de ténacité des aciers à outils. [48]

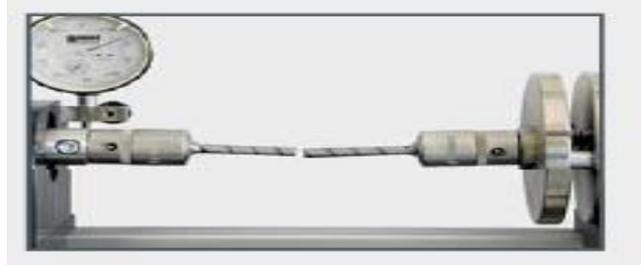


Figure4.27 : essai de torsion.

Lors de l'essai de torsion, une éprouvette est fermement fixée à une extrémité, et soumise à l'autre extrémité à un couple en croissance constante, le moment de torsion. Le moment de torsion provoque des contraintes de cisaillement dans la section de l'éprouvette; un état de contrainte s'installe, entraînant une déformation, puis une rupture.

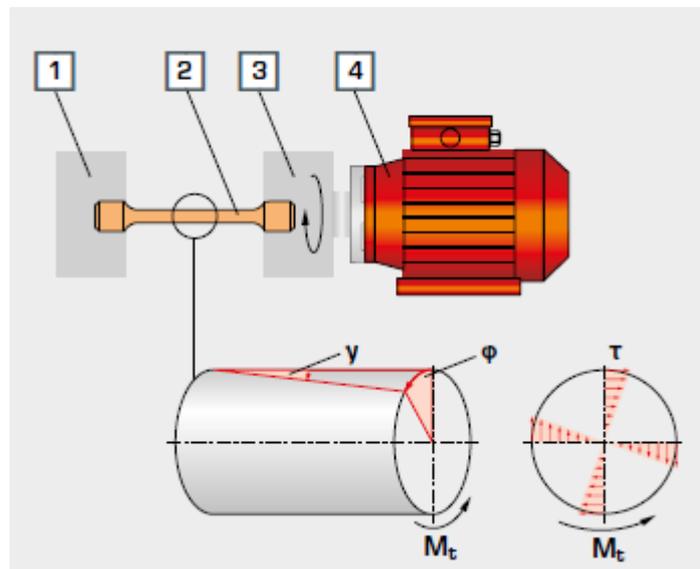


Figure4.28 : Procédure de l'essai de torsion.

Les données :

**1** : serrage fixe, **2** : éprouvette, **3** : serrage rotatif, **4** : entraînement;  **$M_t$**  : moment de torsion,  **$\gamma$**  : angle de cisaillement,  **$\phi$**  : angle de torsion,  **$\tau$**  : contrainte de cisaillement.

### 6.5. Essai de cisaillement pour l'étude de la capacité de charge contre le cisaillement

L'essai de cisaillement est utilisé pour le contrôle des vis, rivets, tiges et clavettes, et sert à déterminer la résistance au cisaillement du matériau ou le comportement du matériau en cas de sollicitation de cisaillement. À cet effet, on génère des contraintes de cisaillement dans l'éprouvette, en lui appliquant des efforts tranchants externes jusqu'à ce qu'elle se cisaille. Il existe deux méthodes pour déterminer la résistance d'un matériau à la sollicitation de cisaillement: la méthode de test à simple section, et la méthode de test à double section.

Dans le cas de la méthode à double section, l'éprouvette est cisailée au niveau de deux sections, tandis qu'elle ne se cisaille que sur une section dans le cas de la méthode à simple section. Le calcul de la résistance au cisaillement diffère pour ces deux méthodes en ce qui concerne la surface de section à poser. La résistance au cisaillement déterminée lors de l'essai de cisaillement est importante pour le dimensionnement des vis, rivets et tiges, ainsi que pour le calcul de la force requise pour le cisaillement et le poinçonnage. [48]

$\tau = \frac{F}{2 \cdot A}$	Résistance au cisaillement pour la méthode à double section
	$\tau$ résistance au cisaillement, F force, A surface de cisaillement

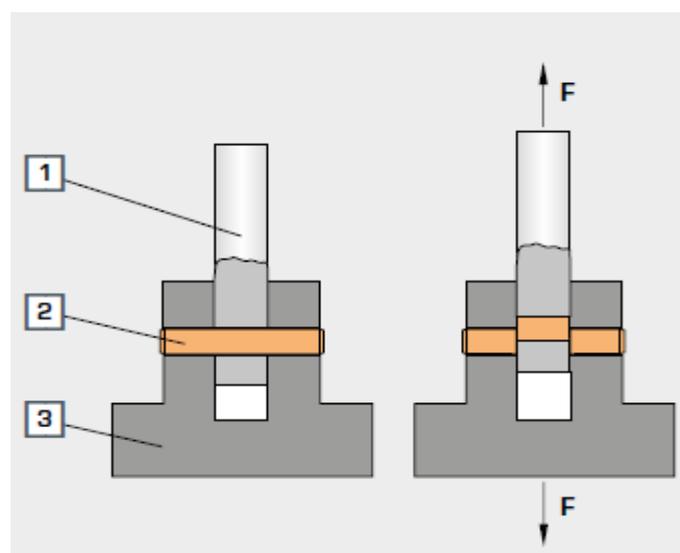


Figure4.29 : Procédure de l'essai de cisaillement à double section.

Les données :

**1** : tirant de traction, **2** : éprouvette, **3** : boîtier, **F** : force d'essai.

## 7. expériences de dureté (vicker, rowell, brinell)

### 7.1. La dureté

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. La dureté est alors une propriété physique complexe et difficile à interpréter, qui dépend non seulement des caractéristiques de ce matériau, mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration. Les essais habituels de dureté sont simples, rapides, et généralement non destructifs, ils offrent donc un moyen très commode, et très utilisé dans les ateliers, pour vérifier l'évolution des propriétés d'une pièce métallique. La dureté permet d'apprécier, dans une certaine mesure, la résistance mécanique, la résistance à l'abrasion, la conservation du poli, la difficulté d'usinage, etc. Elle permet d'apprécier la résistance des corps fragiles (carbures, composés intermétalliques, etc.) [49]

### 7.2. Principe de l'essai de dureté Brinell

Cette méthode d'essai consiste, dans des conditions définies, à enfoncer un corps d'essai normalisé, une bille en métal dur, à l'intérieur du matériau. La surface de l'empreinte laissée est ensuite mesurée optiquement. Puis la surface de l'empreinte est calculée à partir de son diamètre et du diamètre de la bille. La pénétration du corps d'essai entraîne l'apparition d'un état de contrainte triaxiale dans l'éprouvette. La dureté Brinell est calculée à partir de la force d'essai et de la surface de l'empreinte de la section sphérique. [10]

$$HB = \frac{0,102 \cdot F}{A_B} \quad 0,102 = \frac{1}{9,81} = \frac{1}{g}$$

pour la conversion  
de N en kilogramme-force

Les données :

**HB** : valeur de dureté Brinell, **F** : force d'essai en N, **AB** : surface de l'empreinte en mm<sup>2</sup>, g=9,81 accélération de la pesanteur.

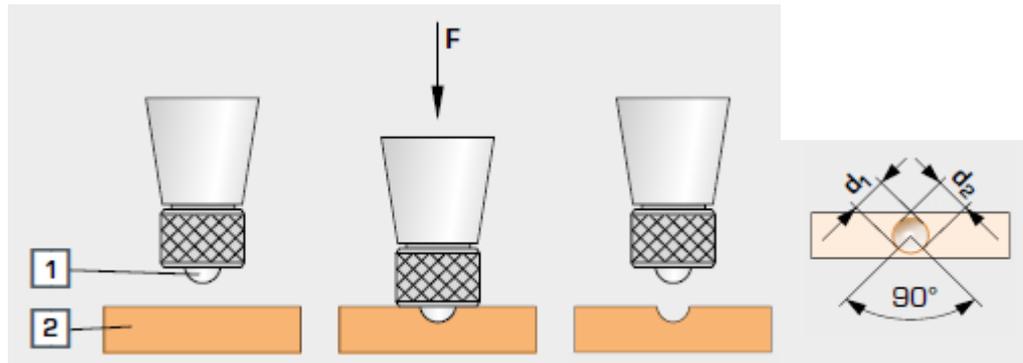


Figure4.30 : Procédure d'essai et mesure optique de l'empreinte laissée.

Les données :

**1** : bille en métal dur, **2** : éprouvette, **F** : force d'essai, **d1 et d2** : diamètres en angle droit l'un par rapport à l'autre

### 7.3. Principe de l'essai de dureté Vickers

La méthode d'essai est similaire à celle de l'essai de dureté Brinell. Mais à la différence de la méthode Brinell, le corps d'essai utilisé est un diamant de forme pyramidale. La mesure des deux diagonales  $d_1$  et  $d_2$  et le calcul de la moyenne permettent de déterminer la diagonale de l'empreinte. La dureté Vickers est le quotient de la force d'essai par la surface de l'empreinte. [48]

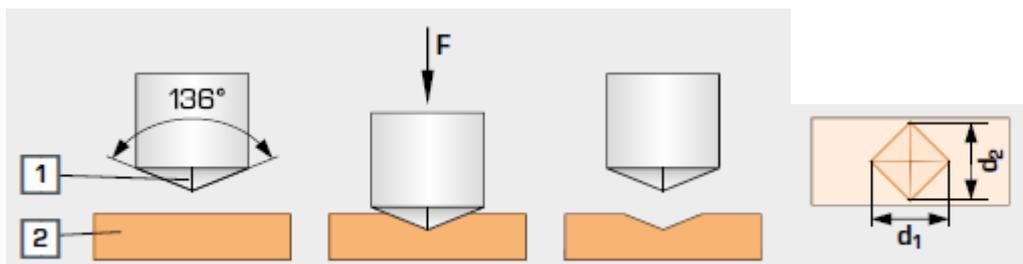


Figure4.31 : Procédure d'essai et mesure optique de l'empreinte laissée.

Les données :

**1** : diamant de forme pyramidale, **2** : éprouvette, **F** : force d'essai, **d1 et d2** : diagonales.

## 7.4. Principe de l'essai de dureté Rockwell

La méthode d'essai de dureté Rockwell permet de lire directement la valeur de dureté, qui correspond au différentiel des profondeurs de pénétration, sur le comparateur à cadran. [10]

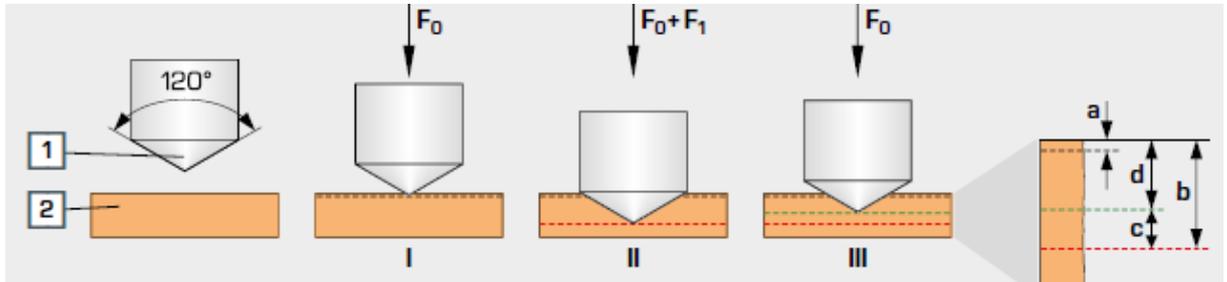


Figure4.32 : Procédure d'essai et mesure de la profondeur de pénétration.

Les données :

**1** : diamant en forme de cône, **2** : éprouvette, **I** : une pré-force d'essai  $F_0$  est appliquée au corps d'essai, et le comparateur à cadran est mis sur zéro, **II** : la force d'essai supplémentaire  $F_1$  est appliquée pour une durée d'action déterminée, **III** : la force d'essai supplémentaire  $F_1$  est retirée, **a** : profondeur de pénétration due à la force d'essai supplémentaire  $F_0$ , **b** : profondeur de pénétration due à la force d'essai supplémentaire  $F_1$ , **c** : recouvrement de forme élastique après retrait de la force d'essai supplémentaire  $F_1$ , **d** : profondeur de pénétration restante  $h$

## 8. Les traitements thermiques

### 8.1. Définition

Les traitements thermiques sont des opérations de chauffage et de refroidissement qui ont pour but de donner à une pièce métallique les propriétés les plus appropriées pour son emploi ou sa mise en forme. Ils permettent d'améliorer dans une large mesure les caractéristiques mécaniques d'un acier de composition déterminée. Toute utilisation rationnelle d'un alliage implique un traitement thermique approprié. D'une façon générale, un traitement thermique ne modifie pas la composition chimique de l'alliage mais apporte les modifications suivantes :

- Constitution (état de carbone et forme allotropique du fer)
- Structure (grosesseur du grain et répartition des constituants)
- Caractéristiques mécaniques.

Les principaux traitements thermiques sont les suivants : trempe, revenu et recuit. [50]

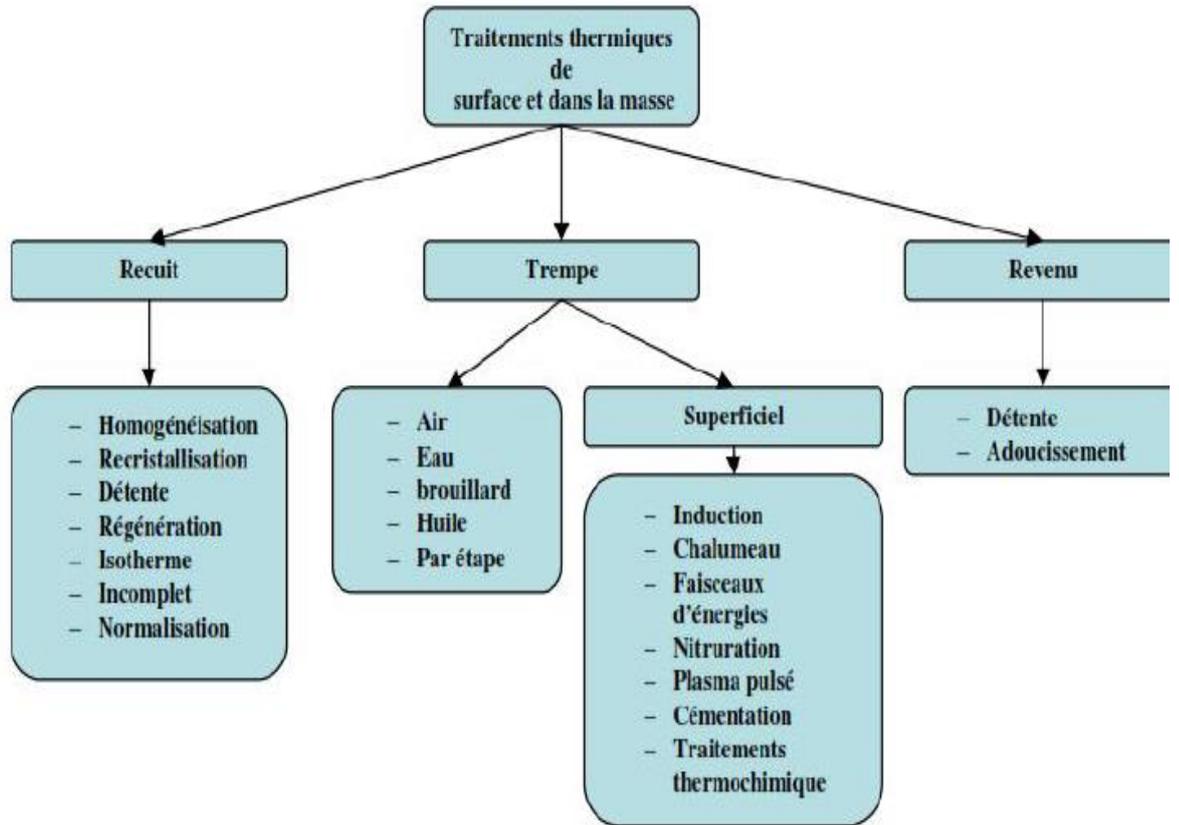


Tableau4.2: Classification des traitements thermiques

## 8.2. Chauffage des pièces

La première étape de chaque traitement thermique est le chauffage de la pièce à la température exigée. Le chauffage doit s'effectuer très rapidement pour avoir une faible consommation d'énergie et une grande productivité. Il existe deux possibilités pour le chauffage des pièces. [51]

- Par transmission de la chaleur
- Par production de la chaleur dans la pièce

Quel que soit le procédé de chauffage utilisé, il existe toujours une différence de température dans les différentes parties de la pièce. Répartition de la chaleur non uniforme. La figure suivant représente la courbe de chauffage pour le contour de la pièce et le cœur de la pièce, la courbe est simplifiée comme une droite.

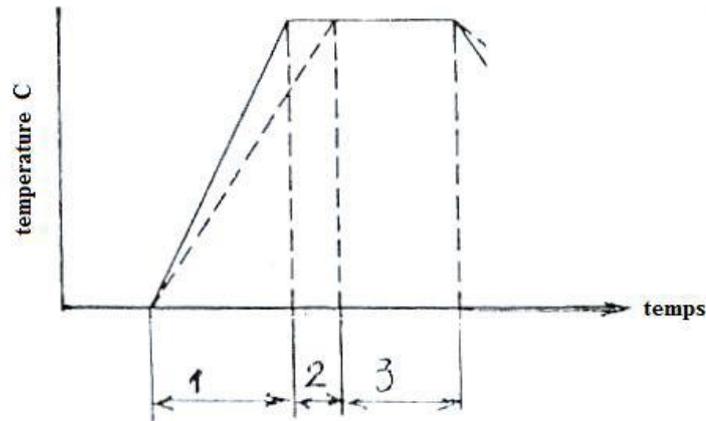


Figure4.33: la courbe de chauffage.

- I. Durée de préchauffage : C'est le temps de début de chauffage jusqu'à ce que la température nominale soit atteinte à la surface de la pièce.
- II. Durée de chauffage de pénétration ou d'égalisation : C'est le temps nécessaire pour atteindre la température nominale à la surface et au cœur de la pièce.
- III. Durée de maintien : C'est le temps nécessaire pour maintenir la pièce à une température, et à partir de la température atteinte dans le cœur.

### 8.3. Gammes des traitements thermiques de l'acier

Les modes principaux de traitement thermique qui modifient de diverses manières la structure et les propriétés d'un alliage par des opérations de chauffage jusqu'à une certaine température, de maintien à cette température, et suivies d'un refroidissement à une vitesse plus ou moins accélérée sont :

- Le recuit.
- La normalisation.
- La trempe.
- Le revenu et le vieillissement.

Les principaux facteurs qui permettent de distinguer entre les différents types de traitements thermiques sont la température de maintien et la vitesse de refroidissement.

### ➤ Le recuit

Les aciers possèdent un caractère apte d'acquérir grâce à des traitements thermiques variés, toute une gamme de propriétés très différentes. Les recuits en général amèneront les alliages en équilibre physico-chimique et mécanique. Ils tendent à réaliser l'équilibre structural en faisant disparaître les états hors d'équilibre résultants des traitements thermiques et mécaniques antérieurs. Le recuit correspond aux valeurs maximales des caractéristiques de ductilité. (Résilience et allongement) et aux valeurs minimales des caractéristiques de résistance (dureté, limite élastique, charge à la rupture). [52]

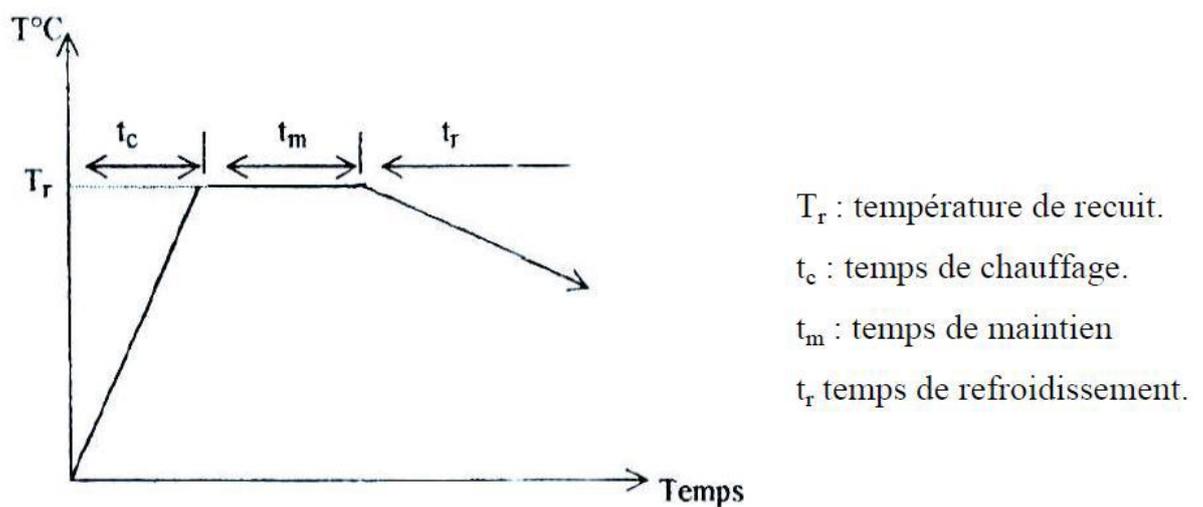


Figure4.34 : le cycle thermique d'un recuit.

#### 1. Le recuit a pour but de

- ✓ Diminuer la dureté d'un acier trempé.
- ✓ Obtenir le maximum d'adoucissement pour faciliter l'usinage ou les traitements mécaniques.
- ✓ Régénérer un métal écroui ou surchauffé.
- ✓ Homogénéiser les textures hétérogènes.
- ✓ Réduire les contraintes internes

### ➤ La trempe

La trempe consiste à un chauffage de l'acier à une température de 30 à 50°C au-dessus de la ligne GOSK supérieure à celle de  $AC_3$ , pour les aciers hypoeutectoïdes et supérieure à  $AC_3$ , pour les aciers hypereutectoïdes.

A cette température l'acier est maintenu jusqu'à l'achèvement du chauffage complet c'est-à-dire jusqu'à la transformation des phases, ensuite l'acier subit un refroidissement rapide avec une vitesse supérieure à la vitesse critique de la trempe (pour les aciers au carbone le plus souvent dans l'eau et pour les aciers alliés dans l'huile ou dans un bain de trempe d'autre nature).

Le but du refroidissement rapide et d'obtenir une structure martensitique, donc éviter une transformation perlitique. La transformation de l'austénite doit commencer et se termine dans le domaine de la martensite. Donc la trempe permet de donner un maximum de dureté à l'acier  $HV = 700$  à  $800$  ou  $HRC = 60$  à  $65$ , ce qui donne une structure convenable pour le traitement de revenu.

La trempe n'est pas un traitement thermique définitif, le plus souvent elle est suivie d'un revenu destiné à diminuer la fragilité et les contraintes internes afin de donner à l'acier les propriétés mécaniques appropriées

### ➤ Le revenu

Le revenu est un traitement thermique pratique, généralement après trempe, et qui a pour but de corriger les défauts causés par la trempe d'un acier (contraintes internes et fragilités). Le chauffage de l'acier trempé est effectué à une température inférieure à  $AC_2$ , (selon la résistance exigée), suivi d'un maintien à cette température et au refroidissement jusqu'à la température ambiante [14]

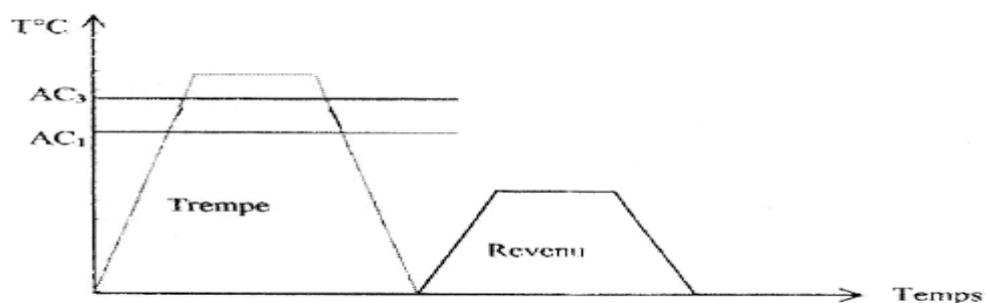


Figure4.35 : le cycle de revenu.

Le revenu est destiné à provoquer un retour plus ou moins marqué vers l'état stable à froid, donc d'obtenir les propriétés mécaniques requises, c'est à dire la martensite se transforme en de nouveaux constituants (sorbite, bainite). Donc le revenu permet de supprimer les contraintes internes provoquées par la trempe, de diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante. Cette suppression de contraintes est d'autant plus complète que la température du revenu est plus élevée, c'est à dire, l'affaiblissement des contraintes est le plus intense lorsque le maintien atteint 15 à 30 min à 550°C.

#### 8.4. Etalonnage des fours

Les fours utilisés pour nos traitements thermiques sont ceux du laboratoire de sciences des matériaux du département génie mécanique

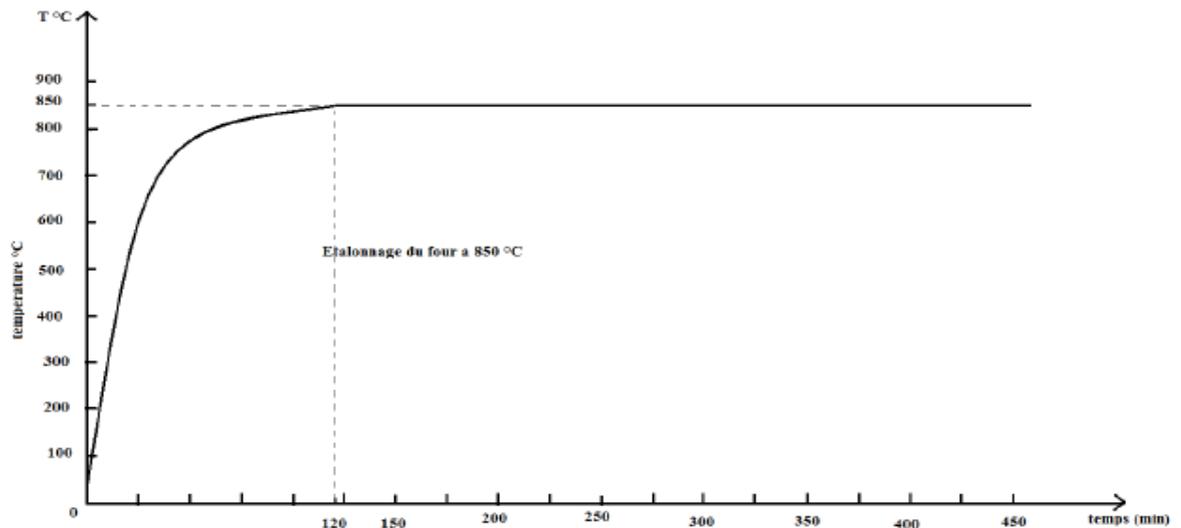


Figure4.36 : étalonnage du four à 850°C.

#### 8.5. Exécution des traitements thermiques

On a réparti les éprouvettes en sept lots.

- 1<sup>er</sup> lot : N'a pas subi de traitement thermique.  
Toutes les autres éprouvettes ont subi des traitements thermiques (recuis) de déférente température
- 2<sup>ém</sup> lot : les éprouvettes ont subi un traitement thermique à 850°C pendant 30min.

- 3<sup>ém</sup> lot : les éprouvettes ont subi un traitement thermique à 850°C pendant 60min.
- 4<sup>ém</sup> lot : les éprouvettes ont subi un traitement thermique à 900°C pendant 30min.
- 5<sup>ém</sup> lot : les éprouvettes ont subi un traitement thermique à 900°C pendant 60min.
- 6<sup>ém</sup> lot : les éprouvettes ont subi un traitement thermique à 950°C pendant 30min.
- 7<sup>ém</sup> lot : les éprouvettes ont subi un traitement thermique à 950°C pendant 60 min.



Figure4.37 : photos du four des traitements thermiques.

## 9. le but de ces expériences

sont des expériences mécaniques et thermiques qui permettent déterminer la durée de vie et l'efficacité d'un matériau en phase de post-fabrication, et les expériences mécaniques permettent de classer les matériaux et de donner leur identité , Où l'on sait que les propriétés mécaniques des matériaux sont variables et non fixes, car elles changent en fonction de la situation environnante. Par exemple, une modification de la température ambiante entraîne une modification des propriétés mécaniques des matériaux. Par conséquent, les tests de caractérisation sont effectués à une certaine température standard.

- Connaître l'élasticité du matériau pour retrouver sa forme d'origine après la suppression de la force qui lui est appliquée.
- Déterminez la capacité du matériau à résister aux rayures ou à la pénétration, Ainsi que la capacité du matériau à se casser lorsqu'il est soumis à des contraintes.

- Détermination de la résistance d'un matériau à la flexion.
- Le traitement thermique permet de réduire les contraintes internes, et d'obtenir un ramollissement maximal pour faciliter le traitement mécanique.
- diminuer la fragilité des pièces trempées tout en conservant une dureté suffisante.

**Remarque:** La structure physicochimique du matériau joue un rôle important dans l'emploi des pièces mécaniques (voir annexe).

## 10. Quelques des métaux propose

### ✓ **Acier :**

La propriété la plus importante de l'acier est sa grande aptitude au formage et au martelage, sa résistance à la traction, sa grande élasticité et sa conductivité thermique élevée. Chaque fois que ces propriétés sont importantes, la propriété la plus importante de l'acier inoxydable est sa résistance à la rouille.

Les propriétés physiques de l'acier font référence à la physique du matériau, telles que la densité, la conductivité thermique, l'élasticité unitaire, le taux de poisson, etc. Certaines des quantités de base des propriétés physiques de l'acier sont:

- Densité =  $7,7 \div 8,1$  [kg / dm<sup>3</sup>]
- Unité de flexibilité E =  $190 \div 210$  GPa
- Taux de poisson =  $0,27 \div 0,30$
- Conductivité thermique =  $11,2 \div 48,3$  [W / mK]
- Dilatation thermique =  $9 \div 27$  [10<sup>-6</sup> / K]

### ✓ **Aluminium :**

L'aluminium est l'un des matériaux les plus légers et solides utilisés dans l'impression 3D. Il possède de bonnes propriétés mécaniques et peut être utilisé pour des pièces soumises à des tensions élevées. De plus, il offre un niveau de détail élevé, ce qui le rend intéressant si vous désirez créer des géométries complexes. L'une de ses caractéristiques les plus notables est sa grande résistance aux contraintes mécaniques et aux températures élevées. Le point de fusion de l'aluminium est à 1256 ° C. Cela fait de l'aluminium l'un des meilleurs matériaux pour le prototypage. De plus, il est utilisé pour créer des pièces solides et des modèles fonctionnels qui résistent aux températures élevées, tels que les moteurs, les réacteurs, etc. C'est pourquoi

l'aluminium est largement utilisé dans les industries exigeantes, comme celles de l'automobile et de l'aérospatiale. Les principales caractéristiques de cette série:

- Il est soumis à un durcissement sous contrainte.
- Haute résistance à l'usure, dureté élevée, soudabilité élevée, résistance moyenne.
- Il est utilisé dans de nombreuses applications telles que la fabrication de structures.
- Résistant aux hautes températures
- La plage standard de contraintes maximales est de (125 à 350 MPa) ou (18 à 51 Ksi).
- ✓ **Titane :**

Le titane est un matériau d'impression 3D avec d'excellentes propriétés mécaniques. Il est solide, léger, hautement résistant à l'oxydation et à l'acide, et également résistant à la chaleur. Le point de fusion du titane est extrêmement élevé (1660 ° C ou 3260 ° F).

Pour cette raison, il est fréquemment utilisé dans les industries de haute technologie, telles que la fabrication de pièces axiales et de articulée pour les robots industriels.

**Remarque:** la céramique, le carbure et l'acier rapide de toutes sortes sont considérés parmi les matériaux les plus importants et les meilleurs d'un point de vue physicochimique, en plus de leur résistance au frottement et à la corrosion, (voir annexe).

## **11. Problème résultant d'un manque de respect à l'égard la maintenance préventive**

- Ils peuvent entraîner un dysfonctionnement des pièces et des composants, ce qui pourrait ralentir ou arrêter votre production.
- Déformation importance du matériau.
- Ils provoquent une usure des pièces.
- Consommation d'énergie élevée.
- Réduire la durée de vie des pièces.
- Réfraction les pièces axiale et articule.
- Effectué le coût des pièces.

## 12. Objectif de maintenance préventive

- Ce type de maintenance permet d'améliorer les conditions de travail sur le matériel concerné.
- Faciliter le mouvement du robot pour effectuer ses performances requises.
- Réduire le risque d'arrêt du travail après une intervention imminente ou un arrêt de maintenance.
- Les interventions de maintenance préventive sont planifiées d'arrêter le robot pour la maintenance des pièces axiales et articulées, et ainsi l'entreprise ne perd pas en production et facilite les travaux de maintenance.
- La maintenance préventive prolonge la durée de vie des matériaux et équipements.
- Amélioration de la gestion des stocks en contrôlant les dates de remplacement des pièces axiales et articulées.
- Un coût de réparation moins élevé.

## 13. Le plan d'entretien proposé

Parmi les défauts qui conduisent à des erreurs figurent l'absence d'une bonne installation du robot et la défaillance de ses pièces de rechange en plus du facteur de frottement résultant de la température élevée due à la longue période de fonctionnement du robot, et le frottement conduit à une température élevée qui contribue à la corrosion des pièces de rechange articulées, le vide entre les pièces qui forment les liaisons axiales et articulaires, ce qui résulte du manque de matière dans une pièce de pièces ou dans les deux pièces ensemble, et pour éviter la corrosion résultant du frottement, une maintenance préventive doit être incluse et les propriétés physiques et chimiques des pièces utilisées doivent être prises en compte pour réaliser les liaisons axiales et articulaires, et pour Les propriétés physico-chimiques élevées des pièces doivent être soumises à des tests mécaniques (tels que des tests de traction, de compression, de torsion, de cisaillement et de flexion) et à des tests traitement thermiques (tels que la trempe, la résilience et la dureté).

**Remarque:** l'étanchâtes peuvent être affectés par un frottement continu, ce qui peut entraîner une perte d'huiles, et donc les extrémités de se faner.

<b>Les pièces</b>		<b>La maintenance préventive</b>	<b>Forces appliquées</b>	<b>Marteaux propose</b>	<b>La durée de vie</b>
<b>Axiale</b>	<b>Cylindre rempli</b>	<b>Surveillance des pièces (nettoyage et vérification)</b>	<b>Contraintes axiales</b>	<b>Acier rapide (X70 .X60) (Haute résistance)</b>	<b>Longue durée de vie</b>
	<b>Cylindre creux</b>	<b>Surveillance des pièces (nettoyage et vérification)</b>	<b>Contraintes axiales</b>	<b>Acier rapide (X70 .X60)</b>	<b>Longue durée de vie</b>
	<b>Engrenages,</b>	<b>Surveillance des pièces (vérification et graissage automatique)</b>	<b>Les forces appliquées en fonction du type d'engrenage</b>	<b>la céramique (Haute résistance à l'abrasion)</b>	<b>Durée de vie moyenne</b>
	<b>Les Roulements pivotants,</b>	<b>Suivi des pièces par calendrier (graissage automatique)</b>	<b>Les forces appliquées selon les types des roulements</b>	<b>l'acier rapide (Haute résistance à l'abrasion)</b>	<b>Durée de vie moyenne</b>
	<b>Anneaux creux</b>	<b>Surveillance des pièces (nettoyage et vérification)</b>	<b>Contraintes verticales</b>	<b>la céramique, le carbure et l'acier rapide</b>	<b>Longue durée de vie</b>
<b>articulier</b>	<b>Rotules</b>	<b>Surveillance des pièces (graissage automatique et vérification)</b>	<b>Contraintes verticales et axiales</b>	<b>la céramique, le carbure et l'acier rapide. (Haute résistance à l'abrasion)</b>	<b>Durée de vie moyenne</b>

Tableau 4.3 : Le tableau présente la maintenance préventive et les matériaux suggérés pour la fabrication

## 14. Conclusion

On améliore les métaux des pièces des robots industriel nous permettent de prévenir les en pannes.

Un règlement de maintenance préventive est planifiée selon un planning afin d'arrêter le robot pour la maintenance des pièces axiales et articulées, et ainsi l'entreprise ne perd pas en production et facilite les travaux de maintenance.

**Conclusion générale**

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

Au cours de cette étude théorique, dans laquelle nous avons traité des types de robots et de leurs caractéristiques et problèmes qu'ils peuvent rencontrer au cours du travail. Dans cet aspect nous avons mené une étude approfondie sur les différents éléments articulés et axiales, et ceci afin de développer une politique modèle de maintenance préventive de ces éléments, Prévention de la déformation et de la corrosion des pièces axiales et articulaire.

L'objectif général de ces études proposées était Et trouver une solution à ce problème afin d'éviter des pertes économiques et matérielles, qui pourraient conduire les entreprises industrielles à perdre leurs silos industriels et commerciaux, et à travers ce travail modeste, nous avons développé un plan de maintenance préventive, et c'est par notre suggestion de certains matériaux qui ont des propriétés physico-chimiques élevées, et soumis Ces échantillons vont des matériaux à des tests mécaniques, thermiques et chimiques, et ceci dans le but d'améliorer leurs propriétés physiques et chimiques et d'assurer leur sécurité, et tout cela pour éviter les problèmes de frottement, de déformation et de réfraction au niveau du matériau à partir duquel ces pièces sont fabriquées pendant l'exercice de leurs tâches, et d'augmenter la durée de leur vie et d'augmenter La rentabilité du robot.

Avec ce travail modeste, nous avons ouvert la voie aux étudiants de la spécialisation pour approfondir et rechercher ce domaine à l'avenir.

## **Bibliographie**

## Bibliographie

---

### Bibliographie

- [1] Robots, genèse d'un peuple artificie; Auteur: Daniel Ichbiah
- [2] Robotics and control; Auteur: Mittal & Nagrath, ISBN 0-07-048293-4
- [3] La double contrainte: L'influence des paradoxes de Bateson en Sciences humaines; Auteur : Jean-Jacques Wittezaele
- [4] Belkhadria Khemisti, "commande d'un robot mobile par réseaux de neurones artificiels" Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de magister en électronique. Option: Robotique. Université El Hadj Lakhdar Batna
- [5] Robotics for Electronics Manufacturing: Principles and Applications in cleanroom automation; Auteur: Karl Mathia, ISBN978-0-521-87652-0Hardback
- [6] Mechatronics; Auteur: V.S.Bagad, ISBN9788184314908, Edition 2008.
- [7] Computer Aided Manufacturing; C. Elanchezhian,G. Shanmuga Sundar; First Edition 2005, Second Edition 2007.
- [8] Introduction to robotics: analysis, control, applications; Auteur: Saeed B.Niku
- [9] Robotics (par Appuu Kuttan) ; Auteur : Appuu Kuttan, ISBN978-81-89866-38-9
- [10]: DOKTORS / DOKTORIN DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.) M. Sc. Fawzia Dardouri
- [11]: Stuart Shepherd and Alois Buchstab. Kuka robots on-site. In Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2014, pages 373–380. Springer, 2014.
- [12]: Cours robotique industrielle\_VF\_PERZ\_PROF\_2020\_SAVOIR
- [13] : Mark W. Spong, Seth. Hutchinson, and M. Vidyasagar. Robot Modeling and Control. John Wiley and Sons, Inc., Berlin Heidelberg, 2005.
- [14]: John J Craig, Ping Hsu, and S Shankar Sastry. Adaptive control of mechanical manipulators. The International Journal of Robotics Research, 6(2):16–28, 1987.
- [15]: B. Siciliano, L. Sciavicco, L. Villani, and G. Oriolo. Robotics : Modelling, Planning and Control. Springer Verlag, London, 2010.

## Bibliographie

---

- [16]: B. Siciliano and O. Khatib. Springer Handbook of Robotics. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, 2008.
- [17]: L Sweet and M Good. Redefinition of the robot motion-control problem. IEEE Control Systems Magazine, 5(3):18–25, 1985.
- [18]: MC Good, LM Sweet, and KL Strobel. Dynamic models for control system design of integrated robot and drive systems. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 107(1) :53–59, 1985.
- [19]: Maria Makarov. Contribution à la modélisation et la commande robuste de robots manipulateurs à articulations flexibles. Applications à la robotique interactive. PhD thesis, Supélec, 2013.
- [20] : Alexander Spiller and Alexander Verl. Superimposed force/torquecontrol of cooperating robots. In Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), pages 1–7. VDE, 2010.
- [21]: K Khorasani. Nonlinear feedback control of flexible joint manipulators : A single link case study. IEEE Transactions on Automatic Control, 35(10) :1145–1149, 1990.
- [22]: Patrizio Tomei. A simple pd controller for robots with elastic joints. IEEE Transactions on automatic control, 36(10):1208–1213, 1991.
- [23]: MM Bridges and DM Dawson. Redesign of robust controllers for rigid-link flexible-joint robotic manipulators actuated with harmonic drive gearing. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 142(5):508–514, 1995.
- [24] : E. Dombre, Analyse et Modélisation des Robots Manipulateurs, 22 janvier 2002.
- [25]: W. Khalil and E. Dombre. Modeling, Identification and Control of Robots. 2008
- [26] : J.L. Boimond, Robotique, Université Angers
- [27] : Jacques Gangloff « Cours de Robotique »
- >> [http://eavr.u-strasbg.fr/wiki/upload/a/a4/Cours\\_rob\\_intro.pdf](http://eavr.u-strasbg.fr/wiki/upload/a/a4/Cours_rob_intro.pdf)
- [28] : Jacques Gangloff Cours de Robotique ENSPS 3A MASTER ISTI
- [29] : [elyzee-consortium.com / principaux-types-robots-industriels/](http://elyzee-consortium.com/principaux-types-robots-industriels/)

## Bibliographie

---

- [30] : mémoire de robot industrielle.
- [31] : Stratégie de maintenance. Cour maintenance 2 master électromécanique .
- [32] : <https://acturobot.fr/maintenance-robotique/>
- [33] : <https://www.thesneaklife.com/2020/01/03/marche-mondial-de-la-maintenance-preventive-des-robots-2020-2026-abb-fanuc-kuka-scott-yaskawa-motoman/>
- [34] : [https://www.acieta.com/services/preventative-maintenance-1/?fbclid=IwAR3cEn0RBuxRsy3bFygjYnOhwawhiYnCjmfCuL8hZ1G\\_MpkXPOfPVJ8INvo](https://www.acieta.com/services/preventative-maintenance-1/?fbclid=IwAR3cEn0RBuxRsy3bFygjYnOhwawhiYnCjmfCuL8hZ1G_MpkXPOfPVJ8INvo)
- [35] : Cours robotique industrielle\_VF\_PERZ\_PROF\_2020\_SAVOIR
- [36] : <http://theses.insa-lyon.fr/publication/1995ISAL0031/these.pdf>
- [37]: T. Wongratanaphisan and M. Chew. Gravity compensation of spiral two-dog serial manipulators. Journal of Robotic Systems, 2002.
- [38]: D.T.Tuttle. Understanding and modeling the behavior of a harmonic drive gear transmission. Technical report, Massachusetts Institute of Technology, 1992.
- [39] : <https://www.roboticautomationsystems.com/6-axis-robots.html>
- [40] : mastersds cours robot boimond (2)
- [41] : Cours interactif : Le tournage Elaboré par GARA Souhir
- [42] : Procédés d'obtention des surfaces par enlèvement de matière
- [43] : Cours interactif : Le fraisage Elaboré par GARA Souhir
- [44] : Le-moulage en sable. Cours. PDF
- [45] : <http://www.primante3d.com/principe/?fbclid=IwAR1m5dg8nJS0HR1wH-3cAHCNsiiN2yU3SFLG-CvprHsh3u1XRcd1GRSCs1U>
- [46]:<https://www.prodways.com/fr/plastic-selective-laser-sintering-technology-presentation/?fbclid=IwAR23ZCdfmpSTI65DskE5uoW7mfyg90yJ1SgRT-dGWP66c7ijljiFIGc82Rg8>
- [47] : Méthodes-d'essai-mécanique-connaissances-de-base\_french

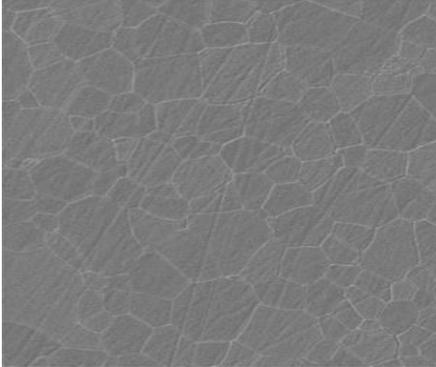
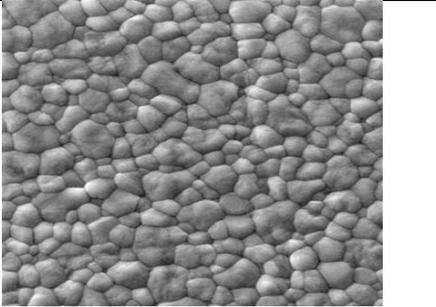
## Bibliographie

---

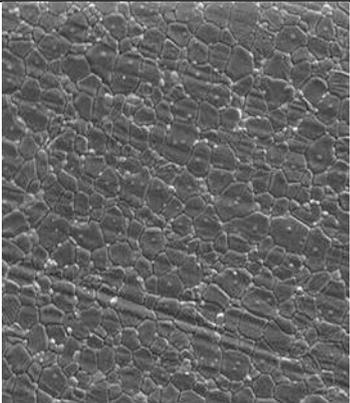
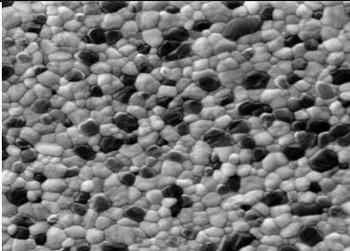
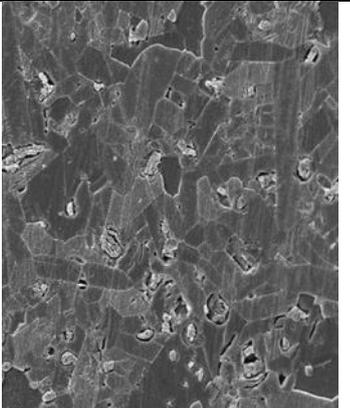
- [48] : Essais mécaniques des métaux - Essais de dureté Auteur(s) : Dominique FRANÇOIS .
- [49] Livre des matériaux, éditions des écoles polytechniques de Montréal 2eme éditions  
J.M.DORLOT, J.P.BAILIAN, J.MASCUNARE.( Les traitements thermiques :).
- [50] : LOURI LAKHTINE, <<métallographie et traitement thermique des metaux>> edition  
MIR, moscou 1977.
- [51] RENE CAZAUD, <<collection aide-mémoire, métallurgie : mise en forme et  
Traitement>>96ème edition(Le recuit).
- [52] A. CONSTANT, G. HENRY et J. C CHARBONNIER « principes de base des traitements  
thermiques thermomécanique et thermochimiques des aciers » édition PYC, 1992.( Le  
revenu).

Les Annexes

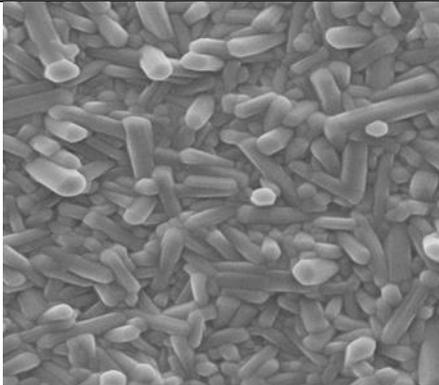
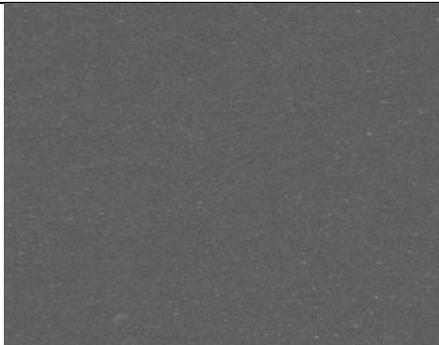
## Les Annexes

Matière	La définition	Propriétés et usages	L'apparence du matériau
<p><b>Oxyde d'alumine (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)</b></p>	<p>Les alumines (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) de haute pureté (jusqu'à 99,9%) possèdent une structure cristalline hexagonale-rhomboédrique, une taille de grains de 1 à 5 microns, une densité de 3,75 à 3,95 g/cm<sup>3</sup> et une dureté jusqu'à 2000 Vickers.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellente isolation électrique</li> <li>• Dureté élevée</li> <li>• Résistance à la compression</li> <li>• Grande résistance mécanique</li> <li>• Faible conductivité thermique</li> <li>• Faible expansion thermique</li> <li>• Excellente résistance à la corrosion et à l'usure</li> <li>• Excellentes propriétés tribologiques</li> <li>• Haute biocompatibilité</li> </ul>	
<p><b>Zircone (ZrO<sub>2</sub>)</b></p>	<p>Les zircons stabilisés à l'oxyde d'yttrium ( ZrO<sub>2</sub>+Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ) possèdent une structure cristalline tétragonale métastable, une taille de grains inférieure à 0,50 microns, une densité supérieure à 6,00 g/cm<sup>3</sup> et une dureté d'environ 1200 Vickers. Les zircons peuvent également être stabilisés à l'oxyde de cérium (ZrO<sub>2</sub> + CeO<sub>2</sub>) ou l'oxyde de magnésium ((ZrO<sub>2</sub> + MgO), selon les propriétés du matériau final souhaité.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grande résistance mécanique</li> <li>• Ténacité</li> <li>• Dureté élevée</li> <li>• Résistance à la compression</li> <li>• Faible conductivité thermique</li> <li>• Excellente résistance à la corrosion et à l'usure</li> <li>• Excellentes propriétés tribologiques</li> <li>• Haute biocompatibilité</li> </ul>	

## Les Annexes

<p><b>des ZTA</b></p>	<p>(Zirconia Toughened Alumina)</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Renforcement mécanique de l'alumine par transformation de phase des grains de Zirconie dans la matrice</li> <li>• Excellente résistance aux chocs thermiques</li> <li>• Non sujet au vieillissement</li> </ul>	
<p><b>Composites Alumine Zirconie</b></p>	<p>Les composites, généralement 80% 3Y-TZP / 20% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (ATZ) ou 90% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/ 10% 3Y-TZP (ZTA), allient les propriétés des alumines et des zircons haute pureté pour obtenir des caractéristiques finales qui offrent le meilleur de chaque matériau.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dureté</li> <li>• Résistance à l'usure</li> <li>• Résistance au vieillissement amélioré</li> </ul> <p>Résistance mécanique et une ténacité proche d'une 3Y-TZP</p>	
<p><b>LE CARBURE DE SILICIUM</b></p>	<p>Le Carbure de Silicium (SiC) polycristallin peut surpasser les céramiques à base d'oxydes dans certains domaines de pointe, comme les applications haute température, les pièces d'usure ou les composants électroniques et optoélectroniques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Légèreté</li> <li>•Très haute dureté</li> <li>•Bonne résistance à la fatigue</li> <li>•Conductivité thermique élevée</li> <li>•Faible coefficient de dilatation</li> <li>•Inertie chimique élevée</li> </ul>	

## Les Annexes

<p><b>Nitru de Silicium</b></p>	<p>Le Nitru de Silicium (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) polycristallin peut surpasser les céramiques à base d'oxydes dans certains domaines de pointe, comme les applications haute température, les pièces d'usure ou les composants électroniques et optoélectroniques.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Légèreté</li> <li>•Très haute dureté</li> <li>•Bonne résistance à la fatigue</li> <li>•Conductivité thermique élevée</li> <li>•Faible coefficient de dilatation</li> <li>•Inertie chimique élevée</li> </ul>	
<p><b>Rubis / Saphir</b></p>	<p>Le rubis et le saphir synthétiques sont des monocristaux d'oxyde d'aluminium, pratiquement pur pour le saphir (+99,99% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). La couleur du rubis est obtenue par l'adjonction de quelques ppm d'oxyde de chrome (CrO<sub>3</sub>). Ces deux matériaux possèdent une structure cristalline hexagonale-rhomboédrique, une densité de 3,99 g/cm<sup>3</sup> et un coefficient d'absorption hydrique de 0 %.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>•Dureté et résistance mécanique élevée</li> <li>•Excellente résistance à l'usure</li> <li>•Coefficient de frottement très faible</li> <li>•Inerte chimiquement</li> <li>•Bonne conductivité thermique</li> <li>•Parfait isolant électrique</li> </ul> <p>De plus, le saphir est optiquement transparent dans l'ultraviolet, le visible et le proche infrarouge.</p>	

### Acier rapide :

#### 1 : Composition, avantages et inconvénients :

La teneur en carbone a une influence considérable (et assez complexe) sur les propriétés de l'acier : en dessous de 0,008 %, l'alliage est plutôt malléable et on parle de « fer » ; au-delà de 2,1 %4, on entre dans le domaine de l'eutectique fer/carbure de fer ou bien fer/graphite, ce qui

## Les Annexes

---

modifie profondément la température de fusion et les propriétés mécaniques de l'alliage, et l'on parle de fonte.

Entre ces deux valeurs, l'augmentation de la teneur en carbone a tendance à améliorer la dureté de l'alliage et à diminuer son allongement à la rupture ; on parle d'aciers « doux, mi-doux, mi-durs, durs ou extra-durs » selon la « classification traditionnelle ».

Dans les manuels de métallurgie un peu anciens, on peut trouver comme définition de l'acier un alliage fer-carbone où le carbone varie de 0,2 à 1,7 % ; la limite actuelle a été établie à partir du diagramme binaire fer/carbone. Toutefois, il y a des aciers avec des concentrations de carbone supérieures à ces limites (acier lédéburitiques), obtenus par frittage.

On modifie également les propriétés des aciers en ajoutant d'autres éléments, principalement métalliques, et on parle d'aciers « alliés ». On peut encore améliorer grandement leurs caractéristiques par des traitements thermiques (notamment les trempes ou la cémentation) prenant en surface ou à cœur de la matière ; on parle alors d'aciers « traités ».

Outre ces diverses potentialités, et comparativement aux autres alliages métalliques, l'intérêt majeur des aciers réside d'une part dans le cumul de valeurs élevées dans les propriétés mécaniques fondamentales :

- raideur, résistance à la déformation élastique : module d'élasticité  $E$  ;
- résistance à la déformation irréversible, à la rupture : limite élastique  $R_e$ , résistance minimale à la rupture  $R_m$  ;
- dureté  $H$  ;
- résistance aux chocs : résilience  $K$ .

D'autre part, leur coût d'élaboration reste relativement modéré, car le minerai de fer est abondant sur terre (environ 5 % de l'écorce) et sa réduction assez simple (par addition de carbone à haute température). Enfin les aciers sont pratiquement entièrement recyclables grâce à la filière ferraille.

On peut néanmoins leur reconnaître quelques inconvénients, notamment leur mauvaise résistance à la corrosion à laquelle on peut toutefois remédier, soit par divers traitements de surface (peinture, brunissage, zingage, galvanisation à chaud, etc.), soit par l'utilisation de

## Les Annexes

nuances d'acier dites « inoxydables ». Par ailleurs, les aciers sont difficilement moulables, donc peu recommandés pour les pièces volumineuses de formes complexes (bâtis de machines, par exemple). On leur préfère alors des fontes. Enfin, lorsque leur grande masse volumique est pénalisante (dans le secteur aéronautique par exemple), on se tourne vers des matériaux plus légers (alliages à base d'aluminium, titane, composites, etc.), qui ont l'inconvénient d'être plus chers.

Lorsque le prix est un critère de choix important, les aciers restent privilégiés dans presque tous les domaines d'application technique : équipements publics (ponts et chaussées, signalisation), industrie chimique, pétrochimique, pharmaceutique et nucléaire (équipements sous pression, équipements soumis à l'action de la flamme, capacités de stockage, récipients divers), agroalimentaire (conditionnement et stockage), bâtiment (armatures, charpentes, ferronnerie, quincaillerie), industrie mécanique et thermique (moteurs, turbines, compresseurs), automobile (carrosserie, équipements), ferroviaire, aéronautique et aérospatial, construction navale, médical (instruments, appareils et prothèses), composants mécaniques (visserie, ressorts, câbles, roulements, engrenages), outillage de frappe (marteaux, burins, matrices) et de coupe (fraises, forets, porte-plaquette), mobilier, design et équipements électroménagers, etc.

### 2 : Composition et structure :

#### Teneur en carbone

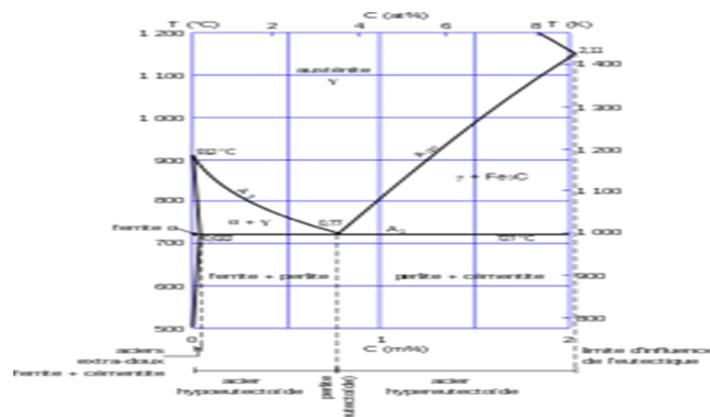
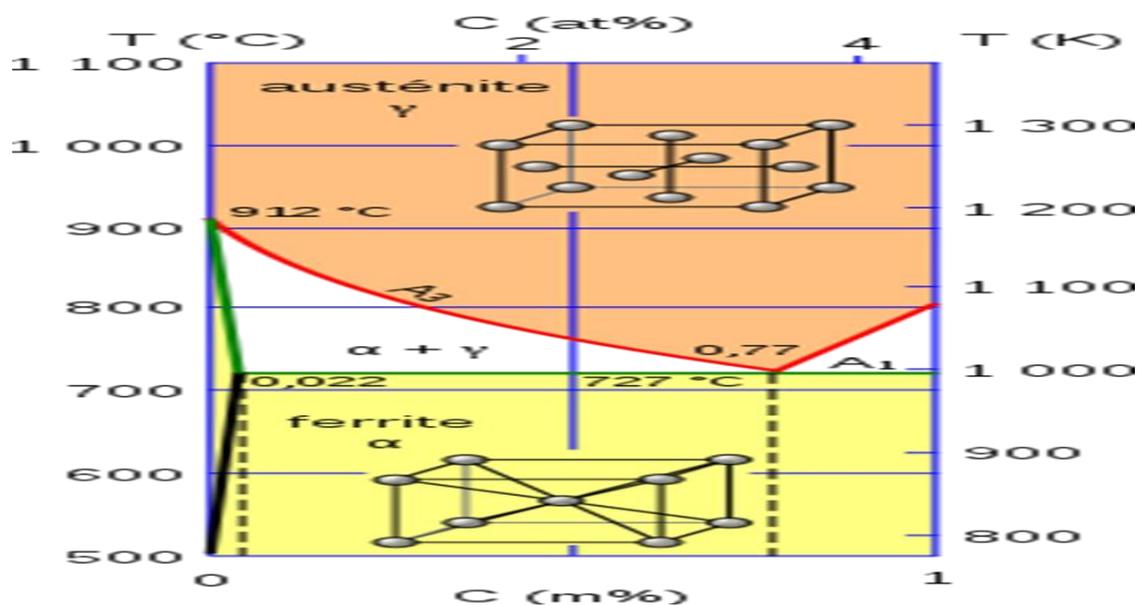


Diagramme de phase fer-carbone, permettant de visualiser les conditions d'existence des formes d'acier, en absence d'éléments gammagènes et de trempe.

## Les Annexes



La température de transition  $\alpha/\gamma$  varie avec la teneur en carbone.

On distingue plusieurs types d'aciers selon le pourcentage massique de carbone qu'ils contiennent :

- les aciers hypoeutectoïdes (de 0,0101 à 0,77 % de carbone) qui sont les plus malléables ;
  - les aciers extra-doux ont une teneur inférieure à 0,022 % de carbone ; ils sont hors de la « zone d'influence » de l'eutectoïde (perlite) et n'ont donc pas de perlite ; ils sont durcis par des précipités de cémentite en faible quantité,
  - entre 0,022 et 0,77 % de carbone, la cémentite est présente dans la perlite mais n'existe pas sous forme « seule » ;
- l'acier eutectoïde (0,77 % de carbone) appelé perlite ;
- les aciers hypereutectoïdes (de 0,77 à 2,11 % de carbone) qui sont les plus durs et ne sont pas réputés soudables.

La limite de 2,11 % correspond à la zone d'influence de l'eutectique (lédéburite) ; il existe toutefois des aciers lédéburitiques.

La structure cristalline des aciers à l'équilibre thermodynamique dépend de leur concentration (essentiellement en carbone mais aussi d'autres éléments d'alliage), et de la

## Les Annexes

---

température. On peut aussi avoir des structures hors équilibre (par exemple dans le cas d'une trempe).

La structure du fer pur dépend de la température :

- jusqu'à 912 °C, le fer (fer  $\alpha$ ) a une structure cristalline cubique centrée appelée ferrite ;
- entre 912 °C et 1 394 °C, le fer (fer  $\gamma$ ) a une structure cristalline cubique à faces centrées appelée austénite ;
- entre 1 394 °C et son point de fusion à 1 538 °C, le fer (fer  $\delta$ ) retrouve une structure cristalline cubique centrée appelée ferrite delta (cette dernière joue un rôle essentiel dans la mise en œuvre et surtout le soudage des aciers duplex).

La structure du fer + carbone évolue d'une façon plus complexe en fonction de la température et de la teneur en carbone. Les règles diffèrent selon que l'on est hors de la « zone d'influence » de l'eutectoïde (entre 0 % et 0,022 %), entre 0,022 % et 0,77 % (hypoeutectoïde) ou entre 0,77 % et 2,11 % (hypereutectoïde ; au-delà, il s'agit de fonte). Voir l'étude du diagramme fer-carbone.

D'une manière simplifiée, pour un carbone compris entre 0,022 % et 2,11 % :

- jusqu'à 727 °C on trouve un mélange de ferrite et de cémentite ;
- à partir de 727 °C le fer  $\alpha$  se transforme en fer  $\gamma$  (changement de phase appelé austénitisation) ; La température de fin de transformation dépend de la teneur en carbone.

Les aciers non alliés (au carbone) peuvent contenir jusqu'à 2,11 % en masse de carbone. Certains aciers alliés peuvent contenir plus de carbone par l'ajout d'éléments dits « gammagènes ».

Les différentes phases de l'acier :

- Austénite
- Bainite
- Cémentite
- Ferrite

- Martensite

- Perlite

### **3 : Éléments d'alliage :**

Le carbone a une importance primordiale car c'est lui qui, associé au fer, confère à l'alliage le nom d'acier. Son influence sur les propriétés mécaniques de l'acier est prépondérante. Par exemple, en ce qui concerne l'amélioration de la propriété de dureté, l'addition de carbone est trente fois plus efficace que l'addition de manganèse.

**L'aluminium :** excellent désoxydant. Associé à l'oxygène, réduit la croissance du grain en phase austénitique. Au-delà d'un certain seuil, il peut rendre l'acier inapte à la galvanisation à chaud.

**Le chrome :** c'est l'élément d'addition qui confère à l'acier la propriété de résistance mécanique à chaud et à l'oxydation (aciers réfractaires). Il joue aussi un rôle déterminant dans la résistance à la corrosion lorsqu'il est présent à une teneur de plus de 12 à 13 % (selon la teneur en carbone). Additionné de 0,5 % à 9 % il augmente la trempabilité et la conservation des propriétés mécaniques aux températures supérieures à l'ambiante (famille des aciers alliés au chrome). Il a un rôle alphagène.

**Le cobalt :** utilisé dans de nombreux alliages magnétiques. Provoque une résistance à l'adoucissement lors du revenu.

**Le manganèse :** forme des sulfures qui améliorent l'usinabilité. Augmente modérément la trempabilité.

**Le molybdène :** augmente la température de surchauffe, la résistance à haute température et la résistance au fluage. Augmente la trempabilité.

**Le nickel :** rend austénitiques (rôle gammagène) les aciers à forte teneur en chrome. Sert à produire des aciers de trempabilité modérée ou élevée (selon les autres éléments présents), à basse température d'austénitisation et à ténacité élevée après traitement de revenu. C'est l'élément d'alliage par excellence pour l'élaboration des aciers ductiles à basses températures (acier à 9 % Ni pour la construction des réservoirs cryogéniques, acier à 36 % Ni dit « Invar » pour la construction des cuves de méthaniers et des instruments de mesure de précision).

## Les Annexes

---

**Le niobium** : même avantage que le titane mais beaucoup moins volatil. Dans le domaine du soudage il le remplace donc dans les métaux d'apport.

**Le phosphore** : augmente fortement la trempabilité. Augmente la résistance à la corrosion. Peut contribuer à la fragilité de revenu.

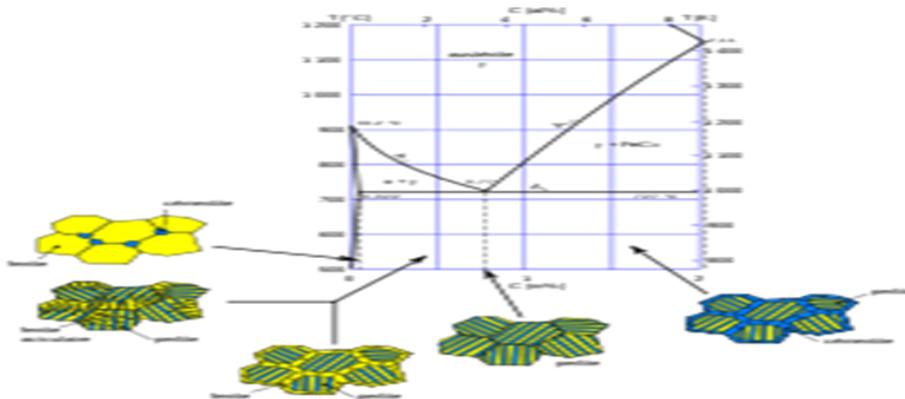
**Le silicium** : favorise l'orientation cristalline requise pour la fabrication d'un acier magnétique, augmente la résistivité électrique. Améliore la résistance à l'oxydation de certains aciers réfractaires. Utilisé comme élément désoxydant.

**Le titane** : pouvoir carburigène élevé (comme le niobium) et réduit donc la dureté de la martensite. Capture le carbone en solution à haute température et, de ce fait, réduit le risque de corrosion intergranulaire des aciers inoxydables ( $TiC$  se forme avant  $Cr_{23}C_6$  et évite donc l'appauvrissement en chrome au joint de grain).

**Le tungstène** : améliore la dureté à haute température des aciers trempés revenus. Fonctions sensiblement identiques à celles du molybdène.

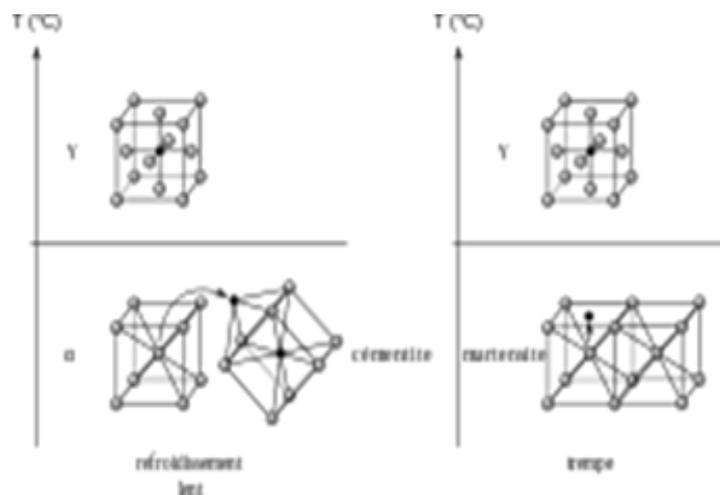
**Le vanadium** : augmente la trempabilité. Élève la température de surchauffe. Provoque une résistance à l'adoucissement par revenu (effet de durcissement secondaire marqué).

### 4 : Structure :



Structure cristalline des aciers pour un refroidissement lent : répartition de la ferrite (jaune) et de la cémentite (bleu).

## Les Annexes



Lors d'un refroidissement lent, le carbone est chassé des mailles de ferrite et va former des carbures (gauche). Lors d'une trempe, le carbone reste piégé dans la maille lors de la transformation  $\gamma \rightarrow \alpha$  ; cela forme la martensite (droite).

Lors du refroidissement d'un lingot, l'acier se solidifie à l'état austénitique. Au cours du refroidissement, à 727 °C, l'austénite se décompose, soit en ferrite + perlite, soit en perlite + cémentite. La vitesse de refroidissement ainsi que les éléments d'alliage ont une importance capitale sur la structure obtenue, et donc sur les propriétés de l'acier. En effet :

- les joints de grain bloquent les dislocations, donc augmentent la dureté et la limite élastique ; or, plus les grains sont petits, plus il y a de joints de grain ;
- la cémentite est un carbure, une céramique très dure ; sa présence augmente la dureté et la limite élastique, mais diminue la ductilité.

De manière générale :

- un refroidissement rapide donne de petits grains, alors qu'un refroidissement lent donne de gros grains ;
- la réorganisation des atomes pour passer de la structure austénitique (cubique à faces centrées) à la structure ferritique (cubique centrée) se fait par des mouvements d'atomes de faible ampleur (quelques distances interatomiques) ;
- la ferrite pouvant contenir moins de carbone dissous (voir Solution solide et Site interstitiel), le carbone doit migrer sur de plus grandes distances pour former de la cémentite ;

## Les Annexes

---

la distance à parcourir est moins grande dans le cas de la perlite (eutectoïde), puisque la cémentite s'intercale entre des « tranches » de ferrite ;

- la germination des nouveaux cristaux se fait de manière préférentielle aux défauts, et notamment aux joints de grain de l'austénite ; ainsi, la structure de solidification de l'austénite joue un rôle important (voir Solidification).

Certains éléments chimiques peuvent « piéger » le carbone pour former des carbures (par exemple le titane ou l'aluminium). Ils empêchent ainsi la formation de cémentite.

On peut modifier la structure de l'acier par des traitements thermomécaniques :

- déformations : écrasement du lingot, laminage à froid ou à chaud, forgeage, etc. ;
- traitements thermiques, qui permettent de « rejouer » le refroidissement :
  - trempe, éventuellement suivie d'un revenu : la rapidité de la transformation ne permet pas au carbone de diffuser et le « piège » dans la maille cubique centrée, qui se déforme pour donner de la martensite ; les cristaux forment de petites aiguilles,
  - une trempe plus lente, ou bien une trempe étagée, permet la formation de bainite,
  - recuit, permettant la diffusion des éléments, la réorganisation des atomes et l'élimination des dislocations.

La métallurgie des poudres consiste à compacter de la poudre d'acier et de la chauffer en dessous de la température de fusion, mais suffisamment pour que les grains se « soudent » (frittage). Cela permet de maîtriser la structure de l'acier et son état de surface (en particulier pas de retrait ni de retassure), mais introduit de la porosité.