

UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA 1
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE MECANIQUE

Mémoire pour l'obtention du diplôme de
MASTER CONSTRUCTION MECANIQUE

ETUDE THEORIQUE D'UNE
CELLULE FLEXIBLE DE
FABRICATION MECANIQUE

Proposé et encadré par :
Mr. Abderrazak ALLALI
Mr. Abdelkader BENMISRA

Réalisé par :
Mr. Karim ZERABIB

Année universitaire :
2017 - 2018

REMERCIEMENTS

Je remercie Allah le tout puissant qui m'a donné la force, le courage et la volonté qui m'ont permis de faire ce travail.

Mes remerciements les plus vifs et sincères vont à mes parents pour leur soutien permanent.

Je tiens à remercier mes promoteurs, Monsieur A.ALLALI et Monsieur A.BENMISRA, qui m'ont dirigé tout le long de ce travail, pour le soutien qu'ils m'ont apporté, pour leur claire voyance qui m'a guidée tout au long de cette étude sans oublier les membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont portés à ce mémoire.

Je tiens aussi à remercier le Chef de Département de Mécanique, Monsieur M.TEMMAR, qui m'a beaucoup aidé durant mon cursus, ainsi que son personnel actif.

K.ZERABIB

RESUME

Ces travaux débouchent sur les cellules flexibles de réalisation des pièces complexes de haute technicité justifiées dans la problématique citée dans les annexes de ce mémoire, un état de l'art est exploité dans ce sens plus précisément, Ils portent sur l'élaboration de nouvelles méthodes de calcul des robots manipulateur. De plus ils concernent la géométrie des implantations pour contrôler la trajectoire à l'aide des robots entre les stations et la chaîne automatique proposées à l'usinage d'un vilebrequin.

Il est fréquent que le problème principal posé se situe au niveau des positions de l'organe terminal ainsi que le comportement total de la cellule de fabrication, et ce sur le suivi de trajectoires complexes possédant des discontinuités géométriques. Des variantes-types de fonctionnement des robots manipulateurs sont déterminés dans la simulation afin de réaliser quelques opérations dans les chaînes-types d'usinage d'un vilebrequin.

A l'issue de notre travail, une modélisation optimale est proposée afin d'améliorer le comportement global des cellules flexibles de fabrication des vilebrequins.

ABSTRACT

This work leads to flexible cells for the production of complex pieces of high technology justified in the problem mentioned in the appendices of this paper, a state of the art is exploited in this sense more precisely, and they focus on the development of new methods for calculating robot. Moreover they concern the geometry of the implementations to control the trajectory with the help of the robots between the stations and the automatic chain proposed to the machining of a crankshaft.

It is common that the main problem is located at the positions of the terminal organ and the total behavior of the manufacturing cell, and on the tracking of complex trajectories with geometric discontinuities a simulation has been developed to determine standard operating variants of manipulator robots proposed for carrying out some operations in the crankshaft machining type chains.

At the end of our work, an optimal modeling is proposed in order to improve the global behavior of the flexible cells of manufacture of the crankshafts.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS

RESUME

NOMENCLATURES

PROBLEMATIQUE

INTRODUCTION GENERALE

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES

1.1 Introduction.....	3
1.2 Les cellules flexibles dans la production.....	3
1.2.1 Définition.....	3
1.2.2 Caractéristiques des cellules flexibles.....	4
1.2.3 Avantages des systèmes de production flexibles F.M.S.....	4
1.3 Les opérations de mise en forme.....	4
1.3.1 Fraisage.....	4
1.3.2 Tournage.....	5
1.3.3 Procédés U.G.V.....	6
1.4 Les différents types d'implantation.....	7
1.4.1 Implantation aléatoire.....	7
1.4.2 Implantation en sections homogènes.....	7
1.4.3 Implantation en ligne.....	7
1.4.4 Implantation en îlots.....	8
1.5 Causes structurales.....	8
1.5.1 Ecart de réalisation.....	8
1.5.2 Sollicitation dynamique associée aux effets d'inertie.....	9
1.5.3 Architecture pour le modèle de prédiction des écarts.....	9
1.6 La conception conventionnelle des machines-outils.....	10
1.7 Structures des machines.....	13
1.7.1 Cellule élémentaire.....	13

1.7.2 Machine-outil à structure sérielle.....	14
1.7.3 Machine-outil à structure parallèle industrialisée.....	14

CHAPITRE 2

ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS

2.1 Introduction.....	18
2.2 Modélisation géométrique d'un robot industriel.....	20
2.2.1 Modèle Géométrique Direct (M.G.D.....	20
2.3 Analyse cinématique.....	22
2.4 Dynamique des robots.....	24
2.4.1 Introduction.....	24
2.4.2 Modèle dynamique.....	24
2.4.3 Formalisme de LAGRANGE.....	24
2.4.4 Formalisme de NEWTON-EULER.....	25
2.4.5 Conclusion.....	26

CHAPITRE 3

IMPLANTATION D'UNE CELLULE FLEXIBLE DE RECTIFICATION D'UN VILBREQUIN

3.1 Machines à unités autonomes et les chaînes d'usinage automatique.....	27
3.1.1 Introduction.....	27
3.1.2 Généralités sur les petites machines à unités autonomes.....	28
3.1.3 Exemple d'une unité de perçage et de taraudage.....	30
3.2 Première proposition d'une chaîne pour l'usinage d'un vilebrequin.....	32
3.3 Deuxième proposition d'une chaîne pour l'usinage d'un vilebrequin.....	35
3.4 Conception du robot 1 et 3 (chaînes flexibles/station alésage-rectification et station alésage-rectification/centre de fraisage-rectification).....	41
3.5 Conception du robot 2 (station alésage-rectification).....	43
3.6 Centre d'usinage (fraisage-rectification) EUMACH UMC-1000.....	45
3.7 Robots (1, 2 et 3) utilisés dans les machines à unité autonomes proposées dans un atelier flexible.....	48

CHAPITRE 4

SIMULATION NUMERIQUE DES ROBOTS (1, 2 et 3) ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

4.1 Génération de la trajectoire.....	50
4.1.1 Génération en variable articulaires.....	50
4.1.2 Trajectoire cubique.....	51
4.1.3 Polynôme de degré n.....	51
4.1.4 Polynôme de degré trois.....	51
4.1.5 Trajectoire cubique à vitesse constante au milieu.....	52
4.1.6 Trajectoire cubique à accélération constante.....	53
4.1.7 Trajectoire des points séquences.....	54
4.2 Modélisation géométrique.....	54
4.2.1 Matrice de transformation homogène (TH).....	54
4.2.2 Modèle géométrique inverse.....	56
4.3 Application polynomial.....	57
4.3.1 Polynôme degré 3 utilisé pour le robot 1.....	57
4.3.2 Polynôme degré 3 utilisé pour le robot 3.....	58
4.4 Application partie dynamique.....	60
4.4.1 Modélisation dynamique des robots 1 et 3.....	60
4.4.2 Résultats de simulation.....	62
4.4.3 Conclusion (robots 1 et 3).....	65
4.5 Application polynomial du robot 2.....	65
4.5.1 Espace de travail du robot 2.....	65
4.5.2 Calcul de l'espace de travail du robot 2.....	66
4.6 Application partie dynamique de robot 2.....	67

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES

ANNEXES

NOMONCLATURES

A.F Atelier Flexible

F.M.S Systèmes de Production Flexibles

$x = f(q)$ Position de l'organe terminal

$[\dot{X}] = [J][\dot{q}]$ Modèle cinématique direct

$[J] = \frac{\partial f_j}{\partial q_j}$ Jacobinne

$\ddot{x} = [J]\ddot{q} + [A]\dot{q}^2$ Accélération

D. H Variables articulaires de Denavit-Hartenberg

(P_N) Vitesse du point de référence par rapport au repère fixe

(ω_N) Vitesse de rotation instantanée

$q = [q_1 \dots q_n]$ Configuration articulaire

$x = [x_1 \dots x_n]$ Elément de l'espace opérationnel

$E_c = 1/2 \dot{q}^T [A] \dot{q}$ Energie cinétique du système

$[A]$ Matrice $(n \times n)$ symétrique définie positive

$A_{ij}(q)$ Dépendant des variables articulaires q

$\dot{q} = (\dot{q}_1, \dot{q}_2, \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_n)^T$ Matrice uni-colonne des vitesses généralisées

$G_i = -\frac{\delta E_p}{\delta q}$ Energie potentielle

E_p Energie potentielle externe du système

A_i Quantité d'accélération généralisée

F_i Forces généralisées

E_D Energie de dissipation par effet du frottement visqueux

Γ_i Forces généralisées non conservatives

$$\Gamma_i = \sum_{j=1}^n \left[A_{ij} \ddot{q}_j + \sum_{k=j+1}^n \left(\frac{\partial A_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial A_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial A_{jk}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k + \left(\frac{\partial A_{ij}}{\partial q_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial A_{ij}}{\partial q_j} \right) \dot{q}_j^2 \right] - G_i$$
 Les

équations scalaires de Lagrange

Γ_i Matrice uni-colonne des forces généralisées

$[A]$ Matrice carrée de dimension $(n \times n)$ symétrique définie positive

$[B]$ Matrice de dimension $(n \times (n-1) \times n/2)$, appelée matrice des termes de Coriolis

$[C]$ Matrice de dimension $(n \times n)$, appelée matrice des termes centrifuges

[G] Matrice colonne de dimension (n x 1), représentant les forces généralisées aux champs de pesanteur

$M(q) \in \mathbb{R}_{n \times n}$ Matrice d'inertie

$B(q, \dot{q}) + K(q, \dot{q})$ $q \in \mathbb{R}_n$ Englobe les couples dus aux forces de Coriolis et centrifuges

$G(q) \in \mathbb{R}_n$ Vecteur de forces ou couples dus aux forces de gravitation

$T_p \in \mathbb{R}_n$ Vecteur de forces ou couples de perturbation externe.

$T(t) \in \mathbb{R}_n$ Vecteur de forces ou couples moteurs

D.D.L Degré de liberté

$\Gamma = [A] \ddot{q} + [B] \dot{q} \cdot \dot{q} + [C] q^2 - G$ Modèle dynamique direct

x Valeur scalaire

X Vecteur

\hat{x} Reconstruction ou estimation de la variable x

\cdot^T Matrice adjointe (transposée conjuguée)

* Produit terme à terme

σ Fonction d'activation non-linéaire/sigmoïde (selon le contexte)

σ_+ Fonction softplus, $\sigma_+(x) = \log(1 + \exp(x))$

σ_{max} Fonction softmax

F.A.O Fabrication Assistée par Ordinateur

C.A.O Commande Assistée par Ordinateur

U.G.V Usinage à grande vitesse

M.G.D Modèle géométrique directe

(R) Pièce rotation sur pièce

(P) Pièce glisse sur Prismatique

(C) Pièce rotation sur cylindrique

(S) Pièce mouvement d'une vis

O_m Origine mesure

C.N Commande numérique

C_o Cote outil

C.T Classe de tolérances

C.U Compensation d'usure

E Module d'Young

PROBLEMATIQUE

MISE EN PLACE DE CLUSTERS INDUSTRIES

MECANIQUES ET INDUSTRIE AUTOMOBILE EN

ALGERIE

Proposition de termes de référence pour une étude de faisabilité :

Cette proposition fait suite à une mission d'appui-conseil de l'Agence Française de Développement en juillet 2013, dont l'objectif était d'une part, de vérifier l'intérêt des autorités publiques et des représentants du secteur privé pour la mise en place d'un cluster et, d'autre part, d'apprécier l'existence des conditions préalables à la structuration d'un cluster dans le domaine de la mécanique automobile.

A la suite d'une réunion organisée au Ministère de l'Industrie et des mines en février 2015, il a été décidé d'orienter l'étude de faisabilité sur les conditions de mise en place de 2 clusters, un pour l'industrie mécanique à l'Est du pays, le second pour l'industrie automobile à l'Ouest. En effet, ces régions constituent aujourd'hui 2 pôles industriels distincts, et pourraient constituer de ce fait des zones d'implantation intéressantes pour des clusters. L'étude de faisabilité devra prendre en compte cette orientation.

Le processus de l'étude permettra d'évaluer le potentiel de développement sectoriel via une approche cluster selon, 4 axes :

- ✓ Potentiel de développement de l'activité économique;
- ✓ Potentiel d'amélioration de l'environnement territorial;
- ✓ Potentiel de mobilisation du secteur privé;
- ✓ Potentiel d'implantation du secteur public.

1. Première partie :

Etat des lieux et identification d'un ou plusieurs sous-secteurs porteurs

Cette première phase permettra de vérifier que les deux secteurs identifiés présentent un réel potentiel en termes de développement de clusters. Ainsi, pour définir le périmètre de ces clusters dans les secteurs de l'industrie mécanique à l'Est et de l'industrie automobile à l'Ouest, les points majeurs suivants devraient être abordés :

1. 1. Réaliser une revue documentaire.

Réaliser une revue de terrain.

2. Deuxième partie : Faisabilité de la mise en place de nouveaux clusters

Le contenu des étapes suivantes pourra être revu notamment à l'occasion de la tenue de la première réunion du comité de pilotage :

Identification des branches ciblées des entreprises potentiellement intéressées :

- identifier, au niveau local, 15 à 25 entreprises leaders de la branche retenue et susceptibles de faire partie d'un cluster.

Ces séminaires devront avoir un caractère opérationnel et pragmatique, présenter les actions collaboratives identifiées, et les besoins en appui matériel et immatériel nécessaires pour leur réussite sans donc dupliquer les actions de dissémination et formation déjà conduites dans le cadre du programme DEVED.

3. Résultats attendus de la mission

Etat des lieux du secteur de la sous-traitance automobile vis-à-vis notamment des exigences exprimées par Renault Algérie et définition du périmètre des clusters ;

- Etat des lieux du secteur de l'industrie mécanique (compétitivité des entreprises travaillant sur le secteur...)

- Synthèse du potentiel de développement des entreprises intéressées;

- Définition des clusters à mettre en place;

- Etablissement d'un premier plan d'actions pour leur mise en place;

2. L'expert local devra répondre au profil suivant :

6. Estimation de la Charge des experts

DESIGNATION	EXPERT LOCAL	EXPERT INTERNATIONAL	TOTAL
ETAPE 1	15J	15J	30J
ETAPE 2	15J	20J	35J
TOTAL	30J	35J	65J

INTRODUCTION GENERALE

La modélisation de la production se caractérise par un grand nombre de variantes à produire et des délais de livraisons de plus en plus courts. Cette situation influe sur les méthodes d'ordonnancement couramment employées dans l'industrie. Les problèmes rencontrés sont souvent nouveaux et on ne trouve que peu de méthodes éprouvées dans ce contexte. Les campagnes de production étant plus nombreuses et de plus courte durée, on se trouve presque toujours en régime transitoire. Les approximations qui présupposent des flux de nature continue n'étant plus valides, on doit tenir compte des événements discrets. Dans ce contexte, la cellule flexible nous a semblé une démarche intéressante, autant qu'elle offre la sécurité de fonctionnement d'une opération conventionnelle.

Dans ce contenu, on développe l'idée d'introduire les robots manipulateurs qui ont été développés récemment pour réaliser des opérations difficiles, dangereuses et surtout extrêmement répétitives qui ne requéraient qu'une bonne respectabilité. C'était le cas surtout des opérations de peinture de carrosseries automobiles ou de manutention lors des opérations de fabrication mécanique (voir annexe 1). Ces opérations ayant longtemps constituées une part significative du marché, les fabricants de robots ont logiquement focalisé leurs efforts de recherche et développement sur la création de gammes de robots dédiées aux besoins de ces opérations ne nécessitant qu'une bonne respectabilité de pose. La compétence mondiale, l'augmentation de la fréquence des changements de production en réponse aux demandes de personnalisation des produits, amènent d'année en année les industriels à élargir le spectre des applications susceptibles d'être robotisées à des procédés plus complexes en terme de trajectoires et plus exigeants en terme de précision absolue comme l'assemblage ou la mesure. De plus, le rendement, la grande accessibilité et la facilité de reconfiguration des robots en font aujourd'hui le moyen matériel essentiel permettant de répondre à cette demande d'agilité. Ainsi, l'adaptation des robots en vue de réaliser des opérations continues comme l'usinage représente aujourd'hui un besoin croissant de l'industrie de fabrication.

En effet, ce monde de production exploite, avec l'arrivée de machines plus adaptables, pour investir judicieusement dans de nouveaux équipements, pour augmenter la capacité de production aux possibilités plus étendues.

Ce mémoire commence par une introduction générale, et il est subdivisé complètement en 4 chapitres :

CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES

Il se résume dans toutes les notions nécessaires à la compréhension du domaine de la machine-outil et les ateliers flexibles de mises en forme sont décrits.

CHAPITRE 2 : ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS

La modélisation des robots industriels de façon systématique et automatique exige une méthode adéquate de calcul.

Modèle géométrique direct et inverse (MGD et MGI).

Modèle cinématique direct et inverse (MCD et MCI).

Formalismes de LAGRANGE et de NEWTON-EULER.

CHAPITRE 3 : IMPLANTATION D'UNE CELLULE FLEXIBLE DE RECTIFICATION D'UN VILBREQUIN

Machines, stations et unités autonomes de fabrication, permettent de maîtriser les nouvelles méthodes de contrôle, puis sur le poste de travail et leurs modes opératoires.

Proposition d'une chaîne automatique destinée à des opérations de perçage et de taraudage sur un vilebrequin.

CHAPITRE 4 : SIMULATION NUMERIQUE DES ROBOTS (1, 2 et 3) ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Logiciels de calculs sont utilisés, des résultats sont obtenus, illustrés par des courbes et des commentaires sont suggérés.

Et ce travail se termine par une conclusion générale, des références qui sont liés directement au sujet de recherche élaboré, ainsi que des annexes qui illustrent ce Master 2.

CHAPITRE 1

GENERALITES SUR LES ATELIERS FLEXIBLES

1.1 Introduction :

Des travaux se sont focalisés sur la modélisation [16, 21] et/ou la compréhension des phénomènes de coupe particuliers dans le cas de l'usinage robotisé.

En effet, les phénomènes de broutement ou d'instabilité de coupe, connus des usineurs, se développent relativement facilement en usinage robotisé alors que les mêmes conditions de coupe donnent un comportement plus stable sur une machine-outil conventionnelle. De façon globale, l'état de l'art fait ressortir les points suivants : les travaux précédents n'évoquent pas ou ne prennent pas en compte de manière significative les défauts des chaînes cinématiques d'un robot industriel. Ces défauts sont pourtant, pour une grande part, responsables de la dégradation de la précision de positionnement en statique et en dynamique.

La génération ou planification de trajectoires des robots est très peu évoquée, ni remise en cause. Il est donc nécessaire de l'adapter au suivi de trajectoires avec une précision élevée comme dans le contexte de la machine-outil [34].

La présente étude se propose d'investiguer ces aspects par une contribution dans les domaines de la planification de trajectoires adaptée à l'usinage assisté par robot [33], la compréhension, la modélisation et l'identification des défauts des axes des robots industriels, en particulier les souplesses et les irrégularités cinématique des systèmes de transmission, la correction de défauts par la mise en forme hors ligne de la trajectoire de référence.

Ce chapitre détaille les généralités sur les cellules flexibles de fabrication mécanique [14], les machines d'usinage, la modélisation des cellules d'usinage et les notions de base en fabrication à commande numérique.

1.2 Les cellules flexibles dans la production [14] :

1.2.1 Définition :

Un atelier est dit flexible lorsqu'il peut produire des articles avec des variantes sans l'intervention de l'opérateur humain dans un processus de fabrication adaptatif, automatisé, simultané et capable de réaliser - en temps réel par un ordinateur - des pièces en quantité variable. Les nombreuses installations d'assemblage rendant cet

atelier complexe, donc il n'est pas évident de prévoir les effets d'une modification sans la simuler en tenant compte des données réelles.

1.2.2 Caractéristiques des cellules flexibles :

- Le délai.
- Le flux.
- Optimisation des paramètres.
- Structures adéquates.
- Organisation bénéfique.
- Les moyens de la logistique.
- Les moyens de transport.

1.2.3 Avantages des systèmes de production flexibles F.M.S :

- Réduction des coûts unitaires grâce à l'usinage complet flexible entièrement automatisé de tailles de lot d'une unité à de grandes quantités.
- Faibles niveaux de modification pour répondre aux besoins des clients.
- Production basée sur la demande avec faibles quantité de matériaux.
- Production très efficace garantie juste à temps.
- Usinage sans intervention humaine avec plusieurs équipes.
- Réduction des temps de production et de passage tout en maintenant les mêmes hauts niveaux de qualité de traitement.
- Solutions de projet clé en main.
- Conditions optimales pour l'extension du système et l'intégration de machines additionnelles.
- Interconnexion d'une grande variété de versions de machine.
- Haut niveau d'expertise interne dans la manipulation de projets majeurs.

1.3 Les opérations de mise en forme :

1.3.1 Fraisage :

En fraisage conventionnel, on travaille « en opposition » : en raison du jeu dans la vis d'entraînement, un travail « en avalant » provoquerait des chocs pouvant nuire à la précision de l'usinage voire détériorer la machine, les machine à commande numérique possèdent des vis avec noix pourvues de billes précontraintes donc exemptes de jeu, ce qui permet le travail en avalant qui soulage l'effort de coupe, l'usage de moteurs linéaires sur certaines machines a même supprime l'usage des vis.



Figure 1.1.a : Fraiseuse C.N.C



Figure 1.1.b : Opération de façonnage sur fraiseuse CNC 8065 Fagor [29]

1.3.2 Tournage :

En donnant à l'outil une trajectoire plane quelconque, on peut obtenir une forme de révolution quelconque, les tours à C.N permettent de suivre de tels profils, définis géométriquement par des combinaisons d'éléments simples, analytiquement par une fonction, ou point par point dans le cas de profils non définis mathématiquement.

En Tournage traditionnel, la vitesse de rotation est fixe. Les tours à C.N possèdent une fonction souvent appelée (G96) qui permet d'avoir une vitesse de rotation évolutive. Cette fonctionnalité s'appelle la vitesse de coupe constante, elle permet d'avoir des états de surface supérieurs à l'usinage traditionnel.



Figure 1.2.a : Tour à C.N [36]

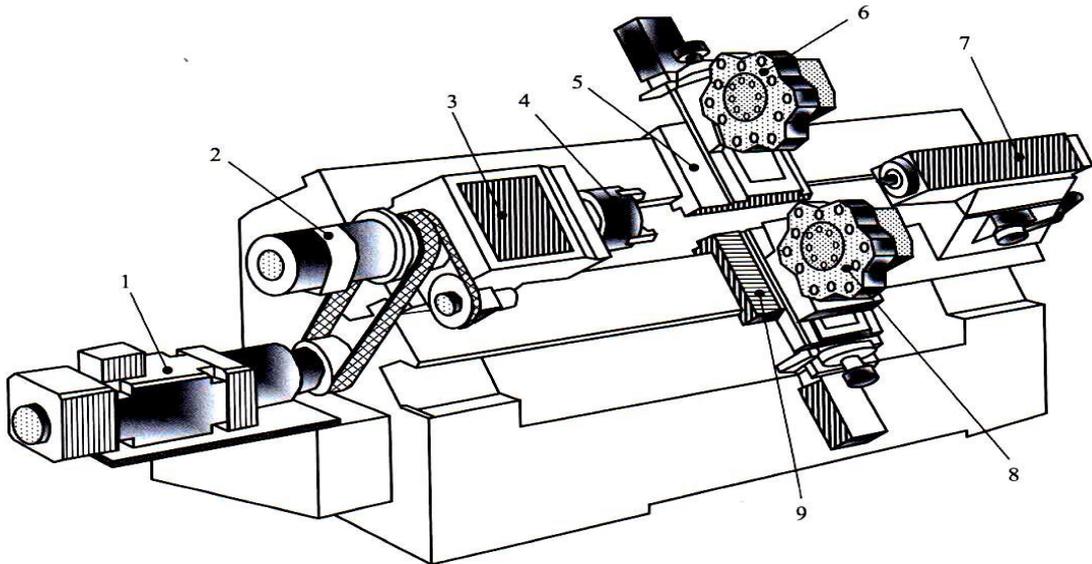


Figure 1.2.b : Tour à C.N à deux tourelles montées sur un chariot transversal [1=commande électrique principale; 2=commande de la broche; 3=boîte de vitesse; 4=mandrin à trois mors; 5 et 9=chariot transversal; 6, 8=tourelle révoluer (porte-outils); 7=contre-poupée] [13]

1.3.3 Procédés U.G.V :

Le processus a pour point d'entrée le modèle C.A.O, issu de l'étape de conception qui constitue le modèle de référence construit à partir d'un agencement de surfaces ou d'éléments géométriques. La première étape F.A.O associée à la chaîne numérique concerne la génération de trajectoire ou modèle F.A.O à partir du modèle C.A.O Cette étape consiste à calculer un ensemble de points et orientations caractéristiques : les positionnements de l'outil sur la surface C.A.O (points de passage ou points de contrôle selon le format de description de trajectoire choisi).

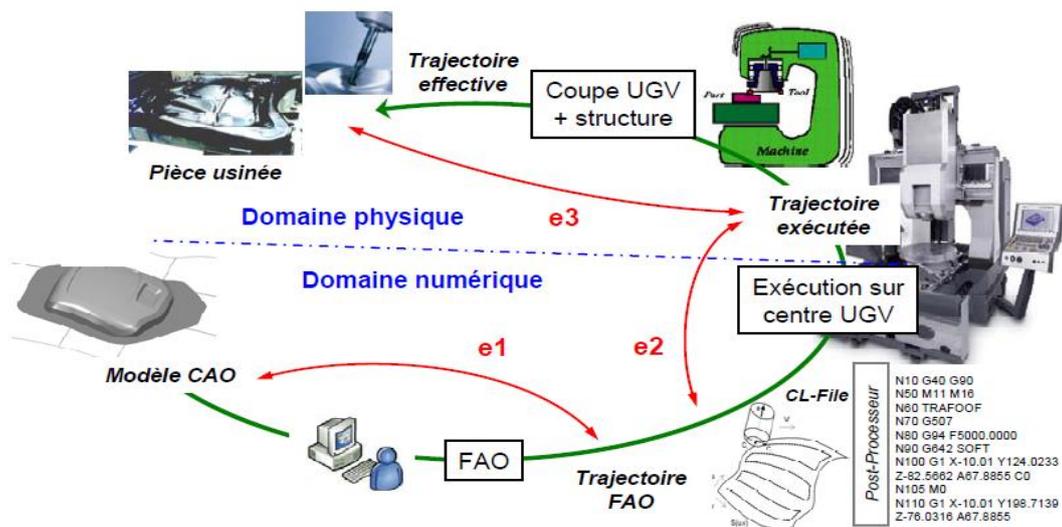


Figure 1.3 : Processus d'élaboration U.G.V [21]

1.4 Les différents types d'implantation [27] :

1.4.1 Implantation aléatoire : Elle se retrouve parfois dans les petites industries dont le développement a été progressif, mais ce n'est pas une solution d'implantation optimum car elle génère des temps de déplacement importants des produits.

1.4.2 Implantation en sections homogènes : Les machines qui ont les mêmes fonctions ou utilisent les mêmes techniques sont regroupées dans le même atelier.

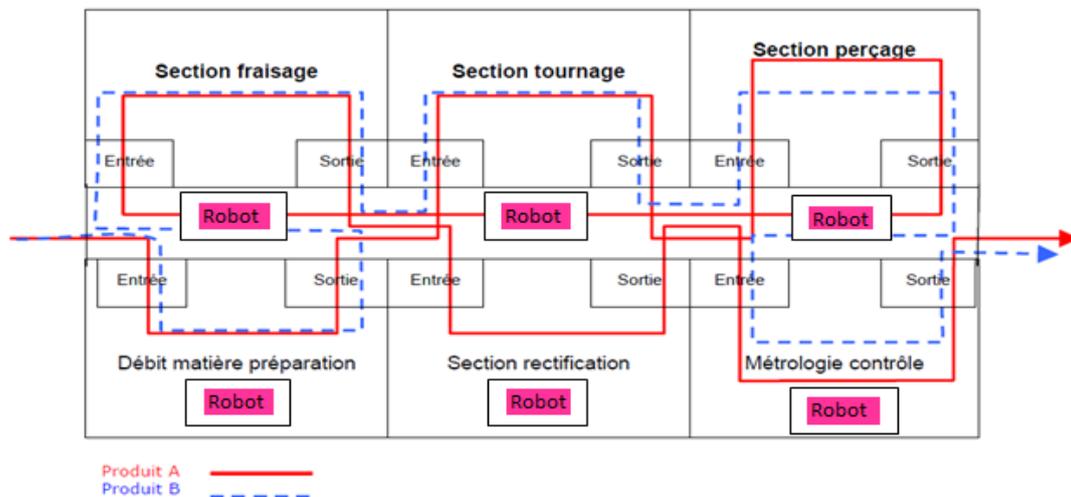


Figure 1.4.a : Implantation en sections homogènes

1.4.3 Implantation en ligne :

Les machines sont positionnées dans l'ordre de la gamme de fabrication, mais la flexibilité est quasiment nulle parce que certains produits peuvent ne pas utiliser tous les postes de travail, donc ils seront obligés de suivre le sens de la circulation sans possibilité de rebroussement.

Par exemple, le produit C dans la figure n'utilise pas le poste F1, mais respecte l'ordre de la ligne de production.

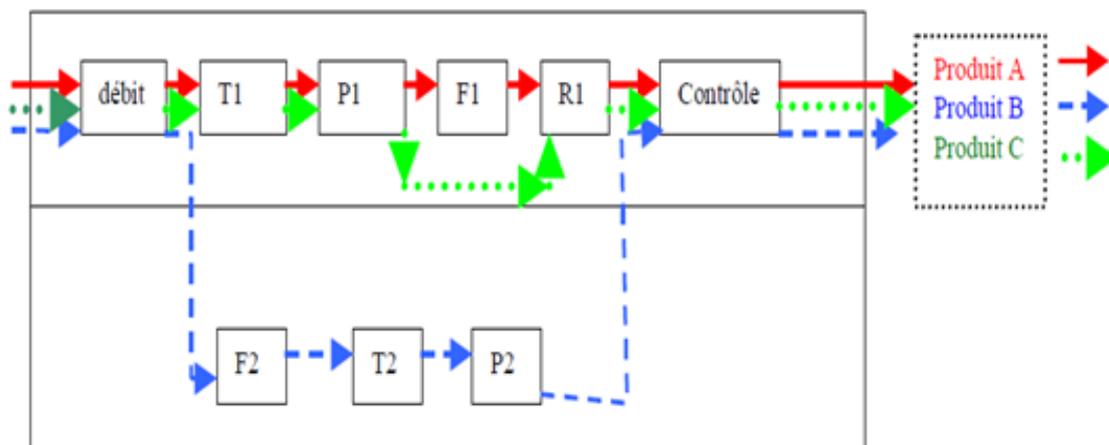


Figure 1.4.b : Implantation en ligne

1.4.4 Implantation en îlots :

Les machines sont regroupées en ensembles d'îlots ou petits ateliers spécialisés pour réaliser entièrement un ensemble de pièces.

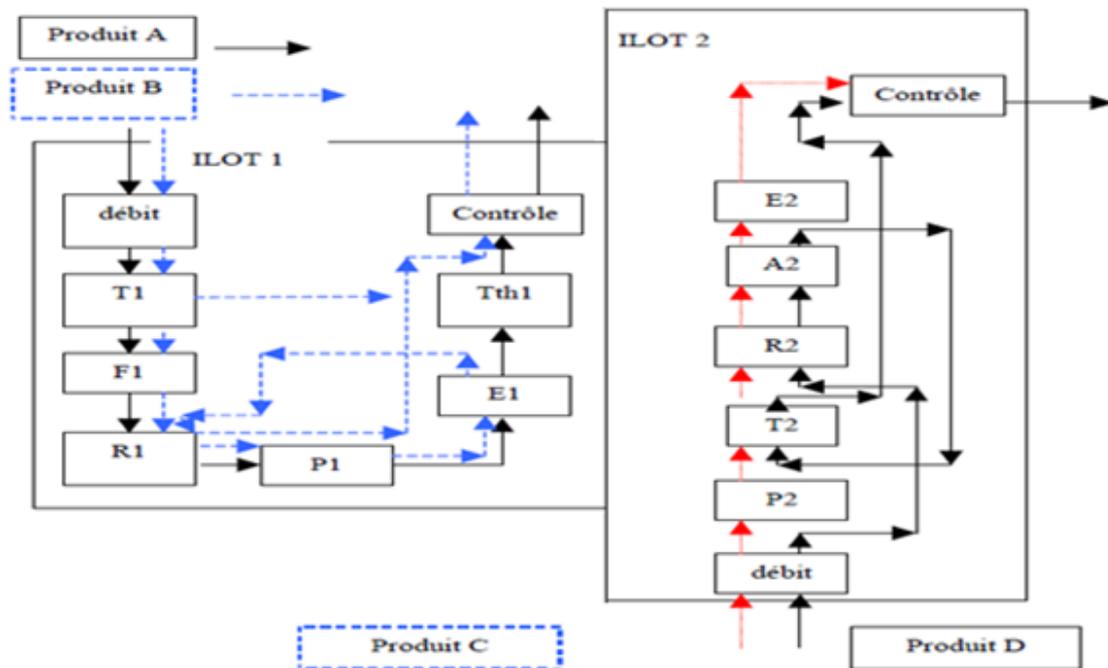


Figure 1.4.c : Implantation en îlots

1.5 Causes structurales :

1.5.1 Ecart de réalisation :

D'après l'architecture globale d'une M.O.C.N, les écarts physiques de réalisation sont associés aux niveaux proposés. Ces écarts sont générés par les défauts géométriques, déformations et vibrations des différents composants mécaniques de la Cellule Élémentaire d'Usinage (Figure 1.5). Lors de l'usinage, le mouvement des axes, les efforts de coupe, les changements de température et les défauts géométriques impactent le mouvement réel de l'outil par rapport à la surface à usiner.

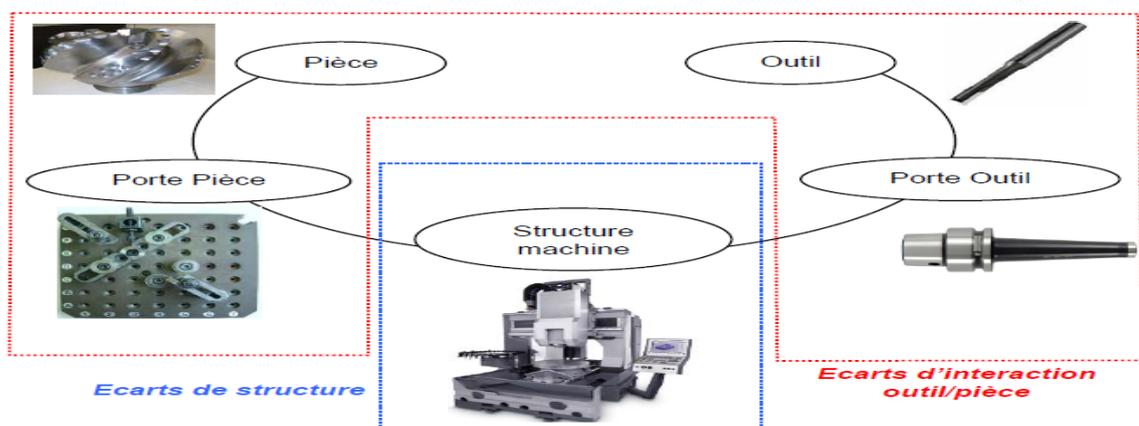


Figure 1.5 : Cellule élémentaire d'usinage [21]

1.5.2 Sollicitation dynamique associée aux effets d'inertie :

Afin d'accroître la productivité, les constructeurs de machine outils développent des moyens de production possédant des caractéristiques cinématiques toujours plus élevées. Ainsi, les caractéristiques de déplacement des axes sont aujourd'hui de 100 m/min en vitesse, avec des accélérations de 2 g. Les évolutions technologiques portent sur la motorisation et la transmission au niveau des liaisons : Les moteurs synchrones associés à vis à billes tendent à être remplacés par des moteurs linéaires pour diminuer les frottements et atteindre des accélérations et des vitesses très élevées.

Les structures des machines sont également modifiées par les constructeurs. On voit apparaître des structures de machines dites parallèles afin de gagner en agilité : la réduction des masses en déplacement, des associations géométriques et cinématiques des performances de chaque axe permettent d'atteindre des accélérations plus importantes. Cependant, d'un point de vue rigidité, ces machines sont beaucoup plus sensibles que les structures classiques dites sérielles; les déformations engendrées sous actions mécaniques importantes peuvent nuire à la qualité géométrique des surfaces générées. Ainsi, les fortes vitesses d'avance dans le cadre de l'usinage grande vitesse engendrent des phénomènes dynamiques prononcés, tout particulièrement dans le cas des machines à structure parallèles ou agiles (Figure 1.7).



Figure 1.7 : Exemple de structure agile : Robot cartésien [21]

1.5.3 Architecture pour le modèle de prédiction des écarts :

L'approche par modélisation a pour objectif d'établir un modèle permettant la prédiction des écarts sous un chargement donné en accélération. L'étude porte ainsi sur l'évaluation des déformations de la machine, en ne considérant dans un premier

temps uniquement les 3 mouvements de translation associés aux axes X, Y et Z. Dans la suite, les notations du schéma de (Figure 1.8) sont utilisées. Le bâti constitue l'ensemble «base» noté (S1); l'axe X, l'ensemble «portique», noté (S2); l'axe Y, l'ensemble «bélier», noté (S3) et l'axe Z, l'ensemble «coulant», noté (S4). La démarche de choix et de modélisation mise en place pour les structures U.G.V dites sérielles.

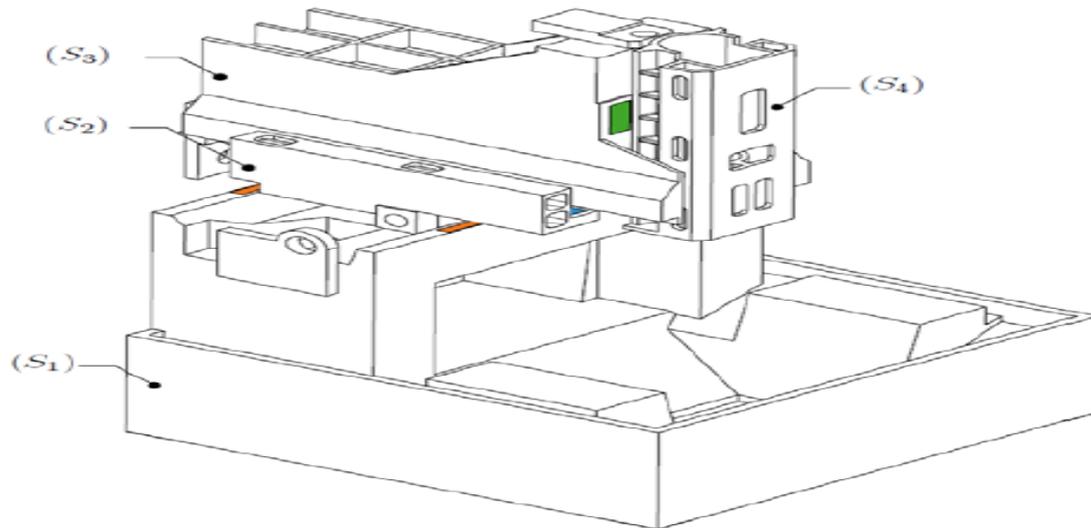


Figure 1.8 : Architecture de la machine

1.6 La conception conventionnelle des machines-outils :

La conception conventionnelle des machines-outils dans l'industrie compte sur l'intuition et l'expérience du concepteur pour le choix d'une architecture. Cependant l'intuition et l'expérience ne garantissent pas que le choix effectué soit optimal. Vu l'absence de méthodologies et d'algorithmes de choix d'architectures de machines-outils, le développement de nouvelles machines-outils se base généralement sur certaines structures déjà commercialisées et exploités par les industries.

Afin de comparer les machines-outils, des études se basaient sur certaines caractéristiques structurales. Comme la typologie de la structure ouverte «C» ou bien fermé «O» et le type de la chaîne cinématique : sérielle, parallèle et hybride. Cependant la détermination d'une sélection de machines-outils optimales devrait s'appuyer sur des indicateurs de la performance et du comportement de la machine lors de l'usinage.

La conception conventionnelle consiste à déterminer l'ensemble des solutions cinématiquement possible en fonction du nombre d'axes souhaités. En fonction du type d'opération d'usinage à réaliser, des critères de sélection sont définis [21, 36]. Ces critères permettent de classer ces solutions et d'en extraire les architectures optimales. Cette sélection réduit le nombre d'architectures étudiées avec des outils de simulation mécanique.

Pour éviter d'avoir des solutions symétriques et pour unifier la lecture des codes d'architectures on a utilisé une convention. Par exemple l'architecture de la machine dans la (Figure 1.9) est (C, Y, O, X, Z, B). [21, 36].

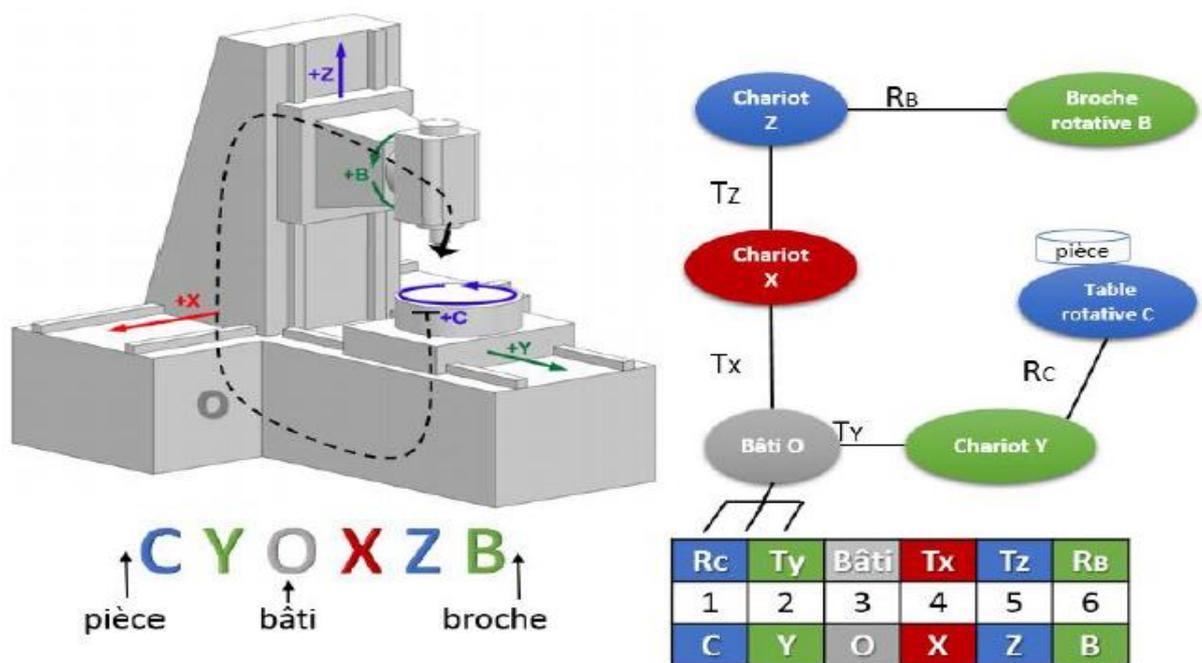


Figure 1.9 : Exemple type d'une machine-outil 5 axes et son graphe de liaison

Il existe des contraintes à évaluer et cela selon le sens de rotation des axes pour pouvoir suggérer un prototype adéquat. Une fois ces contraintes établies, l'ensemble des solutions de machines-outils sont évaluées et notées. Ces contraintes sont :

- Précision géométrique de la machine :

L'objectif de cette contrainte est de garantir l'indépendance des mouvements des axes vis-à-vis du mouvement de la pièce par rapport à la broche. Pour se faire, l'architecture satisfaisant cette contrainte devrait ne pas comporter un axe de rotation placé entre deux axes de translation et inversement. D'autres parts, des contraintes de conception ont obligé à placer les axes de rotation soit au début soit à la fin du code de description de l'architecture.

- Dexterité de la machine :

Cette contrainte ne s'applique que sur les architectures des machines-outils 5 axes dont leurs axes de rotation sont soit A et C soit B et C. En effet pour assurer des tâches d'usinages 5 axes continus, il ne peut pas y avoir un axe de rotation suivant l'axe de la broche. Cette propriété peut se traduire par la contrainte suivante : l'axe C doit être placé à gauche des autres axes de rotation.

- Masses mobiles de la machine :

Dans cette contrainte on s'intéresse aux positions des axes de translation régissant les plus grands déplacements dans la machine. En effet pour limiter l'impact des grands déplacements de la structure de la machine sur son comportement dynamique, il est judicieux de placer ces 2 axes de translations de part et d'autre du bâti. Dans la majorité des cas les 2 axes de translation assurant les déplacements les plus importants sont l'axe X et Y. De ce fait les architectures vérifiant cette contrainte disposent obligatoirement de l'une des 2 séquences suivantes (XOY) ou (YOX).

- Accessibilité à l'espace de travail :

L'utilisation de machines-outils à tête d'usinage immobile n'est pas privilégiée dans le cas de l'usinage de pièces aéronautique de grandes dimensions. En effet, les contraintes d'accessibilité et de masse en mouvement amènent à privilégier les machines dont la table est fixe dans le cas de pièces de grandes dimensions. Dans le cas des pièces de dimensions moyennes, ce besoin s'exprime alors par un compromis à déterminer entre l'orientation de la broche et de la table. Ainsi, les machines, dont la tête et la table sont actionnées, sont les plus adaptées.

Pour exprimer cette contrainte, on se focalise sur l'emplacement du bâti dans le vecteur de description de l'architecture. Ainsi, cette contrainte tend à privilégier les architectures amenant à proposer des mouvements à la fois de la table et de la broche.

- Répartition de la masse de la structure :

L'arrangement des axes de part et d'autre du bâti permet d'optimiser le comportement dynamique de la structure et de réduire les sollicitations générées lors des mouvements. Pour cela le bâti O doit être placé au milieu de l'architecture.

On doit développer une méthodologie rationnelle de sélection d'architectures de machine-outil 5 de plusieurs axes pour l'usinage de pièces des différentes dimensions et cela avant l'installation des ateliers flexibles. Cette méthodologie doit permettre de dégager rapidement une sélection d'architectures pertinentes. En effet, parmi les solutions proposées on choisit des architectures de machine-outil adaptées à l'usinage

qui exigent des différentes solutions aux matériaux usinés, ce qui se traduit par un gain important en temps d'analyse lors des études approfondies.

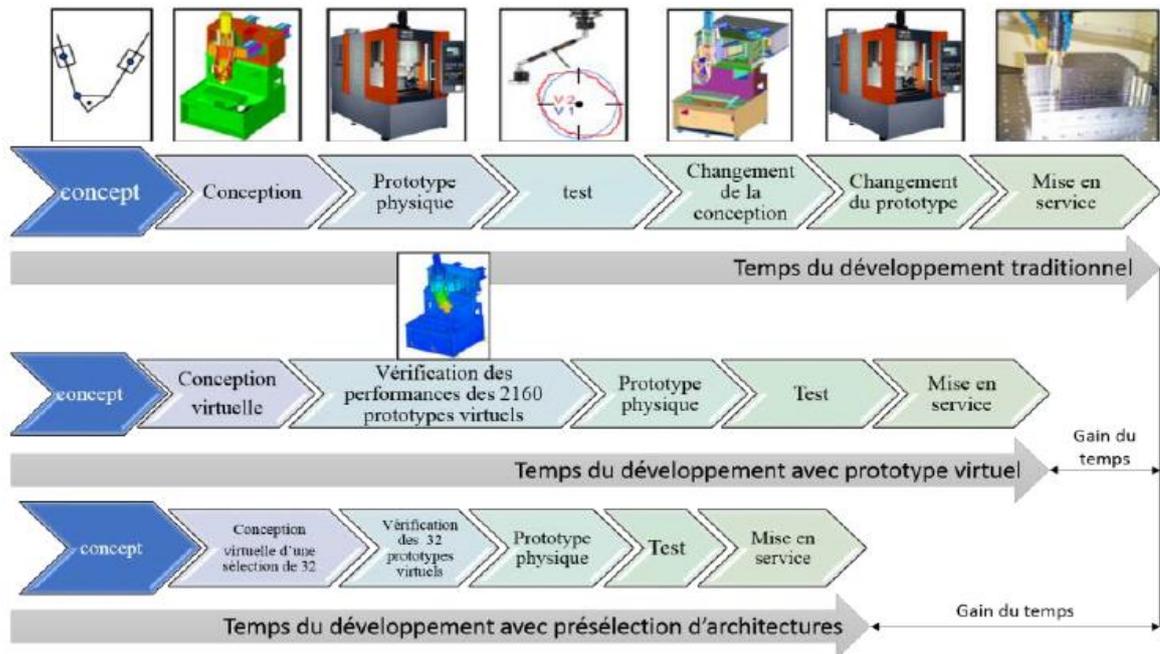


Figure1.10 : Comparaison de la conception traditionnelle et la conception avec la nouvelle méthodologie

1.7 Structures des machines :

1.7.1 Cellule élémentaire :

- Aspect technologique : préparation nécessitant les mobilisations des connaissances relatives à la maîtrise du procédé (choix des équipements, du processus et des conditions de mise en œuvre).
- Aspect géométrique : localisation (positionnement, par axial, suivi de trajectoire) de l'effecteur dans l'espace de la tâche.

Éléments permanents concourant à la réalisation de la tâche : l'outil, l'effecteur, la machine porteuse, le système de commande et le système de retour d'information qualifiant la tâche (géométrique ou technologique).

La situation relative de l'outil par rapport à la pièce est assurée par une chaîne de solides : liaison complète, mouvement de translation ou de rotation assuré par réglage ou par commande à l'aide d'un actionneur. La géométrie des surfaces, les dimensions de la porte pièce sont définies dans l'espace des tâches les mouvements relatifs sont exprimés dans l'espace articulaire.

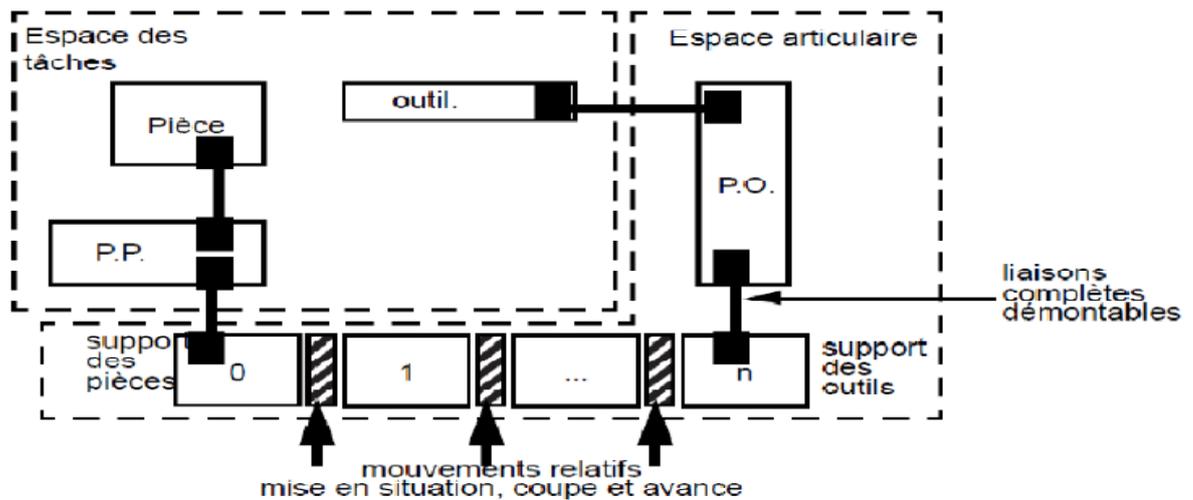


Figure 1.11 : Relation entre espace articulaire et espace des tâches [36]

1.7.2 Machine-outil à structure sérielle :

C'est un mécanisme à chaîne cinématique ouvert dont l'organe terminal est relié à la base par une succession de segments en liaison avec son successeur.

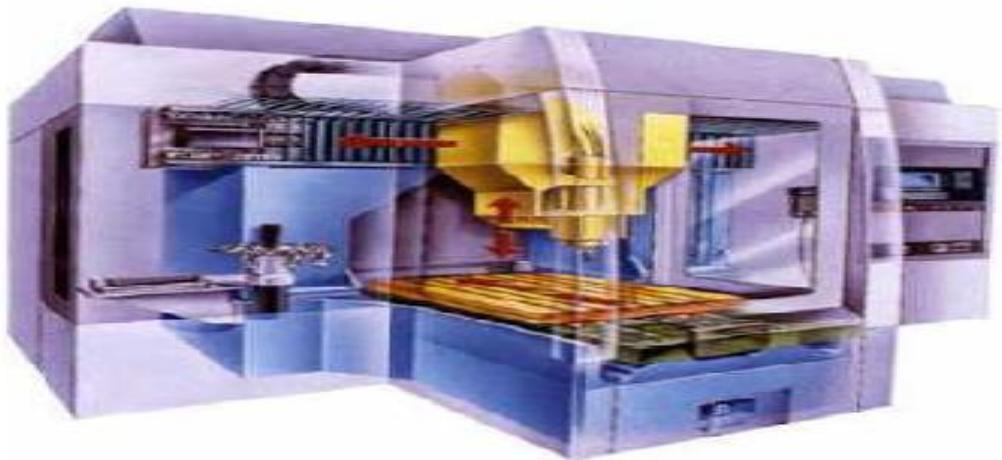


Figure 1.12 : Machine-outil à structure sérielle de type portique (MIKRON HSM 700) [36]

1.7.3 Machine-outil à structure parallèle industrialisée :

Les machines à structures parallèles sont des structures spatiales articulées est d'un exercice difficile. Il existe plusieurs types de représentation et chacun d'eux permet une lisibilité accrue de certains paramètres.

Pour illustrer ce propos, on a appliqué les différentes représentations à la Variax de GIDDING & LEWIS qui est une fraiseuse à cinq axes présentant une architecture similaire à la plate-forme de GOUGH, depuis, plusieurs machines outils ont été conçues et réalisées avec des architectures très diverses.

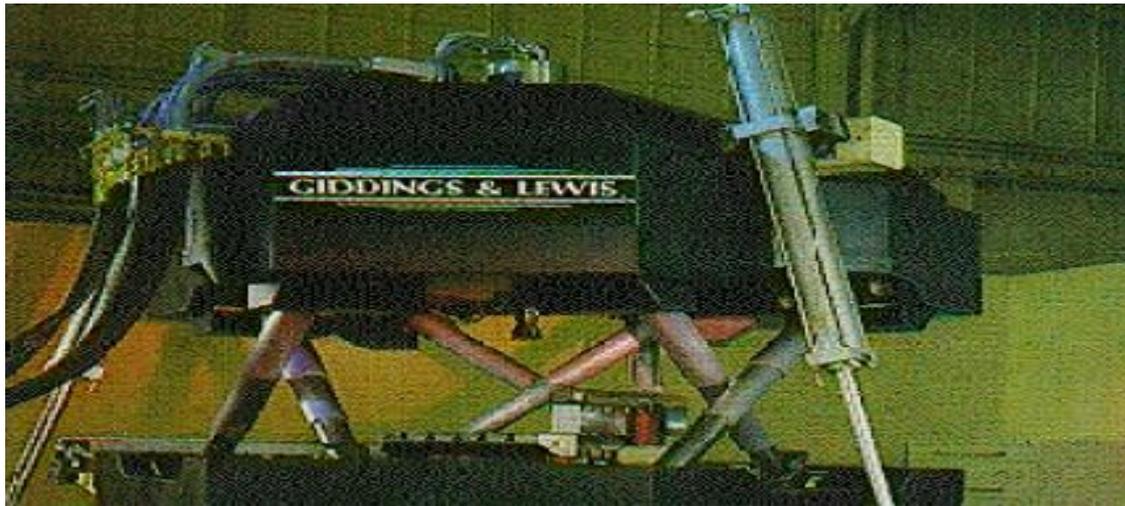


Figure 1.13 : Fraiseuse à cinq axes Variax de GIDDING & LEWIS [36]

Cependant, ce type de machine ne rencontre qu'un succès mitigé et n'équipe aujourd'hui que peu d'ateliers de fabrication. Actuellement, elles sont surtout utilisées pour des opérations de perçage dans l'industrie automobile ou l'évidement de poches dans l'aéronautique, par exemple; depuis les années 2000, des machines Tricept de la société PCI sont utilisées pour percer les traverses arrière des Peugeot 407 dans l'usine PSA de Cormeilles-le-Royal.



Figure1.14 : Machine Tricept

- Atelier d'usinage Quenneville Inc [28]

Table 1.1 : Liste d'équipements de l'atelier Quenneville inc

CENTRE D'USINAGE (CNC)		
1	Mazak V-655/60N	60" x 26" x 26"
1	Hass VF-11/50	120" x 40" x 30"
1	Hass VF-7/50	84" x 32" x 30"
2	Hass VF-2/40	30" x 16" x 20"
1	Emmegi Diamant	25" x 15" x 25"
TOUR CONTROLE NUMERIQUE (CNC)		
1	Mazak QT 30	15"Ø x 38" Long
TOUR CONVENTIONNEL		
4	Tour	10"Ø x 60" Long
1	Tour	15"Ø x 120" Long
1	Tour	16"Ø x 60" Long
1	Tour	37"Ø x 168" Long
FRAISEUSE		
2	Fraiseuse universelle	#50 cône 52" x 26" x 20"
1	Fraiseuse universelle	#50 cône 60" x 23" x 22"
1	Fraiseuse verticale	#50 cône 30" x 10" x 15"
ALESEUSE		
2	Aléseuse horizontale	#50 cône 55" x 55"
RECTIFIEUR-SURFACEUR (grinder)		
1	Rectifieur de surface	8" x 30"
PERCEUSE		
1	Perceuse colonne	bras 48"
1	Perceuse colonne	bras 40"
1	Perceuse colonne	bras 36"
EQUIPEMENTS DE SOUDURE		
2	Soudeuses	
4	Soudeuses semi-automatique	

AUTRES EQUIPEMENTS	
1	Tumbler FMD-4LR Sweco Finishing mill
1	Scie à ruban automatique
1	Scie à ruban Doall
1	Scie radiale acme
1	Presse hydraulique horizontale 200 tonnes
2	Pemserter Series 4 Press Force 12000 lbs
SALLE D'INSPECTION	
Mitutoyo CMM Crysta-plus M574	
Mesureur de coordonnées Mitutoyo LH-600	
Rockwell testeur	
Comparateur optique Mitutoyo PH-3500	
EQUIPEMENTS DE MANIPULATION	
1	Pont roulant
1	Pont roulant
Autres ponts roulants et chariots élévateurs	
EQUIPEMENTS DE TRANSPORT	
1	Freightliner flat bed
4	Pick up

CHAPITRE 2

ETUDE THEORIQUE DES ROBOTS INDUSTRIELS

2.1 Introduction :

Une cellule robotisée industrielle, comme celle présentée à la (Figure 2.1), qui est constituée d'au moins trois éléments : le robot, l'élément terminal et la pièce. Sur l'élément terminal du robot est fixé le dispositif via une interface mécanique dans le but d'accomplir une tâche particulière : pince de soudure par point, préhenseur de perçage et de rivetage, broche d'usinage, pistolet de peinture...

La pièce est l'entité sur laquelle porte le travail du robot : carrosserie à souder, voilure d'avion à percer. L'outil et la pièce peuvent être embarqués ou fixés au sol.

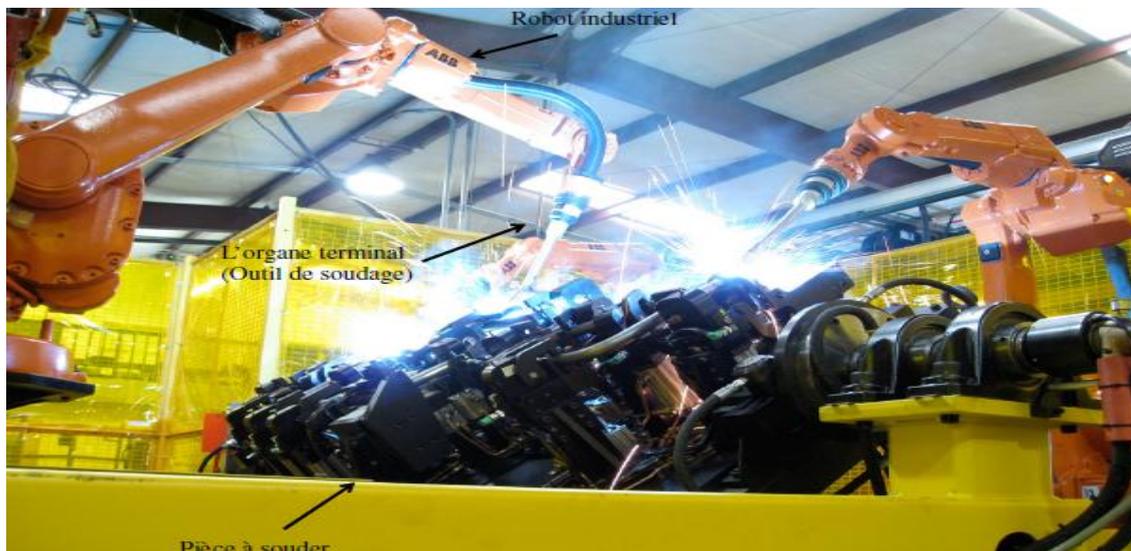


Figure 2.1 : Cellule robotisée [22]

Les robots industriels sont en général répétables et peu précis. La répétabilité des robots industriels est de l'ordre de 0.03 à 0.1 mm pour les robots de faible et de moyenne envergure et elle peut dépasser les 0.2 mm pour les gros porteurs. Les défauts à l'origine du défaut de répétabilité sont de nature aléatoire. Ils sont causés entre autres, par les réglages des certains phénomènes non géométriques tels que les jeux et les frottements. C'est donc un phénomène impossible à modéliser et à corriger par anticipation. Les écarts de pose à l'origine du défaut de précision ont quant à eux un caractère assignable et non plus aléatoire comme dans le cas du défaut de répétabilité.

La précision statique d'un robot, désignée par le terme <exactitude de pose> dans les normes I.S.O, décrit la capacité du robot à atteindre une pose commandée. Elle est définie comme étant l'écart entre la pose commandée et la moyenne des poses atteintes. L'erreur d'exactitude de pose des robots industriels est souvent de quelques millimètres. L'écart entre la pose nominale commandée du robot et la pose réelle mesurée est issu de la différence entre le modèle nominale du robot, défini par le concepteur, et le robot réel. Cette différence a pour origine de nombreux facteurs. Ces facteurs sont classés comme facteurs géométriques et non géométriques (Voir le tableau 2.1). La précision dynamique, décrit quant à elle, la capacité du robot à suivre une trajectoire désirée avec peu ou sans déviation La précision dynamique est affectée par les mêmes sources d'erreurs que la précision statique. Le robot doit alors atteindre des positions définies théoriquement et non plus enregistrées. Il existe de nombreuses solutions pour améliorer la précision des robots.

Table 2.1 : Sources des erreurs de précision de robots industriels [22]

Précision statique du robot industriel	
Erreurs géométriques	Erreurs non-géométriques
<ul style="list-style-type: none"> - Paramètres du modèle géométrique - Définition de l'organe terminal 	<ul style="list-style-type: none"> - Souplesse des articulations et des bras - Défauts de transmission dans les systèmes - Jeu mécanique

Par exemple, l'amélioration de la qualité de fabrication des composants du robot permet de réduire les tolérances et ainsi limiter les erreurs géométriques. Une autre solution consiste à faire une bonne conception de la dite structure mécanique pour réduire les défauts des souplesses. La calibration de robot est la solution qui permet d'améliorer la précision statique du positionnement du robot sans aucune modification de la structure mécanique ou de la conception du robot lui-même. En général, la calibration comporte quelques étapes : modélisation, mesure, et identification. Cette méthode de programmation (Figure 2.2) constitue aujourd'hui un quasi standard dans les secteurs de l'automobile par exemple. Les techniques de modélisation numérique des cellules robotisées ne prennent en compte que des représentations nominales du robot, de la pièce des outils et de leur positionnement relatif.

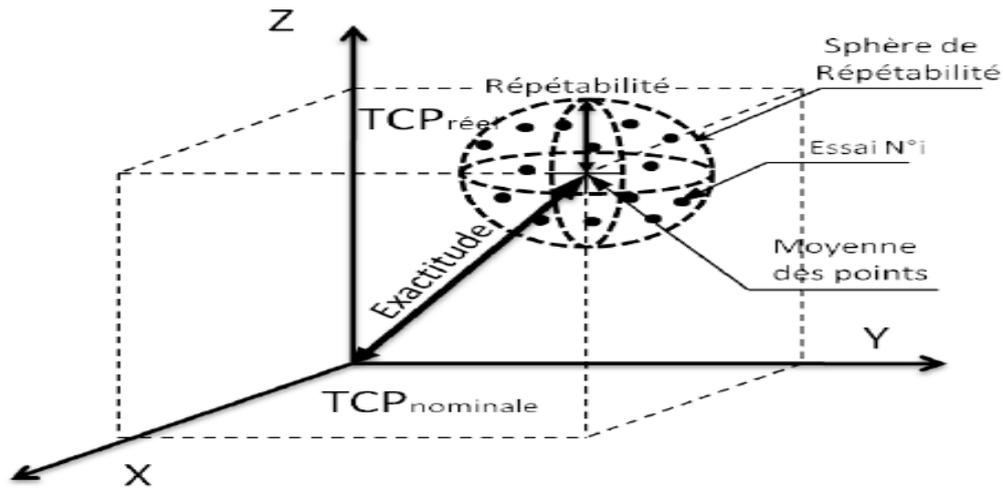


Figure 2.2 : Précision d'un robot : Exactitude de pose et répétabilité [22]

2.2 Modélisation géométrique d'un robot industriel [22] :

La conception des robots nécessitent la caractérisation des modèles géométrique, cinématique et dynamique. Ces modèles permettent d'effectuer la transformation entre l'espace opérationnel, dans lequel sont défini la position et l'orientation de l'organe terminal, et l'espace articulaire, dans lequel est définie la configuration du robot. Dans ce travail, on s'intéresse aux robots manipulateurs à architecture série ouverte à bras rigides reliés entre eux par des articulations considérées idéales, sans jeu mécanique et sans pénibilités.

2.2.1 Modèle Géométrique Direct (M.G.D) :

Le modèle géométrique direct permet d'exprimer la position et l'orientation de l'organe terminal en fonction de la position articulaire du robot. Afin de caractériser ce modèle géométrique, nous introduisons dans la suite une méthode classique permettant de traiter les translations et les rotations dans un formalisme unifié via la représentation sous forme de matrice homogène.

2.2.1.1 Transformation homogène :

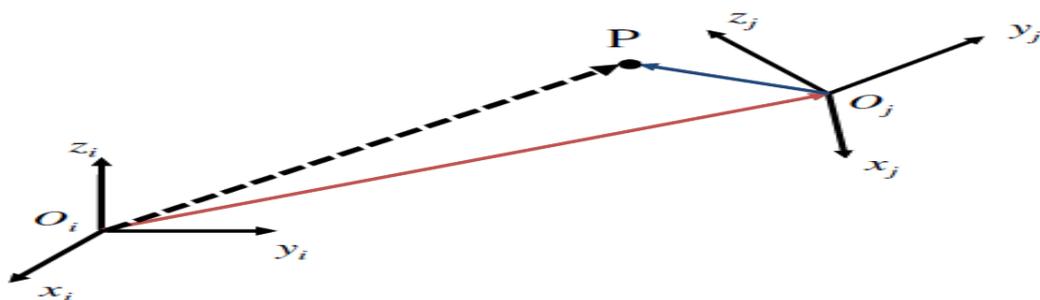


Figure 2.3 : Représentation d'un point P dans 2 repères différents [22]

La (Figure 2.3) représente les repères R_i et R_j d'origine respective O_i et O_j ainsi qu'un point P . Le vecteur $O_i j$, représentant $O_i O_j$, a ses coordonnées exprimées dans le repère R_i . Le vecteur P_j désigne le vecteur $O_j P$ dont les coordonnées sont exprimées dans le repère R_j . La matrice A_{ij} est la matrice de rotation du repère R_j par rapport au repère R_i . Ainsi, la position du point P dans le repère R_i , notée P_i est donnée par la relation : $P^i = O_j^i + A_j^i P^j$ (2.1)

La matrice de rotation A_{ji} est une matrice réelle orthogonale de $O_3(\mathbb{R})$ telle que $(A_{ij})^T A_{ji} = I_3$ où I_3 est la matrice identité de $M_{3 \times 3}(\mathbb{R})$.

L'équation (2.1) donne la transformation (translation et rotation) permettant d'exprimer un point dans le repère R_i à partir des coordonnées de ce point dans le repère R_j . Comme $A_{ji} = (A_{ij})^T$, la transformation inverse est calculée alors par la multiplication de (2.1) par $(A_{ij})^T$: $P^j = A_i^j O_j^i + A_i^j P^i$ (2.2)

Il est possible d'obtenir une relation plus compacte de (2.2), en utilisant les coordonnées homogènes du point P sous la forme : $\tilde{P} = \begin{bmatrix} P \\ 1 \end{bmatrix}$ (2.3)

Où : \tilde{P} est un représentant homogène de P . Dans ce cas, l'équation (2.1) s'écrit alors :

$$\tilde{P}^i = T_j^i \tilde{P}^j \text{ (2.4)}$$

Où T_{ij} est donné par : $T_j^i = \begin{bmatrix} A_j^i & O_j^i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$ (2.5)

C'est une matrice 4×4 appelée matrice de transformation homogène. Ici \tilde{P}^i et \tilde{P}^j sont les représentations homogènes du point P respectivement exprimées dans les repères R_i et R_j . Le vecteur $O_i j$ est le vecteur de translation de l'origine du R_i vers l'origine du R_j . La matrice A_{ij} est la matrice de rotation du R_j par rapport au repère R_i .

La transformation des coordonnées entre R_i et R_j est décrit alors par la matrice de transformation homogène T_{ji} qui satisfait l'équation :

$$\tilde{P}^j = T_i^j \tilde{P}^i = (T_j^i)^{-1} \tilde{P}^i \text{ (2.6)}$$

Il est à noter que la matrice de transformation homogène n'est en général pas orthogonale.. $T^{-1} \neq T^T$ (2.7)

En conclusion, une matrice de transformation homogène permet d'exprimer la transformation des coordonnées entre deux repères dans un format compact. Il est alors facile de vérifier qu'une séquence de transformations de coordonnées correspond aux produits des matrices homogènes : $\tilde{P}^0 = T_1^0 T_2^1 \dots T_n^{n-1} \tilde{P}^n$ (2.8)

Où : T_i^{i-1} représente la transformation homogène reliant la représentation d'un point dans le repère R_i à la représentation du même point dans le repère R_{i-1} .

2.2.1.2 Les paramètres géométriques :

Plusieurs conventions sont possibles pour définir la position relative de repères successifs. La convention de Denavit-Hartenberg "D.H" est la plus fréquemment utilisée. Cette convention utilise 4 paramètres, 2 angles et 2 distances.

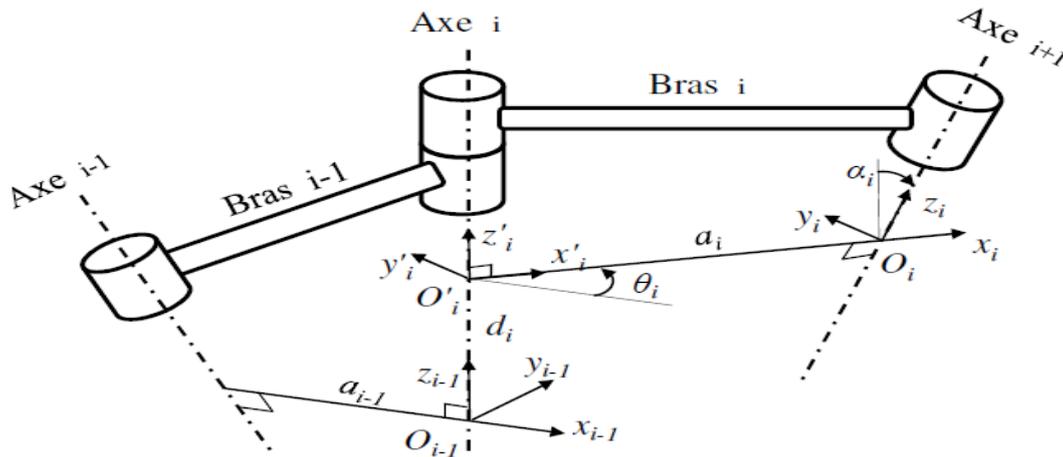


Figure 2.4 : Paramètres de Denavit et Hardenberg [16]

2.3 Analyse cinématique :

La position de l'organe terminal dans l'espace opérationnel peut être écrite en termes de variables articulaires comme suit : $X = f(q)$ (2.29)

Le modèle cinématique direct permet d'obtenir la vitesse de l'organe terminal dans l'espace opérationnel en fonction des vitesses articulaires.

En différenciant l'équation (2. 29), on obtient :

$$\dot{X}_j = \sum_j \frac{\partial f_j}{\partial q_j} \dot{q}_j \dots\dots\dots (2.30)$$

Qui s'écrit aussi sous forme matricielle :

$$[\dot{X}] = [J][\dot{q}] \dots\dots\dots (2.31)$$

La Jacobienne du système est définie par :

$$[J] = \frac{\partial f_j}{\partial q_j} \dots\dots\dots (2.32)$$

Les accélérations sont données par :

$$\ddot{X} = \sum_j \frac{\partial f_i}{\partial q_j} \ddot{q}_j + \sum_j \sum_k \frac{\partial^2 f_i}{\partial q_j \partial q_k} \dot{q}_j \dot{q}_k \quad \dots \dots \dots (2.33)$$

Ou bien sous forme matricielle par :

$$\ddot{x} = [J] \ddot{q} + [A] \dot{q}^2 \quad \dots \dots \dots (2.34)$$

Ou : $q = [q^1, q^2, \dots \dots \dots]^t \quad \dots \dots \dots (2.35)$

$$\dot{q}^2 = [\dot{q}_1 \dot{q}_1, \dot{q}_1 \dot{q}_2, \dots \dots \dots]^t \quad \dots \dots \dots (2.36)$$

j (q) est la matrice Jacobienne donnée par :

$$j(q) = \frac{\partial f_j}{\partial q} \quad \dots \dots \dots (2.37)$$

Et : $[A] = \left(\frac{\partial^2 f_j}{\partial q_j \partial q_k} \right) \quad \dots \dots \dots (2.38)$

A partir du modèle cinématique (2.38), on peut écrire le modèle différentielle (2.39).

Supposons que les variables q_i soient maintenant non les variables articulaires de Denavit-Hartenberg, mais les variables associées aux déplacements des moteurs rotatifs ou linéaires et que le robot présente une chaîne cinématique directe passant par ces moteurs. Il existe alors un modèle différentiel du type. Chaque actionneur peut associer en statique la force ou le couple δ_i qu'il exerce et forme le vecteur :

$$\Gamma = [\delta_1 \dots \delta_i \dots \delta_n]^T \quad \dots \dots \dots (2.39)$$

Des forces articulaires sous l'effet de ces forces combinées, l'organe terminal exerce sur l'environnement des forces qui peuvent être réduites à leur torseur résultant (force et mouvement) noté F, qui a donc 6 composantes. En utilisant alors la relation :

$$\begin{pmatrix} P_N \\ \omega_N \end{pmatrix} = J_0(q) q \quad \dots \dots \dots (2.40)$$

Ou : (P_N) : La vitesse du point de référence par rapport au repère Fixe.

(ω_N) : La vitesse de rotation instantanée et le principe des travaux virtuels pour des déplacements infinitésimaux de type (2.34).

Alors : $\Gamma = J_0^T f \quad \dots \dots \dots (2.41)$

Qui permet de calculer les forces matrices nécessaires pour exercer sur l'environnement des forces données. L'équation (2.42) constitue donc plutôt un

modèle inverse au sens habituel du terme. Le modèle direct ne peut s'obtenir que si la matrice J est régulière.

Dans le cas d'un robot non redondant ($n = 6$) et en dehors des singularités, on a alors

le modèle direct : $F = (J_0^T)^{-1} \Gamma$ (2.42)

2.4 Dynamique des robots :

2.4.1 Introduction :

Le modèle dynamique qui exprime une équation mathématique qui donne la relation entre les (couples et/ou les moments) appliqués aux actionneurs et les positions, les vitesses et les accélérations articulaires.

2.4.2 Modèle dynamique :

Elle exprime une équation mathématique qui donne la relation entre les (couples et/ou les moments) appliqués aux actionneurs et les positions, les vitesses et les accélérations articulaires. Elle est de la forme : $\Gamma = g(q, \dot{q}, \ddot{q}, F)$ (2.44)

Conventionnellement, on dira que la relation (2.44) représente le modèle dynamique inverse ou tout simplement le modèle dynamique. Alors le modèle dynamique direct est celui qui exprime les accélérations en fonction des positions, des vitesses et des couples des actionneurs. $\ddot{q} = h(q, \dot{q}, r, F)$(2.45)

Pour obtenir le modèle dynamique des robots, on dispose de 2 formalismes qui sont les plus souvent utilisés, il s'agit de :

- Formalisme de LAGRANGE et NEWTON-EULER

2.4.3 Formalisme de LAGRANGE :

Il décrit les équations en termes de travail et d'énergie du système qui donne ce qui suit quand l'effort extérieur sur l'organe terminal est supposé nul.

$$\Gamma_i = \frac{d}{dt} \left(\frac{dL}{dq_i} \right) - \frac{dL}{dq_i} \dots\dots\dots (2.46)$$

Avec : $i = (1, \dots, n)$

L est la fonction de LAGRANGE égale à la différence entre l'énergie cinétique totale (E) et l'énergie potentielle totale (U) du système.

L'expression de l'énergie cinétique est : $K = \frac{1}{2} \dot{q}^T A \dot{q}$ (2.47)

A : Matrice d'inertie du robot d'éléments génériques A_{ij}

A_{ij} : Sont fonction des variables articulaires q

Avec : $i = (1, \dots, n)$ et $j = (1, \dots, n)$

Le lagrangien s'écrit : $L = K - V = \frac{1}{2} \dot{q}^T A \dot{q} - V \dots\dots\dots (2.48)$

Comme l'énergie potentielle est aussi fonction des variables articulaires q , alors, d'après l'équation (2.47) et après dérivation, on obtient :

$$\Gamma_i = [A_{i1}, \dots, A_{in}] \ddot{q} + \dot{q}^T \left[\frac{\partial A_{i1}}{\partial q}, \dots, \frac{\partial A_{in}}{\partial q} \right] \dot{q} - \frac{1}{2} \dot{q}^T \left[\frac{\partial A}{\partial q_i} \right] \dot{q} + \frac{\partial u}{\partial q_i} \dots\dots\dots (2.48)$$

Ou encore :

$$\Gamma_i = [A_{i1} \ddot{q}_1 + \dots + A_{in} \ddot{q}_n] + [B_i^{12} \dot{q}_1 \dot{q}_2 + \dots + B_i^{1n} \dot{q}_1 \dot{q}_n + B_i^{23} \dot{q}_2 \dot{q}_3 + \dots + B_i^{(n-1)n} \dot{q}_{n-1} \dot{q}_n] + [C_{i1} \dot{q}_1^2 + \dots + C_{in} \dot{q}_n^2] + Q_i \dots\dots\dots (2.49)$$

Elle s'écrit sous la forme matricielle de la manière suivante :

$$\Gamma = A \ddot{q} + B \dot{q} \dot{q} + C \dot{q}^2 + Q \dots\dots\dots (2.50)$$

B : matrice de terme de Coriolis d'éléments génériques B_i^{jk} de dimension $[n \times n (n-1)/2]$

C : matrice de termes centrifuges d'éléments génériques C_{ij} de dimension $(n \times n)$

$$\dot{q} \dot{q} = [\dot{q}_1 \dot{q}_2, \dots, \dot{q}_1 \dot{q}_n, \dot{q}_2 \dot{q}_3, \dots, \dot{q}_{n-1} \dot{q}_n]^T \dots\dots\dots (2.51)$$

$$\dot{q}^2 = (\dot{q}_1^2, \dot{q}_2^2, \dots, \dot{q}_n^2)^T \dots\dots\dots (2.52)$$

$$\ddot{q} = (\ddot{q}_1, \ddot{q}_2, \dots, \ddot{q}_n)^T \dots\dots\dots (2.53)$$

$Q = [Q_1, \dots, Q_n]^T$: vecteur des forces de gravité.

On identifier les expressions des équations.

$$B_i^{jk} = \frac{\partial A_{ij}}{\partial q_k} + \frac{\partial A_{ik}}{\partial q_j} - \frac{\partial A_{jk}}{\partial q_i} \dots\dots\dots (2.54)$$

$$C_{ij} = \frac{\partial A_{ij}}{\partial q_j} - \frac{1}{2} \frac{\partial A_{ij}}{\partial q_i} \dots\dots\dots (2.55)$$

$$Q_i = \frac{\partial u}{\partial q_i} \dots\dots\dots (2.56)$$

Ou : A , B , C et Q représentent les coefficients dynamiques du robot qui sont fonction des paramètres géométriques et inertiels du mécanisme. Avec les équations d'un système mécanique articulé, on forme un système de n équations différentielles couplées, non linéaires et du second ordre.

2.4.4 Formalisme de NEWTON-EULER :

Il est adapté à la construction du modèle dynamique inverse. Il permet le dimensionnement de la structure et des actionneurs. Le caractère itératif de ce formalisme réduit le temps de calcul par rapport au formalisme de LAGRANGE. Il est basé sur une double récurrence : Une récurrence avant la base du robot vers l'effecteur en utilisant la formule de composition pour calculer les vitesses et accélérations. Donc, le torseur dynamique et une récurrence

arrière de l'effecteur vers la base pour calculer les couples des actionneurs en exprimant le bilan des efforts pour chaque corps. La composition des vitesses donne :

$$\omega_j = \omega_{j-1} + \bar{\sigma}_j \dot{q}_j a_j \dots\dots\dots (2.57)$$

$$v_j = v_{j-1} + \omega_{j-1} \wedge L_j + \sigma_j \dot{q}_j a_j \dots\dots\dots (2.58)$$

On dérive ces 2 expressions pour obtenir la composition des accélérations :

$$\dot{\omega}_j = \dot{\omega}_{j-1} + \bar{\sigma}_j \left(\ddot{q}_j a_j + \omega_{j-1} \wedge \dot{q}_j a_j \right) \dots\dots\dots (2.59)$$

$$\dot{v}_j = \dot{v}_{j-1} + \dot{\omega}_{j-1} \wedge L_j + \omega_{j-1} \wedge \left(\omega_{j-1} \wedge L_j + \sigma_j \dot{q}_j a_j \right) + \sigma_j \left(\ddot{q}_j a_j + \omega_{j-1} \wedge \dot{q}_j a_j \right) \dots\dots (2.60)$$

On arrange comme suit :

$$\dot{v}_j = \dot{v}_{j-1} + \dot{\omega}_{j-1} \wedge L_j + \omega_{j-1} \wedge \left(\omega_{j-1} \wedge L_j \right) + \sigma_j \left(\ddot{q}_j a_j + 2\omega_{j-1} \wedge \dot{q}_j a_j \right) \dots\dots\dots (2.61)$$

On peut utiliser cette dernière expression pour déterminer la vitesse du centre de gravité, à

savoir : $\dot{v}_{Gj} = \dot{v}_j + \omega_j \wedge \left(\omega_j \wedge S_j \right) \dots\dots\dots (2.62)$

Ce qui permet d'obtenir le torseur dynamique :

$$F_j = m_j \dot{v}_{Gj} \dots\dots\dots (2.63)$$

$$N_j = \tau_j \dot{\omega}_j + \omega_j \wedge \left(\tau_j \wedge \omega_j \right) \dots\dots\dots (2.64)$$

F_j et N_j : représentent respectivement la somme totale des forces extérieures et la somme totale des moments extérieurs. On initialise la récurrence par : $\dot{\omega}_0 = 0$, $\omega_0 = 0$ et $\dot{v}_0 = 0$

2.4.5 Conclusion :

Pour modéliser un système, c'est-à-dire gouverner ces sorties, il faut prévoir le comportement du système, en réponse aux différentes excitations d'entrer qui pourront lui être appliquées; la démarche est de représenter le comportement du système sous la forme d'un modèle, une telle démarche s'appelle la modélisation; d'une manière générale, on recherche toujours le modèle le plus simple qui permet d'expliquer, de manière satisfaisante, le comportement du processus dans son domaine d'application; les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire. (Dans lequel est définie la configuration du robot).

CHAPITRE 3

IMPLANTATION D'UNE CELLULE FLEXIBLE DE RECTIFICATION D'UN VILBREQUIN

3.1 Machines à unités autonomes et les chaînes d'usinage automatique :

3.1.1 Introduction [5, 7, 11] :

Les machines à unités autonomes et les chaînes d'usinage automatique sont caractérisées par la perfection de leur conception et leur haute qualité de fabrication. Dans leurs systèmes sont exploitées toutes les dernières acquisitions des constructions de machines-outils. Matériaux de première classe, conception moderne, fabrication qualifiée des machines et des chaînes d'usinage automatique, tout cela leur assure une grande production, une bonne précision d'usinage et une grande longévité.

Les machines et les chaînes d'usinage automatique distinguent par leurs strictes proportions, par un dimensionnement heureux, par des silhouettes harmonieuses, chaque ensemble étant dessiné de façon à constituer le prolongement de la pièce de base principale. Chaque machine se présente ainsi comme un tout organique aux formes finis. Une grande attention est accordée à l'unification et la normalisation dans le domaine de la machine-outil. Ceci a mené à la création d'une gamme étendue d'ensembles normalisés pour les machines-outils et les chaînes d'usinage automatique.

L'emploi d'ensembles normalisés rend l'utilisation très commode, allège les réparations, élargit les possibilités dans le remplacement des ensembles devenus caducs et permet d'étudier et de mettre en application rapidement et économiquement différents types et modifications de machines-outils. La croissance de la production de machines à unité autonomes et de chaînes d'usinage automatique est un trait caractéristique de l'industrie de la machine-outil. Des chaînes d'usinage automatique construites sont en service avec le nombre d'usines.

L'expérience de l'étude et de l'exploitation des chaînes d'usinage automatique a permis de créer des ateliers et des usines automatiques, travaillant actuellement avec succès dans plusieurs branches de l'industrie. Les ateliers et les laboratoires des usines de machines-outils sont dotées d'un équipement moderne et disposent

d'ingénieurs, techniciens et ouvriers hautement qualifiés. Les caractéristiques techniques succinctes de certaines machines types à unités autonomes et chaînes types d'usinage automatique constituées par des machines à unités autonomes. Selon les prescriptions techniques du Client, les constructeurs étudient construisent des machines à unités autonomes et des chaînes d'usinage automatique de conceptions et caractéristiques extrêmement variées.

3.1.2 Généralités sur les petites machines à unités autonomes :

Une des principales voies du perfectionnement radical des processus de fabrication dans les constructions mécaniques modernes est la forte concentration des opérations, menant à l'accroissement de la productivité du travail. Les machines à unités autonomes opèrent en cycle automatique ou semi-automatique et exécutent l'usinage avec un grand nombre d'outils simultanément. Les machines à unités autonomes exploitent complètement les larges possibilités de l'automatisation, grâce à l'emploi des automatismes hydrauliques et électriques modernes.

C'est pour cette raison que les machines à unités autonomes, machines à grand rendement et haute efficacité, trouvent des applications de plus en plus nombreuses dans les constructions mécaniques modernes. Les machines à unités autonomes sont le plus employées dans les usines de production en masse ou en grandes séries, à conception stable des produits : industrie de l'automobile et du tracteur, machines agricoles, constructions électriques, etc.

Dans les fabrications en série à production relativement faible, par exemple dans l'industrie de la machine-outil, l'exécution des opérations d'alésage, lourds de main-d'œuvre, par des machines à unités autonomes construites en tenant compte des particularités de ces fabrications, est également efficace. L'automatisation poussée des machines à unités autonomes composées par les circuits de commande et de verrouillage, simplifie leur conduite sans nécessiter l'exécution de travaux de haute qualification.

Les machines à unités autonomes permettent d'accroître la productivité du travail de plusieurs fois comparativement aux machines-outils universelles ordinaires. Cela résulte avant tout de l'usinage simultané d'une ou plusieurs pièces par un grand nombre d'outils. Le nombre de broches des machines à unités autonomes va de 5 à 100 et même au-delà dans certaines d'entre elles.

Les machines à unités autonomes peuvent usiner simultanément plusieurs surfaces orientées sous des angles divers sur des côtés différents de la pièce.

Outre l'accroissement du rendement, l'usinage de surfaces interliées sur les pièces d'un seul montage accroît la précision de leur situation relative.

Une grande extension a été donnée aux machines à unités autonomes avec plateaux pivotants à postes multiples et avec tambours pour l'usinage parallèle successif de plusieurs pièces simultanément. L'exécution par de telles machines non seulement des opérations de perçage-alésage et de filetage, mais aussi de fraisage, permet dans nombre de cas d'usiner complètement sur une seule machine des pièces de formes complexe. Le déchargement des pièces usinées et le chargement des pièces à usiner sont exécutés au poste de chargement du plateau ou du tambour pendant l'usinage des pièces aux autres postes ; ceci réduit au minimum les temps improductifs.

Les machines à unités autonomes peuvent être divisées en deux groupes principaux : les petites machines à unités autonomes à puissance maximale des moteurs électriques des têtes d'usinage jusqu'à 3.0 KW et les grandes machines à unités d'usinage à puissance maximale des moteurs électriques des unités d'usinage jusqu'à 30 KW.

Les petite machines à unité autonomes sont composées avec des têtes d'usinage autonomes mécaniques, à fourreau coulissant, des bâtis, des plateaux pivotants, des plaques de guidage, des adaptations multibroches de perçage, alésage, etc. et d'autres ensembles similaires.

D'après les cycles opératoires et les méthodes d'élaboration des phases d'usinage des pièces, les petites machines à poste et multipostes.

Dans les machines à un poste, plusieurs têtes usinent simultanément la même pièce abloquée dans un montage fixe. L'usinage achevé, la pièce finie est enlevée et une nouvelle pièce est mise en place.

Les machines multipostes, à rendement plus grand, usinent simultanément plusieurs pièces, et le déchargement et le chargement des pièces sont exécutés simultanément avec l'usinage.

Dans les machines de ce type les pièces sont serrées dans des montages placés sur le plateau pivotant, et les têtes d'usinage avec outils sont montées autour du plateau.

Les machines à un poste et multipostes peuvent être dotées de dispositifs de chargement automatique, ce qui augmente notablement leur rendement.

Les têtes à fourreau sont destinées au perçage, au lamage et à l'usinage des alésages par d'autres méthodes.

Le cycle opératoire des têtes à fourreau comprend l'approche rapide, l'avance de travail et le recul rapide du fourreau. Il est aussi possible de réaliser des perçages étagés à nombre d'étages réduits.

3.1.3 Exemple d'une unité de perçage et de taraudage [5, 11] :

Nouveauté sur Industrie 2006, l'unité de perçage et de taraudage BEA 16 de Suhner (D.471) permet, grâce à son servomoteur digital, de réaliser tous les cycles d'usinage. Cette unité est autonome et programmable avec contrôle C.N et coffret intégré. Equipé d'un fourreau sortant, elle permet des opérations de perçage jusqu'à 16 mm dans l'acier et de taraudage jusqu'à M16. Elle offre une avance par vis à bille pour une course de travail de 140 mm.

Un moteur électrique de 1,5 kW permet des vitesses de rotation jusqu'à 5 000 tr/mn. La petite unité d'usinage BEM 3 est une unité autonome à fourreau sortant et permet des opérations de perçage jusqu'à Ø 3 mm, avec avance pneumatique intégrée de 40 mm ; la régulation de l'avance est hydraulique.

Un moteur électrique d'une puissance de 0.25 kW permet des vitesses de rotation de la broche de 1000 à 10 000 tr.min⁻¹. En combinaison avec un variateur de fréquence des vitesses de broche jusqu'à 18 000 tr.min⁻¹.



Figure 3.1 : BEA 16 CNC unité d'usinage : 1 - AXE - CNC

Table 3.1 : Caractéristiques techniques

Course total	140 mm
Capacité de perçage max	Ø 16 / 450 N/mm
Capacité de taraudage	M12 / 600 N/mm ²
Poussée	2700 N
Couple transmissible max	30 Nm

Vitesse de rotation	200 – 5000 min ⁻¹
Tolérance de concentricité	0,01 mm
Précision de position	± 0,05mm
Vitesse du moteur à 50 Hz	1450 min ⁻¹
Puissance du moteur à 50 Hz	1,5 kW
Porte-outils	HSK 40
Commande	PIC-Control 24 DC
Protection Moteur	IP 54
Poids /Couleur BEA16 CNC-SK	50 kg / RAL 5012
Poids /Couleur BEA16 CNC-IS	65 kg / RAL 5012

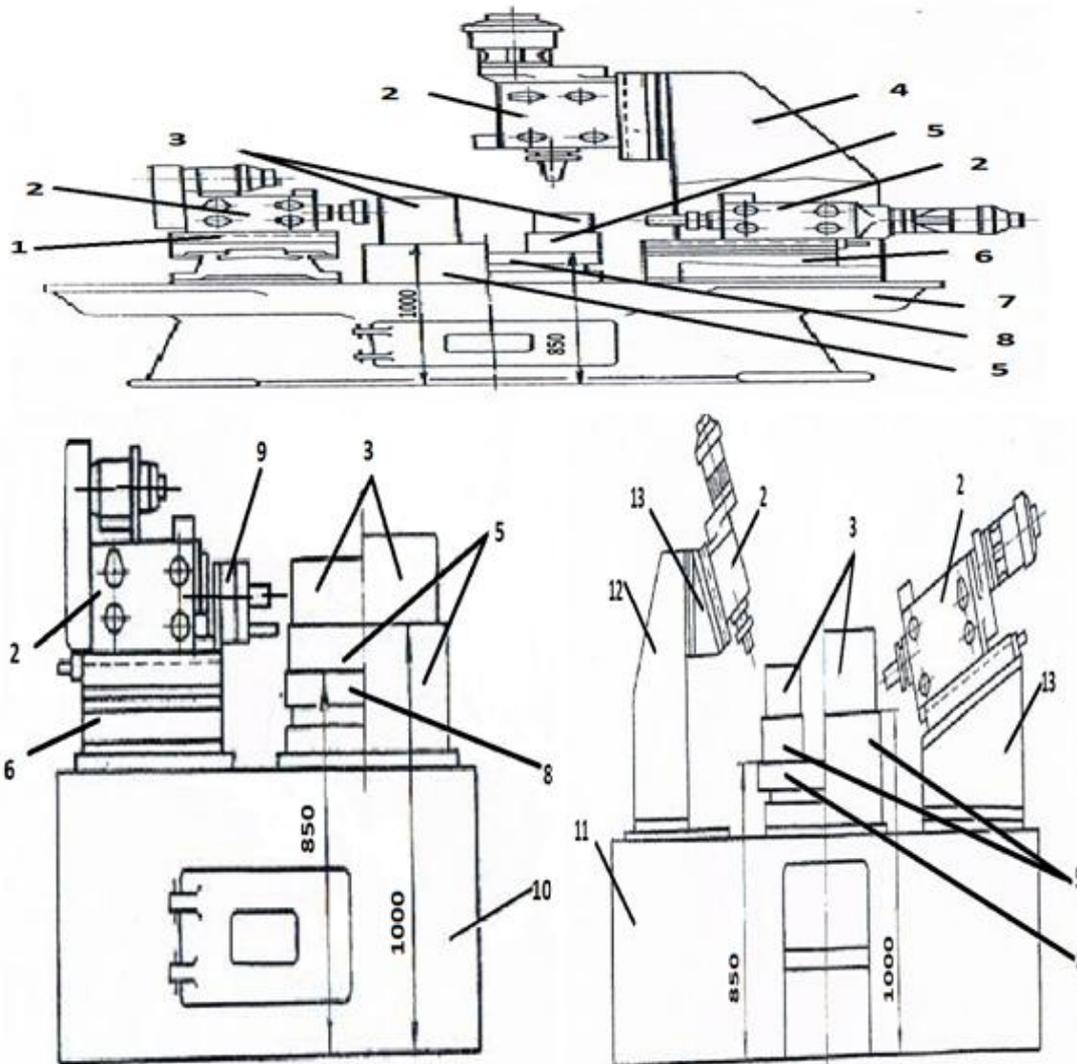


Figure 3.2 : Ensembles principaux et certaines dimensions des petites machines à unités autonomes : 1.Table d'usinage; 2.Tête d'usinage; 3.Pièce à usiner; 4.Bâti vertical du type à arcade; 5.Dispositif; 6.Plaque intercalaire droite; 7.Bâti circulaire; 8.Plateau diviseur; 9.Adaptation multibroche; 10.Bâti unilatéral; 11.Bâti bilatéral; 12.Montant; 13.Plaque-équerre intercalaire

3.2 Première proposition d'une chaîne pour l'usinage d'un vilebrequin :

Cette chaîne automatique est destinée à l'usinage des surfaces de références du vilebrequin de camion.

La chaîne comprend 4 machines. La machine C1 effectue le fraisage de faces du vilebrequin serré dans un étau par ces deux portées extrêmes. L'alignement du vilebrequin pour la répartition régulière des surépaisseurs d'usinage de faces est assuré suivant les joues médianes par un mécanisme de centrage automatique. Le dispositif de serrage est monté sur une table d'usinage qui déplace le vilebrequin à usiner entre 2 poupées porte-fraises horizontales fixes.

La machine C2 réalise le perçage de trous de centrage et d'un trou de flasque utilisé pour pouvoir introduire un tenon de fixation lors de l'usinage ultérieur du vilebrequin sur des rectifieuses.

Les machines C3 et C4 à portiques sont conçues pour l'usinage sur les 1^e, 3^e, 4^e, et 8^e joues des plats utilisées comme surfaces de référence lors du tournage ultérieur du vilebrequin. La machine C3 est pourvue de deux côtés de 2 plaques de guidage le long desquelles se déplacent horizontalement les poupées porte-fraises. La poupée installée au premier poste est à 2 broches, au premier poste de la machine C3 le vilebrequin est fixé entre les points par les vérins hydrauliques dont l'un a le diamètre plus grand que l'autre pour assurer le serrage axial du vilebrequin par son flasque usiné contre la plaquette de référence. Le réglage angulaire du vilebrequin est assuré par un vérin hydraulique et un mécanisme à levier à centrage automatique. Le réglage angulaire du vilebrequin au second poste est effectué par le serrage du vilebrequin par le plat usiné au premier poste contre la plaquette de référence. La machine C4 diffère de la machine C3 par ce qu'elle est monoposte. Les vilebrequins devant être mis dans les étaux sur les machines C1 et C2, le transporteur de pièces est réalisé sous forme de manipulateur qui élève les vilebrequins à 180 mm et les transporte à 500 mm. Les tiges du transporteur sont munies de V rigides.

Le cycle de travail du transporteur est le suivant : élévation des tiges avec les vilebrequins, déplacement de travail horizontale, descente des tiges, retour des tiges à leur position de départ.

Pour monter les pièces à usiner dans les dispositifs de serrage des machines C3 et C4 il est prévu des élévateurs enlevant les vilebrequins du transporteur-manipulateur et

les montant jusqu'à la ligne des pointes. Au cours du transfert du vilebrequin du premier poste au second poste de la machine C3 il est retourné dans les V du transporteur à 90° grâce à l'interaction des manetons de vilebrequin avec les butées-gabarits vissées à la surface inférieure du portique.

La commande d'avance de toutes les unités d'usinage est hydraulique. Pour les fraiseuses on a prévu des réservoirs à huile séparés ; la perceuse est équipée de têtes d'usinage autonomes.

A l'entrée de la chaîne il est prévu un magasin d'une capacité de 10 pièces qui permet d'effectuer le chargement de la chaîne une fois tous les 10 cycles, entretemps l'opérateur desservant cette chaîne peut exécuter d'autres opérations. La commande du transporteur, du magasin de chargement, des dispositifs de serrage des pièces à usiner et des autres mouvements auxiliaires est hydraulique, à alimentation centralisée. Le groupe de commande hydraulique comprend, outre un groupe motopompe avec moteur électrique, tous les appareils hydrauliques de contrôle, de réglage et de distribution.

Le contrôle de la marche est assuré par un combinateur. Le poste de commande central est pourvu d'un commutateur qui permet de passer du régime de travail automatique de la chaîne au régime de réglage. Dans ce dernier cas chaque mécanisme est commandé à partir d'un poste de réglage placé directement sur le mécanisme à commander.

Pour l'évacuation des copeaux la chaîne est équipée d'un transporteur à vis logé dans une tranchée passant le long de la chaîne.

Les outils recharge sont stockés dans une armoire à outillage qui est aussi utilisée pour ranger les appareils de réglage des outils à la cote donnée réduisant sensiblement le temps de remplacement des outils émoussés.

Cette chaîne automatique est composée en général d'unités normalisée, ce qui facilite considérablement le changement de son réglage dans le cas de changement de fabrication.

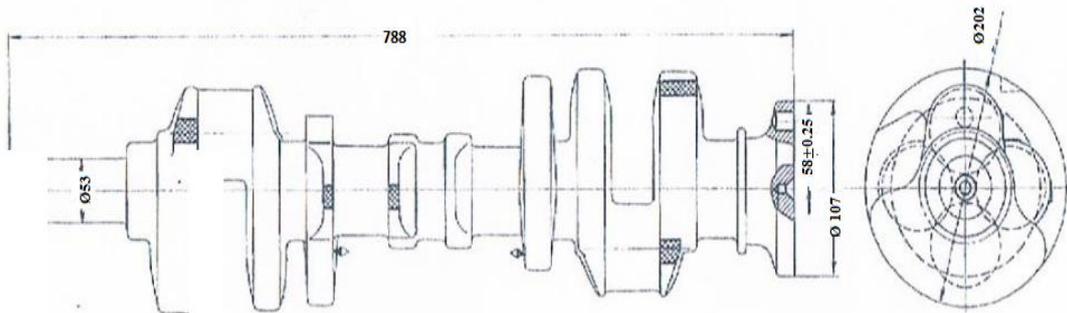


Figure 3.3 : Dessin de définition du vilebrequin A

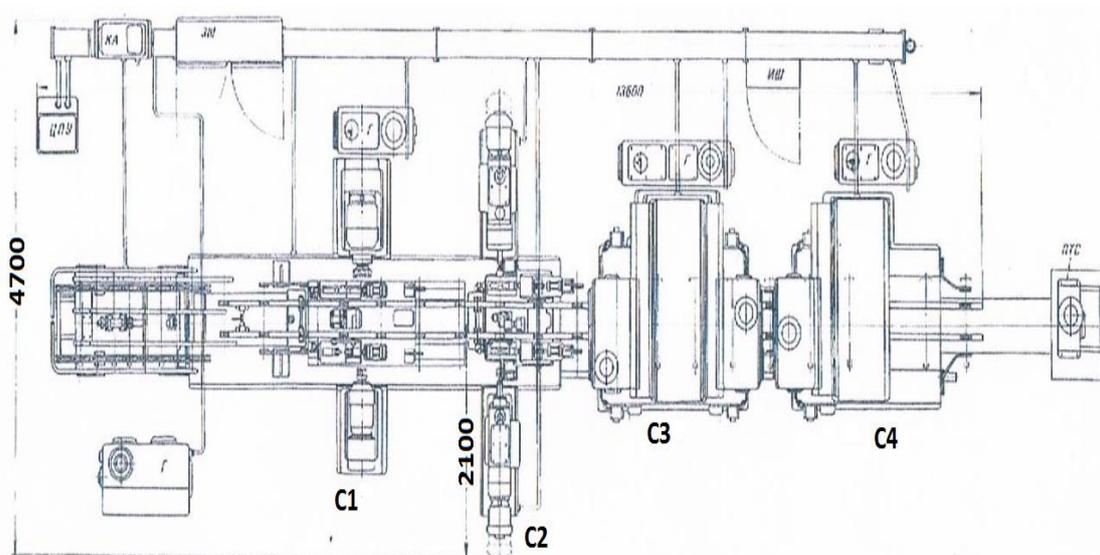
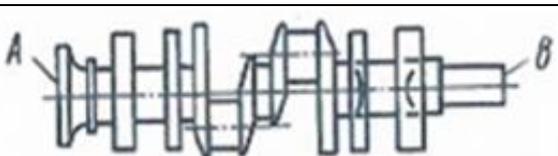
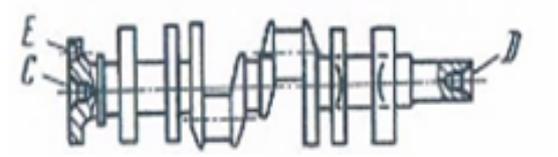
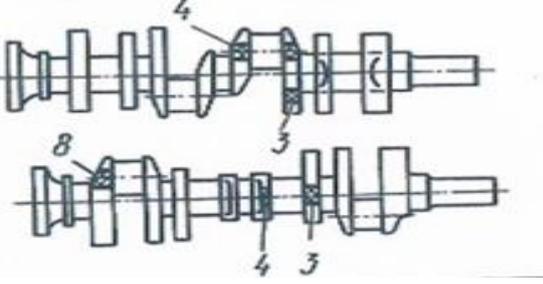
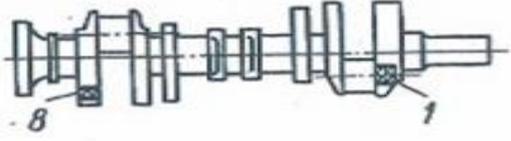


Figure 3.4 : Plan de la chaîne d'usinage automatique (C1-C4)

Tableau 3.2 : Gamme d'usinage du vilebrequin A

Machine	Opérations à exécuter	Croquis
C1	Tête gauche : fraisage de la face A Tête droite : fraisage de la face B	
C2	Tête gauche : centrage du trou C et perçage du trou Ø 15 (E) Tête droite : centrage du trou D	

<p>C3</p>	<p>Position 1 : fraisage de joues 3 et 4</p> <p>Position 2 : fraisage de joues 3, 4 et 8</p>	
<p>C4</p>	<p>Fraisage de joues 1 et 8</p>	

Caractéristiques principales :

Pièce à usiner : vilebrequin d'un moteur de camion

Matière de la pièce à usiner : acier 45

Rendement de la chaîne alimentée à 100% : 48 pièces/h

Nombre de machines par chaîne : 4

Nombre d'unités d'usinage : 7, y compris de perçage : 2, de fraisage : 5

Nombre de broches : 11

Nombre de postes de travail : 5

Nombre de moteurs électriques : 12

Puissance totale des moteurs électriques : 56 kw

Encombrement de la chaîne : 13600×4700×2900 mm

Poids de la machine : 34.5 t

3.3 Deuxième proposition d'une chaîne pour l'usinage d'un autre vilebrequin :

Cette chaîne automatique est conçue pour l'usinage du vilebrequin du moteur d'automobile à cylindres en V.

La chaîne comprend 17 machines divisées en 2 sections fonctionnant indépendamment et installées en série (1 π 90a et 1 π 90b).

La section 1 π 90a composée de 8 machines assure l'usinage complet de la chambre de collecteur, y compris le taraudage des trous pour les bouchons, et les trous de graissage de bielles.

La section 1 π 90b composée de 9 machines réalise l'usinage des canaux de communication de la conduite d'huile et le fraisage du logement pour la clavette.

Les machines de la section 1 π 90a sont équipées de têtes d'usinage horizontales autonomes à corps mobile et de têtes verticales inclinées à fourreau. La commande de l'avance des têtes à corps mobile est hydraulique, celle des têtes à fourreaux est mécanique à partir d'une came.

Toutes les machines de la section de type 1 π 90b (à l'exception de la dernière, fraiseuse) sont équipées de têtes d'usinage hydraulique à fourreaux spécialement étudiées pour le perçage de trous profonds de diamètre de 6 à 10 mm et de longueur maximale de 200 mm. Le dégagement des forets nécessaire à l'évacuation des copeaux est réduit au minimum : la consigne d'un dégagement intermédiaire des forets n'est envoyée que lorsque le couple moteur agissant sur le foret atteint sa valeur maximale admissible. Les têtes sont fixées sous différents angles sur portiques des machines (deux-sur la face avant du portique et deux-sur sa paroi arrière). Cet emplacement des têtes permet de prévoir sur chaque machine à quatre têtes deux postes de travail.

Pour faciliter le changement de l'outil toutes les têtes à fourreau (aussi bien hydrauliques, mécaniques) sont montées sur des chariots sur lesquels elles sont reculées à l'aide des vérins hydrauliques. Pour la fixation et le serrage des pièces à usiner on se sert des trous de centrage. Le transport des pièces le long de la chaîne est effectué par des transporteurs pas-à-pas pourvus de cliquets à ressort. Les pièces glissent le long des plaquettes par leurs portées principales. En six endroits de la chaîne, entre les positions de travail, on a prévu des plaquettes fixes contre les quelles les vilebrequins butent par leurs manetons et tournent à un angle donné, sans dispositifs supplémentaires de rotation.

La commande des transporteurs, ainsi que des dispositifs de serrage et de fixation de pièces aux positions de travail, est hydraulique, centralisée. Les groupes de commande hydraulique de chaque section comprennent, outre le groupe motopompe avec moteur électrique, l'appareillage de contrôle, de réglage, ainsi que de démarrage. Entre les sections il est prévu un magasin qui est actionné automatiquement pour débiter ou emmagasiner les pièces à l'arrêt d'une des sections.

La commande de la chaîne est assurée par des combinateurs de sections. Il est aussi prévu un poste central de commande de toute la chaîne, ainsi que le poste central de commande de la section 1 π 90b. Les postes centraux sont pourvus de commutateurs permettant de passer du régime automatique au régime de réglage de la chaîne ou de ses sections séparées. Dans le cas du passage au régime de fonctionnement, le poste

central est commandé à partir des postes de réglage disposés directement sur les mécanismes à commander.

Pour évacuer les copeaux il est prévu un transporteur à vis monté dans une tranchée passant le long de la chaîne.

Les outils de rechange sont stockés dans des armoires à outils. Les appareils pour le réglage des outils à la cote placés dans les mêmes armoires, ainsi que les mandrins à changement rapide utilisés dans la chaîne, réduisent sensiblement le temps de remplacement des outils émoussés.

Cette chaîne automatique est composée en général d'unités normalisées, ce qui permet de régler la chaîne d'une façon plus aisée en cas de changement de la pièce à usiner.

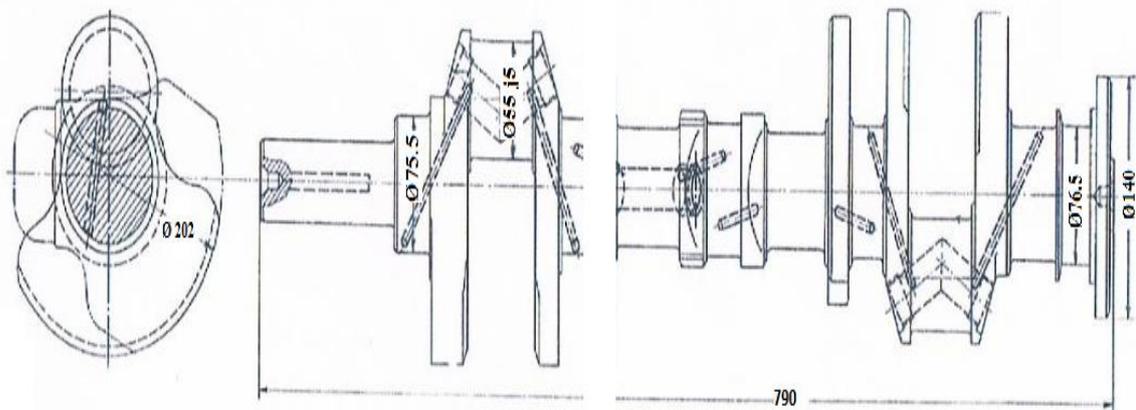


Figure 3.6 : Dessin de définition du vilebrequin B

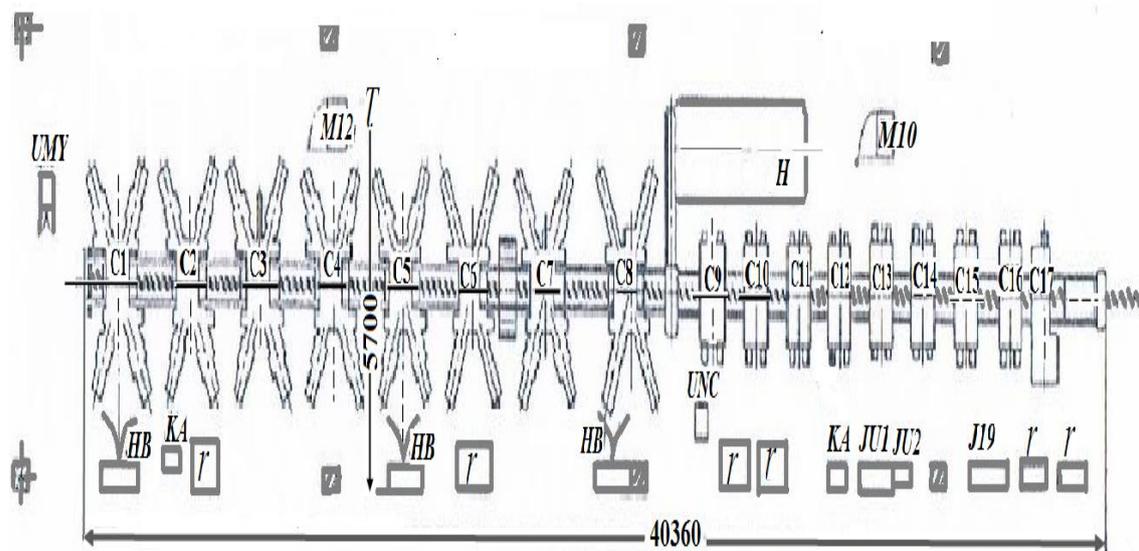
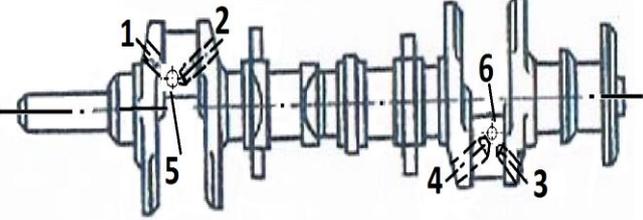
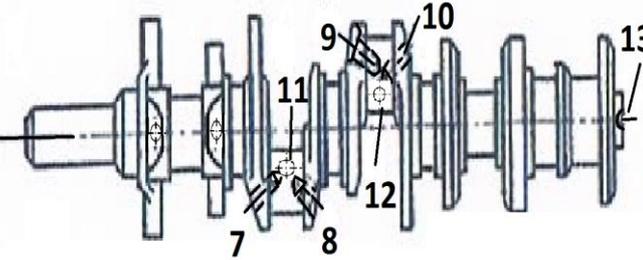
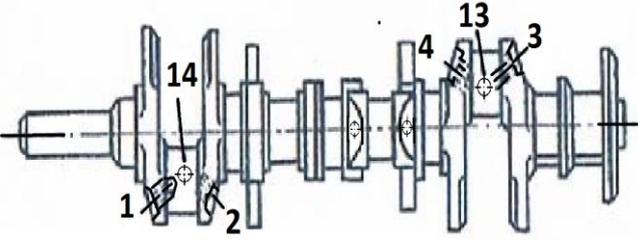


Figure 3.7 : Plan de la chaîne d'usinage automatique (C1-C17)

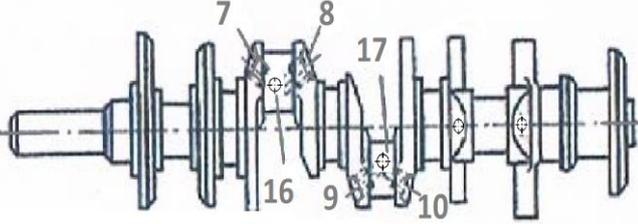
Tableau 3.3 : Gamme d'usinage du vilebrequin B

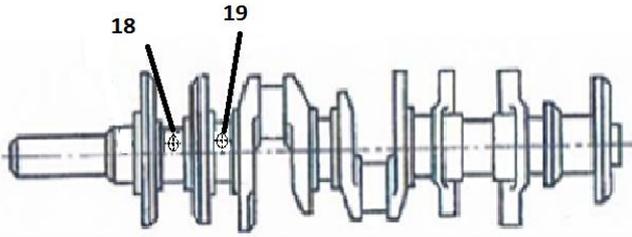
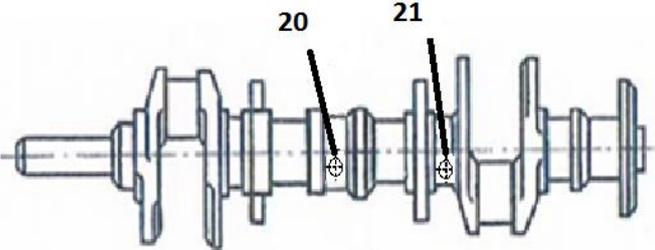
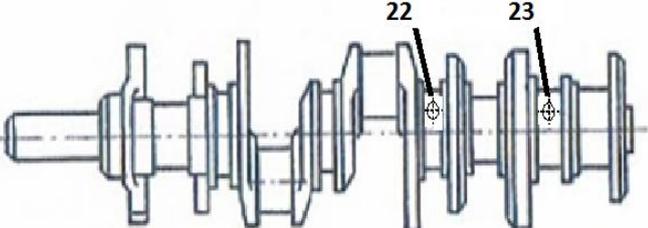
Machine	Opérations à exécuter	Croquis
C1	Perçage de 4 trous \varnothing 27.5 (1 à 4) et 2 trous \varnothing 6 (5 et 6)	
C2	Perçage supplémentaire de 2 trous \varnothing 27 (2 et 4), et alésage à l'alésoir-fraise de 2 trous \varnothing 28.3 (1 et 3) et chanfreinage de 2 trous (5 et 6)	
Pivotement du vilebrequin à 90°		
C3	Perçage de 4 trous \varnothing 27.5 (7 à 10), de 2 trous \varnothing 6 (11 et 12) et alésage à l'alésoir-fraise hémisphère R6	
C4	Perçage supplémentaire de 2 trous \varnothing 27 (7 et 10), et alésage à l'alésoir-fraise de 2 trous \varnothing 28.3 (8 et 9) et chanfreinage de 2 trous (11 et 12)	

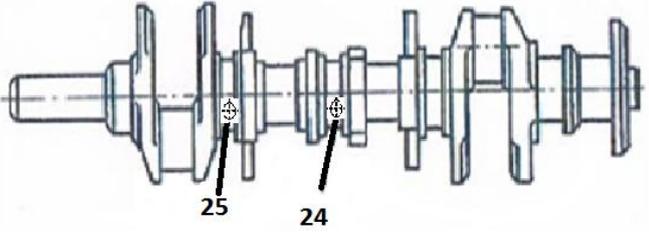
Pivotement du vilebrequin à 90°

C5	Perçage supplémentaire de 2 trous Ø 27 (1 et 3), alésage à l'alésoir-fraise de 2 trous Ø 28.3 (2 et 4) et perçage de 2 trous Ø 6	
C6	Taraudage M30×1.5 de 4 trous (1 à 4) et chanfreinage de 2 trous (13 et 14)	

Pivotement du vilebrequin à 90°

C7	Perçage supplémentaire de 2 trous Ø 27 (8 et 9), alésage à l'alésoir-fraise de 2 trous Ø 28.3 (7 et 10) et perçage de 2 trous Ø6 (16 et 17)	
C8	Taraudage M30×1.5 de 4 trous (7 à 10) et chanfreinage de 2 trous (16 et 17)	
C9	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 7.3 (18 et 19) à 3 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 7 (18 et 19) à 36 mm	

C10	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 6.7 (18 et 19) à 36 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 6.4 (18 et 19) à 30 mm	
Pivotement du vilebrequin à 70°		
C11	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 7.3 (20 et 21) à 3 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 7 (20 et 21) à 36 mm	
C12	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 6.7 (20 et 21) à 36 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 6.4 (20 et 21) à 30 mm	
Pivotement du vilebrequin à 110°		
C13	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 7.3 (22 et 23) à 3 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 7 (22 et 23) à 36 mm	
C14	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 6.7 (22 et 23) à 36 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 6.4 (22 et 23) à 30 mm	
Pivotement du vilebrequin à 70°		
C15	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 7.3 (24 et 25) à 3 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 7 (24 et 25) à 36 mm	

C16	Poste 1 : perçage de 2 trous Ø 6.7 (24 et 25) à 36 mm Poste 2 : perçage de 2 trous Ø 6.4 (24 et 25) à 30 mm	
Pivotement du vilebrequin à 100°		
C17	Fraisage de la rainure à clavette	

Caractéristiques principales :

Pièce à usiner : vilebrequin d'un moteur d'automobile

Matière de la pièce à usiner : acier 45

Rendement de la chaîne alimentée à 100 % : 40 pièces/h

Nombre de machines par chaîne : 17

Nombre de têtes d'usinage : 80, y compris de fraisage : 1

Hydrauliques autonomes : 32

Cage profond : 32

Mécaniques à fourreau : 15

Nombre de broches : 84

Nombre de postes de travail : 25

Nombre de moteurs électriques : 91

Puissance totale des moteurs électriques : 134.5 kw

Encombrement de la chaîne : 40360×5700 mm

Poids de la machine : 122 t

3.4 Conception du robot 1 et 3 (chaînes flexibles/station alésage-rectification et station alésage-rectification/centre de fraisage-rectification) :

La structure proposée est une architecture de type SCARA pour le déplacement et le positionnement de la pièce sur le convoyeur.

- Structure du robot SCARA [37, 38] :

Structure ouverte simple; elle permet d'amener la pièce dans une situation (position et orientation) donnée. Elle est la plus utilisée et a pour avantage d'augmenter la rigidité ainsi que la précision d'analyse et positionner la pièce dans une machine-outil.

Le robot est constitué d'articulations rotoïdes fonctionnant dans le même plan, motorisées et passives, qui se déplace dans le sens verticale. Cette structure nous assure le déplacement et la contrainte appliquée sur la machine.

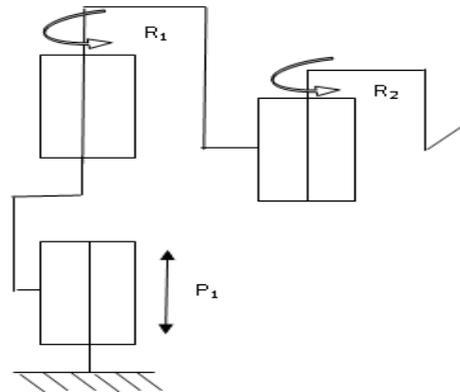


Figure 3.8 : Robot SCARA [38]

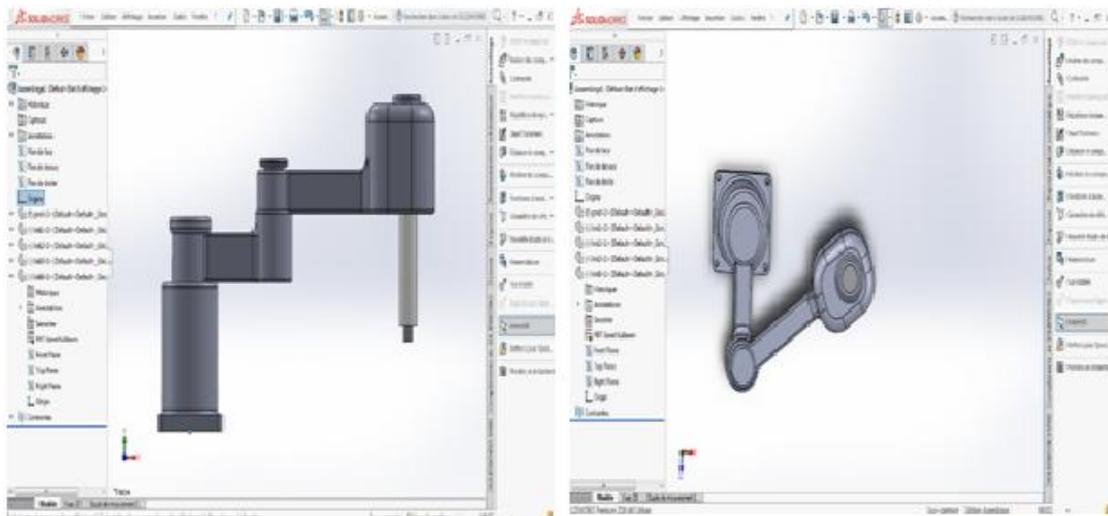


Figure 3.9 : Vue d'ensemble du robot 1 et 3

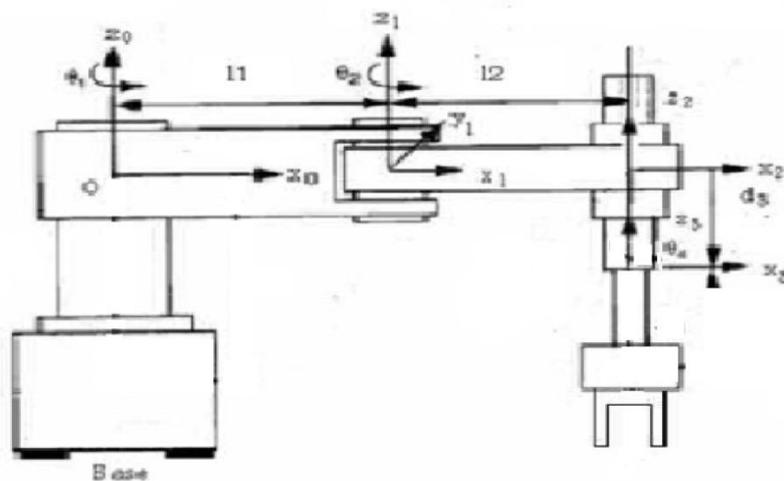


Figure 3.10 : Schéma cinématique du robot 1 et 3

Tableau 3.4 : Paramètre de D.H robot 1 et 3

Axes	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	l_1	0	0	θ_1^*
2	l_2	0	d_2	θ_2^*
3	0	0	d_3^*	0

3.5 Conception du robot 2 (station alésage–rectification) :

Le robot 2 choisit est de type (ALG-M.O-l). C'est une nouveauté en Algérie et a été adaptée aux données d'une station d'usinage composée de quatre phases d'usinage différentes, et en vue de transformer cette unité de fabrication mécanique en une cellule flexible.

- Etat de la technique antérieure :

L'opération d'usinage se caractérise par une trajectoire fermée d'une suite de déplacement et d'arrêt avec une livraison évacuation des pièces à l'aide de la main et cela après un choix optimal de toutes les caractéristiques.

Les différentes opérations comportent la descente, la fermeture et la montée de la main ainsi que le déchargement à l'aide des circuits et des modules judicieux.

Les phases intermédiaires sont celles du déclenchement de l'usinage dans les différentes phases et de l'évacuation vers les transporteurs à palettes.

Les modules utilisés pour la conception, le fonctionnement et suivant le cahier des charges de ce robot sont composés de cylindres, vérins hydrauliques, d'éléments auxiliaires qui constituent les composantes du circuit hydraulique, d'éléments d'assemblage, la main de chargement et déchargement et de moteurs électriques.

Les blocs ci-dessus sont liés entre eux et équipés par des capteurs qui permettent de produire les positionnements et l'ordre d'orientation des objets à traiter à l'entrée des installations automatiques lors de l'exécution des opérations et le déchargement de la dernière phase, ainsi que la synchronisation pendant les rotations d'angles (90° , 17° , 56° et 90°) pour effectuer les différentes phases. La station d'usinage existante sur la (Figure 3.11) pour 4 postes de travail, 2 palettes (a_0 et b_0) et 2 chariots de transport de pièce (a et b), le chariot (a) livre les pièces, tandis que le chariot (b) les évacue. Le robot est situé au centre des 4 postes, le centre est bien la position repère. Le cycle des mouvements est la rotation initiale du robot industriel vers le chariot (a) (angle = 135°), la descente de la main dépend des caractéristiques des machines-outils utilisées

synchronisées par les capteurs. La fermeture de la main sur la pièce répond au poids de la pièce usinée. La montée et la rotation vers (a_0) (angle = 90°) et le déchargement dans la phase 2 de fabrication d'un repère (angle = 45°). Il en est de même pour la phase 3 (b_0) après avoir exécuté la phase 4 (b). Un déchargement correct de la pièce est effectué à l'aide d'un mouvement de rotation d'un angle ($\gamma = 270^\circ$), le robot est positionné devant le chariot (a) pour exécuter une nouvelle gamme d'usinage.

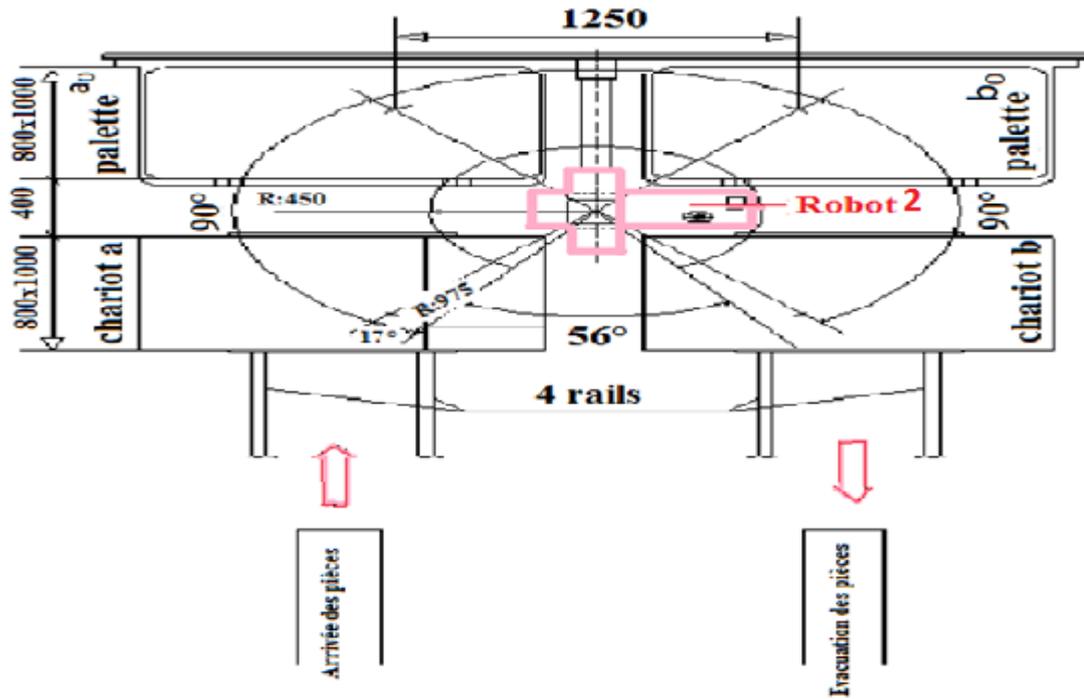


Figure 3.11 : Vue de la station de d'alésage-rectification

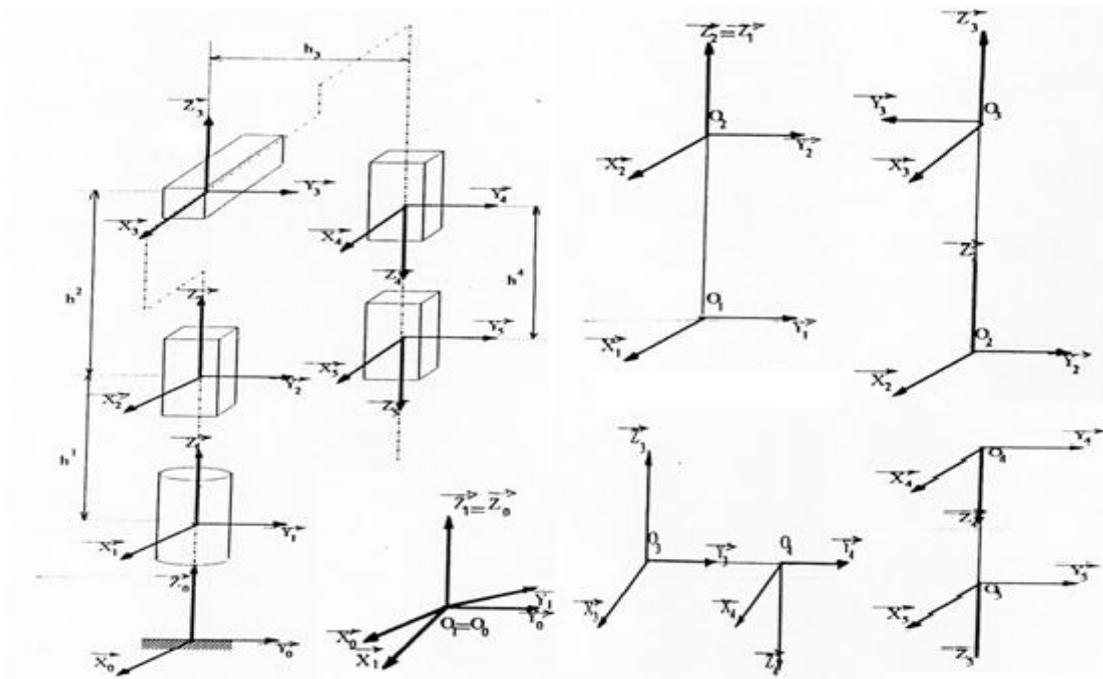


Figure 3.12 : Schéma cinématique du robot 2 (cycle des mouvements)

Tableau 3.5 : Les paramètres géométriques du robot 2

Indice	0	1	2	3	4	5
d_i	0	h_1	h_2	h_3	h_4	
α_i		0	$\pi/2$	$\pi/2$	0	
σ		0	1	1	1	1
r_i		0	Z_2	Z_3	Z_4	Z_5
θ_i		γ	0	0	0	0

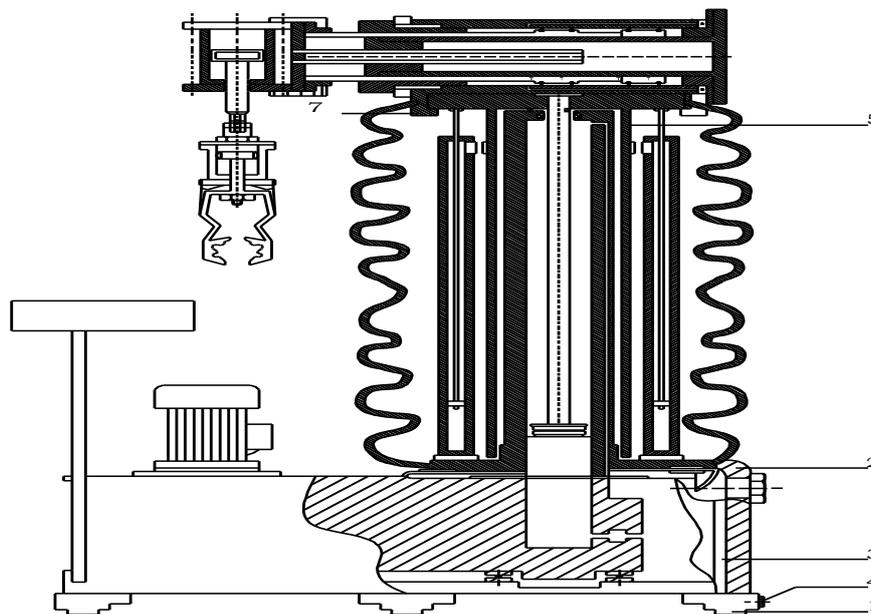


Figure 3.13 : Vue en élévation et partiellement en coupe du robot 2

3.6 Centre d'usinage (fraisage-rectification) EUMACH UMC-1000 :

Le centre d'usinage EUMACH UMC-1000 [11], est idéal pour améliorer la performance des spécialistes de l'industrie en matière d'enlèvement de copeaux. Ce centre vertical 5 axes possède une table de dimensions 1000x800 mm, une broche HSK63 17.2 KW, un chargeur 40 outils. La broche de ce centre d'usinage est présentée avec une vitesse variant de 16000 à 24000 tr /min.

- Caractéristiques et accessoires standard.
- Garde de splash complet avec toit supérieur.
- Système de refroidissement programmable.
- Système de lubrification automatique.
- Système alarme de travail, lampes d'indication.

- Refroidisseur d'eau à broche.
- Port d'interface terminal rs-232.
- Machine et manuels de contrôle.
- Toolbox avec spanners & wrenches.
- Convoyeurs à puce de type à chaîne + 2 auges à pinces à vis.
- Balances linéaires à 3 axes + codeurs rotatifs à 2 axes.



Figure 3.14 : Centre d'usinage 05 axes EUMACH UMC-1000

Table 3.6 : Caractéristiques techniques EUMACH UMC-1000

Machine		UMC-1000
Trajectoires		
Axe X/Y/Z	mm	1000×800×700
Distances		
Vertical : nez de la broche à la table	mm	150 ~ 850
Horizontal : centre de la broche à la table	mm	50 ~ 750
Table d'indexation		
Dimensions	mm	1000×800
A la distance au sol	mm	1000
Charge maximale	kg	1500
Incrément d'indexation		0.001*×360000
T fentes (pas×lar×pas)		7×18H×P100

Broche de Moteur		
La vitesse	rpm	16000/24000
Puissance	kw	17.2/21.4
Conique		SK40 (HSK-A63)
Incrément d'indexation		0.001 [*] ×360000
Diamètre du palier avant	mm	70
Avance		
Rapide	m/min	24/24/24
Coupe	m/min	10
A.T.C		
Porte-outil		SK40
Tirette		MAS403P40T1
Outils		40
Max diamètre/longueur/poids		Ø120mm/300mm/7kg
Général		
Puissance requise	kva	40
Taille du sol et la hauteur	m	3.7×4.5×3
Poids net	kg	15000

- Technologie de nouvelle génération :

Le concept d'usinage le plus efficace et le plus intelligent pour l'usinage multi-faces à hautes performances augmente la productivité, la flexibilité et la répétabilité.

- Guidages à galets et vis à billes :

Les guidages linéaires à trois axes à haut niveau de rigidité et robustesse offrent une faible inertie au démarrage, un faible frottement et une accélération élevée. Les vitesses optimisent le servomoteur et assurent une réponse immédiate et précise aux exigences de coupe élevées et découpe de contours.

- Gain de temps grâce à l'usinage multi-faces sans avoir à le réinstaller.
- Productivité maximale grâce à un mouvement rapide et une accélération élevée.
- Flexibilité et polyvalence illimitées lors de la fabrication de pièces individuelles.
- Stabilité maximale grâce à une répartition optimale de la charge.
- Répétabilité maximale de la machine grâce à l'évitement des chevauchement d'axes.
- Garde totalement fermée.

NB : le robot 3 est implanté entre la station alésage-rectification et le centre de fraisage-rectification

3.7 Robots (1, 2 et 3) utilisés dans les machines à unité autonomes proposées dans un atelier flexible :

On propose le plan suivant avec les dimensions adéquates d'une chaîne flexible et qui sera validé après une simulation pour déterminer un régime de fonctionnement adéquat :

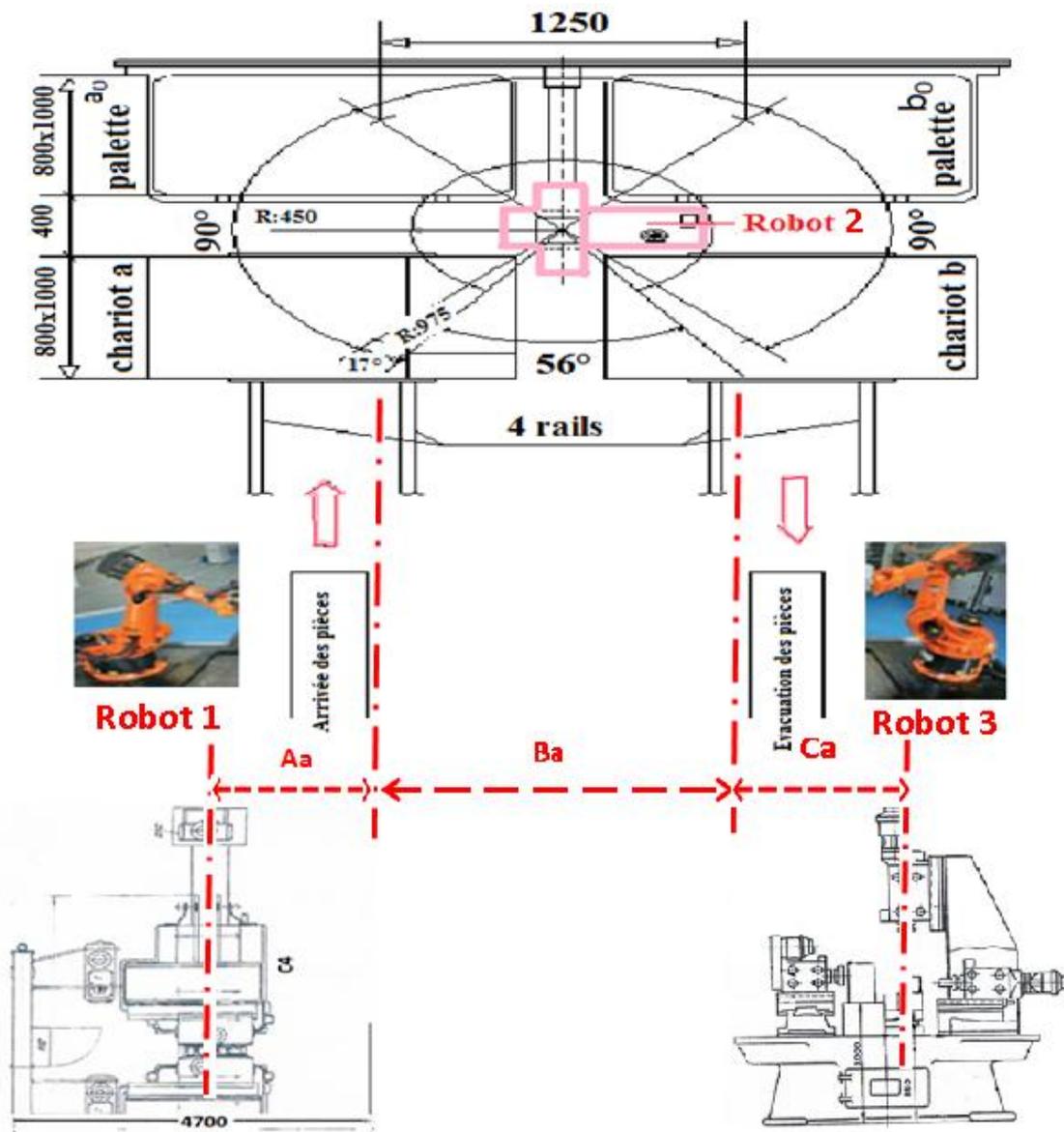


Figure 3.15.a : Première chaîne flexible proposée

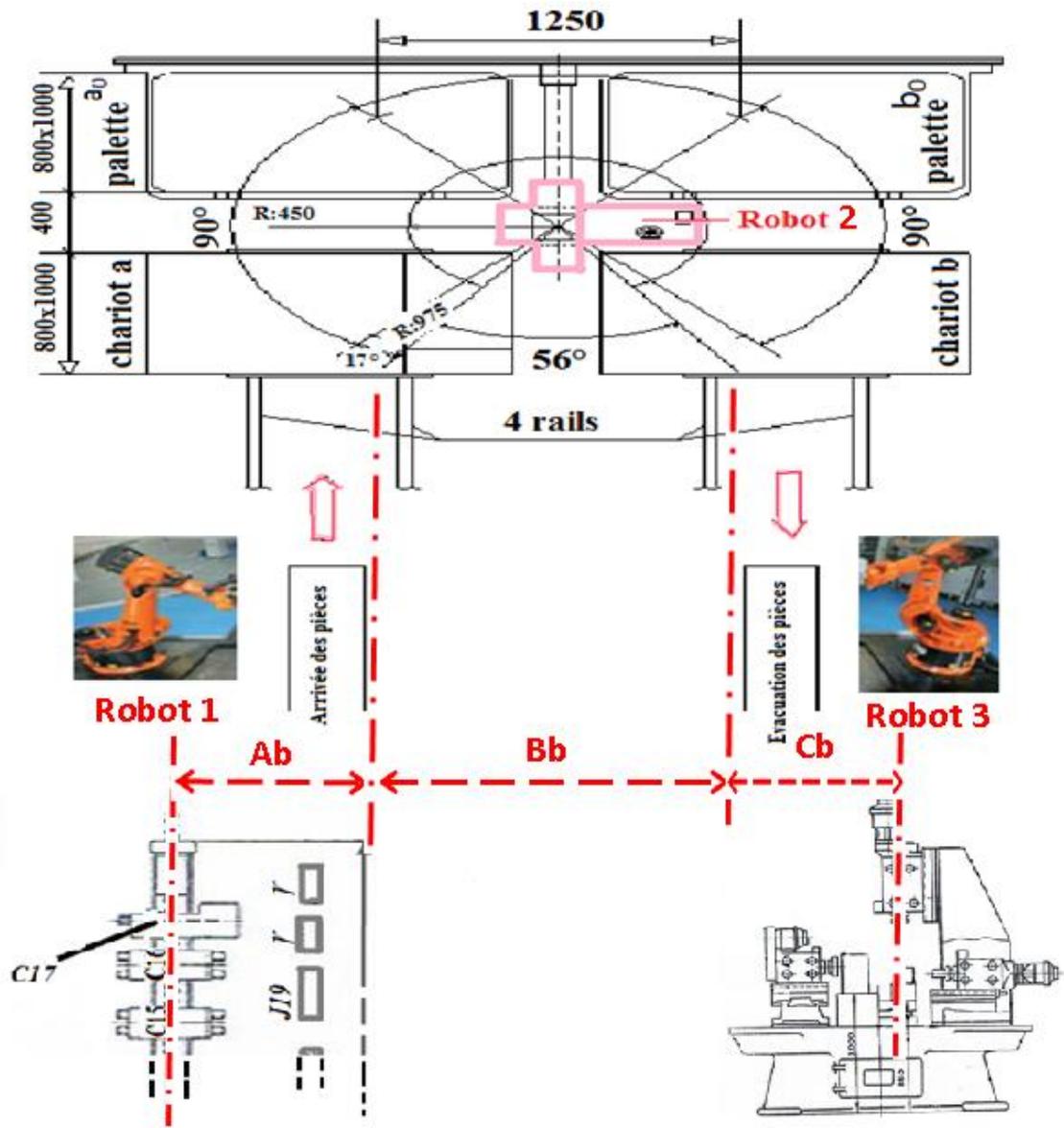


Figure 3.15.b : Deuxième chaine flexible proposée

CHAPITRE 4

SIMULATION NUMERIQUE DES ROBOTS (1, 2 et 3) ET INTERPRETATIONS DES RESULTATS

Après la présentation des différentes caractéristiques, avantages et configuration d'ateliers flexibles, il convient maintenant de présenter les calculs de ma proposition. L'étude consiste à générer les trajectoires des robots d'un atelier équipé d'un CNC, chaînes flexibles et stations d'usinage.

4.1 Génération de la trajectoire :

Pour effectuer une tâche dans l'espace opérationnel (Figure 4.1), il est nécessaire d'effectuer une trajectoire à l'intérieur de l'espace de travail.

Du point de vue manipulateur, ceci permet de définir l'évolution temporelle de la matrice de transformation homogène qui repère le poignet par rapport à la base de robots, on va mettre en évidence plusieurs méthodes pour planifier une trajectoire.

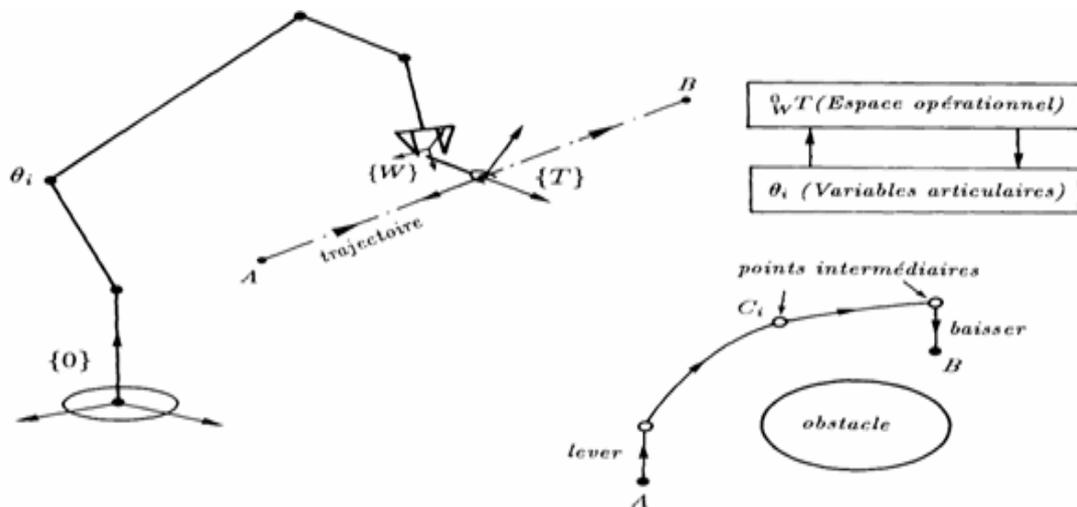


Figure 4.1 : Génération de trajectoire

4.1.1 Génération en variable articulaires :

Soit une trajectoire reliant les points extrêmes A et B en passant par les points C_i (Figure 4.1). Une fois ces points convertis dans l'espace des variables d'articulations, il faut relier les valeurs articulaires par articulations, il faut relier les valeurs de chaque variable articulaire par une fonction adéquate.

4.1.2 Trajectoire cubique :

Commençons par le cas le plus simple d'une trajectoire définie seulement par ses extrémités A et B (Figure 4.2).

Chacune des variable d'articulations est alors soumise à 4 contraintes $(\theta_A, \dot{\theta}_A)$, $(\theta_B, \dot{\theta}_B)$, les vitesses d'extrémités seront nulles si le manipulateur démarre et arrive au repos. Le polynôme de degré minimum satisfaisant ces 4 contraintes est du degré 3 :

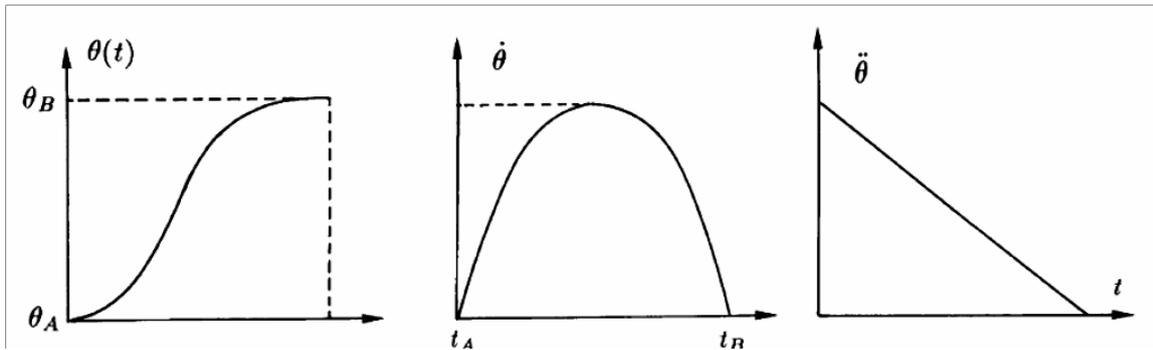


Figure 4.2 : Trajectoire cubique : variable articulaire, vitesse, accélération

4.1.3 Polynôme de degré n :

Le nombre des conditions détermine le degré d'un polynôme, en général le polynôme $q=q(t)$ est de degré n et de n+1 conditions.

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \dots + a_n t^n \dots \dots \dots (4.1)$$

On distingue 2 types de conditions :

- La trajectoire doit passer par tous les points spécifiés.
- Position, vitesse, accélération, entre deux points seront nulles si le manipulateur démarre et arrive au repos.

4.1.4 Polynôme de degré trois :

Il possède 4 variables qui doivent satisfaire les conditions aux limites (initiales et finales) :

$$\begin{aligned} q(t_0) &= q_0 \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_0 \\ q(t_f) &= q_f \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \dots \dots \dots (4.2) \end{aligned}$$

Le polynôme $q(t)$ d'après (4.2) génère 4 équations

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \dots \dots \dots (4.3)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \\ 0 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_0 \\ \dot{q}_0 \\ q_f \\ \dot{q}_f \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.4)$$

4.1.5 Trajectoire cubique à vitesse constante au milieu :

On exige une vitesse $\dot{q} = \dot{q}_c$ constante au milieu de la trajectoire pour que :

$$\begin{cases} t_1 \leq t \leq t_2 \\ t_0 \leq t_1 \leq t_2 \leq t_f \end{cases} \dots\dots\dots (4.5)$$

Les conditions aux limites sont :

$$\begin{aligned} q(t_0) = q_0 & \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_0 \\ \dot{q}(t) = \dot{q}_c & \quad t_1 \leq t \leq t_2 \dots\dots\dots (4.6) \\ q(t_f) = q_f & \quad \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \end{aligned}$$

La trajectoire possède 3 phases : phase de début, vitesse constante, et phase finale.

Pour $t_0 \leq t \leq t_1$

Les conditions aux limites sont :

$$q_1(0) = q_0 \quad \dot{q}_1(0) = 0 \quad \dot{q}_1(t_1) = \dot{q}_c \dots\dots\dots (4.7)$$

L'équation adéquate aux 3 conditions est de degré 2 :

$$\begin{aligned} q_1(t) &= a_0 + a_1 t + a_2 t^2 \dots\dots\dots (4.8) \\ \dot{q}_1(t) &= a_1 + 2a_2 t^1 \end{aligned}$$

On remplace (4.7) dans (4.8), on tire :

$$q_0 = a_0 \quad 0 = a_1 \quad \dot{q}_c = 2a_2 t_1 \dots\dots\dots (4.9)$$

On remplace (4.10) dans (4.8), on obtient :

$$q_1(t) = q_0 + \frac{\dot{q}_c}{2t_1} t^2 \dots\dots\dots (4.10)$$

Pour $t_1 \leq t \leq t_2$

Au milieu, la vitesse est supposé constante

$$\dot{q}(t) = \dot{q}_c \dots\dots\dots (4.11)$$

$$q_2(t) = \dot{q}_c t + C1 \dots\dots\dots (4.12)$$

Détermination de la constante C1

$$t = t_1 \quad q_0 + \frac{\dot{q}_c}{2t_1} t_1^2 = \dot{q}_c t_1 + c_1 \dots\dots\dots (4.13)$$

$$c_1 = q_0 - \frac{\dot{q}_c}{2t_1} t_1 \dots\dots\dots (4.14)$$

On remplace (4.14) dans (4.12), on tire :

$$q_2(t) = \dot{q}_c t + q_0 - \frac{\dot{q}_c}{2t_1} t_1 \dots\dots\dots (4.15)$$

Pour $t_2 \leq t \leq t_f$

Les conditions de limites sont :

$$q_3(t_f) = q_f \quad \dot{q}_3(t_f) = 0$$

$$q_3(t_2) = q_2(t_2) = q_2 = \dot{q}_c t_2 + q_0 - \frac{\dot{q}_c}{2t_1} t_1 \dots\dots\dots (4.16)$$

$$\dot{q}(t_2) = \dot{q}(t_2) = \dot{q}_c$$

L'équation adéquate à 4 conditions est de degré 3 :

$$q_3(t) = b_0 + b_1 t + b_2 t^2 + b_3 t^3 \dots\dots\dots (4.17)$$

$$\dot{q}_3(t) = b_1 + 2b_2 t + 3b_3 t^2 \dots\dots\dots (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \\ 1 & t_0 & t_0^2 & t_0^3 \\ 0 & 1 & 2t_0 & 3t_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_f \\ 0 \\ \dot{q}_c t_2 + q_0 - \frac{1}{2} t_1 \dot{q}_c \\ \dot{q}_c \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.19)$$

4.1.6 Trajectoire cubique à accélération constante :

La trajectoire possède 2 accélérations (a_c) positive et négative :

$$\left| \ddot{q}(t_0) \right| = a_c \dots\dots\dots (4.20)$$

➤ Pour $0 \leq t \leq \frac{1}{2} t_f$

a_c : positive

Les conditions aux limites sont :

$$q_1(0) = q_0 \quad \dot{q}_1(0) = 0 \dots\dots\dots (4.21)$$

Donc : $\dot{q}_1(t_0) = a_c t$ (4.22)

$q_1(t_0) = \frac{1}{2} a_c t^2 + q_0$ (4.23)

➤ Pour $\frac{1}{2} t_f \leq t \leq t_f$

Les conditions aux limites sont :

$q_2(t_f) = q_f + q_0$ $q_1\left(\frac{t_f}{2}\right) = q_2\left(\frac{t_f}{2}\right) = \frac{1}{8} a_c t_f^2 + q_0$ $\dot{q}_2(t_f) = 0$ (4.24)

Donc : $q_2(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2$ (4.25)

On obtient :

$$\begin{bmatrix} 1 & t_f & t_f^2 \\ 0 & 1 & 2t_f \\ 1 & t_0 & t_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_f \\ 0 \\ q_0 + \frac{1}{8} a_c t_f^2 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.26)$$

4.1.7 Trajectoire des points séquences :

Les conditions aux limites sont :

$q(t_0) = q_0$ $\dot{q}(t_0) = 0$ $\ddot{q}(t_0) = 0$
 $q(t_1) = q_1$
 $q(t_2) = q_2$ (4.27)

$q(t_3) = q_3$ $\dot{q}(t_3) = 0$ $\ddot{q}(t_3) = 0$

4.2 Modélisation géométrique

4.2.1 Matrice de transformation homogène (TH)

- Hypothèse :

- ✓ Les rotations selon l'axe (Z)
- ✓ Les projections selon l'axe (X) et (Z)

$\text{Sin}\theta_1 = s_1$ (4.28)

$\text{Cos}\theta_1 = c_1$ (4.29)

$\text{Sin}\theta_2 = s_2$ (4.30)

$\text{Cos}\theta_2 = c_2$ (4.31)

$\text{Cos}(\theta_1 + \theta_2) = c_{12}$ (4.32)

$\text{Sin}(\theta_1 + \theta_2) = s_{12}$ (4.33)

Donc les matrices de transformation de chaque chainon sont :

$$T_1^0 = \begin{bmatrix} c_1 & -s_1 & 0 & l_1 c_1 \\ s_1 & c_1 & 0 & l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.34)$$

$$T_2^1 = \begin{bmatrix} c_2 & -s_2 & 0 & l_2 c_2 \\ s_2 & c_2 & 0 & l_2 s_2 \\ 0 & 0 & 1 & -d_2 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.35)$$

$$T_3^2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.36)$$

Donc le modèle géométrique direct de notre robot s'écrit sous la forme :

$$T_3^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 \dots\dots\dots (4.37)$$

A l'aide du programme MATLAB, on détermine la matrice T_3^0 :

$$T_3^0 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_2 c_{12} + l_1 c_1 \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_2 s_{12} + l_1 s_1 \\ 0 & 0 & 1 & -d_2 - d_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.38)$$

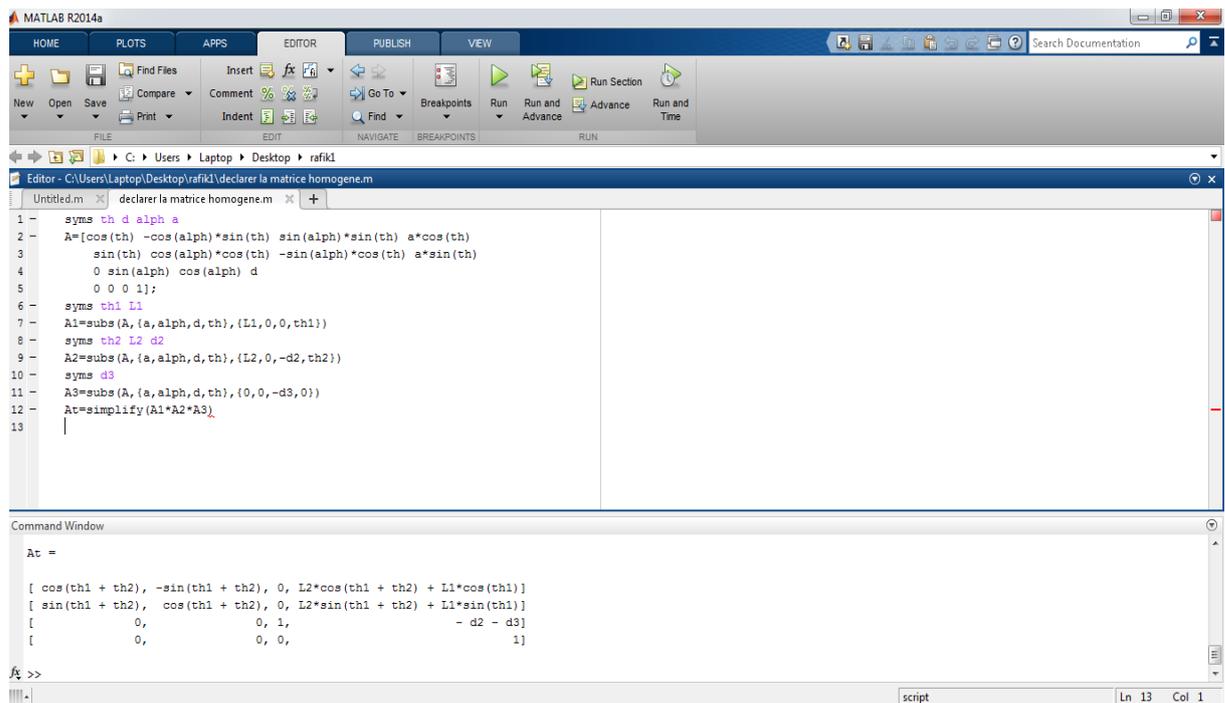


Figure 4.3 : Résultats obtenus par MATLAB

4.2.2 Modèle géométrique inverse :

- Variables articulaires du robot :

Le but est de déterminer la position désirée qui est donnée par la matrice de transformation homogène T_H^R :

$$T_H^R = \begin{bmatrix} n_x & o_x & a_x & p_x \\ n_y & o_y & a_y & p_y \\ n_z & o_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (4.39)$$

Calcul la variable articulaire (θ_1) :

Par identification :

$$p_x = l_1 c_1 + l_2 c_{12} \dots\dots\dots (4.40)$$

$$p_y = l_1 s_1 + l_2 s_{12} \dots\dots\dots (4.41)$$

$$p_x^2 = l_1^2 c_1^2 + l_2^2 c_{12}^2 + 2l_1 l_2 c_1 c_{12} \dots\dots\dots (4.42)$$

$$p_y^2 = l_1^2 s_1^2 + l_2^2 s_{12}^2 + 2l_1 l_2 s_1 s_{12} \dots\dots\dots (4.43)$$

$$P_y^2 + P_x^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 (c_1 c_{12} + s_1 s_{12}) \dots\dots\dots (4.44)$$

Avec :

$$c_1^2 + s_1^2 = 1 \dots\dots\dots (4.45)$$

$$c_{12}^2 + s_{12}^2 = 1 \dots\dots\dots (4.46)$$

$$c_{12} = c_1 c_2 - s_1 s_2 \dots\dots\dots (4.47)$$

$$s_{12} = c_1 c_2 + s_1 s_2 \dots\dots\dots (4.48)$$

On remplace (4.47) et (4.48) dans (4.45) on obtient :

$$P_x^2 + P_y^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 c_2 \dots\dots\dots (4.49)$$

On tire c_2 :

$$c_2 = \frac{1}{2l_1 l_2} (p_x^2 + p_y^2 - l_1^2 - l_2^2) \dots\dots\dots (4.50)$$

$$s_2 = \pm \sqrt{(1 + c_2^2)} \dots\dots\dots (4.51)$$

$$\theta_2 = \pm \text{antg} \frac{s_2}{c_2} \dots\dots\dots (4.52)$$

4.3 Application polynomial (voir annexe 3) :

4.3.1 Polynôme degré 3 utilisé pour le robot 1 :

Pour $0 \leq t \leq 6$ sec

Les conditions aux limites du chainon 1 sont :

$$\begin{aligned} \theta_1(0) &= 20 \text{ deg} & \dot{\theta}_1(0) &= 0 \\ \theta_1(6) &= 30 \text{ deg} & \dot{\theta}_1(6) &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (4.53)$$

On remplace (4.53) dans (4.37) et à l'aide d'un programme établi par MATLAB, on obtient : $\theta_1(t) = 20 + 83.3333t^2 - 92.5926t^3 \dots\dots\dots (4.54)$

Les conditions aux limites du chainon 2 sont :

$$\begin{aligned} \theta_2(0) &= 5 \text{ deg} & \dot{\theta}_2(0) &= 0 \\ \theta_2(6) &= 25 \text{ deg} & \dot{\theta}_2(6) &= 0 \end{aligned} \dots\dots\dots (4.55)$$

On remplace (4.53) dans (4.37) et à l'aide d'un programme établi par MATLAB, on obtient : $\theta_2(t) = 5 + 166.6667t^2 - 185.1852t^3 \dots\dots\dots (4.56)$

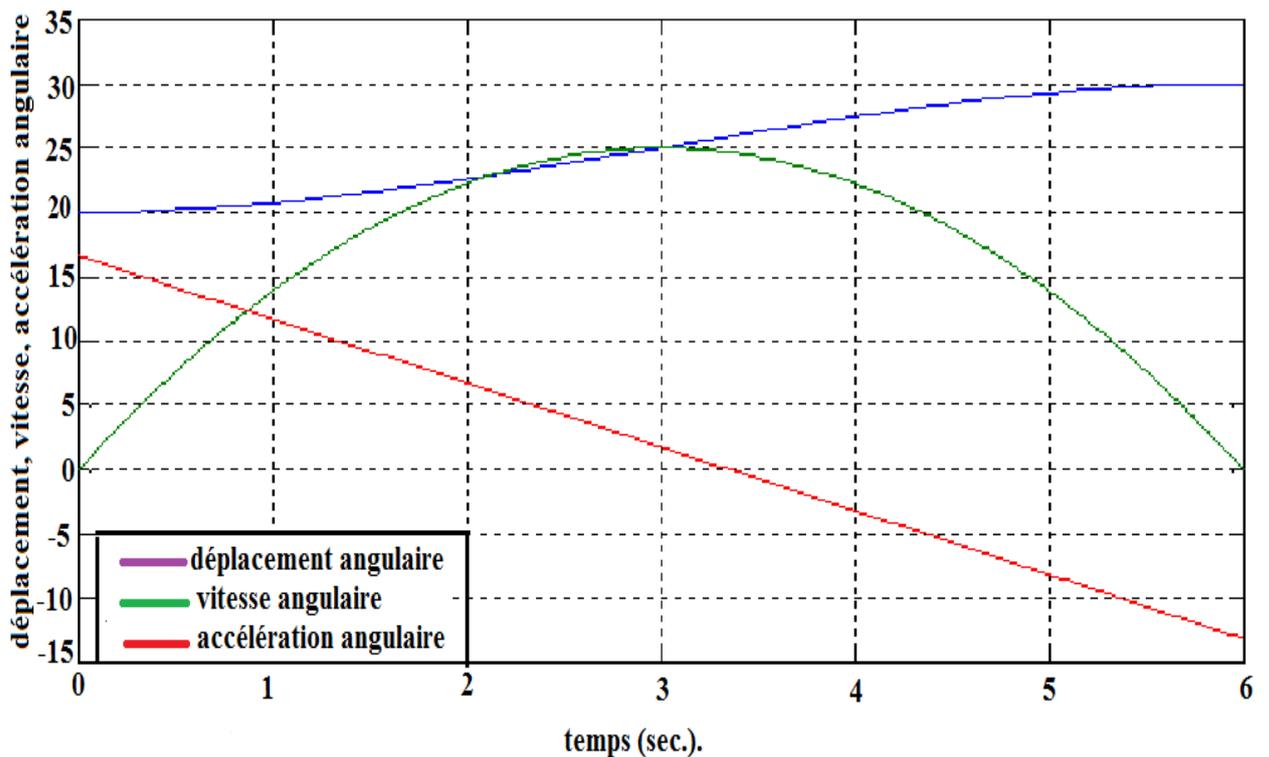


Figure 4.4 : Variations des déplacements, des vitesses et accélérations angulaires pour $0 \leq t \leq 6$ du chainon 1

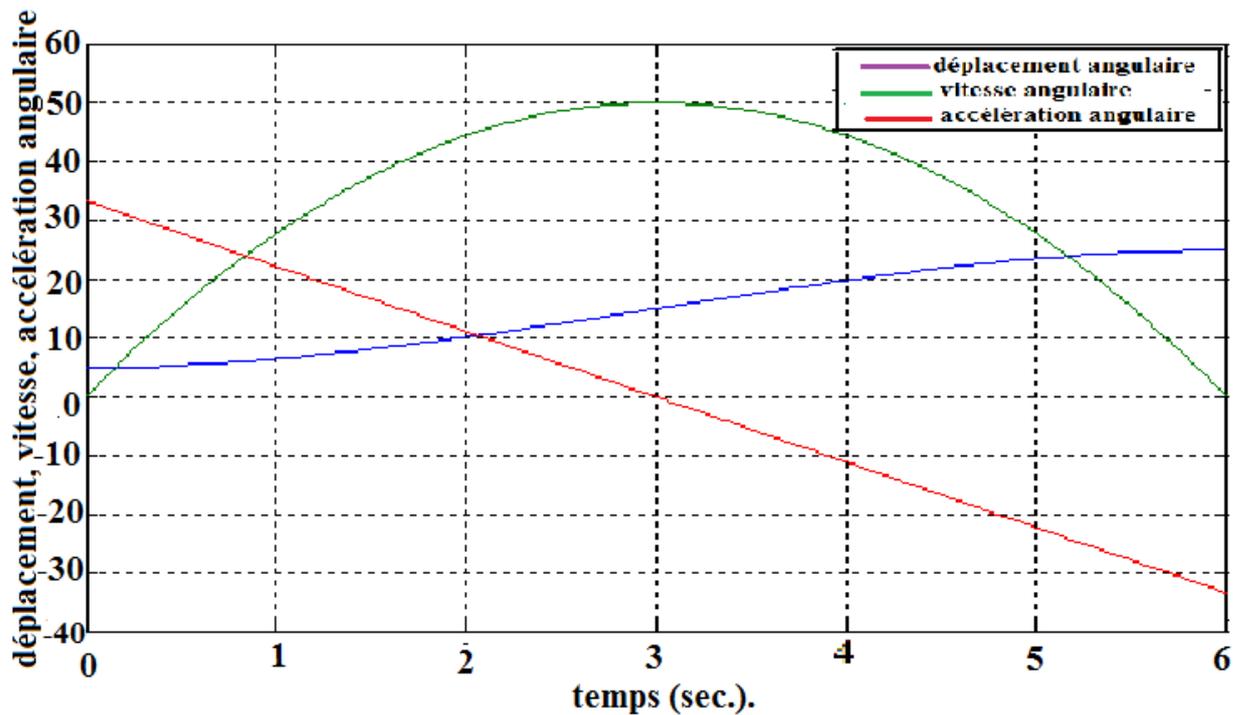


Figure 4.5 : Variations des déplacements, des vitesses et accélérations angulaires pour $0 \leq t \leq 6$ du chaînon 2

4.3.2 Polynôme degré 3 utilisé pour le robot 3 :

Pour $0 \leq t \leq 9$ sec

Les conditions aux limites du chaînon 1 sont :

$$\begin{aligned} \theta_1(0) &= 20 \text{ deg} & \dot{\theta}_2(0) &= 0 \\ \theta_1(9) &= 30 \text{ deg} & \dot{\theta}_2(9) &= 0 \end{aligned} \quad (4.57)$$

On remplace (4.53) dans (4.37) et à l'aide d'un programme établi par MATLAB, on

$$\text{obtient : } \theta_1(t) = 20 + 37.0370t^2 - 27.4348t^3 \quad (4.58)$$

Les conditions aux limites du chaînon 2 sont :

$$\begin{aligned} \theta_2(0) &= 5 \text{ deg} & \dot{\theta}_2(0) &= 0 \\ \theta_2(9) &= 25 \text{ deg} & \dot{\theta}_2(9) &= 0 \end{aligned} \quad (4.59)$$

On remplace (4.53) dans (4.37) et à l'aide d'un programme établi par MATLAB, on

$$\text{obtient : } \theta_2(t) = 5 + 74.0741t^2 - 54.8697t^3 \quad (4.60)$$

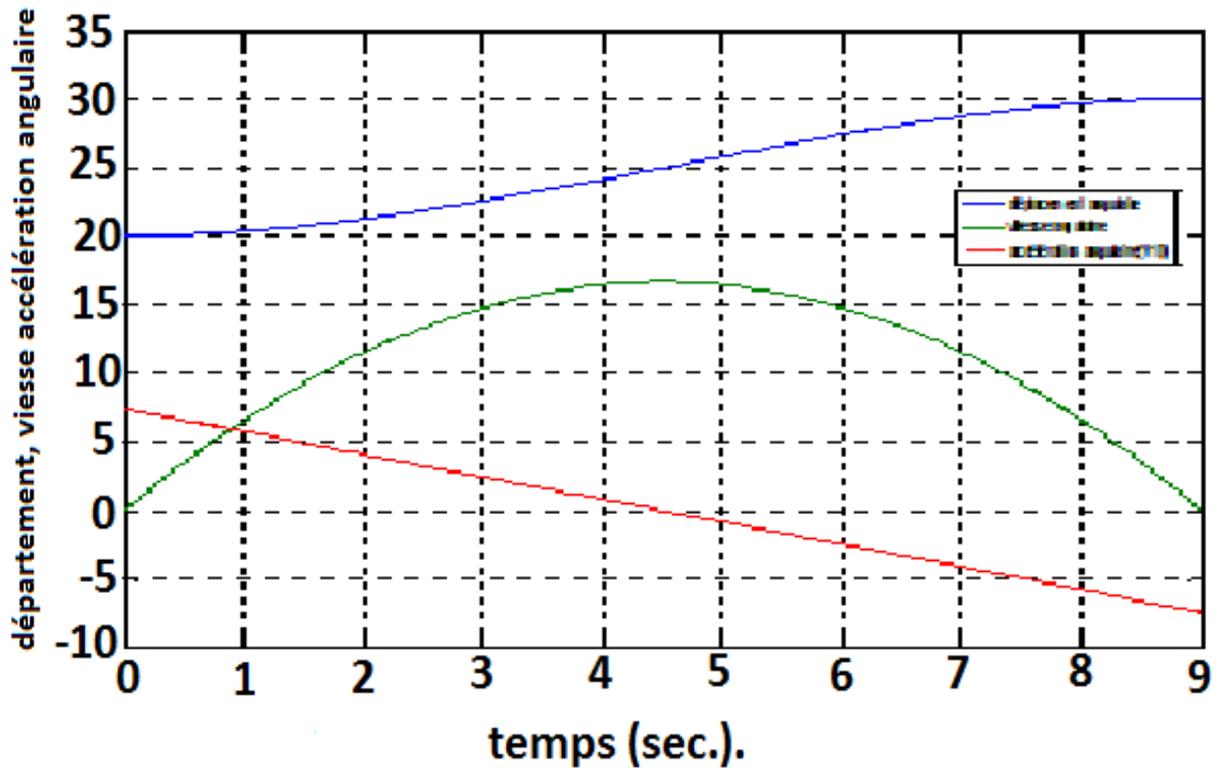


Figure 4.6 : Variations des déplacements, des vitesses et accélérations angulaires pour $0 \leq t \leq 9$ du chaînon 1

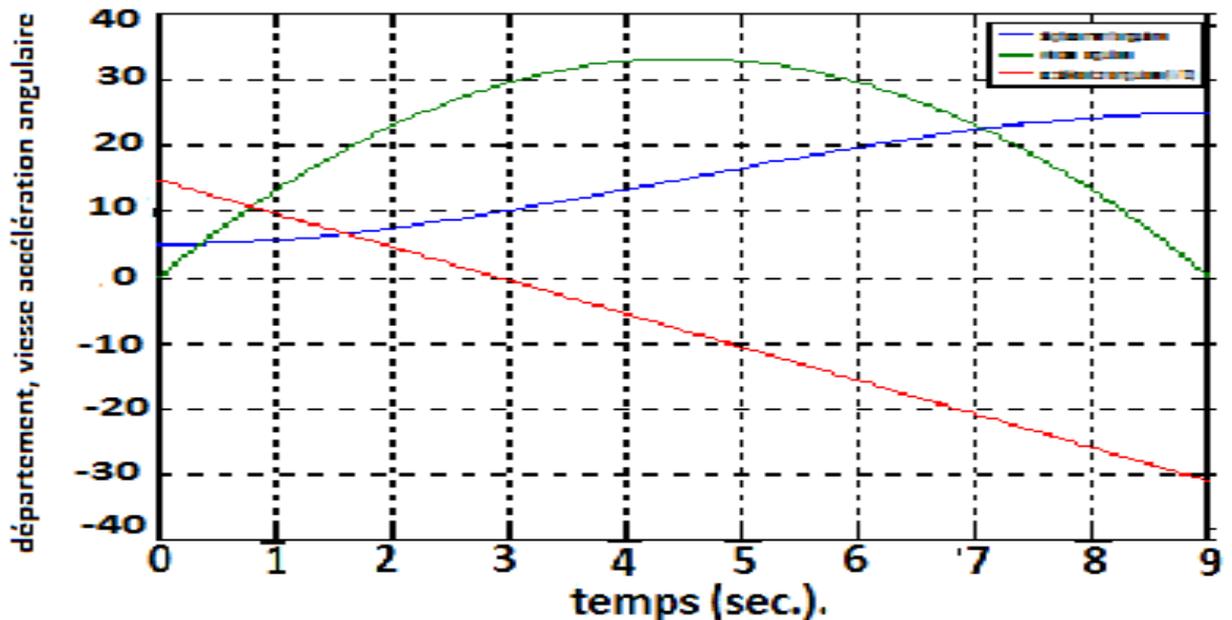


Figure 4.7 : Variations des déplacements, des vitesses et accélérations angulaires pour $0 \leq t \leq 9$ du chaînon 2

➤ Discussion des résultats :

Ce polynôme possède la particularité de vitesses angulaires maximales au voisinage du milieu de trajectoire, accélérations décroissantes et déplacements croissants.

4.4 Application partie dynamique :

4.4.1 Modélisation dynamique des robots 1 et 3 :

La position initiale du robot pour les 2 postures :

$$p_x = 2 \quad p_y = 0 \quad \text{La position désirée : } p_x = 1.36 \quad p_y = 1.36$$

$$\theta_1(0) = 0 \text{ deg} \quad \theta_2(0) = 0 \text{ deg}$$

$$\theta_1(1) = 60 \text{ deg} \quad \theta_2(1) = -30 \text{ deg}$$

L'équation du mouvement pour coude haut pour la position initiale et désirée (à l'aide de MATLAB)

$$\theta_1(t) = 180t^2 - 120t^3$$

$$\theta_2(t) = -90t^2 + 60t^3$$

Vérification du polynôme à $t = 0$ sec $\theta_1 = 0$ deg et $\theta_2 = 0$ deg

On remplace $\theta_1 = 0$ et $\theta_2 = 0$ dans (4.40) et (4.41), on trouve :

$$p_x = 2 \quad p_y = 0 \quad (\text{position initial})$$

à $t = 1$ sec $\theta_1 = 60$ deg et $\theta_2 = -30$ deg

On remplace $\theta_1 = 60$ deg et $\theta_2 = -30$ deg dans (4.40) et (4.41)

On trouve : $p_x = 1.36$ $p_y = 1.36$ (La position désirée)

L'équation du mouvement pour coude bas pour la position initiale et désirée (à l'aide de MATLAB)

$$\theta_1(1) = 30 \text{ deg} \quad \theta_1(0) = 0 \text{ deg} \quad \theta_2(0) = 0 \text{ deg} \quad \theta_2(1) = 30 \text{ deg}$$

L'équation du mouvement pour coude bas pour la position initiale et désirée (à l'aide de MATLAB)

$$\theta_1(t) = 90t^2 - 60t^3$$

$$\theta_2(t) = 90t^2 - 60t^3$$

Vérification du polynôme à $t = 0$ sec $\theta_1 = 0$ et $\theta_2 = 0$

On remplace $\theta_1 = 0$ et $\theta_2 = 0$ dans (4.40) et (4.41), on trouve :

$$p_x = 2 \quad p_y = 0 \quad (\text{position initial})$$

à $t = 1$ sec $\theta_1 = 30$ deg et $\theta_2 = 30$ deg

On remplace $\theta_1 = 30$ deg et $\theta_2 = 30$ deg dans (4.40) et (4.41), on trouve :

$$p_x = 1.36 \quad p_y = 1.36 \quad (\text{La position désirée})$$

- Remarque :

On peut généraliser le calcul des facteurs dynamique avec t entre 0 et 10 sec. En utilisant les méthodes numériques tel que développements limités, discrétisations, analyses

numériques, plans d'expériences, méthodes grapho-numérique, identification et intégration numérique.

- Vérification des résultats par la méthode de la mécanique classique :

$$K_1 = \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}_1^2 \dots \dots \dots (4.61)$$

$$V_1 = m_1 g l_1 \sin \theta_1 \dots \dots \dots (4.62)$$

$$x_2 = l_1 \cos \theta_1 + l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (4.63)$$

$$y_2 = l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (4.64)$$

$$\dot{x}_2 = -l_1 \dot{\theta}_1 \sin \theta_1 - l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (4.65)$$

$$\dot{y}_2 = l_1 \dot{\theta}_1 \cos \theta_1 + l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (4.66)$$

$$v_2^2 = \dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2 \dots \dots \dots (4.67)$$

$$K_2 = \frac{1}{2} m_2 v_2^2 \dots \dots \dots (4.68)$$

$$V_2 = m_2 g y_2 = m_2 g (l_1 \sin \theta_1 + l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2)) \dots \dots \dots (4.69)$$

$$L = K - V = K_1 + K_2 - V_1 - V_2 \dots \dots \dots (4.70)$$

$$L = \frac{1}{2} (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1^2 + \frac{1}{2} m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 + m_2 l_1 l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 - (m_1 + m_2) g l_1 \sin \theta_1 - m_2 l_2 \sin(\theta_1 + \theta_2) \dots$$

(3.33)

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \dot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \cos \theta_2 \dots \dots \dots (4.71)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_1} = (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 (2 \ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 (2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + \dot{\theta}_2^2) \sin \theta_2$$

... (3.35)

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = -(m_1 + m_2) g l_1 \cos \theta_1 - m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2) \dots \dots \dots (4.72)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \cos \theta_2 \dots \dots \dots (4.73)$$

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}_2} = m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 2 \ddot{\theta}_1 \cos \theta_2 - m_2 l_1 l_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 \dots\dots\dots (4.74)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = m_2 g l_1 l_2 (\dot{\theta}_1^2 + \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 - m_2 g l_2 \cos(\theta_1 + \theta_2)) \dots\dots\dots (4.75)$$

$$\tau_1 = m_2 l_2^2 (\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + m_2 l_1 l_2 c_2 (2\ddot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_2) + (m_1 + m_2) l_1^2 \ddot{\theta}_1 - m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_2^2 - 2m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 + m_2 l_2 g c_2 + (m_1 + m_2) l_1 g c_1 \dots\dots (3.40)$$

$$\tau_2 = m_2 l_1 l_2 c_2 \ddot{\theta}_1 + m_2 l_1 l_2 s_2 \dot{\theta}_1^2 + m_2 l_2 c_{12} + m_2 l_2 g c_{12} + m_2 l_2 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)^2 \dots\dots\dots (4.76)$$

4.4.2 Résultats de simulation :

En utilisant les méthodes numériques classiques pour un intervalle de temps $0 \leq t \leq 10$ sec, on peut retrouver presque les mêmes résultats en intégrant numériquement les fonctions obtenus.

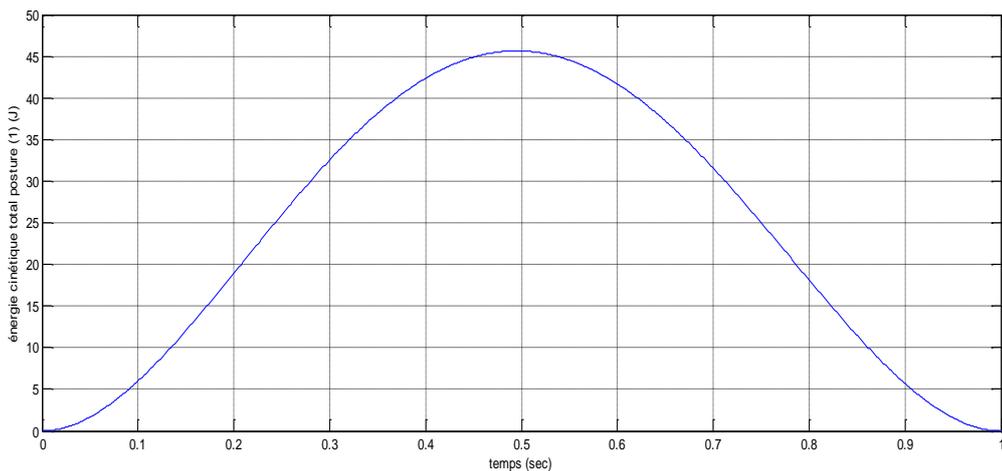


Figure 4.8 : Variation de l'énergie cinétique totale de la posture 1

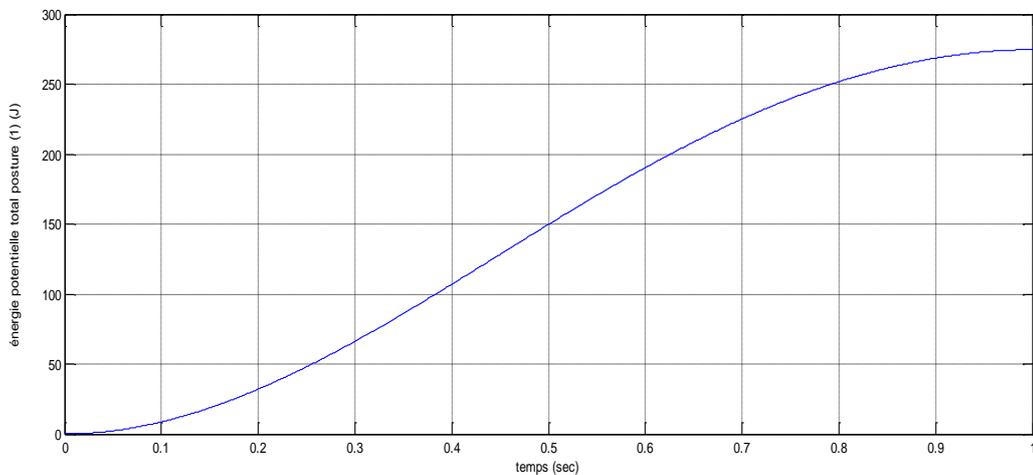


Figure 4.9 : Variation de l'énergie potentielle totale de la posture 1

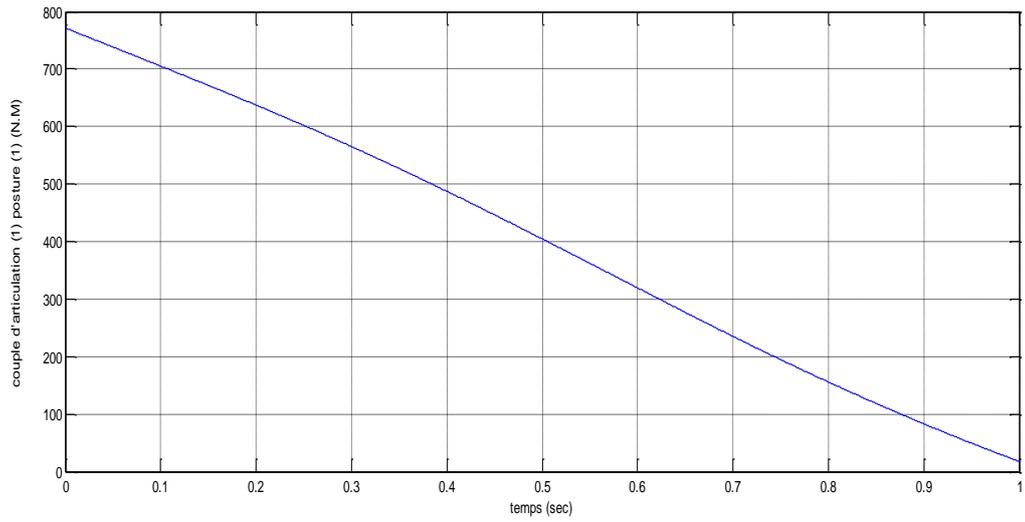


Figure 4.10 : Couple articulation 1 de la posture 1

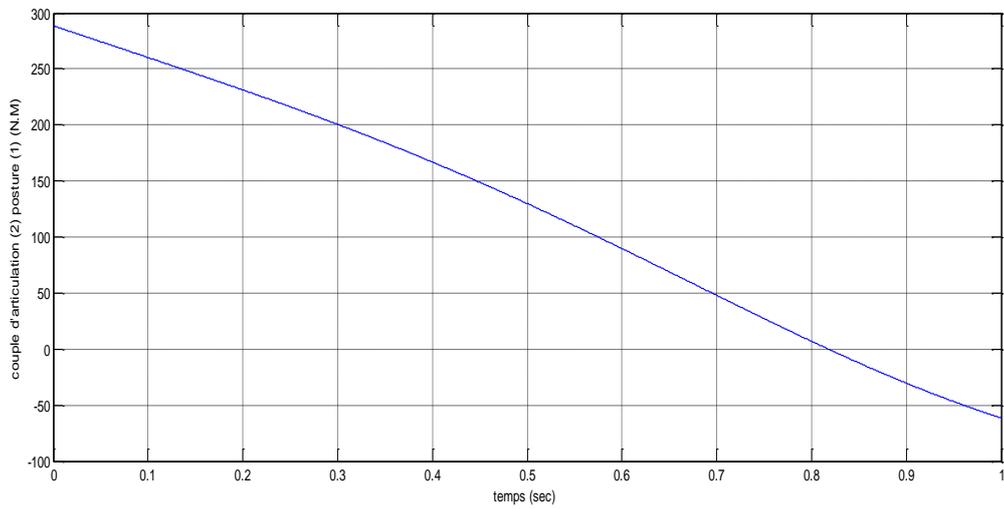


Figure 4.11 : Couple articulation 2 de la posture 1

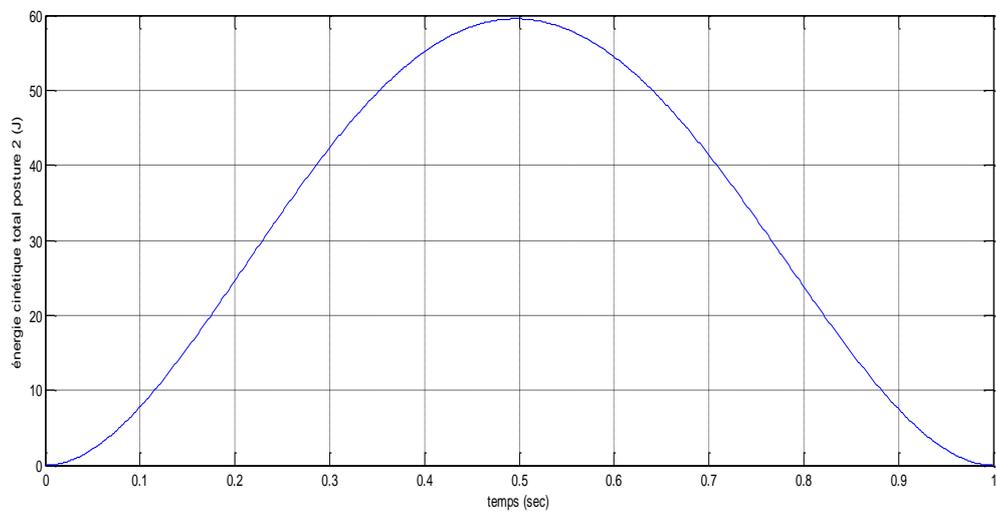


Figure 4.12 : Variation de l'énergie cinétique totale de la posture 2

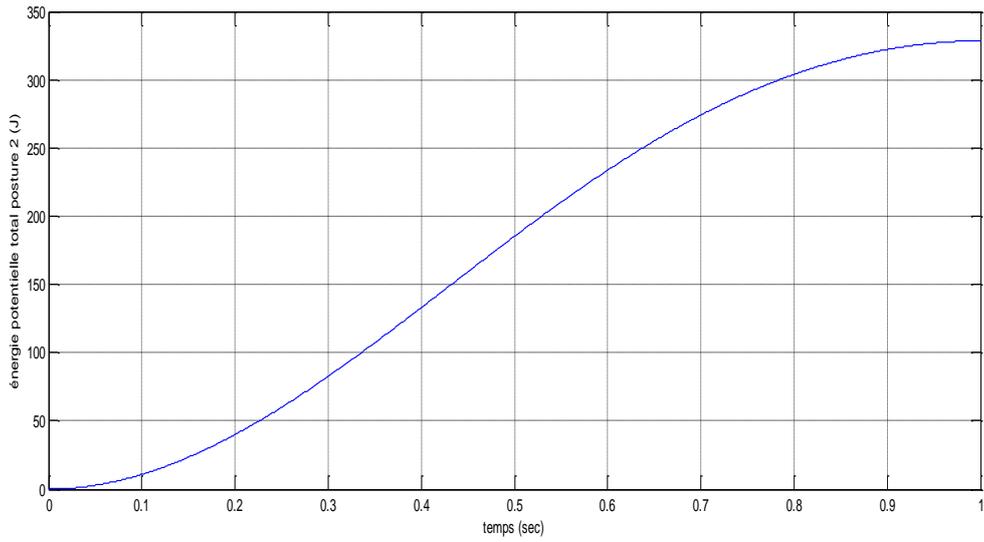


Figure 4.13 : Variation de l'énergie potentielle totale de la posture 2

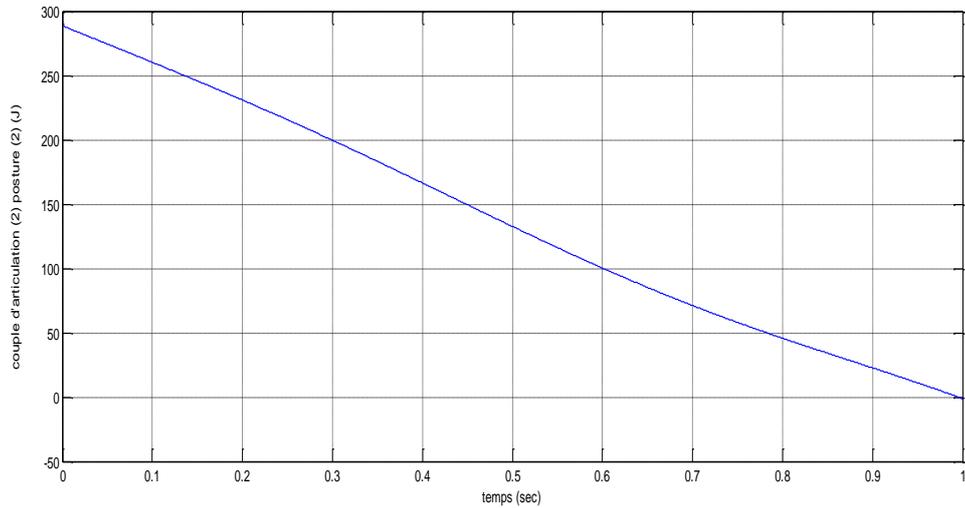


Figure 4.14 : Couple articulation 1 de la posture 2

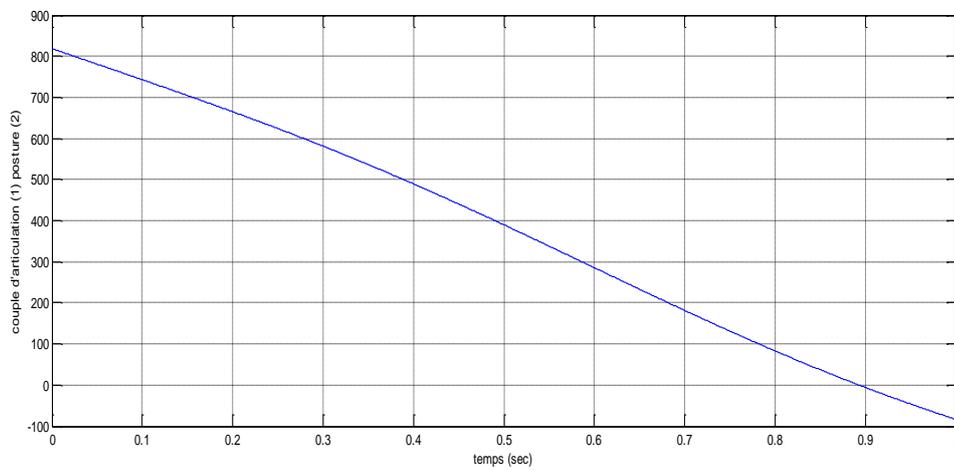


Figure 4.15 : Couple articulation 2 de la posture 2

4.4.3 Conclusion (robots 1 et 3) :

Le modèle cinématique établi, donne le comportement du système, en déplacements, vitesses et accélérations angulaires à un temps désiré. Les excitations d'entrer qui pourront être appliquées sur les robots 1 et 3 sont calculer dans le model dynamique, une telle démarche s'appelle la modélisation; d'une manière générale, on recherche toujours le modèle le plus simple qui permet d'expliquer, de manière satisfaisante, le comportement du processus dans son domaine d'application; les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire. (Dans lequel est définie la configuration du robot).

Tableau 4.1 : Comparaisons des résultats obtenus

Polynômes	Déplacement des chainons (mm)		Accélération des chainons (mm/sec^2)	
	01	02	01	02
Degré 3 du robot 1, $0 \leq t \leq 6$ s	20°	5°	170	340
$\theta_1(t) = 20 + 83.3333t^2 - 92.5956t^3$	à	à	0	0
$\theta_2(t) = 5 + 166.6667t^2 - 185.1852t^3$	30°	25°	-170	-340
Degré 3 du robot 3, $0 \leq t \leq 9$ s	20°	5°	70	150
$\theta_1(t) = 20 + 37.0370t^2 - 27.4348t^3$	à	à	0	0
$\theta_2(t) = 5 + 74.0741t^2 - 54.8697t^3$	30°	25°	-70	-150
Ce robot se diffère du premier par une trajectoire qui nécessite une montée selon l'axe OZ et cela jusqu'au niveau de l'espace du travail de la station de fraisage (Position système de blocage hydraulique selon l'axe OY)				

D'après les résultats obtenus pour la planification d'une trajectoire de degré 3 on remarque que ce polynôme possède des particularités satisfaisantes à la fin du mouvement.

4.5 Application polynomial du robot 2

4.5.1 Espace de travail du robot 2 :

L'espace de travail est l'ensemble des positions et/ou orientations accessibles par l'organe terminal du robot.

Le volume ou l'espace de travail d'un robot dépend généralement de 3 facteurs :

- De la géométrie du robot
- De la longueur des segments
- Du débattement des articulations (limité par des butées)

- Analyse de l'espace de travail du robot 2 :

L'analyse de l'espace de travail des robots trouve de nombreuses applications. Notamment dans le domaine de la C.A.O- Robotique pour la conception optimale des robots, des sites robotisés, et pour la programmation hors ligne.

Soit $q = [q_1 \dots q_n]$ un élément de \mathbb{R}^n représentant une configuration articulaire donnée et soit $x = [x_1 \dots x_n]$ l'élément de l'espace opérationnel \mathbb{R}^n correspondant, tel que :

$$X = f(q) \dots\dots\dots (4.77)$$

On note Q l'ensemble des configurations accessibles compte tenu des butées articulaires. Par conséquent, Q sera appelé domaine articulaire :

L'image de Q par le modèle géométrique direct f définit l'espace de travail W du robot :

$$W = f(Q) \dots\dots\dots (4.78)$$

4.5.2 Calcul de l'espace de travail du robot 2 :

Comme on l'a définie précédemment, la position de l'organe terminal dans le repère atelier est donnée par le vecteur position dans la matrice de transformation qui exprime le repère R_5 dans R_0 noté :

$$P = \begin{Bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{Bmatrix}; \text{ avec } \begin{Bmatrix} p_x = (z_3 - z_4)c\gamma_1 \\ p_y = (z_3 - z_4)s\gamma_1 \\ p_z = h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + z_2 - z_5 \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (4.79)$$

En développant un programme qui a comme paramètres entrées les limites articulaires de chaque articulation et sortie toutes les configurations possibles de l'organe terminal.

4.6 Application partie dynamique de robot 2 :

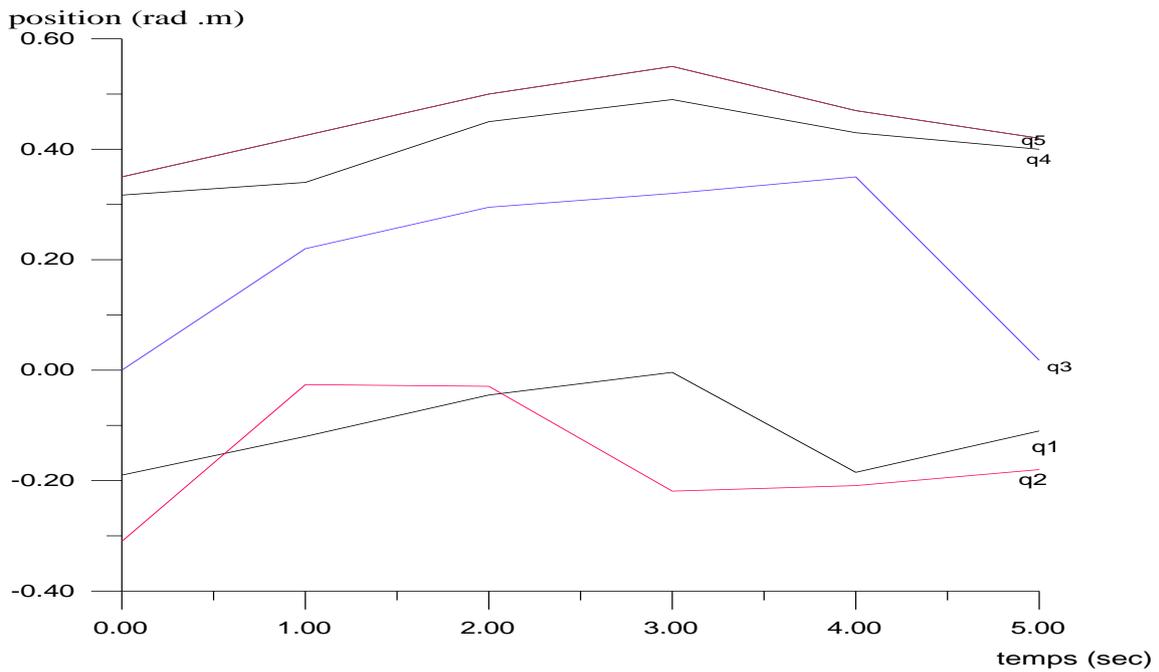


Figure 4.16 : Position (rad ou m)

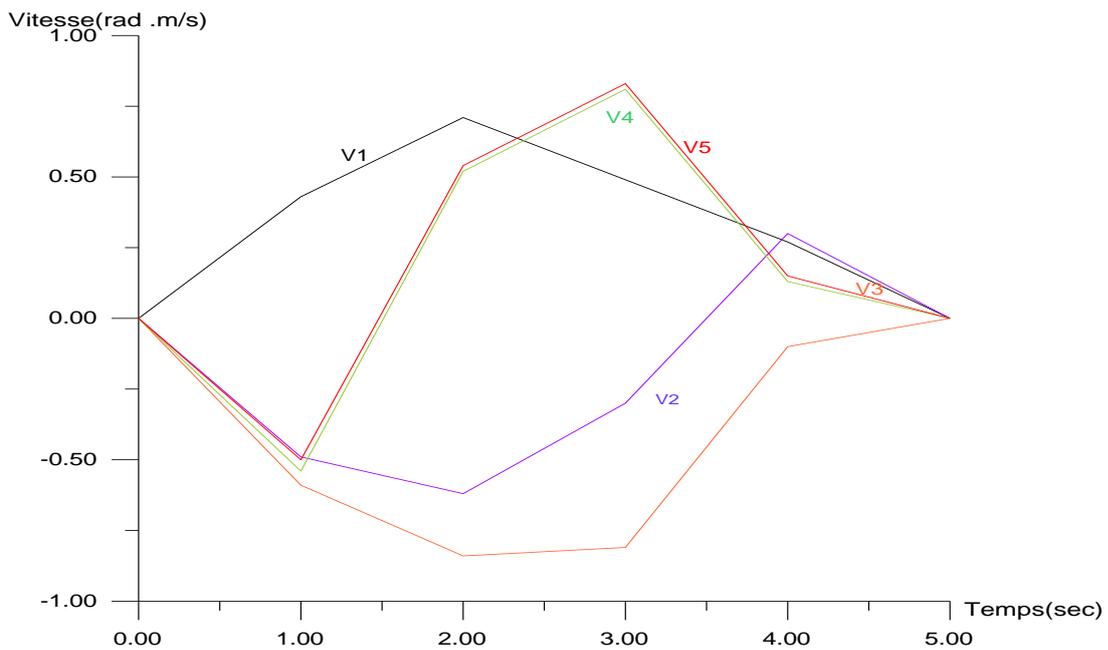


Figure 4.17 : Vitesses (rad/s ou m/s)

- Graphes de simulations de 5 chainons :

- (q₁, v₁, a₁, c₁)
- (q₂, v₂, a₂, c₂)
- (q₃, v₃, a₃, c₃)
- (q₄, v₄, a₄, c₄)
- (q₅, v₅, a₅, c₅)

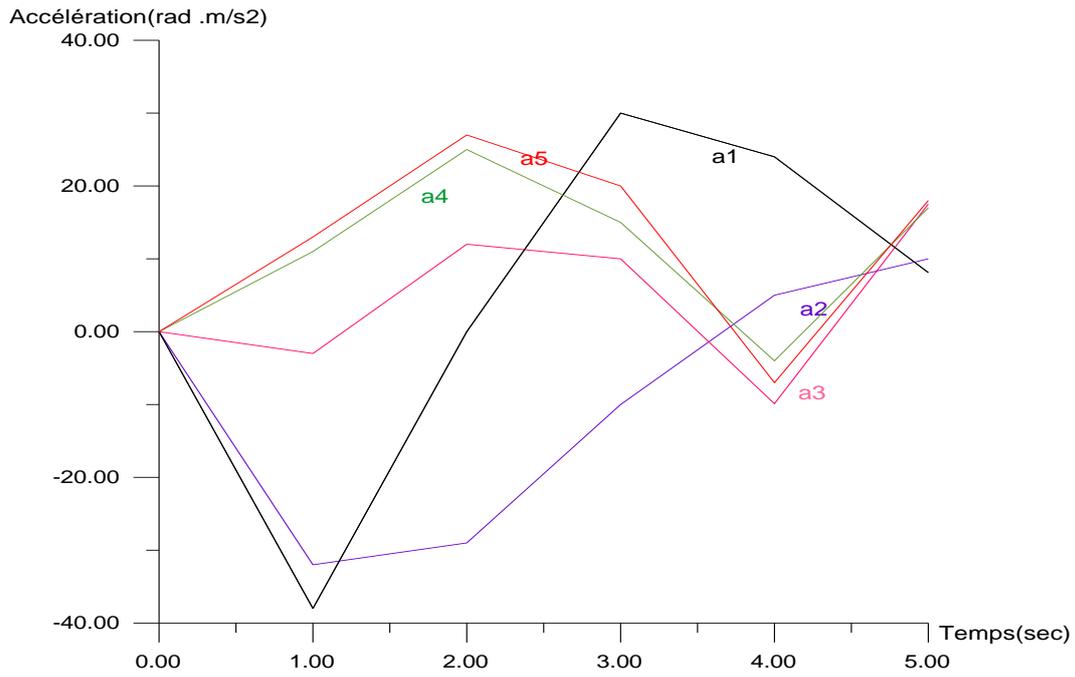


Figure 4.18 : Accélération (rad/s² ou m/s²)

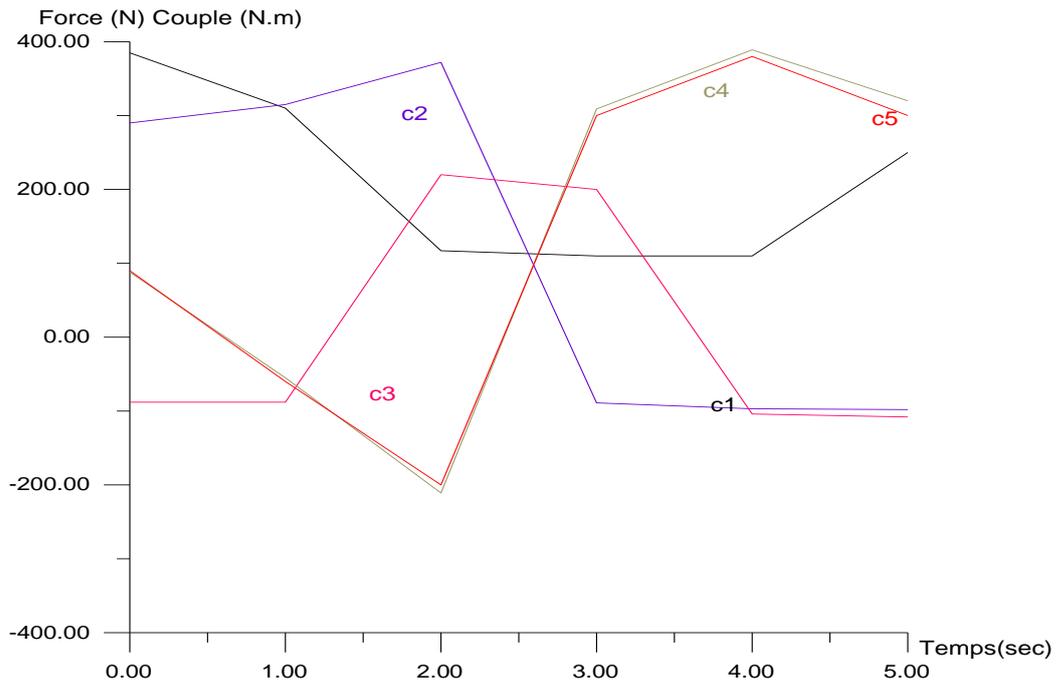


Figure 4.19 : Couples (N.m)

- Graphes de simulations de 5 chainons :

----- (q₁, v₁, a₁, c₁)

----- (q₂, v₂, a₂, c₂)

----- (q₃, v₃, a₃, c₃)

----- (q₄, v₄, a₄, c₄)

----- (q₅, v₅, a₅, c₅)

- Interprétation des résultats :

Les postures sont illustrées par des courbes de position de robot 2 (Figure 4.16) obtenus d'un régime de fonctionnement dans la station alésage-rectification. Cette dernière est desservie par le robot 1 avec transport des vilebrequins semi-finis des chaînes flexibles (C1-C4) et (C1-C17) vers le convoyeur. Dans la partie cinématique (Figure 4.17) et (Figure 4.18) les vitesses et les accélérations sont illustrées. Et à la fin les courbes dynamiques (Figure 4.19), où on n'a pu déterminer les caractéristiques de vérification des modules à la résistance et à la rigidité ainsi que la fiabilité du robot 2.

Il est donc évident que les 2 chaînes flexibles (C1-C4) et (C1-C17) étudiées sont de résultats différents, si on change de ligne de production. Par contre des forces inertielles, centrifuges et de couplage apparaissent et d'autre part les jeux dû aux frottements et élasticités de toutes origines ne sont plus négligés. Il est donc nécessaire de revoir le rendement des 2 lignes de productions en tenant compte les temps de réalisation, la qualité des produits finis, l'état des surface des vilebrequins usinés, les phénomènes dynamiques et le coût de réalisation des gammes d'usinages proposées dans le chapitre 3.

Dans les cas, des manipulateurs flexibles, Le positionnement réel d'un manipulateur, que ce soit en statique ou en dynamique (poursuit des trajectoires) s'écarte inévitablement et pour différentes causes, de sa position désirée. De même, un manipulateur ne se positionne jamais au même endroit lorsque la même trajectoire est répétée plusieurs fois.

La compensation est incontournable et l'étude d'un modèle des déformations est donc nécessaire; de même l'usure est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces.

CONCLUSION GENERALE

Ce projet étudie un volet de recherche dans le domaine des ateliers flexibles comment représenter la génération de planificateurs des tâches d'usinage, d'assemblage et de manutention dans une cellule flexible de production dans le but de s'initier dans les moyens de production.

Après avoir défini la robotique industrielle, tout en détaillant son historique, ses classifications, et les différents domaines où les robots ont pris leurs places dans les ateliers flexibles afin d'effectuer des tâches plus difficiles.

Le but des applications citées dans notre travail de recherche est de comprendre la contribution des robots manipulateurs dans le domaine de la fabrication mécanique.

Le but de conception est de donner une image quasi-réelle, afin de trouver des solutions rapides pour un choix d'une structure mécanique articulée adéquate. Par ailleurs, on peut l'utiliser pour simuler les mouvements souhaités, avant qu'elle soit opérationnelle sur un site industriel.

Les modèles de transformation entre l'espace opérationnel (dans lequel est définie la situation de l'organe terminal) et l'espace articulaire. (Dans lequel est définie la configuration du robot) sont élaborés.

Le besoin incessant de la pratique du terrain, et particulièrement lorsque l'ensemble des contraintes du processus de fabrication de pièces selon des dessins de définition suggérés à l'étude et qui ont abouti au choix d'une cellule robotisée constituée de 3 postes proposés à l'étude.

L'importance de l'étude d'une cellule de manutention dans le but de répondre aux exigences du marché et aux recommandations de l'assurance. Dont l'application des notions de trajectoire espace et volume de travail des cellules flexibles sont déduits et aux nouveautés qu'elles ont apportées à la production mécanique.

- En conclusion une nouvelle plate-forme de conception de cellules flexibles est proposée.

De ce point de vue, nous avons étudié l'organisation de l'atelier en groupes de machines. Comme solution d'organisation, deux variantes sont suggérées dans l'industrie et des études théoriques sont élaborées.

A savoir le modèle cinématique établi, donne le comportement du système, en déplacements, des vitesses et des accélérations angulaires à un temps désiré sont illustrées dans des figures. Les excitations d'entrée qui pourront être appliquées sur les robots 1, 2 et 3 sont calculées dans le modèle dynamique. Les postures des robots manipulateurs sont illustrées par des différentes courbes des robots obtenus d'un régime de fonctionnement dans une station d'alésage – fraisage et rectification. Cette dernière est desservie par les robots manipulateurs avec une manutention des vilebrequins semi-finis des chaînes flexibles (C1-C4) et (C1-C17) vers le convoyeur afin de les préparer pour les prochaines phases d'usinages. Il est donc évident que les 2 chaînes flexibles (C1-C4) et (C1-C17) sont étudiées et de résultats différents déterminés.

Les perspectives de recherches futures se basent sur l'étude des contraintes qui apparaissent dans les nombreuses liaisons. Ainsi que la compensation est incontournable sur l'étude d'un modèle des déformations ; de même l'usure (Tribologie) est un ensemble complexe de phénomènes difficiles à interpréter, amenant une émission de débris avec perte de masse, de cote, de forme, et s'accompagnant de transformations physiques et chimiques des surfaces...

Il est donc nécessaire de revoir le rendement des 2 lignes de productions en tenant compte les temps de réalisation, la qualité des produits finis, l'état des surface des vilebrequins usinés, les phénomènes dynamiques et le coût de réalisation des gammes d'usinages proposées pour avoir des systèmes qui combinent plusieurs équipements d'usinage différents afin de créer avec succès une nouvelle technologie inexistante en Algérie.

REFERENCES

- [1] C.Pinto, E.Macho, V.Petuya, O.Altuzarra, A.Hernández, Logiciel de simulation pour la caractérisation cinématique de robots spatiaux, Department of Mechanical Engineering, University of the Basque Country, Alameda Urquijo s/n, 48013, Bilbao, charles.pinto@ehu.es, Spain
- [2] H.Khlifi, Proposition de méthodologie de développement d'un service de cloud manufacturing adapté à la fabrication additive, CONFERE'17, Seville, Espagne, 6 et 7 Juillet 2017
- [3] T.Ameur, Cours Construction Mécanique 1, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [4] M.Lajili, Méthodologie de choix d'une architecture de machine-outil 5 axes, Université Clermont Auvergne, CNRS, SIGMA Clermont, Institut Pascal, F-63000 Clermont-Ferrand, France, 23ème Congrès Français de Mécanique Lille, 28 Août au 1er Septembre 2017
- [5] CNC High & Applications, Système CNC Flexium, www.num.com, 2016
- [6] Homag, Centres d'usinage BMG 500/600, © HOMAG Holzbearbeitungs systeme, GmbH, 04/2015
- [7] Motoréducteurs/réducteurs à vis sans fin CHM Extrait – Programme Système© by Nozag – 2015
- [8] J.-P.Cordebois et coll, Fabrication par Usinage, © Dunod, Paris, Nouvelle Présentation 2013
- [9] [C.Barlier](#), L.Ceppetelli, Méthodes et production en usinage, Cateilla, 2014
- [10] A.Beskri, Systèmes de surveillance automatique en usinage : Moyens et méthodes, 21ème Congrès Français de Mécanique, Bordeaux, 26 au 30 août 2013
- [11] Eumach[®], Centre d'usinage : ACRA UMC-1000, <http://www.machinesproduction.fr/https://www.masteels.com/machines/5-axismachines/product/umc-1000>, mise à jour 2013
- [12] Comité Pédagogique National du Domaine Sciences et Technologies, M.E.S.R.S. Algérie
- [13] C.Masclé, W.Wygowski, Fabrication avancée et méthodes industrielles du dossier produit au dossier fabrication, [Presses Internationales Polytechniques](#), 2013

- [14] P. Conesa, Contribution à une structure de gestion en temps réel de cellule flexible de production, Thèse Doctorat en Simulation et méthodologie d'évaluation Université Claude Bernard-Lyon I, Submitted on 6 Aug 2013
- [15] Maria Makarov, Contribution à la modélisation et la commande robuste de robots manipulateurs à articulations flexibles. Applications à la robotique interactive, École Doctorale Sciences et Technologies de l'Information, des Télécommunications et des Systèmes, Supélec, 2013
- [16] W. Khalil, E. Dombre, Bases de la modélisation et de commande des robots manipulateurs de type série, IRCCyN Ecole Centrale de Nantes & LIRMM Université Montpellier, 08 mai 2012
- [17] F. Djougane, Etude conceptuelle d'un robot manipulateur pour l'ENMTP Mémoire de magister en Génie industriel, Université de Batna 2012
- [18] G. Morel, J. Szewczyk & M.A. Vitrani, Comanipulation. In J. Troccaz, éditeur, Robotique Hermes, hermes lavoisier traité systèmes automatisés, édition 2012
- [19] V. Pateloup, Amélioration du comportement cinématique des Machines-Outils UGV, Thèse Doctorat en Génie Mécanique, Université Blaise Pascal – Clermont II, Submitted on 13 Feb 2012
- [20] A. Collignan, J. Pailhes & P. Sebastian, Chapitre d'ouvrage «Design optimization: management of large solution spaces and optimization algorithm selection» dans Proceedings of the IMProVe International conference on Innovative Methods in Product Design, Venice, 2011
- [21] D. Prévost, Modélisation avancée du couple Machine Outil/Commande Numérique dans un contexte UGV pour l'optimisation du calcul de trajectoires multi-axes, Thèse de Doctorat, Génie mécanique, École Normale Supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2011
- [22] A. Olabi, Amélioration de la précision des robots industriels pour UGV, Thèse de l'Université des Arts et Métiers Paris-Tech, 2011
- [23] Desoutter, Industrialtools, Unités de perçage et taraudage à avance automatique www.desouttertools.com, Français LT1212 © Copyright 2010, Imprimé en Europe, 1^{re} édition, Janvier 2010
- [24] H. Huang, B. Li, R. Liu, and Z. Deng, Type synthesis of deployable/foldable articulated mechanisms, In IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010

- [25] S.Zirmi, Conception de montages d'usinage modulaire pour le fraisage, Docteur de l'Université de Grenoble, Génie industriel : Conception et Production, Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG, 2010
- [26] M.Oulevey, Simulation d'un atelier flexible à très haute variabilité, MOSIM'01-Troyes (France), du 25 au 27 avril 2001
- [27] G.Casanova, Ordonnancement Implantation de centres de charges lors d'une production
- [28] Atelier d'usinage, Quenneville Inc., liste des équipements, CWB Certified CSA W47.1, 2003
- [29] Fagor-Automation-Commande-Numerique-C.N.C-8065, 2011
- [30] H.Aladad, Conception du système de fabrication de pièces mécaniques en grand série : formalisation de la configuration géométrique (enveloppe) et cinématique de Machine-Outil Reconfigurable (MOR), Thèse pour obtenir le grade de Docteur de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Spécialité "Mécanique", ParisTech, 2009
- [31] CERATIZIT AustriaGesellschaftm.b.H., Usinage de vilebrequins, E-mail : info.austria@ceratizit.comwww.ceratizit.com, CERATIZIT Luxembourg Sarl, E-mail : info@ceratizit.comwww.ceratizit.com
- [32] J.F.Debongnie, Conception et calcul des éléments de machines, © DEBONGNIE (Jean-François), Liège, Belgium, 2011
- [33] M.Djeghaba, Problèmes de décision dans une cellule de production utilisant la coopération entre robots, DOCTEUR Spécialité : Automatique, L'Université des Sciences et Techniques de Lille Flandres Artois, Mars 1986
- [34] Willemin-Macodel SA Bulletin d'information, N° 1236 www.willemin-macodel.com SIAMS 2018 Halle 1.1 Stand B2/C3
- [35] G.R.Nicolet, Conception et Calcul des Éléments de Machines Copyright © Gaston Nicolet CH-1700, Fribourg, Tout droit réservé, École D'Ingénieurs de Fribourg (E.I.F) Section de Mécanique, revu en 2006
- [36] A.Sebbak, Etude cinématique d'une machine outil à structure parallèle, Mémoire Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013
- [37] A.Hamissi, Modélisation d'un Robot SCARA à structure complexe (Parallèle) destiné à manipuler une sonde échographique, Mémoire de Magister, Institut d'Optique et Mécanique de Précision, Université Ferhat Abbas, Setif

ANNEXES

Annexe 1 :

- Liste des équipements prioritaires

N° fiche	Segmentation	Equipements	Exigences Carsat
PREVENTION DU RISQUE CHIMIQUE			
1	VL Carrosserie et PL	Système de lavage pour pistolets à peinture solvantée	Système d'aspiration diminuant l'exposition aux vapeurs de solvant et évitant tout contact cutané, avec rejet à l'extérieur du bâtiment
2	VL Mécanique et PL	Réseau d'aspiration des gaz d'échappement	Système d'aspiration avec captage des gaz au plus près des pots d'échappement, assurant un rejet efficace des polluants à l'extérieur du bâtiment et doté d'aides à la manutention (potences, rails de transferts, enrouleurs...)
3		Fontaine de dégraissage des pièces	Système d'élimination des graisses agissant de préférence par voie bactériologique pour la fontaine de dégraissage
4		Fontaine mobile de nettoyage de frein	
PREVENTION DES RISQUES MUSCULOSQUELETIQUES			
Système de levage de la caisse évitant le travail à genoux de l'opérateur			
5	VL Carrosserie	Table élévatrice	Déclaration CE de conformité du constructeur, avec aptitude à l'emploi avant mise en service sur produit neuf
Aide au démontage et à la manutention des éléments sous caisse			
6	VL Mécanique et PL	Table élévatrice	Déclaration CE de conformité
7		Vérin de fosse	Déclaration CE de conformité Soupape d'arrêt de sécurité

Aide à la manutention pour les opérations sur pneumatique			
8	VL Mécanique et PL	Lève-roue mobile	Déclaration CE de conformité pour les appareils semi-automatiques dotés de bras d'assistance évitant le port des pneumatiques, pour les opérations sur jantes
9		Démonte-pneu Equilibreuse de roues	Déclaration CE de conformité pour les appareils semi automatique, dotés de bras d'assistance évitant le port des pneumatiques, pour les opérations sur jantes et pour les équilibreuses.
PREVENTION DES CHUTES DE HAUTEUR ET DE PLAIN-PIED			
10	VL Carrosserie et PL	PIRL ou échafaudage roulant	Attestation d'admission à la marque NF
11	PL	Protection fosse	Avec échelle fixe de secours, dans le respect de la recommandation nationale
12	VL Mécanique et PL carrosserie	Systèmes suspendus (enrouleurs et bras multi énergie)	

Annexes 2 :

- Caractéristiques d'un cahier de charges :

- Définir précisément le problème ou la situation à améliorer.
- Identifier clairement les besoins de l'entreprise.
- Préciser les objectifs de l'intervention et les résultats attendus.
- Etablir les règles et les exigences de base pour la réalisation de l'intervention.
- Obliger la société-conseil à préciser les services à fournir et les biens livrables.
- Présenter les éléments d'une entente pouvant lier les deux parties.
- Servir de document de référence pour éviter les problèmes d'interprétations.
- Définir les responsabilités et les rôles des parties engagées dans l'intervention.
- Déterminer les modalités de règlement en cas de litiges.

- Contenu d'un cahier de charges :

- Bref historique de l'entreprise.
- Description du contexte actuel.
- Définition du problème.
- Objectifs visés par l'intervention (les résultats attendus).
- Règles d'acquisition du cahier des charges.
- Instructions aux soumissionnaires.
- Schéma proposé de l'offre de service.

- Caractéristiques d'un atelier flexible :

- Les moyens de production doivent être capables de traiter plusieurs types de pièces, donc de s'adapter à de nouvelles gammes de produits d'une manière automatique et sans que cela ne perturbe la production globale (limitation des retards,...)
- Les moyens de transport sont flexibles dans le sens d'un cheminement non figé dans l'atelier, d'une possibilité de manutention de produits divers, de stockage, de déstockage...
- L'approche informatique dans la conduite de l'atelier doit être modulaire afin de permettre une intégration facile d'autres éléments, sans remettre en cause la structure déjà implantée.

La spécification de l'ensemble de ces éléments, organisationnels matériels et informatiques est arrêtée dans les différentes phases d'étude de l'atelier.

Il existe en fait 2 phases. La première est une phase de conception et est relative aux structures et moyens matériels. La seconde est une phase de conduite, et correspond au monde de gestion de l'atelier (planification, ordonnancement, gestion des stocks, diagnostic de pannes...).

Annexes 3 :

****la matrice de transformation homogène****

syms θ d α

```
A=[cos( $\theta$ )      -cos( $\alpha$ )*sin( $\theta$ )      sin( $\alpha$ )*sin( $\theta$ )      a*cos( $\theta$ )
    sin( $\theta$ )      cos( $\alpha$ )*cos( $\theta$ )      -sin( $\alpha$ )*cos( $\theta$ )      a*sin( $\theta$ )
    0              sin( $\alpha$ )              cos( $\alpha$ )              d
    0              0                      0                      1];
```

syms θ L1

A1=subs(A, {a, α , d, θ }, {L1, 0, 0, θ 1})

syms θ L2d2

A2=subs(A, {a, α , d, θ }, {L2, 0, -d2, θ 2})

symsd3

A3=subs(A, {a, α , d, θ }, {0, 0, -d3, 0})

```

At=simplify(A1*A2*A3)

*****polynôme de degré 3*****
symsto
symstf
symst
symsa0
symsa1
symsa2
symsa3
to=0
tf=0.3
A=[a to (to).^2 (to).^3;0 1 2*(to) 3*((to).^2);1 tf tf.^2 tf.^3;0 1
2*tf 3*(tf.^2)]
inv(A)
a=[20 0 30 0]
a'
inv(A)*a'
*****courbe de vitesse, accélération et déplacement angulaire*****
*****robot 1*****
*****polynôme de degré 3*****
t=0:6;
theta1=(20+83.3333*t.^2-92.5926*t.^3);
dtheta1=(2*83.3333*t.^1-3*92.5926*t.^2);
ddtheta1=(2*83.3333-2*3*92.5926*t.^1);
plot(t,theta1,t,dtheta1,t,ddtheta1/2)
grid
theta2=(5+166.6667*t.^2-185.1852*t.^3);
dtheta2=(2*166.6667*t.^1-3*185.1852*t.^2);
ddtheta2=(2*166.6667-2*3*185.1852*t.^1);
plot(t,theta2,t,dtheta2,t,ddtheta2/2)
grid
*****courbe de vitesse, accélération et déplacement angulaire*****
*****robot 3*****
*****polynôme de degré 3*****
t=0:9;
theta1=(20+37.0370*t.^2-27.4348*t.^3);
dtheta1=(2*37.0370*t.^1-3*27.4348*t.^2);
ddtheta1=(2*37.0370-2*3*27.4348*t.^1);
plot(t,theta1,t,dtheta1,t,ddtheta1/2)
grid
theta2=(5+74.0741*t.^2-54.8697*t.^3);
dtheta2=(2*74.0741*t.^1-3*54.8697*t.^2);
ddtheta2=(2*74.0741-2*3*54.8697*t.^1);
plot(t,theta2,t,dtheta2,t,ddtheta2/2)
grid
*****calcul du couple, énergie cinétique et potentielle de 2 postures*****
t=0:1;
t1=(180*t.^2-120*t.^3)*pi/180;
t2=(-90*t.^2+60*t.^3)*pi/180;
dt1=(2*180*t.^1-3*120*t.^2)*pi/180;
dt2=(-2*90*t.^1+3*60*t.^2)*pi/180;
ddt1=(2*180-2*3*120*t.^1)*pi/180;
ddt2=(-2*90+2*3*60*t.^1)*pi/180;
c1=cos(t1);
s1=sin(t1);
c12=cos(t1+t2);
s12=sin(t1+t2);
c2=cos(t2);
s2=sin(t2);
m1=15;

```

```

m2=15;
g=9.81;
l1=1;
l2=1;

Énergie cinétique
K1=0.5*m1*l1.^2*dt1.^2;
K2=0.5*m2*l1.^2*dt1.^2+0.5*m2*l2.^2*(dt1+dt2).^2+m2*l1*l2*(dt1.^2+dt1.*dt2).*c
2;
K=K1+K2;
plot(t,K)
Énergie potentielle
V1=m1*g*l1*s1;
V2=m2*g*(l1*s1+l2*s12);
V=V1+V2;
plot(t,V)
Couple de l'articulation 1
t01=m2*l2.^2*(ddt1+ddt2)+m2*l1*l2*c2.*(2*ddt1+ddt2)+(m1+m2)*l1.^2*ddt1-
m2*l1*l2*s2.*dt2.^2-2*m2*l1*l2*s2.*dt1.*dt2+m2*l2*g*c12+(m1+m2)*g*c1;
plot(t,t01)
Couple de l'articulation 2
t02=m2*l1*l2*c2.*ddt1+m2*l1*l2*s2.*dt1.^2+m2*l2*g*c12+m2*l2.^2*(ddt1+ddt2);
plot(t,t02);

```

Annexes 4:

Synthesis of an Automatic Production Line

Benmisra A. †, Belaidi A. *, Allali A. **, Moufida Irki **.

† abdelkader.benmisra@yahoo.fr : Department of Mechanics, faculty of technology,
Soumaâ-Blida road Mailbox 270, University of Blida 1.

* Department of Hydrocarbons Transportation, faculty of hydrocarbons and chemistry,
Avenue of Independence, 35000-Boumerdès, M'hamedBougara University, Boumerdès.

** : Aircraft Laboratory, University of Blida 1,
Soumaâ-Blida road Mailbox 270, yasminallali2011@yahoo.fr & ing_moufida@yahoo.fr.

Summary

This work leads to flexible cells for the production of complex pieces of high technicality, justified in the field of robotics [2], and then they will be expanded to develop new methods for calculating industrial robots for lifting parts in flexible workshops [9,11]. Indeed, the translation or rotation movement regulates the geometry of the surfaces and the dimensions of the work piece in the space of the spots [13]. Typical variants of the operation of lifting robots are determined in the simulation in order to carry out some operations in the standard chains of machining [14].

At the end of these works, the postures of the organ of the execution are defined as well as speeds necessary for the operation, accelerations and energies. Introduced notions are illustrated [1, 7, 8] by simulation from the development of lifting and handling robots [9] in industrial manufacture.

Synthèse d'une Chaîne Automatique de Fabrication

Résumé

Ces travaux débouchent sur les cellules flexibles de réalisation des pièces complexes de haute technicité, justifiées dans le domaine de la robotique [2], ensuite ils seront élargis à l'élaboration de nouvelles méthodes de calcul des robots industriels de levage des pièces dans les ateliers flexibles [9,11]. En effet, le mouvement de translation ou de rotation assure par réglage la géométrie des surfaces et les dimensions de la porte pièce dans l'espace des taches [13]. Des variantes-types de fonctionnement des robots de levage sont déterminés dans la simulation afin de réaliser quelques opérations dans les chaînes-types d'usinage [14].

A l'issue ces des travaux, les postures de l'organe de l'exécution sont définies ainsi que vitesses nécessaires au fonctionnement, accélérations et énergies. Les notions introduites sont illustrées [1, 7, 8] par une simulation issue du développement des robots de levage et manutention [9] en fabrication industrielle.

References

- [1] CNC High & Applications, Système CNC Flexium, www.num.com, 2016.
- [2] Homag, Centres d'usinage BMG 500/600, © HOMAG Holzbearbeitungs systeme, GmbH, 04/2015.
- [3] Desoutter, Industialtools, Unités de perçage et taraudage à avance automatique www.desouttertools.com, Français LT1212 © Copyright 2010, Imprimé en Europe, 1^{re} édition, Janvier 2010.
- [4] A. Sebbak, Etude cinématique d'une machine outil à structure parallèle, Mémoire Master Professionnel, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2013.
- [5] Willemin-Macodel SA Bulletin d'information, N° 1236 www.willemin-macodel.comSIAMS 2018 Halle 1.1 Stand B2/C.
- [6] Eumach[®], Centre d'usinage : ACRA UMC-1000, <http://www.machinesproduction.fr/https://www.masteels.com/machines/5-axis-machines/product/umc-1000>, mise à jour 2013.

- [7] G. Morel, J. Szewczyk & M.A. Vitrani., Comanipulation. In J. Troccaz, éditeur, Robotique Hermes, hermes lavoisier traité systèmes automatisés, édition 2012.
- [8] A. Collignan, J. Pailhes & P. Sebastian, Chapitre d'ouvrage « Design optimization: management of large solution spaces and optimization algorithm selection » dans Proceedings of the IMProVe International conference on Innovative Methods in Product Design, Venice, 2011.
- [9] A. Olabi, Amélioration de la précision des robots industriels pour UGV, Thèse de l'Université des Arts et Métiers Paris-Tech, 2011.
- [10] H. Huang, B. Li, R. Liu, and Z. Deng, Type synthesis of deployable/foldable articulated mechanisms, In IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, 2010.
- [11] Fagor-Automation - Commande- Numerique- C.N.C-8065, 2011.
- [12] Charles Pinto, Logiciel de simulation pour la caractérisation Cinématique de robots spatiaux, (1) Department of Mechanical Engineering. University of the Basque Country. Alameda Urquijo s/n, 48013 Bilbao, Spain. +34 946 014 089, Fax: +34 946 014 215, e-mail: charles.pinto@ehu.es.
- [13] H. Khelifi, Proposition de méthodologie de développement d'un service de cloud manufacturig adapté à la fabrication additive, CONFERE'17, Seville, Espagne, 6 et 7 Juillet 2017.
- [14] Van Hoa Nguyen. Synthèse de tolérance pour la conception des systèmes mécatroniques : Approche par bond graph inverse. Automatique / Robotique. INSA de Lyon, 2014.

Notification of Abstract Acceptance

2019 2nd International Conference on Advanced Control, Automation and Robotics
(ICACAR 2019)

Phuket, Thailand on Jan 18-20, 2019

www.icacar.org



Paper ID#: [AR1003]

Format (oral or poster): [Oral]

Title of Paper or Poster: [Synthesis of an Automatic Production Line]

Dear Benmisra A. , Belaidi A., Allali A and Moufida Irki,

Thank you for submitting your abstract for presentation at 2019 2nd International Conference on Advanced Control, Automation and Robotics (ICACAR 2019), to be held in Phuket, Thailand, on Jan. 18-20, 2019.

The technical committee have reviewed your abstract and found that it meets acceptance requirements set forth by the Program Committee. Hence, we are pleased to inform you that your abstract has been accepted by the Program Committee of the ICACAR 2019, please check the review comments in attachment.

Congratulations - you may begin making your conference plans.

The preliminary program, venue information will be posted on website: www.icacar.org. Please compile and return the [ICACAR Registration Form](#) to icacar@iased.org. ICACAR 2019 conference committee will provide confirmation when your registration and fees (payment link can be found in registration form) have been received and processed. Please finish the registration before **October 10th, 2018**.

If the above paper is registered on time, You will be able to present your abstract in a 15 minute time slot during the conference, paper can be prepared in PDF, or PPT version, the official language of ICACAR 2019 is English.

Thank you for your interests, and we look forward to your participation in the ICACAR 2019.

Yours sincerely,

ICACAR 2019

Organizing Committee September 25, 2018

