MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE Dr. YAHIA FERES
DE MEDEA
FACULTÈ DES SCIENCES ET DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT GENIE MECANIQUE



Mémoire de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de
Master en Mécatronique

Conception Mécanique et modélisation d'un système Robot-Vision

Présenté par :

-Boukhari Abderrezak

-Slimani Abdelghani

Dirigé par :

Dr Kara Reda

Année 2011/2012

Remerciements

Nous remercions le dieu tout puissant de nous avoir donné le savoir et l'école l'opportunité de pouvoir poursuivre nos études et de choisir un métier aussi noble.

Nous exprimons nos sincères remerciements et notre profonde gratitude à : M. Kara Reda pour l'aide précieuse qu'il nous apporté tout au long de la préparation de ce mémoire aussi pour les conseils qu'il n'a pas cessé de nous prodiguer.

Nous adressons également nos vifs remercîments et notre profonde gratitude :

Au président et aux membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font, en acceptant d'évaluer notre travail.

Aux Bengharbia, said,boumahdi d'avoir mis a notre entière disposition tous les moyens nécessaires à l'accomplissement de ce projet.

Nous remercions aussi tous les professeurs et les membres d'encadrement qui nous ont soutenu durant notre formation et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire

Dédicace

Je dédie ce modeste travail en témoignage de toute mon affection et mon respect :

A mon père, pour son sacrifice.
A ma très chèremère.

A mes chèresfrères : Miloud, Mahdjoub, Abdelkader, toufik, Rédha, Mohamed,

A mes Chères sœurs.

A mon Amie soumia.

A tous mes amis en particulier : Dr Sabih, Nacer. Rahime Hamza. Hichem, yakoub

A mon binome Abdelgfhani et sa fmille
A tous mes enseignants depuis mon premier pas dans l'école

A tous mes camarades de la promotion 2012

Abderrezak

Dédicace

Je dédie ce modeste travail
A mes très chères parents qui m'ont toujours soutenu

A ma grande famille

A ma très chèremère.

A mon chère frère :bilale

A mes Chères sœurs.

A tous mes amis en particulier : Bilale, hassen,Amine,Ali

A mon collegue et binome Abderrezak et sa famille
A tous mes enseignants depuis mon premier pas dans l'école

A tous ceux et celles quej'aime.

A tous mes camarades de la promotion 2012

Abdelghani

Table des matières

Remerciements **I**
Dédicace **II**
Table des matières **IV**
Liste des figures et tableaux **VIII**

Introduction générale **1**
1 Chapitre I : Calibration d'une caméra CCD **3**
1.1 Introduction **3**
1.1.1 Historique **3**
1.1.1.1 Les caméras films. **3**
1.1.1.2 Les caméras numériques **4**
1.2 L'influence des paramètres de la caméra sur les caractéristiques des images **4**
1.2.1 principe de la chambre noire. **4**
1.2.2 Les observations. **5**
1.3 Les différents types des caméras. **5**
1.3.1 Caméra à tube. **5**
1.3.2 Caméra CCD 'charged coupled devise'. **5**
1.3.2.1 Principe de fonctionnement d'une caméra CCD. **5**
a) Récepteurs a transferts de charge'CCD'. **5**
b) Définitions des pixels. **6**
c) Processus de lecture. **6**
1.4 Les avantages et les inconvénients d'une caméra CCD **7**
1.4.1 Les avantages. **7**
1.4.2 Les inconvénients. **7**
1.5 Modèle d'une caméra CCD. **7**
1.5.1 Introduction. **7**
1.5.2 Le modèle de sténopé **7**
1.5.3 Utilisation des coordonnées homogènes **8**
1.5.4 Le modèle de pinhol **9**
1.5.5 Paramètres extrinsèques de la caméra. **10**
1.5.5.1 Transformation entre le repère du monde et le repère caméra . . . **10**
1.5.6 Les paramètres intrinsèques **12**
1.5.6.1 Transformation entre le repère caméra et le repère capteur . . . **12**
1.5.6.2 Transformation entre le repère capteur et le repère image. **12**
1.6 Modèle sténopé complet sans distorsion. **13**
1.7 correction des distorsions. **15**

Table des matières

1.7.1	Les distorsions radiales	**15**
1.7.2	Les distorsions tangentielles.	**16**
1.7.3	Le modèle complet avec les deux types de distorsion.	**18**
1.8	Conclusion	**18**
2	**Chapitre II :Modélisation du robot PUMA 560**.	**19**
2.1	Modélisation du robot PUMA 560.	**19**
2.1.1	Introduction.	**19**
2.1.2	Présentation du robot PUMA 560.	**19**
2.2	Modélisation géométrique.	**21**
2.2.1	Modélisation géométrique direct.	**21**
2.2.1.1	Définitions.	**21**
2.2.1.2	Méthode générale de calcul du modèle géométrique direct	**21**
a)	Méthode des matrices 3x3	**21**
b)	Méthode des matrices 4x4.	**22**
2.3	Méthode de Denavit- Hartenberg	**22**
2.3.1	Calcule le modèle géométrique direct.	**22**
2.3.2	Paramètres de Denavit-Hartenberg modifiés.	**23**
2.3.3	L'expression des matrices de passage homogènes H_i^{i+1}.	**23**
2.4	Modélisation de notre robot 'PUMA 560'.	**26**
2.4.1	Modèle géométrique direct du robot	**26**
2.4.1.1	Paramètres géométriques.	**26**
2.4.2	Expression de la matrice de passage homogène H_i^{i+1}.	**27**
2.5	Modèle géométrique inverse(MGI).	**29**
2.5.1	Equations de position.	**30**
2.5.2	Equations d'orientation.	**31**
2.6	Application de la méthode de paul sur notre robort.	**31**
2.6.1	Equations de position.	**31**
2.6.2	Equations d'orientation.	**35**
2.7	Conclusion.	**38**
3	**Chapitre III : Conception mécanique**.	**39**
3.1	Etude mécanique.	**39**
3.2	Etude théorique.	**39**
3.3	Introduction.	**39**
3.4	La motorisation	**39**
3.4.1	Choix les caractéristiques du moteur_.	**40**
a)	Moteur1.	**40**
b)	Moteur2+3.	**40**
c)	Moteur4+5+6.	**41**
3.5	Choix du type de réducteur.	**41**
3.5.1	Schéma cinématique.	**42**
3.5.2	Calcul de la résistance pratique à l'extension	**43**

Table des matières

3.6		Etude cinématique	**43**
3.6.1		Le rapport de réducteur	**43**
3.6.2		Calcul nombre des dents.	**43**
	a)	Pour le moteur 1.	**43**
	b)	pour le moteur 2.	**44**
	c)	Pour le moteur 3.	**44**
3.6.3		Calcul des modules.	**45**
	a)	Cas d'un engrenage cylindrique.	**45**
	b)	Cas d'un engrenage conique.	**45**
3.7		Calcul les diamètres des pignons.	**46**
3.8		Etude dynamique.	**46**
3.8.1		pignon 1 et 2 cylindriques	**46**
	a)	La force tangentielle.	**46**
	b)	La force radiale.	**47**
	c)	La force appliquée sir la roue 1	**47**
	d)	La force appliquée sur la roue 2.	**47**
	e)	Calcul des poids	**47**
3.8.2		Pignons 3 et 4 cylindriques.	**47**
	a)	La force tangentielle.	**48**
	b)	La force radiale.	**48**
	c)	La force appliquée sur la roue 3.	**48**
	d)	La force appliquée sur la roue 4.	**48**
	e)	Calcul des poids.	**48**
3.8.3		Caractéristiques des roues cylindriques à dentures droite normals.	**49**
3.8.4		Pignons 5 et 6 'conique'	**51**
	a)	Calcul du nouveau couple.	**51**
	b)	La force tangentielle.	**51**
	c)	La force radiale.	**52**
	d)	La force axiale.	**52**
	e)	Calcul de la largeur génératrice primitive	**52**
	f)	Calcul des poids.	**53**
3.8.5		Pignons 7 et 8 'conique'.	**53**
	a)	Calcul du nouveau couple.	**53**
	b)	La force tangentielle.	**53**
	c)	Force radiale	**53**
	d)	Force axiale.	**54**
	e)	Calcul de la largeur génératrice primitive	**54**
	f)	Calcul des poids	**54**
	g)	Caractéristiques d'un engrenage conique à des axes perpendiculaires	**55**
	h)	Caractéristique des engrenages coniques.	**56**
3.9		Calcule de résistance de matériau RDM.	**57**
3.9.1		Premier arbre.	**57**

Table des matières

3.9.1.1 Plan Horizontal. **57**
a) Calcul de la réaction. **57**
b) Calcul du moment de flexion Horizontal. **57**
3.9.1.2 Plan vertical. **58**
a) Calcul de la réaction. **58**
b) Calcul du moment de flexion vertical. **58**
c) Calcul du moment de torsion. **58**
d) Calcul du diamètre D1. . . . . **58**
3.9.2 Deuxième arbre **59**
3.9.2.1 Plan horizontal. **59**
a) Calcul de la réaction. **59**
b) Calcul du moment de flexion horizontal. **59**
c) Plan vertical. **59**
d) Calcul du moment de flexion vertical. **59**
e) Moment de flexion idéal. **60**
f) Calcul du diamètre D2. . . . . **60**
3.10 Les Codeurs optiques. **60**
3.10.1 Introduction. **60**
3.10.2 Définition d'un codeur optique. **60**
3.10.3 Principe. **60**
3.10.4 Le codeur incrémental(ou générateurs d'impulsions). **61**

4 **Chapitre V :Validation des modèles des caméras et du Robot** . **63**
4.1 Introduction. **63**
4.2 Résultats expérimentaux pour les deux cameras son distorsions. . **63**
4.2.1 Caméra 1 . . . . . **63**
4.2.2 Caméra 2 . . .. **65**
4.3 Résultats expérimentaux pour les deux cameras avec distorsion. **67**
4.3.1 Tests des distorsions avec la Caméra 1. . . . . **67**
a) Interprétation. **71**
4.3.2 Tests de distorsions avec la Caméra 2 . . . . . **72**
a) Interprétation. **76**
4.4 Résultats expérimentaux pour le modèle géométrique du robot . . **76**
4.5 Conclusion **80**
Conclusion générale **81**
Bibliographie **83**
Annexes **84**

Liste des figures et Tableaux

Figure (1.1)	**La chambre noire**	**4**
Figure (1.2)	fonctionnement d'une caméra	4
Figure (1.3)	Les pixels	6
Figure (1.4)	Les repères utilisé pour une caméra	8
Figure(1.5)	Principe modèle de pinhol	9
Figure(1.6)	Les rotations et translations	10
Figure(1.7)	Effets des distorsions radiales	15
Figure(1.8)	Effets des distorsions tangentielles	17
Figure (2.1)	Schéma du robot PUMA 560	20
Figure (2.2)	Les différents repères d'un robot a structure ouverte simple	21
Figure (2.3)	Paramétrage de Denavit-Hartenberg modifié	23
Figure (2.4)	Définition du repère de robot PUMA 560	26
Figure (2.5)	La chaine cinématique	30
Figure (3.1)	Schématisation cinématique de PUMA 560 (train d'engrenage)	42
Figure (3.2)	Capteur optique incrémentale	61
Figure (3.3)	Capteur optique incrémentale	62
Figure (4.1)	Représentations de la projection des points fournis à la caméra 1	64
Figure (4.2)	Représentions de la projection des points fournis à la caméra 2	65
Figure (4.3)	Représentation des résultats de la projection avec distorsions	67
Figure (4.4)	Représentation des résultats de la projection avec distorsions	68
Figure (4.5)	Représentation des résultats de la projection avec distorsions	69
Figure (4.6)	Représentation des résultats de la projection avec distorsions	70
Figure (4.7)	Représentation des résultats avec distorsions	71
Figure (4.8)	Représentation des résultats avec distorsions	72
Figure (4.9)	Représentation des résultats avec distorsions	73
Figure (4.10)	Représentation des résultats avec distorsions	74
Figure (4.11)	Le Robot PUMA 560 en Position initiale	76
Figure (4.12)	Le Robot PUMA 560 en position N°1	77

Figure (4.13)	Le Robot PUMA 560 en position N°2	78
Tableau (1.1)	Tableau des observations	5
Tableau (2.1)	Paramètre de Denvit-Hartenberg du robot PUMA 560	27
Tableau (3.1)	Caractéristique des roues cylindrique à denture droite normale	49
Tableur (3.2)	Caractéristique des roues cylindrique à denture droite normale (1,2),(3,4):	51
Tableau (3.3)	Caractéristique d'un engrenage conique à des axes perpendiculaire	55
Tableau (3.4)	Caractéristique des engrenages coniques (5,6,7,8)	57
Tableau (4.1)	Résultats de modèle de sténopé direct avec la caméra1	64
Tableau (4.2)	Résultats du model sténopé inverse avec la caméra1	64
Tableau (4.3)	Résultats du model sténopé inverse avec la caméra2	65
Tableau (4.4)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra2	66
Tableau (4.5)	Valeurs des facteurs de distorsions K et P utilisées	67
Tableau (4.6)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (1 pixel)	67
Tableau (4.7)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (5 pixels)	68
Tableau (4.8)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 10 pixels)	69
Tableau (4.9)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (50 pixels)	70
Tableau (4.10)	Erreurs pour les différents types de distorsions	71
Tableau (4.11)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra 2 (1 pixels)	72
Tableau (4.12)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra2 (5 pixels)	73
Tableau (4.13)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra2 (10 pixels)	74
Tableau (4.14)	Résultats du model sténopé direct avec la caméra2 (50 pixels)	75
Tableau (4.15)	Erreurs pour les différents types de distorsions	76
Tableau (4.16)	valeurs expérimentales	76
Tableau (4.17)	valeurs expérimentales	76

Introduction générale

Les performances telles que l'infatigabilité, la précision et la rapidité poussent sans cesse l'homme à développer et à concevoir des systèmes capables de se substituer à ses fonctions, d'abord motrice, puis sensorielle et intellectuelles. Bien que cette quête présente par essence un caractère imaginaire, les avancées technologiques et industrielles en matière d'automatisation sont bien réelles, marquées en particulier par l'essor considérable de la robotique dans la mise en œuvre des procédés de fabrication.

Durant des années, les robots industriels se sont concentrés essentiellement sur la réalisation de tâches parfaitement définies au préalable. Ils sont destinés principalement à des utilisations industrielles de manutention et sur les longues lignes d'assemblage, de soudure ou de peinture. Ils sont parfaitement adaptés à des tâches répétitives qu'ils accomplissent avec précision du moment que les conditions de fonctionnement restent les mêmes. Les modes d'utilisation de ces robots demeurent ainsi peu flexibles. La plupart sont programmés par un opérateur expérimenté. Dès lors, lorsqu'un des paramètres du système est modifié, le fonctionnement du robot n'est plus assuré. Cette incapacité à interagir rapidement et efficacement à des changements imprévisibles de leur environnement extérieur limite leur souplesse ainsi que leur champ d'action.

Classiquement, les robotssont dotés de capteurs proprioceptifs dont le rôle est de fournir des informations sur leur état interne. Mais depuis quelques années déjà, les avancées technologiques ont permis de doter les nouvelles générations de robots de capacités sensorielles nouvelles. Ils leur ont permis d'accéder à des informations sur le monde environnant. Dèslors, ces robots se sont vus affecter des tâches plus complexes dans des environnements partiellement, voire totalement inconnu. Ce type de dispositif sensoriel est appelé capteurs extéroceptifs. Un des capteurs extéroceptifs fournissant la plus grande richesse d'informations est la caméra vidéo.

Au travers de ces considérations, le problème général que nous traitons dans ce travail est essentiellement la conception mécanique d'un robot manipulateur série à six (06) degrés de liberté de type ***PUMA 560***. Au-delà des dimensions des axes et de quelques caractéristiques mécaniques simples que l'on retrouve dans la littérature, nous avons mis l'accent sur le calcul des taux de réductions, des moments que subit chaque axe au cours d'un mouvement ainsi que le dimensionnement de chaque pièce qui constituent la structure.

Afin de compléter ce travail, nous avons voulu fournir des outils en labordantdesmodèles

mathématiques du robot ***PUMA 560***et du système de vision (caméra CCD) de sorte à ce que, dans le futur, on puisse l'asservir en tenant compte de son environnement extérieur (en développant bien sûr des contrôleurs adéquats).

Par conséquent ce mémoire est organisé en quatre chapitres :

lepremier chapitre représente un descriptif et une synthèse d'ensemble du fonctionnement physique (optique) d'une caméra **CCD**. Ce qui nous a permis d'établir des relations mathématiques qui traduisent la transformation des coordonnées d'un point dans l'espace cartésien en coordonnées dans le plan images. Par ailleurs, nous avons mis en exergue un phénomène physique qui influe sur cette transformation à savoir le phénomène de distorsion optique et nous l'avons introduit dans nos modèles,

lessecond chapitre est d'une part, une introduction aux concepts fondamentaux utilisés dans le domaine de la robotique et d'autre part, notre travail de modélisation mathématique du robot manipulateur série ***PUMA 560***. Les deux méthodes les plus utilisées en robotique pour l'élaboration de ces modèles mathématiques y sont présentées et leur application sur le robot ***PUMA 560***y estdétaillée,

letroisième chapitreconstitue l'apportessentiel de notre travail. En effet, nous avons effectué une étude exhaustive de la mécanique du robot **PUMA 560**. Nous avons calculé les différents couples et l'ensemble des forces exercés sur la structure mécanique du robot ainsi que le dimensionnement de l'ensemble des pièces, des engrenages et des moteurs qui constituent le ***PUMA 560***,

lequatrième chapitre sera pour nous l'occasion d'évaluer et de valider l'ensemble des modèles mathématiques que nous avons implémenté sous Matlab. Pour cela, une série d'expériences y est présentée.

Enfin, une **conclusion** nous permettra de résumer l'ensemble des travaux réalisés dans ce mémoire. Nous terminerons par quelques perspectives envisageables dans un futur proche.

CHAPITRE I :

Calibration d'une caméra CCD

Calibration d’une caméra CCD

1.1Introduction

Une **caméra** est un appareil de prise de vues animées utilisé dans les domaines du cinéma, de la Télévision et de l’industrie.
Ce nom vient du mot latin signifiant "chambre", qui est employé dans ce contexte pour désigner la chambre photographique.

1.1.1Historique

Les débuts du cinéma amateur datent de 1922 : l'invention du 9,5 mm suivie par l'apparition de la caméra *Pathé Baby* l’année suivante permet l’avènement de caméras très compactes et faciles à charger.
Le 16 mm, qui apparaît en 1923, permet de disposer d’un matériel encore plus compact et de rendre le coût de la pellicule plus attrayant aussi bien pour les professionnels que pour le public.
Kodac lance le 8 mm, un format encore plus réduit, mais dont la petite taille nuit à la qualité de l'image.
En 1965, l'invention du super-8 permet d’agrandir l'image et de faciliter le chargement de film.
C’est dans les années 1970 qu’il est devenu possible d'enregistrer le son simultanément à l’image, sur une pellicule comportant une piste magnétique.
La caméra vidéo permettant d’enregistrer les images et le son de manière synchrone sur bande magnétique a d’abord été utilisée uniquement par les professionnels de la télévision.
Il faut attendre 1985 pour que le prix de ce matériel vidéo devienne accessible au grand public et que les caméras de ce type et les magnétoscopes remplacent les caméras super-8 et les projecteurs.
Aujourd’hui, alors que l’usage familial de la vidéo s’est généralisé, les professionnels du cinéma utilisent presque toujours des caméras film.

1.1.1.1Les caméras films

Le fonctionnement d’une caméra film repose sur le principe de la photographie,
L’appareil impressionne 24 images par seconde sur un film qu'il faut développer et

éventuellement tirer, avant de pouvoir le visionner à l'aide d'un projecteur, Ce type de caméras se charge donc à l'abri de la lumière.

1.1.1.2Les caméras numériques

Dans les caméras numériques, les rayons lumineux de la scène filmée passent au travers d'un objectif optique frappent un capteur sensible CCD. [1]

1.2L'influence des paramètres de la caméra sur les caractéristiques des images

1.2.1Principe de la chambre noire

La chambre noire est une boite opaque dans une face est translucide (verre dépoli, papier calque) et dont la face opposée est percée d'un petit trou appelé sténopé.

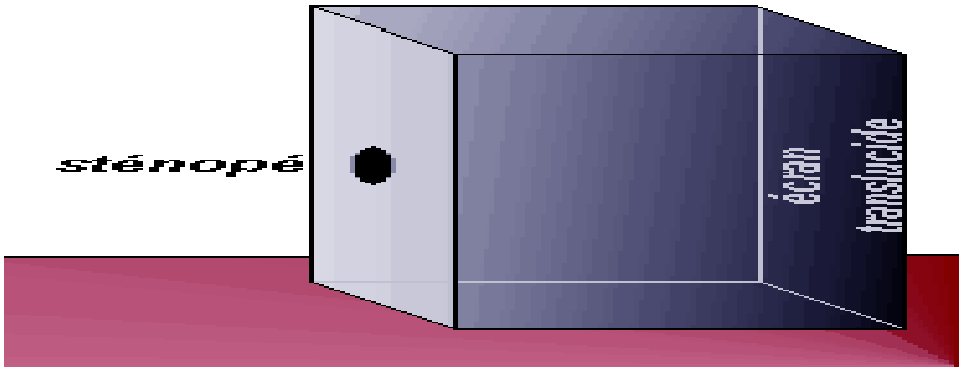


Figure1.1 : Chambre noir

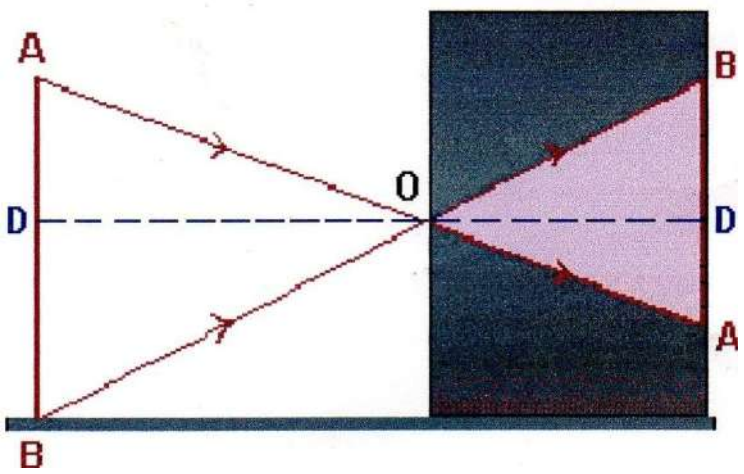


Figure 1.2 : fonctionnement d'une caméra

1.2.2Les observations

	CARACTERISTIQUES DE L'IMAGE			
PARAMETRES	**A'B'**	**Position**	**Netteté**	**Luminosité**
DO augmente	Diminue	renversée	Augmente	Diminue
DO diminue	Augmente	renversée	Diminue	Augmente
D'O augmente	Augmente	renversée	discutable!	Diminue
D'O diminue	Diminue	renversée	discutable!	Augmente
O augmente	Augmente	renversée	Diminue	Augmente
O diminue	Diminue	renversée	Augmente	Diminue

Tableau 1.1 : Tableau des observations [2]

1.3Les différents types des caméras :

Généralement il ya deux types de cameras

1.3.1Caméra à tube :

Elles sont composées d'une cible photoconductrice qu'explore un faisceau.

L'exploration se fait ligne par ligne. A chaque ligne correspond en sortie un signal analogique proportionnel à l'intensité. [3]

1.3.2Caméra CCD "Charged Coupled Device"

Elles sont constituées par un assemblage de photodiodes, chacune d'elles délivre une intensité proportionnelle en un point de l'image Apple pixel. L'avantage de ce type de cameras est qu'elles produisent un signal déjà échantillonner spatialement pour isoler chaque pixel.

1.3.2.1Principe de fonctionnement d'une caméra CCD

a) Récepteurs à transferts de charge (CCD)

Le détecteur CCD, assure la conversion d'un signal lumineux en un signal électrique. Cette technique introduite en 1969 est en usage en astronomie depuis la fin des années 70, fournissant des détecteurs pour les domaines visible, infrarouge et proche UV.

Le fonctionnement d'un détecteur CCD peut être ainsi résumé :

-Chaque pixel de la matrice CCD correspond à un élément semi-conducteur en sandwich dans un condensateur électrique.

-Un photon incident crée un photoélectron, lorsqu'il apporte à un électron du matériau semi-conducteur l'énergie nécessaire pour franchir le seuil énergétique.

-Les photoélectrons sont stockés dans le puits de potentiel qu'est le pixel convenablement polarisé.

-La lecture de ces photoélectrons est commandée par polarisation via des transistors à effet de champ. Elle a lieu soit directement, un obturateur cachant la source, Soit par transfert de trame. Dans ce dernier cas, une moitié de la surface du CCD est réservée à la collecte du signal ; l'autre moitié n'est jamais éclairée, mais recueille les photoélectrons de la partie réceptrice, avant la lecture complète et le transfert des charges vers l'étage d'amplification.

b) Définitions des pixels

Une caméra CCD comprend des lignes et des colonnes, définissant les pixels. Le principe de lecture d'une CCD conduit à définir les bornes des colonnes par un dopage p gravé dans le silicium. En revanche, les bornes des lignes sont définies par une polarisation commandée. Le puits de potentiel qu'est un pixel est statique dans la phase d'acquisition du signal scientifique, puis variable pendant la lecture des pixels.

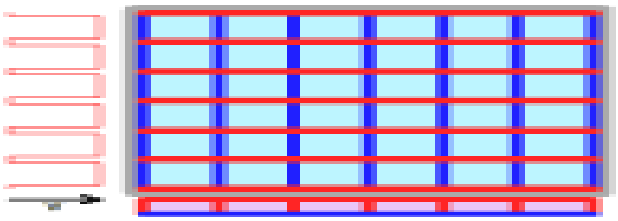


Figure1.3 : **Les pixels**

c) Processus de lecture :

Les étapes de l'enregistrement et de la lecture d'une image CCD sont décrites dans l'animation ci-jointe :

-Durant la pose, les pixels se remplissent peu à peu en photoélectrons. .

-La variation du potentiel définissant les lignes du CCD conduit au transfert, ligne par ligne, vers le registre (grisé).

-Le registre transfère les photoélectrons vers la zone de lecture (gris foncé), pour charger un condensateur. La tension aux bornes du condensateur est ensuite amplifiée et numérisée.

1.4 Les avantages et les inconvénients d'une caméra CCD :

1.4.1 Les avantage :

- faible courant d'obscurité
- gain de conversion élevé
- traitement direct de l'information

1.4.2 Les Inconvénients :

- accès rapide et direct a une région d'intérêt très difficile
- possibilité d'bleuissement (blooming)
- colonne morte *:* Un pixel défectueux pour la fonction de lecture bloque l'information de toute une colonne.[4]

1.5Le modèle d'une camera CCD

1.5.1Introduction

Dans cette section, nous décrivons d'abord le modèle sténopé classique, On ne prend pas en compte les distorsions :

1.5.2Le modèle de sténopé

Le modèle sténopé (***PINHOLE*** en anglais) modélise une caméra par une projection perspective. La projection est la fonction de passage du 3D de l'espace M en un point-image m 2D et peut se décomposer en trois transformations élémentaires successives (figure1.4) : la transformation entre le repère du monde et celui de la caméra(1), la transformation entre le repère caméra et le repère (plan rétinien) (2) et la transformation entre le repère capteur et le repère image. [5]

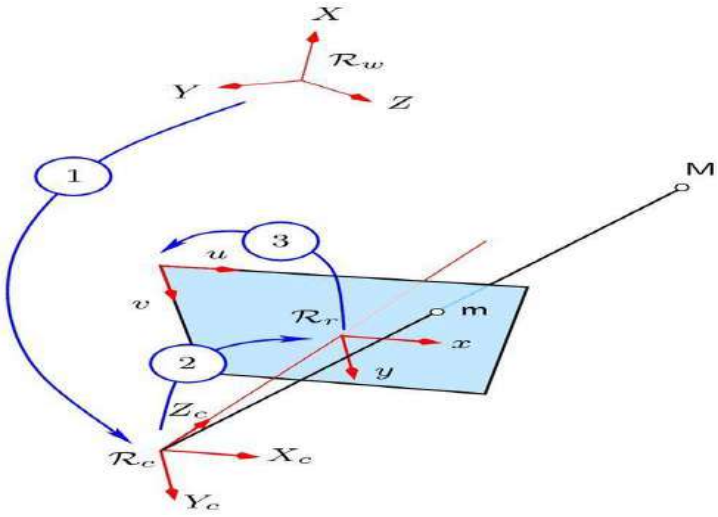


Figure1.4 : Les repères utilisés pour une caméra

Les conditions géométriques sont les suivantes :

- l'image se forme dans un plan (surface sensible du capteur) perpendiculaire à l'axe optique du système.
- l'axe Z est confondu avec l'axe principal du système optique.
- les axes x et y du plan image sont parallèles aux axes X et Y du repère objet et leur origine est sur l'axe Z.
- le système optique est du type sténopé (Pinhol).

1.5.3Utilisation des coordonnées homogènes

En vision par ordinateur, on utilise souvent les coordonnées homogènes :

En 2D :

$$m = \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \qquad m' = \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

coordonnées euclidiennes coordonnées homogènes

En 3D :

$$M = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \qquad M' = \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix}$$

Coordonnées euclidiennes coordonnées homogènes

Il y a plusieurs avantages à cela. On verra par exemple dans la section « Transformation entre le repère caméra et le repère capteur (plan rétinien) » que cela permet d'exprimer le modèle sténopé par une relation linéaire.

1.5.4Le modèle de Pinhol

Comment les points de l'espace 3D sont projetés dansL'image (espace 2D) ?

Object en 3D

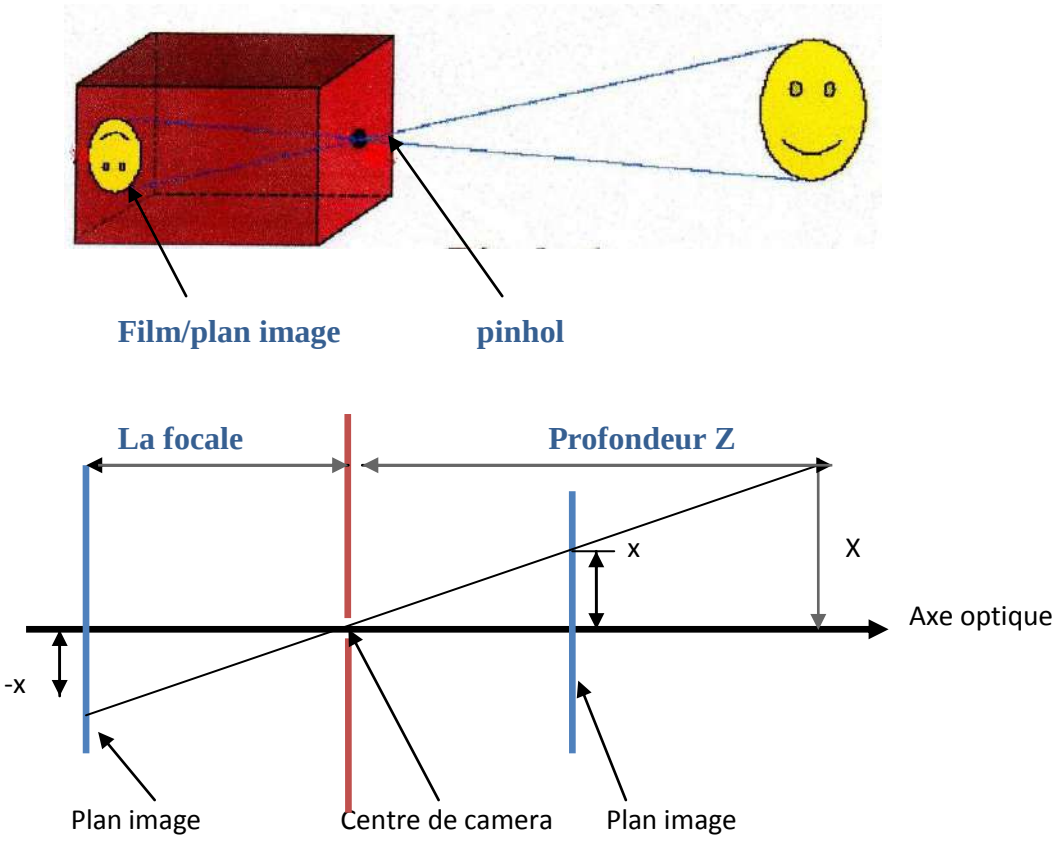


Figure1.5 : Modèle de pinhol

On remarque la relation par triangle semblables :

y : sortant perpendiculaire (z et x)

$$\frac{x}{f} = \frac{X}{Z} \qquad \text{de même} \qquad \frac{y}{f} = \frac{Y}{Z}$$

On en déduit : $x = \frac{X}{Z} f$ de même $y = \frac{Y}{Z} f$ [6]

1.5.5Paramètres extrinsèques de la camera :

1.5.5.1Transformation entre le repère du monde et le repère caméra :

Comme indiqué sur la (figure 1.4) (1) représente une transformation entre le repère du monde R_w(choisi arbitrairement) et le repère caméra R_c(dont l'origine est située au centre optique de la caméra).

Dans un montage réel, il est impossible de garantir que le repère réel soit aligné avec celui de la camera.

La position de la camera dans l'espace réel est la composition de :

une translation trois rotations des axes caméras par apport au repère de l'environnement (figure 1.6).

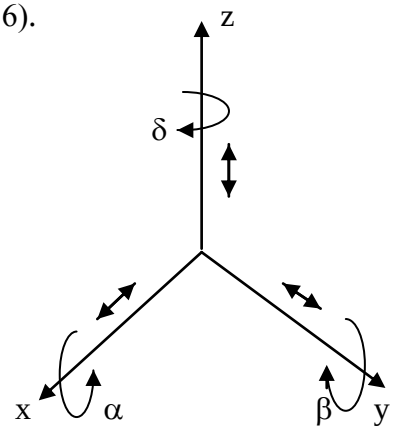


Figure 1.6 : Les rotations et translations

Les paramètres caractérisant la relation entre la caméra et le référentiel sont dits

Extrinsèques :

Le passage des coordonnées environnement aux coordonnées caméra est :

[R] :rotation , t :vecteur de translation

$$\begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = [R] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} + t = \begin{bmatrix} R & t \\ 0^T & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \ldots . \ (1.1)$$

[T] : matrice représente une transformation rigide : trois rotations et trois translations. Elle représente les paramètres extrinsèques.

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos\,\alpha & -sin\,\alpha & 0 \\ 0 & sin\,\alpha & cos\,\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\,\beta & 0 & sin\,\beta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -sin\,\beta & 0 & cos\,\beta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} cos\,\delta & -sin\,\delta & 0 & 0 \\ sin\,\delta & cos\,\delta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} c\delta c\beta & c\delta s\beta s\alpha - s\delta c\alpha & c\delta s\beta c\alpha + s\delta s\delta & 0 \\ s\delta c\beta & s\delta s\beta s\alpha + c\delta c\alpha & c\delta s\beta c\alpha - s\delta s\delta & 0 \\ -s\beta & c\beta s\alpha & c\beta c\alpha & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_x \\ t_y \\ t_z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \ldots.(1.3)$$

La matrice inverse est donnée par l'expression suivante :

$$T^{-1} = \begin{pmatrix} R^t & -R^t t \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Avec : c=cos et s=sin

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{x/x} & r_{x/y} & r_{x/z} & t_x \\ r_{yx} & r_{y/y} & r_{y/z} & t_y \\ r_{z/x} & r_{z/y} & r_{z/z} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \ldots\ldots (1.4)$$

Avec

$r_{x/x}$=cos (δ) cos(β)

$r_{x/y}$=cos (δ) sin(β) sin(α)-sin(δ)cos(α)

$r_{x/z}$=cos (δ) sin(β) cos(α) +sin(δ) sin(α)

$r_{y/x}$=sin (δ) cos (β)

$r_{y/y}$ =sin (δ) sin (β) sin (α)+cost(δ) cos(α)

$r_{y/z}$=sin (δ) sin (β) cos (α)-cos (δ) sin (α)

$r_{z/x}$= -sin (β)

$r_{z/y}$=cos (β) sin (α)

$r_{z/z}$=cos (β) cos(α)

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} \approx \begin{pmatrix} R_{3x3} & t_{3x1} \\ 0^T & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \\ 1 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \ldots (1.5)$$

1.5.6 Les paramètres intrinsèques :

1.5.6.1Transformation entre le repère caméra et le repère capteur (plan rétinien)

La deuxième transformation, notée (2) sur la (figure. 1.4) relie le repère caméra $R_c$au repère capteurR_r (plan rétinien). C'est une projection perspective (matrice 3×4, notée[P] qui transforme un point 3D ($X_cY_cZ_c$)en un point-image (x y) (en unité métrique).

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} = [P] \begin{bmatrix} X_c \\ Y_c \\ Z_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{…. (1.6)}$$

Où' f 'désigne la focale de l'objectif utilisé (mm).
L'équation (1.6) qui traduit la projection perspective s'écrit :

X=f X_c/Z_c,Y=f Y_c/Z_c

Ces équations sont non-linéaires, et l'utilisation des coordonnées homogènes permet d'écrire la projection perspective (et le modèle sténopé complet) sous forme linéaire.

1.5.6.2Transformation entre le repère capteur et le repère image

La troisième et dernière transformation, notée (3) sur la (figure1.4), décrit l'opération de conversion des coordonnées images (x y) (en unité métrique) en coordonnées images discrètes (u v) (pixels).

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & k_x cos\,\theta & c_x + c_y cos\theta \\ 0 & k_y/sin\,\theta & c_y/sin\,\theta \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \text{… (1.7)}$$

Où :

-$c_x$et c_y(en pixels) désignent les coordonnées de l'intersection de l'axe optique avec le plan image (théoriquement au centre de l'image).
-$k_x$et $k_y$en (pixel/mm) désignent le nombre de pixels par unité de longueur suivant les directions(x) et (y)du capteur respectivement ($k_x = k_y$dans le cas de pixels carrés).

-θtraduit la non orthogonalité éventuelle des lignes et colonnes de l'image. En pratique, θ est très proche de$\frac{\pi}{2}$. Ce paramètre est désigné par « skew factor » en anglais.

On considère souvent que le « skew factor » est négligeable ($\theta = \frac{\pi}{2}$) et l'équation (1.3) se simplifie alors de la façon suivante :

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & c_x \\ 0 & k_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} = [A_{simplifil}] \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (1.8)$$

1.6Modèle sténopé complet sans distorsion

La composition des trois transformations(1), (2)et (3)peut être résumée par le schéma de la (figure. 1.4).

$$(X \;\; Y \;\; Z) \overset{T\ t}{\rightarrow} (X_c \; Y_c \;\; Z_c) \overset{P\ t}{\rightarrow} (x \;\; y) \overset{A\ t}{\rightarrow} (u \;\; v)$$

Cela conduit à l'équation du modèle sténopé :

m=AP T avec AP=K

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & k_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & f & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r_{x/x} & r_{x/y} & r_{x/z} & t_x \\ r_{yx} & r_{y/y} & r_{y/z} & t_y \\ r_{z/x} & r_{z/y} & r_{z/z} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \text{..(1.9)}$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} \approx \text{k} \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ 1 \end{bmatrix} \quad \text{avec } k = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.10)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x & 0 \\ 0 & f_y & c_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} r_{x/x} & r_{x/y} & r_{x/z} & t_x \\ r_{yx} & r_{y/y} & r_{y/z} & t_y \\ r_{z/x} & r_{z/y} & r_{z/z} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \dots (1.11)$$

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f_x r_{\frac{x}{x}} + c_x r_{\frac{z}{x}} & f_x r_{\frac{x}{y}} + c_x r_{\frac{z}{y}} & f_x r_{\frac{x}{z}} + c_x r_{\frac{z}{z}} & f_x t_x + c_x t_z \\ f_y r_{\frac{y}{x}} + c_y r_{\frac{z}{x}} & f_y r_{\frac{y}{y}} + c_y r_{\frac{z}{y}} & f_y r_{\frac{y}{z}} + c_y r_{\frac{z}{z}} & f_y t_y + c_y t_z \\ r_{\frac{z}{x}} & r_{\frac{z}{y}} & r_{\frac{z}{z}} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{bmatrix} \quad \dots (1.12)$$

Remarque : Puisque la matrice du modèle complet elle est homogène donc en peut calculer la matrice inverse

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} f_x r_{x/x} + c_x r_{z/x} & f_x r_{x/y} + c_x r_{z/y} & f_x r_{x/z} + c_x r_{z/z} & f_x t_x + c_x t_z \\ f_y r_{y/x} + c_y r_{z/x} & f_y r_{y/y} + c_y r_{z/y} & f_y r_{y/z} + c_y r_{z/z} & f_y t_y + c_y t_z \\ r_{z/x} & r_{z/y} & r_{z/z} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad .(1.13)$$

Où $f_x = f k_x$ et $f_y = f k_y$ désignent la focale de la caméra en nombre de pixels suivant les directions (x) et (y) respectivement.

Les 5 paramètres $(c_x c_y f_x f_y \ \theta)$ de la matrice (k) sont appelés paramètres intrinsèques de la caméra.

Finalement, le modèle sténopé est décrit par 5 paramètres

Intrinsèques :

$(C_x, C_y, f_x, f_y, \theta)$ et 6 paramètres extrinsèques (3 pour la rotation et 3 pour la translation). [6]

Dans le cas où le « Skew Factor » est négligé, le modèle sténopé, qui relie les coordonnées 3D (X Y Z) d'un point exprimé dans le repère du monde aux coordonnées 2D (u v) de sa projection dans le plan image (point-image = pixel), est souvent écrit de la façon suivante :

$$u = \frac{fx\left(r_{xx}X_c + r_{xy}y_c + r_{xz}Z_c + tx\right)}{r_{zx}X_c + r_{zy}y_c + r_{zz}Z_c + tz} + cx$$

$$v = \frac{fy\left(r_{yx}X_c + r_{yy}y_c + r_{yz}Z_c + ty\right)}{r_{zx}X_c + r_{zy}y_c + r_{zz}Z_c + t_z} + c_y \quad \dots (1.14)$$

On peut dire maintenant que Nous avons un système linéaire qui modélise le capteur (rétinien).

Le principe pour déterminer les paramètres du modèle (calibre une caméra), consiste à placer devant la caméra une mire, Chaque point de la mire se Projette dans repère d'image et on mesure ses coordonnées dans le repère image. [7]

1.7Correction des distorsions

La formation des images est modélisée par une application linéaire de l'espace projectif vers le plan projectif à l'aide d'une matrice de transformation perspective de dimension 3x4. Un système d'acquisition d'images suit ce modèle lorsque les lentilles utilisées et leur montage sur l'objectif sont parfaits. Dans le cas contraire, des distorsions optiques peuvent apparaître.

Il existe deux types de distorsions : les distorsions radiales et les distorsions tangentielles. En ajoutant aux paramètres intrinsèques de la caméra des paramètres prenant en compte les distorsions radiales et tangentielle

1.7.1 Les distorsions radiales

Les distorsions radiales sont dues au fait que les lentilles ne sont pas parfaitement minces, leur effet et de déplacer les points images suivant un vecteur dont l'origine est placé sur le centre de l'image et orienté vers le point idéal, dont la norme est proportionnelle à la distance de ce point à l'origine, comme le montre la (figure1.7)

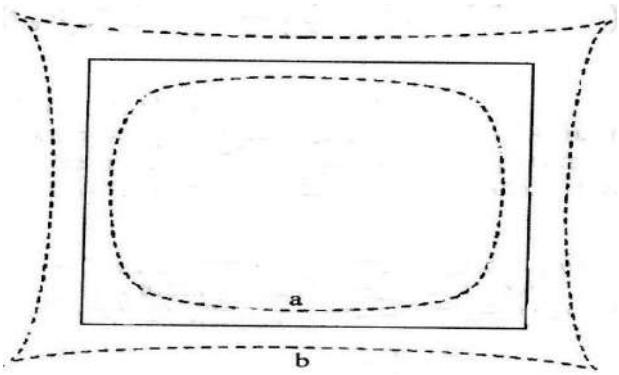


Figure1.7 : Effets des distorsions radiales.

Les lignes en continues représentent l'image sans distorsion, Les lignes en pointillés représentent les distorsions radiales (a : négative, b : positive).

La correction apportée à un point (u, *v)*, exprimé dans un repère dont l'origine est confondue avec le centre des distorsions radiales, est réalisée en translatant ce point par un vecteur (Δu_R,Δv_R).

$$\begin{cases}\Delta u_R = \breve{u}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) = \breve{u}\sum_{i=1}^{n} k_i r^{2i} \\ \Delta v_R = \breve{v}(k_1 r^2 + k_2 r^4 + \cdots) = \breve{v}\sum_{i=1}^{n} k_i r^{2i}\end{cases} \quad (1.15)$$

Avec

$$\breve{u} = (u - c_x)$$

$$\breve{v} = (v - c_y)$$

$$r = \sqrt{u^2 + v^2}$$

k_i=facteur de distorsion radial: dépend de la précision qui l'on veut obtenir et de la qualité de l'objective utilisé.

Le nombre de paramètres$k_i$estimés dépend de la précision que l'on veut obtenir sur le calcul de la distorsion et de la qualité de l'objectif utilisé.

On obtient donc, pour une distorsion radiale de 1 degré, le modèle suivant :

$$\begin{cases} u_R = f_x \frac{r_{xx}X_c + r_{xy}Y_c + r_{xz}Z_c + t_X}{r_{zx}X_c + r_{zy}Y_c + r_{zz}Z_c + t_Z} + c_x + k_1 \breve{u} r^2 \\ v_R = f_y \frac{r_{yx}X_c + r_{yy}Y_c + r_{yz}Z_c + t_X + t_Y}{r_{zx}X_c + r_{zy}Y_c + r_{zz}Z_c + t_Z} + c_y + k_1 \breve{v} r^2 \end{cases} \ldots. (1.16)$$

Avec u_R, v_R le modèle complet avec distorsion radiale

Pour être un système linéaire en prend n point dans l'espace 3D

$$\begin{cases} \vdots \\ u_R = f_x \frac{r_{xx}X_c + r_{xy}Y_c + r_{xz}Z_c + t_X}{r_{zx}X_c + r_{zy}Y_c + r_{zz}Z_c + t_Z} + c_x + k_1 \breve{u} r^2 \\ v_R = f_y \frac{r_{yx}X_c + r_{yy}Y_c + r_{yz}Z_c + t_X + t_Y}{r_{zx}X_c + r_{zy}Y_c + r_{zz}Z_c + t_Z} + c_y + k_1 \breve{v} r^2 \\ \vdots \end{cases} \ldots\ldots (1.17)$$

1.7.2 Les distorsions tangentielles

Les distorsions tangentielles apparaissent lorsque l'assemblage des lentilles sur l'objectif n'est pas parfait (lentilles non alignées, non positionnées perpendiculairement à l'axe optique, …). Accompagnées de. Leur effet est de déplacer les points images tangentiellement au cercle centré sur le point principal de l'image, comme le montre la (figure. 1.8) :

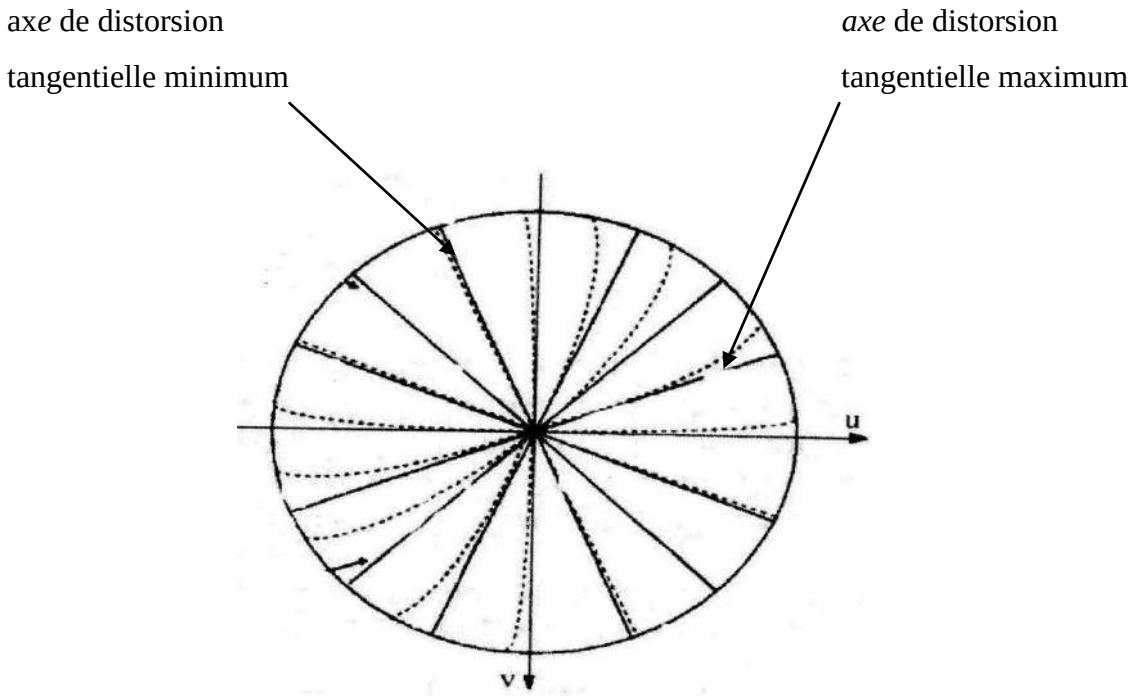


Figure1.8 : Effets des distorsions tangentielles. Lignes pleines : pas de distorsions.

Lignes pointillées : distorsions tangentielles

La correction des distorsions tangentielles pour un point (*u, v*) se modélise par une translation ($\Delta u_{t,}\Delta v_t$) définie par :

$$\begin{cases}\Delta u_t = [p_1(r^2+2u^2)+2p_1uv].(1+p_3r^2+p_4r^4+\cdots \\ \Delta v_t = [p_2(r^2+2v^2)+2p_2uv].(1+p_3r^2+p_4r^4+\cdots\end{cases}$$

C'est-à-dire

$$\begin{cases}\Delta u_t = [p_1(r^2+2u^2)+2p_2uv]\left(1+\sum_{j=1}^{n}p_{2+j}r^{2j}\right) \\ \Delta v_t = [p_2(r^2+2v^2)+2p_1uv]\left(1+\sum_{j=1}^{n}p_{2+j}r^{2j}\right)\end{cases} \quad \text{... (1.18)}$$

$$\begin{cases}u_t = f_x\frac{r_{11}Mx+r_{12}My+r_{13}Mz+t_X}{r_{31}Mx+r_{32}My+r_{33}Mz+t_Z}+c_x+[p_1(r^2+2u^2)+2p_2uv]\left(1+\sum_{j=1}^{n}p_{2+j}r^{2j}\right) \\ v_t = f_y\frac{r_{21}Mx+r_{22}My+r_{23}Mz+t_Y}{r_{31}Mx+r_{32}My+r_{33}Mz+t_Z}+c_y+[p_2(r^2+2v^2)+2p_1uv]\left(1+\sum_{j=1}^{n}p_{2+j}r^{2j}\right)\end{cases} \quad \text{...(1.19)}$$

Avec u_t, v_t modèle complet avec distorsion tangentielle

p_i=facteur de distorsion tangentiel : dépend de la précision qui l'on veut obtenir et de la qualité de l'objective utilisé.

Comme pour les distorsions radiales, le nombre de paramètres à estimer dépend de la précision que l'on veut obtenir sur le calcul de la distorsion et de la qualité de l'objectif utilisé.[10]

1.7.3Le modèle complet avec les deux types de distorsion

Le modèle des équations *(1.14)* peut donc être complété avec les modélisations des deux distorsions *(1.17)*et *(1.18)*, On obtient le modèle suivant

$$\begin{cases} u_d = f_x \frac{r_{11}Mx+r_{12}My+r_{13}Mz+t_X}{r_{31}Mx+r_{32}My+r_{33}Mz+t_Z} + c_x + \breve{u}\sum_{i=1}^{n} k_i r^{2i} + [p_1(r^2+2u^2)+2p_2uv]\left(1+\sum_{j=1}^{n} p_{2+j}r^{2j}\right) \\ v_d = f_y \frac{r_{21}Mx+r_{22}My+r_{23}Mz+t_Y}{r_{31}Mx+r_{32}My+r_{33}Mz+t_Z} + c_y + \breve{v}\sum_{i=1}^{n} k_i r^{2i} + [p_2(r^{\ 2}+2v^2)+2p_1uv]\left(1+\sum_{j=1}^{n} p_{2+j}r^{2j}\right) \end{cases} \ldots(1.20)$$

avec u_d, v_d le modèle complet avec les deux type distorsion

1.8Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une description générale du fonctionnement physique des caméras. Par ailleurs, nous avons élaboré les modèles direct et inverse d'une camera CCD. Grâce à ces relation mathématique nous pourrons les coordonnée de l'effecteur du robot ou celles d'une dans l'espace images avec ou sans distorsions.

CHAPITRE II :

Modélisation du robot PUMA 560

Modélisation du robot PUMA 560

2.1Modélisation du robot Puma 560

2.1.1Introduction

Ce chapitre sera consacré à la modélisation du bras manipulateur ***PUMA 560*** **(M**anipulateur **p**rogrammable **u**niversel de l'**a**ssemblage **560)** utilisé, pour à la fois, réaliser la tâche de positionnement et celle de saisie de l'objet cible.

2.1.2 Présentation du robot PUMA 560

Nous avons opté pour l'architecture d'un bras manipulateur série PUMA 560. C'est un robot de type verticale là articulations rotoïdes et possède six (06)degrés de liberté. Dans le reste de ce chapitre, nous supposerons que les segments du manipulateur sont rigides et les jeux dans les articulations sont négligeables.

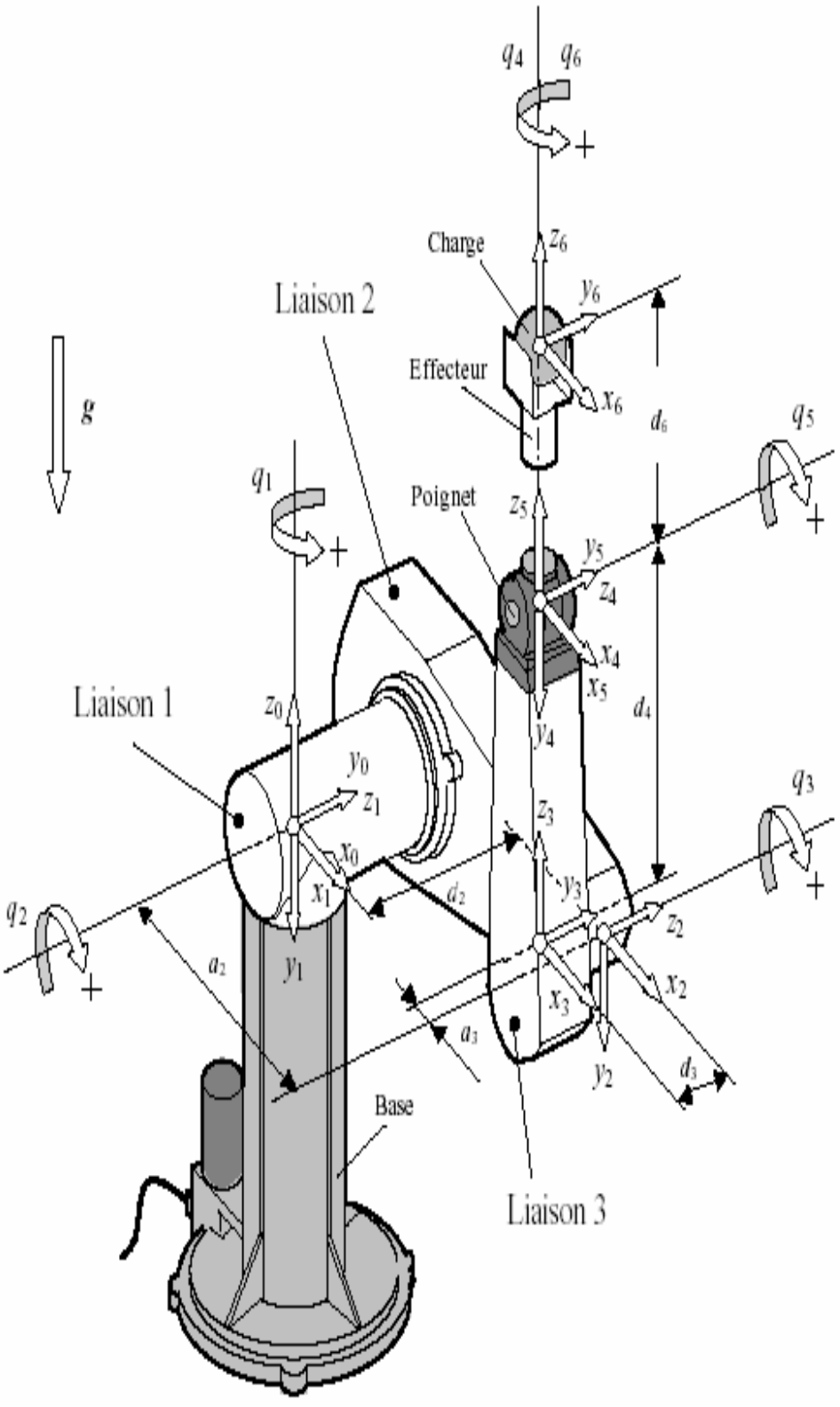


Figure2.1: Schéma du robot PUMA 560

2.2Modélisation géométrique

2.2.1Modèle géométrique direct

2.2.1.1Définitions

Un modèle géométrique directe d'un robot (MGD) est l'ensemble des relations qui permettent d'exprimer la situation de l'organe terminal, qu'impliquent les coordonnées opérationnelles du robot en fonction de ses coordonnées articulaires. Autrement dit, le modèle géométrique direct est donné unefonction qui permet d'exprimer la situation de l'organe terminal en fonction de la configuration du robot définir par les variables d'actions X=f(q).

2.2.1.2Méthode générale de calcul du modèle géométrique direct

a)Méthode des matrices 3x3

L'orientation du repère lié à l'organe terminal, s'obtient à partir des différentes matrices de passageA_i^j du repére (c_n) au rapere (c_{n-1}) de dimention (3x3). Ensuite, nous calculons les coordonnées du point remarquable p qui sont représentées par un vecteur colonne a trois composantes.

La méthode de cosinus directeurs ou les angles d'Euler nous permettrons de connaitre l'orientation du repère (c_n) par apport au repére de référence (c_o) .

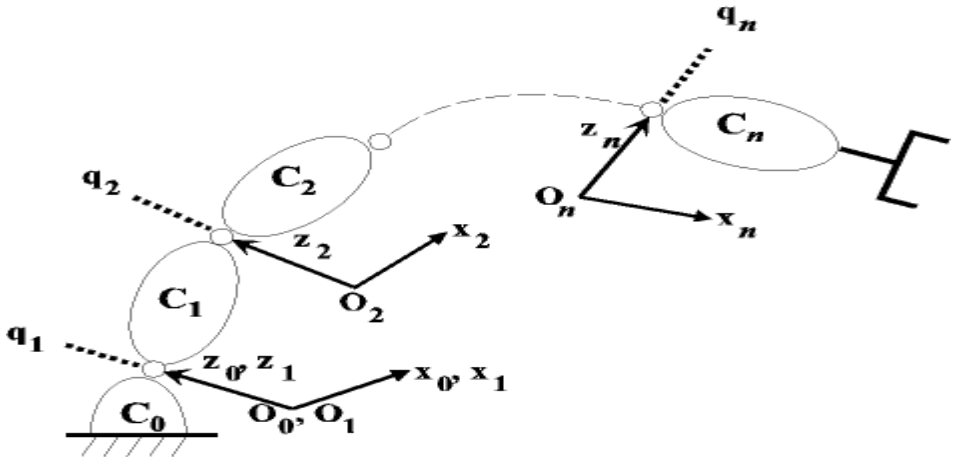


Figure2.2 : Les différents repères d'un robot à structure ouverte simple

b) Méthode des matrices 4x4

La méthode repose sur l'utilisation des coordonnées homogènes.

Dans ce cas, nous avons recours à des matrices de passage homogènes de dimension (4x4) du repère (c_{n-1}) au repére (c_n) .

La matrice de passage homogène est formée à partir des formes de la matrice de passage A_i^j et des coordonnées du vecteur $o_{n-1}o_n$ (vecteur) qui définit la position de l'origine du nouveau repère (c_n) parrapportà l'ancien (c_{n-1}) .

Les produits matriciels successifs permettent de donner une matrice de dimension (4x4) qui a pour éléments d'orientation de l'organe terminal par rapport au repère de référence et les coordonnées du point remarquable.

2.3Méthode de Denavit-Hartenberg

La position de orientation du repère $R_{i+1} = (o_{i+1}, x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})$ par rapport au rapére $R_i = (o_i, x_i, y_i, z_i)$ sont définies par les quatre paramètres$\alpha_i, d_i, \Theta_i, r_i$ dits paramétres de Denavi hartenberg.

Le passage de repère (R_{j-1}) au repere (R_j) s'exprime grâce à quatre paramètres géométriques :

α_i: Angle entre z_i et z_{i+1} mesure autour de x_i ;

d_i: Distance entre z_i et z_{i+1} mesuré suivantx_i ;

Θ_i : Angle entre x_i et x_{i+1} mesure autour de z_{i+1} ;

r_i : Distance entre x_i et x_{i+1} mesurée suivant z_{i+1} ;

Le variable articulaire $q_i$associée a la i^{eme} artuculation est soit $\Theta_i$soitr_i selon le type de l'articulation rotoïde ou prismatique. La détermination de ces paramètres nous permet de calculer la matrice de passage homogène, ce qui nous donne l'orientation de l'organe terminal et la position du point remarquable.

2.3.1Calcul du modèle géométrique direct

La méthode de Denavit-Hartenberg est la plus répandue ; lorsqu'elle est appliquée à un robot constitué d'une structure ouverte simple comme notre cas, elle ne pose aucun problème ; cependant elle présente des ambigüités lorsqu'elle est appliquée sur ses robots ayant des structures fermées.

2.3.2Paramétrage de Denavit-Hartenberg modifiés

Considérons la (figure. 2.3), présentant deux articulations successives liées aux deux repères.

$R_{i+1} = (o_{i+1}, x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})etR_i = (o_i, x_i, y_i, z_i)$. Pour passer de R_i a R_{i+1} on peut procéder ainsi :

-une rotation autour dex_i, d'un angle α_i: rot(x×α_i) ;

-une translation le long de x_i d'une longueur d_i:Tr(x×d_i) ;

-une rotation autour de z_{i+1} d'un angle θ_i:Rot (z×θ_i) ;

-une translation le long dez_{i+1} d'une longuer r_i : Tr(z×r_i)

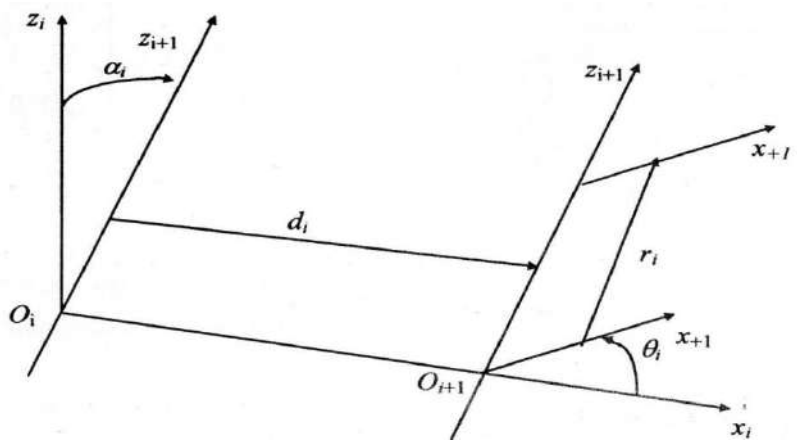


Figure2.3 : Paramétrage de Denavit-Hartenberg modifié

Le paramètre articulaire q_i sera θ_i si liaison de rotation ou r_i si liaison de translation. Introduisant la variable booléenne σ_i définie par :

$q_i = (1 - \sigma_i)\theta_i + \sigma_i r_i$

Nous pouvons écrire alors :

*σ_i =0 si liaiison de rotation $\rightarrow q_i = \theta_i$

*σ_i =1 si liason de translation $\rightarrow q_i = r_i$

2.3.3L'expression des matrices de passage homogènes H_i^{i+1}

L'utilisation des matrices de passage entre repères voisins nous permet l'obtention des matrices de passage homogènes de chaque transformation et de les multiplier.

La matrice de passage homogène H_i^{i+1} est donnée comme suit :

$$H_i^{i+1}=\begin{pmatrix} A & & & F \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Ou A est la matrice de passage de R_ia R_{i+1}, F est la matrice unicolonne des coordonnées de o_{i+1} dans R_i .

H_i^{i+1} = rot(x_i×α_i)×Tr(x_i×d_i) × Rot(z×θ_i)×Tr(z,×r_i)

$$\text{Rot(x, } \alpha_i)=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C\alpha_i & -S\alpha_i & 0 \\ 0 & S\alpha_i & C\alpha_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (1.1)$$

$$\text{Tr(x, } d_i)=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & d_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.2)$$

$$\text{Rot (z, } \theta_i)=\begin{pmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & 0 \\ S\theta_i & C\theta_i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.3)$$

$$\text{Tr(z, } r_i)=\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.4)$$

D'ou H_i^{i+1},A,Fs'écrivent comme suit :

$$H_i^{i+1}=\begin{pmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & d_i \\ C\alpha_i S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i & -r_i S\alpha_i \\ S\theta_i S\alpha_i & S\alpha_i C\theta_i & C\alpha_i & r_i C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (1.5)$$

$$\text{A}=\begin{pmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 \\ C\alpha_i S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i \\ S\theta_i S\alpha_i & S\alpha_i C\theta_i & C\alpha_i \end{pmatrix} \dots (1.6)$$

Pour trouver le modèle géométrique direct nous procédons de la manière suivante, on applique les résultats obtenus précédemment (1.5):

-on place les axes z_i portés par les axes articulaires, puis les axes x_i

-on détermine les paramètres géométriques du robot

T_{n-1} =$H_{n-1}^{n-1}H_{n-1}^{n}$

$T_{n-2} = H_{n-3}^{n-2} T_{n-1}$

$\vdots$

$T_0 = H_0^n = H_0^1 T_1$

T_0 Peut s'écrire sous la forme :

$$T_0 = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (1.7)$$

$$= \begin{pmatrix} & & & p_x \\ & A_{Eul} & & p_y \\ & & & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (1.8)$$

Ou:

s_x: L'orientation de x_6 par apport a x_0;

n_x : L'orientation de $x_6$par rapport ay_0 ;

a_x: L'orientation de $x_6$par apport a z_0;

p_x : L'abscisse du point p dans le repere de référence R_0

s_y : L'orientation dey_6 par apport ax_0 ;

n_y : L'orientation de y_6 par rapport a y_0;

a_y : L'orientation dey_6 par apport a z_0;

p_y : L'ordonnée du point p dans le repère R_0

s_z : L'orientation de z_6 par apport ax_0 ;

n_z : L'orientation dez_6 par rapport a y_0 ;

a_z : L'orientation dez_6 par apport az_0 ;

p_z : définit la cote du point p dans le repère R_0

Le modèle géométrique direct donnant les coordonnées du point p et l'orientation de l'organe terminale (lié au repèreR_n) par rapport a R_0 en fonction de n variables articulaires s'écrit

X=f(q)

$$= \left(p_x p_y p_y s_x s_x s_x n_y n_y n_y a_z a_z a_z\right)^T \quad \dots (1.9)$$

2.4Modélisation de notre robot (PUMA 560)

2.4.1Modèle géométrique direct du robot

2.4.1.1Paramètres géométriques

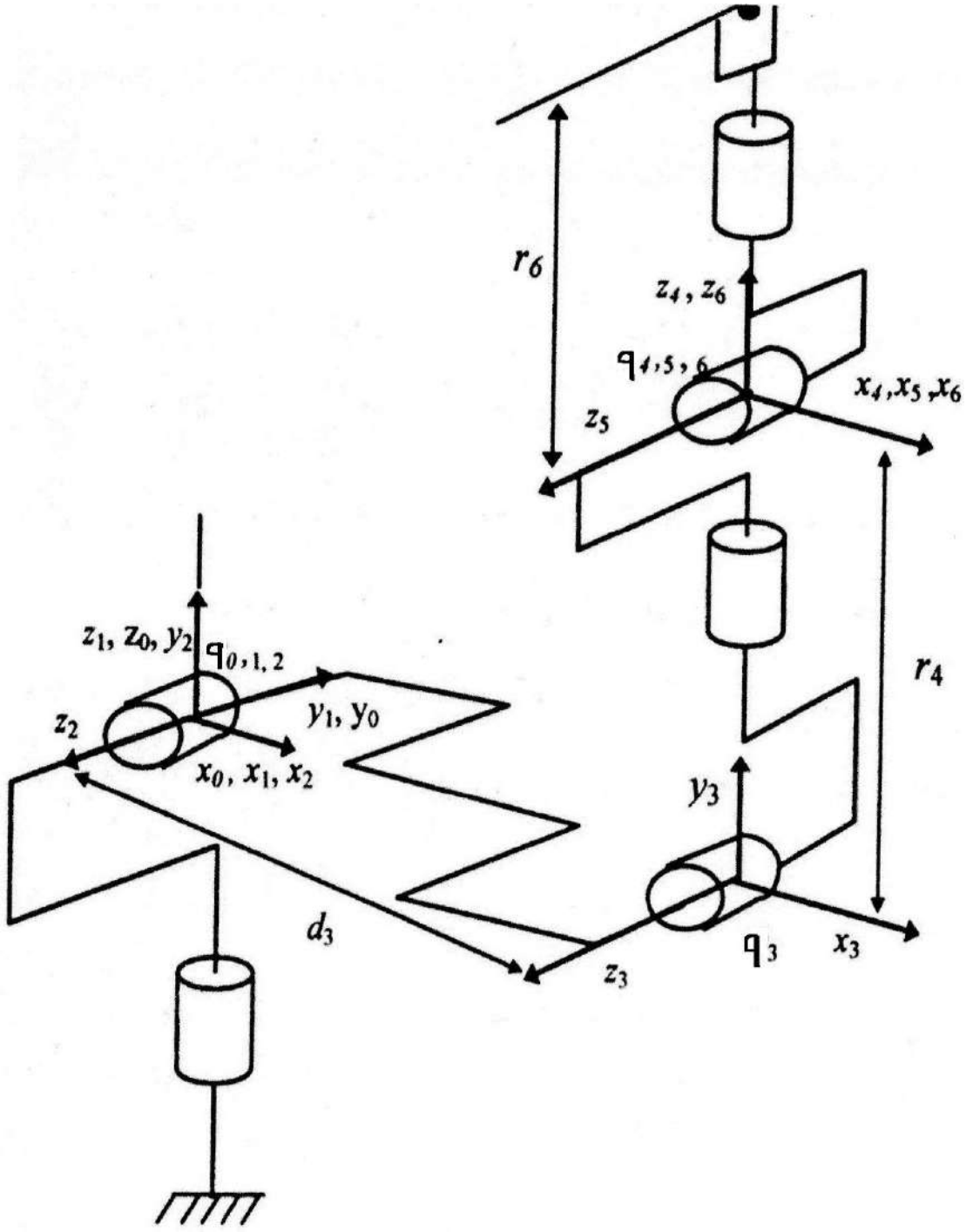


Figure2.4 : Définition du repère de robot PUMA 560

Les valeurs des paramètres de Denvit-Hartenberg correspondants au mécanisme du robot PUMA 560 considéré sont indiquées dans le tableau ci-dessous.

Les articulaires	σ_i	α_i	d_i	θ_i	R_i
1	0	0	0	q_1	0
2	0	90	0	q_2	0
3	0	0	d_3	q_3	0
4	0	-90	0	q_4	r_4
5	0	90	0	q_5	0
6	0	-90	0	q_6	0

Tableau2.1: Paramètre de Denvit-Hartenberg du robot PUMA 560

2.4.2 Expression de la matrice de passage homogène H_i^{i+1}

$$H_i^{i+1} = \begin{pmatrix} C\theta_i & -S\theta_i & 0 & d_i \\ C\alpha_i S\theta_i & C\alpha_i C\theta_i & -S\alpha_i & -r_i S\alpha_i \\ S\theta_i S\alpha_i & S\alpha_i C\theta_i & C\alpha_i & r_i C\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \dots (1.10)$$

A partir de matrice et des valeurs des paramètres du tableau, nous écrivons les matrices de passage homogènes suivantes :

$$H_0^1 = \begin{pmatrix} Cq_1 & -Sq_1 & 0 & 0 \\ Sq_1 & Cq_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.15)$$

$$H_1^2 = \begin{pmatrix} Cq_2 & -Sq_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ Sq_2 & Cq_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.16)$$

$$H_2^3 = \begin{pmatrix} Cq_3 & -Sq_3 & 0 & d_3 \\ Sq_3 & Cq_3 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.17)$$

$$H_3^4 = \begin{pmatrix} Cq_4 & -Sq_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & r_4 \\ -Sq_4 & -Cq_4 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \dots (1.18)$$

$$H_4^5 = \begin{pmatrix} Cq_5 & -Sq_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 \\ Sq_5 & Cq_5 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \ldots(1.19)$$

$$H_5^6 = \begin{pmatrix} Cq_6 & -Sq_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -Sq_6 & -Cq_6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \ldots(1.20)$$

Les produits des matrice H_i^{i+1} permettent d'obtenir les corrdonnées de O_6 dans le repère R_0 lié a la base du robot et l'orientation de la pince par apport a R_0 ,la matrice de passage homogéne H_0^6 obtenue a pour expression :

$$H_0^6 = H_0^1 H_1^2 H_2^3 H_3^4 H_4^5 H_5^6$$

$$H_0^6 = \begin{pmatrix} s_x & n_x & a_x & p_x \\ s_y & n_y & a_y & p_y \\ s_z & n_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad \ldots (1.21)$$

$$= \begin{pmatrix} & A_{Eul} & & p_x \\ & & & p_y \\ & & & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \ldots(1.22)$$

Les vecteurs :s , n , a , et P correspondants sont :

s_x=Cq_1(C(q_2+q_3)(Cq_4 Cq_5 Cq_6-Sq_4 Sq_6)-S(q_2+q_3)Sq_5 Cq_6-Sq_1(Sq_4 Cq_5.Cq_6+Cq_4 Sq_6)

$$s_y = Sq_1\{C(q_2+q_3)[Cq_4Cq_5Cq_6 - Sq_4Sq_6] - S(q_2+q_3)Sq_5Cq_6\} + Cq_1[Sq_4Cq_5Cq_6 + Cq_4Sq_6]$$

$$s_z = \mathrm{S}(q_2+q_3)[Cq_4Cq_5Cq_6 - Sq_4Sq_6] + C(q_2+q_3)Sq_5Cq_6$$

$$n_x = Cq_1\{-C(q_2+q_3)[Cq_4Cq_5Sq_6 + Sq_4Cq_6] + S(q_2+q_3)Sq_5Sq_6\} + Sq_1[Sq_4Cq_5Sq_6 - Cq_4Cq_6]$$

$$n_y = Sq_1\{-q_2+q_3)[Cq_4Cq_5Sq_6 + Sq_4Cq_6] + S(q_2+q_3)Sq_5Sq_6\} - Cq_1[Sq_4Cq_5Sq_6 - Cq_4Cq_6]$$

$$n_z = -\mathrm{S}(q_2+q_3)[Cq_4Cq_5Sq_6 + Sq_4Cq_6] - C(q_2+q_3)Sq_5Sq_6$$

$$a_x = -cq_1((C(q_2+q_3)Cq_4Cq_5 + (sq_2+sq_3)Cq_5) + sq_1sq_4sq_5$$

$$a_y = sq_1((cq_2+cq_3)cq_4sq_5 \ +(sq_2+sq_3)Cq_5)\text{-}cq_1sq_4sq_5$$

$$a_z = -cq_4sq_5\big(s(q_2+q_3)\big) + cq_5\big(c(q_2+q_3)\big)$$

$$p_x = \text{-}Cq_1[S(q_2+q_3)r_4 - Cq_2d_3]$$

$$p_y = \text{-}Sq_1[S(q_2+q_3)r_4 - Cq_2d_3]$$

$$p_z = \text{C}(q_2+q_3)r_4 + Sq_2d_3$$

Ainsi le modèle géométrique direct donnant les coordonnées du point du point remarquable p s'écrit :

X=f(q)

$$= (p_xp_yp_ys_xs_xs_xn_yn_yn_ya_za_za_z)^T$$

2.5Modèle géométrique inverse (MGI)

Le modèle inverse consiste a calculer les coordonnées articulaires correspondant a une situation donnée de l'organe terminale.

La méthode de Paul décrite par la suite peut s'appliquer dans le cas de robots industriels à 6 *d.d.l.* ayant un poignet. A titre d'exemple, elle sera appliquée au robot PUMA 560. On appelle *P* le point d'intersection des axes concourants des 3 dernières articulations voir(figure2.6).

Le M.G.I. est obtenu en résolvant l'équation matricielle suivante :

$$u_0 = T_{0.1}(q_1)\text{x}\ \ T_{1.2}(q_1)\text{x}\ldots\text{x}T_{n-1.n}(q_n) \qquad \ldots(1)$$

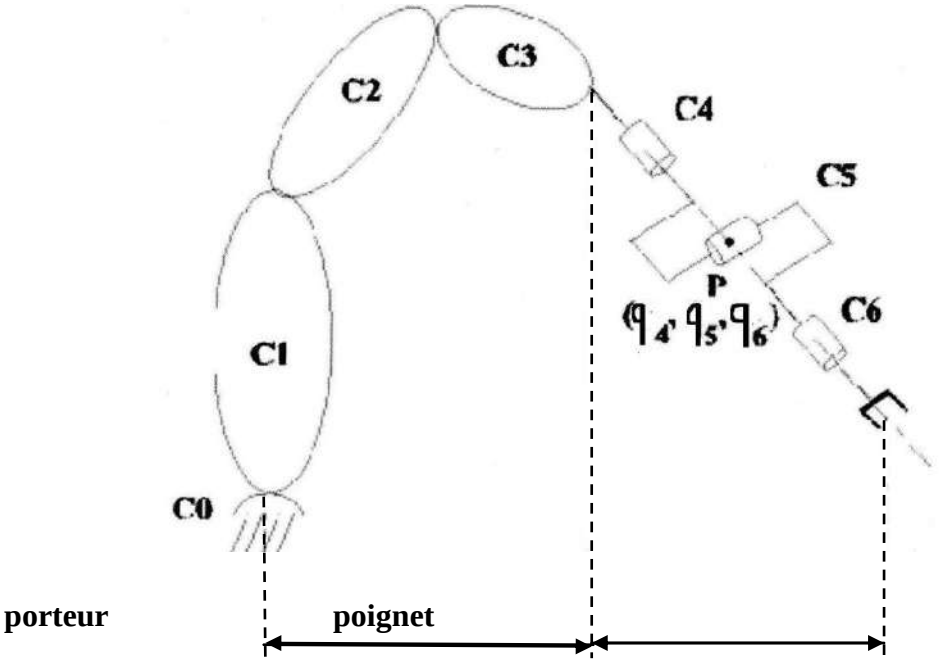


Figure2.5 : La chaine cinématique[9]

Cette structure est caractérisée par les valeurs du paramètre suivant :

$$\left\{\begin{array}{c} d_5 = r_5 = d_6 = 0 \\ \sigma_4 = \sigma_5 = \sigma_6 = 0 \\ \sin(\alpha_5) \neq 0, \sin(\alpha_6) \neq 0 \ (robotnonredondant) \end{array}\right\}$$

La position du point *P* (centre du poignet) est fonction des variables articulaires. Aussi, ce type de structure de robot permet de décomposer le problème du calcul des 6 variables articulaires en 2 problèmes :

- L'un, appelé *problème de position*, est fonction de q_1, q_2, q_3 , il permet de déterminer les paramètres q_1, q_2, q_3 .
- L'autre, appelé *problème d'orientation*, est fonction deq_4, q_5, q_6 , il permet de déterminer les paramètres q_4, q_5, q_6

2.5.1Equations de position

Puisque $q_4 = q_5 = q_6$, *on*

$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = T_{01} \times T_{12} \times T_{23} \times T_{34} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$:Eq: correspondant à la partie position de l'eq(1)

On aboutit à un système de 4 équations sachant que la dernière équation n'est pas pertinente. On obtient les valeurs de variables q_1, q_2, q_3en pré-multipliant successivement cette équation par $T_{j0}, j = 1,2,3$, ceci afin d'isoler et de déterminer de manière séquentielle les variables articulaires.

2.5.2 Equations d'orientation

L'équation correspondant à la partie orientation de l'Eq. (1) s'écrit :

$$[S\ \ N\ \ A]=A_{06}(q)$$

soit encore,

$$A_{3\,0}(q_1, q_2, q_3) \times [S\ N\ A] = A_{3\,6}(q_4, q_5, q_6)$$

Afin de simplifier l'écriture de cette équation, on pose :

$$[F\ G\ H] = A_{3\,6}(q_4, q_5, q_6)$$

La matrice [F G H] est connue sachant que les paramètres q_1, q_2, q_3ont été préalablement déterminés. Aussi, on obtient successivement les paramètres q_4, q_5, q_6en pré-multipliant successivement l'équation précédente par $A_{4\,3}$ puis par $A_{5\,4}$.

Pour cela, on dispose d'un système de 16 équations sachant que les 4 dernières équations ne sont pas pertinentes.

2.6 Application de la méthode de Paul à notre robot

2.6.1Equations de position

On a :

$$\begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = T_{01} \times T_{12} \times T_{23} \times T_{34} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)[d\sin(\theta_2+\theta_3) + a\cos(\theta_2)] \\ \sin(\theta_1)[d\sin(\theta_2+\theta_3) + a\cos(\theta_2)] \\ d\cos(\theta_2+\theta_3) + a\sin(\theta_2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

- Pré-multiplication par la matrice $T_{1\,0}$,on obtient :

$$T_{1\,0} \times \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = T_{1\,2} \times T_{2\,3} \times T_{34} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Rappel :on a

$$T_{0\,1} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix},$$

$$d'ou$$

$$T_{1\,0} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \ldots (2)$$

Et

$$T_{1\,2} \times T_{2\,3} \times T_{34} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & a \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_4) & -\sin(\theta_4) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -d \\ \sin(\theta_4) & \cos(\theta_4) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin(\theta_4 + \theta_3) & 0 & a\cos(\theta_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 & -a\sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -d \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\sin(\theta_2 + \theta_3) + a\cos(\theta_2) \\ 0 \\ d\cos(\theta_2 + \theta_3) - a\sin(\theta_2) \\ 1 \end{bmatrix}$$

Il en résulte les équations suivantes :

$$\begin{cases} \cos(\theta_1)P_x + \sin(\theta_1)P_y = d\sin(\theta_2 + \theta_3) + a\cos(\theta_2) \\ -\sin(\theta_1)P_x + \cos(\theta_1)P_y = 0 \\ P_z = d\cos(\theta_2 + \theta_3) - a\sin(\theta_2) \end{cases}$$

La deuxième équation permet de déduire la valeur. En effet, on a :

$$\frac{\sin(\theta_1)}{\cos(\theta_1)} = \frac{P_y}{P_x} \rightarrow \begin{vmatrix} \theta_1 = Arctg\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \\ \theta_1' = \theta_1 + \pi \end{vmatrix}$$

- Pré-multiplication par la matrice$T_{2\,1}$,on obtient :

$$T_{21} \times T_{10} \times \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = T_{2\,3} \times T_{34} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Rappel :on a :

$$T_{12} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & -\sin(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta_2) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \text{d'où} T_{21} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

On obtient alors :

$$T_{21} \times T_{10} \times \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) & 0 \\ -\sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \cos(\theta_1)P_x + \sin(\theta_1)P_y \\ -\sin(\theta_1)P_x + \text{con}(\theta_1)P_y \\ P_x \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos(\theta_2)(\cos(\theta_1)P_x + \sin(\theta_1)P_y) + \sin(\theta_2)P_z \\ -\sin(\theta_2)(\cos(\theta_1)P_x + \sin(\theta_1)P_y) + \cos(\theta_2)P_z \\ \sin(\theta_1)P_x - \cos(\theta_1)P_y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Par ailleurs, on a :

$$T_{23} \times T_{34} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta_3) & -\sin(\theta_3) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ -d \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -d\sin(\theta_3) + a \\ d\cos(\theta_3) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Aussi, on a :

$$\begin{bmatrix} \cos(\theta_2)(\cos(\theta_1)P_x + \sin(\theta_1)P_y) - \sin(\theta_2)P_z \\ -\sin(\theta_2)(\cos(\theta_1)P_x + \sin(\theta_1)P_y) - \cos(\theta_2)P_z \\ -\sin(\theta_1)P_x + \cos(\theta_1)P_y \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} d\sin(\theta_3) + a \\ -d\cos(\theta_3) \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Soit $b_1 = \cos(\theta_1)\,P_x + \sin(\theta_1)\,P_y$;

il en résulte les équations suivantes

$$\begin{cases} d\sin(\theta_3) = \cos(\theta_2)\,b_1 - \sin(\theta_2)\,P_z - a \\ d\sin(\theta_3) = \cos(\theta_2)\,b_1 - \sin(\theta_2)\,P_z \end{cases} \quad \dots (3)$$

En sommant ces 2 équations, préalablement mises au carré, on obtient l'équation suivante :

$$d^2 = b_1^2 + P_z^2 + a^2 - 2ab_1\cos(\theta_2) + 2aP_z\sin(\theta_2)$$

Soit

$2aP_z\sin(\theta_2) - 2ab_1\cos(\theta_2) = -b_1^2 - P_z^2$(sachant que a=b),

soit l'expression :

$X\sin(\theta_2) + Y\cos(\theta_2) = Z$

avec

$X = -2aP_z$; $Y = -2ab_1$;

$$Z = d^2 - a^2 - b_1^2 - P_z^2$$

$$b_1 = p_x c_1 + p_y s_1$$

On en déduit la valeur suivante du paramètre θ_2 :

$$\begin{cases} \sin(\theta_2) = \frac{XZ + \varepsilon Y\sqrt{X^2+Y^2-Z^2}}{X^2+Y^2} \\ \cos(\theta_2) = \frac{XZ - \varepsilon x\sqrt{X^2+Y^2-Z^2}}{X^2+Y^2} \end{cases} \text{avec} \varepsilon = \pm 1$$

Soit

$$\theta_2 = Arctg\left(\frac{XZ + \varepsilon Y\sqrt{X^2+Y^2-Z^2}}{yZ - \varepsilon x\sqrt{X^2+Y^2-Z^2}}\right)$$

A partir du système d'équations (3) et connaissant la valeur du paramètre, on déduit la valeur du paramètre, soit :

$$\theta_3 = Arctg\left(\frac{-b_1\cos(\theta_2) - P_z\sin(\theta_2) + a}{-b_1\sin(\theta_2) + P_z\cos(\theta_2)}\right)$$

2.6.2Equations d'orientation

Une fois obtenus les paramètres q_1, q_2, q_3le calcul des paramètres q_4, q_5, q_6se fait à partir de la relation :

$$A_{36}(q_4, q_5, q_6) = [F\ G\ H] \qquad (4)$$

Avec

$$[F\ G\ H] = A_{36}(q_4, q_5, q_6) \times [S\ N\ A]$$

Calcul préalable de A_{30}

$$A_{30} = A_{32} \times A_{21} \times A_{10}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\theta_3) & \sin(\theta_3) & 0 \\ -\sin(\theta_3) & \cos(\theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos(\theta_2) & 0 & -\sin(\theta_2) \\ -\sin(\theta_2) & 0 & -\cos(\theta_2) \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \cos(\theta_1) & \sin(\theta_1) & 0 \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \cos(\theta_3)\cos(\theta_2)\cos(\theta_1) - \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) & \cos(\theta_3)\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) - \sin(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & -\cos(\theta_3)\sin(\theta_2) - \sin(\theta_3)\cos(\theta_2) \\ -\sin(\theta_3)\cos(\theta_2)\cos(\theta_1) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\cos(\theta_1) & -\sin(\theta_3)\cos(\theta_2)\sin(\theta_1) - \cos(\theta_3)\sin(\theta_2)\sin(\theta_1) & \sin(\theta_3)\sin(\theta_2) - \cos(\theta_3)\cos(\theta_2) \\ -\sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) & 0 \end{pmatrix}$$

Calcul de la matrice $[F\ G\ H] = A_{30} \times [S\ N\ A]$

On a

$$F = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = A_{30} \times \begin{bmatrix} S_x \\ S_y \\ S_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2+\theta_3)\left(\cos(\theta_1)S_x + \sin(\theta_1)S_y\right) + \sin(\theta_2+\theta_3)S_z \\ -\sin(\theta_2+\theta_3)\left(\cos(\theta_1)S_x + \sin(\theta_1)S_y\right) + \cos(\theta_2+\theta_3)S_z \\ +\sin(\theta_1)S_x - \cos(\theta_1)S_y \end{pmatrix}$$

De même, on a :

$$G = \begin{bmatrix} G_x \\ G_y \\ G_z \end{bmatrix} = A_{30} \times \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta_2+\theta_3)\left(\cos(\theta_1)N_x + \sin(\theta_1)N_y\right) - \sin(\theta_2+\theta_3)N_z \\ -\sin(\theta_2+\theta_3)\left(\cos(\theta_1)N_x + \sin(\theta_1)N_y\right) - \cos(\theta_2+\theta_3)N_z \\ -\sin(\theta_1)N_x + \cos(\theta_1)N_y \end{pmatrix}$$

Et

$$H=\begin{bmatrix}H_x\\H_y\\H_z\end{bmatrix}=A_{30}\times\begin{bmatrix}A_x\\A_y\\A_z\end{bmatrix}=\begin{pmatrix}\cos(\theta_2+\theta_3)\left(\cos(\theta_1)\,A_x+\sin(\theta_1)\,A_y\right)-\sin(\theta_2+\theta_3)A_z\\-\sin(\theta_2+\theta_3)\left(\cos(\theta_1)\,A_x+\sin(\theta_1)\,A_y\right)-\cos(\theta_2+\theta_3)A_z\\-\sin(\theta_1)\,A_x+\cos(\theta_1)\,A_y\end{pmatrix}$$

- Pré-multiplication de l'équation (4) par la matrice A_{43}on obtient

$$A_{43}A_{36}(q_4,q_5,q_6)=A_{43}[F\ G\ H]$$

Avec

$$\begin{pmatrix}\cos(\theta_4)\,F_x+\sin(\theta_4)F_z & \cos(\theta_4)\,G_x+\sin(\theta_4)G_z & \cos(\theta_4)\,H_x+\sin(\theta_4)H_z\\-\sin(\theta_4)\,F_x+\cos(\theta_4)F_z & -\sin(\theta_4)\,G_x+\cos(\theta_4)G_z & -\sin(\theta_4)\,H_x+\cos(\theta_4)H_z\\-F_y & -G_y & -H_y\end{pmatrix}$$

$$=\begin{pmatrix}\cos(\theta_5)\cos(\theta_6) & -\cos(\theta_5)\sin(\theta_6) & \sin(\theta_5)\\\sin(\theta_6) & \cos(\theta_6) & 0\\-\sin(\theta_5)\cos(\theta_6) & \sin(\theta_5)\sin(\theta_6) & \cos(\theta_5)\end{pmatrix}$$

à savoir $(\sin(\theta_4)H_x-\cos(\theta_4)\,H_z=0)$; permet de déduire le paramètre θ_4. En effet, on a :

$$\frac{\sin(\theta_4)}{\cos(\theta_4)}=\frac{H_z}{H_x}\rightarrow\left|\begin{matrix}\theta_4=Arctg\left(\frac{H_z}{-H_x}\right)\\\theta_4'=\theta_4+\pi\end{matrix}\right.$$

Pour le paramètre θ_5En effet, on a :

$$\begin{cases}\cos(\theta_4)\,H_x+\sin(\theta_4)\,H_z=\sin(\theta_5)\\H_y=\cos(\theta_5)'\end{cases}$$

Soit

$$\theta_5=Arctg\left(\frac{-\cos(\theta_4)\,H_x+\sin(\theta_4)H_z}{H_y}\right)$$

Pour trouver le paramètre θ_6

Ona :

$$\begin{cases} -\sin(\theta_4)\, F_x + \cos(\theta_4)\, F_z = \sin(\theta_6) \\ -\sin(\theta_4)\, G_x + \cos(\theta_4)\, G_z = \cos(\theta_6) \end{cases},$$

Soit

$$\theta_6 = Arctg\left(\frac{-\sin(\theta_4)\, F_x - \cos(\theta_4) F_z}{-\sin(\theta_4)\, G_x - \cos(\theta_4) G_z}\right)$$

Les équations de notre système :

$$* \begin{cases} \theta_1 = Arctg\left(\frac{P_y}{P_x}\right) \\ \theta_1' = \theta_1 + \pi \end{cases}$$

$$*\theta_2 = Arctg\left(\frac{\cos(\theta_2) b_1 - \sin(\theta_2) P_z - a}{\cos(\theta_2) b_1 + \sin(\theta_2) P_z}\right)$$

$$* \theta_3 = Arctg\left(\frac{b_1 \cos(\theta_2) - P_z \sin(\theta_2) - a}{b_1 \sin(\theta_2) + P_z \cos(\theta_2)}\right)$$

$$* \begin{matrix} \theta_4 = Arctg\left(\frac{H_z}{H_x}\right) \\ \theta_4' = \theta_4 + \pi \end{matrix}$$

$$*\theta_5 = Arctg\left(\frac{\cos(\theta_4) H_x + \sin(\theta_4) H_z}{-H_y}\right)$$

$$*\theta_6 = Arctg\left(\frac{-\sin(\theta_4) F_x + \cos(\theta_4) F_z}{-\sin(\theta_4) G_x + \cos(\theta_4) G_z}\right) \quad [10]$$

2.7Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'introduire les méthodes utilisées en robotique pour calculer les modèles géométrique directe et inverse d'un robot manipulateur série à six degrés de liberté. Nous avons par la suite appliqué ces techniques sur le robot PUMA 560. Ces modèles permettront par la suite de simuler le fonctionnement de ce robot mais également sa commande grâce au modèle inverse.

Par ailleurs, nous avons montré que l'inversion du modèle géométrique nous offre huit(08) solutions possibles pour une situation donnée de l'organe terminal.

Le choix d'une solution parmi les huit sera conditionné par les contraintes mécaniques et le respect des débattements des axes.

De ce fait, nous consacrons le prochain chapitre à la conception mécanique et au dimensionnement des éléments qui constituent le robot PUMA 560.

CHAPITRE III :

Conception mécanique

Conception mécanique

3.1Etude mécanique

3.2Etude théorique

3.3Introduction

Notre robot estconstitué detrois axes (segments),Il doit fonctionnera une vitesse de 200 tr/min, d'où la n'nécessité d'utiliser des réducteurs de vitesse entre le moteur et l'axe.

Un réducteur sert donc à réduire la vitesse d'un moteur avec transmission de la puissance de la machine motrice vers une machine réceptrice. Il permet également d'augmenter le couple moteur afin d'entrainer en rotation un organe récepteur. On distingue plusieurs réducteurs :

à poulie –courroie

à chaine

àroue et vis sans fin

épicycloïdaux

à engrenages

Dans notre situation nous avons besoin d'étudié la conception et la construction d'un réducteur à engrenage.

3.4La motorisation

Les moteurs à réluctance variable occupent aujourd'hui une place marginale dans les systèmes pas à pas et que s'il fallait simplifier au maximum ce cours, les moteurs à aimants et les moteurs hybrides pourraient être considérés comme une unique famille de moteurs à aimants présentant des caractéristiques électriques très voisines. Ils sont, en outre, souvent diphasés ce qui conduirait alors à l'étude élémentaire des moteurs à aimants diphasés.

Les moteurs pas à pas sont souvent utilisés par les concepteurs qui veulent minimiser le temps de développement du système dans lequel ils ont besoin d'entraînements asservis en position. En effet, les autres moteurs (à collecteur ou sans balais autopilotés) associés à un système d'asservissement en position (électronique

d'alimentation, de commande et capteurs) n'ont pas atteint le même niveau de standardisation et de bas coût que les « moteurs pas à pas ».

Pourtant, la solution pas à pas semble souvent une aberration du point de vue énergétique (consommation toujours beaucoup plus élevée) et du point de la qualité du mouvement (saccadé, vibratoire, engendrant souvent un bruit acoustique élevé).

En fait, comme souvent, c'est la genèse des techniques qui a plus ou moins verrouillé cette situation à une époque où le moteur pas à pas se présentait quasiment comme la seule solution de commande électromécanique en position.

Pour compenser tous les problèmes inhérents à la commande pas à pas, des améliorations souvent complexes ont été mises en œuvre (fonctionnement en boucle fermée de position avec capteur, alimentation en micro-pas, autopilotage sans capteur…). On retrouve.

alors des systèmes électromécaniques très proches des systèmes conventionnels sans balais (moteurs synchrones autopilotés) mis à part le fait qu'ils exploitent des structures électromagnétiques un peu particulières mais qui ne changent pas grand-chose au résultat final.

3.4 .1Choix les caractéristiques du moteur

Ce sont des moteurs pas à pas ils ont le caractéristique suivante

a)Moteure1 :

-Nous avons choisir un moteur de puissance nominal : P=30W

-Couple nominal : c=0.20Nm

-Vitesse nominale : N=1200 tr/min

b)Moteur 2+3 :

-Nous avons choisir un moteur de puissance nominal : P=25W

-Couple nominal : c=0.15Nm

-Vitesse nominale : N=1000 tr/min

c)Moteur 4+5+6:

-Nous avons choisir un moteur de puissance nominal : P=15W

-Couple nominal : c=0.10Nm

-Vitesse nominale : N=1000 tr/min

- Nous voulons faire un mécanisme ou la vitesse de rotation à la sortir ne dépasse pas N=220tr/min [11]

3.5Choix du type de réducteur :

Un train d'engrenage est une suite d'engrenage pouvant utilises déférents types de roues dentées (cylindrique, conique, hélicoïdale…avec des axes parallèles ou concourants).

Dans la majorité des cas, une seule entrée est liée à un moteur et une ou plusieurs sorties peuvent être envisagées.

D'une manière générale les roues dentées peuvent :

- soit tourner par apport à des axes fixes : les trais sont dits simples
- soit tourner par apport à des axes mobiles en rotation : les trais sont dits épicycloïdaux.

Dans ce projet on a choisi le type de réducteur simple avec des roues cylindriques et coniques.

3.5.1 Schéma cinématique

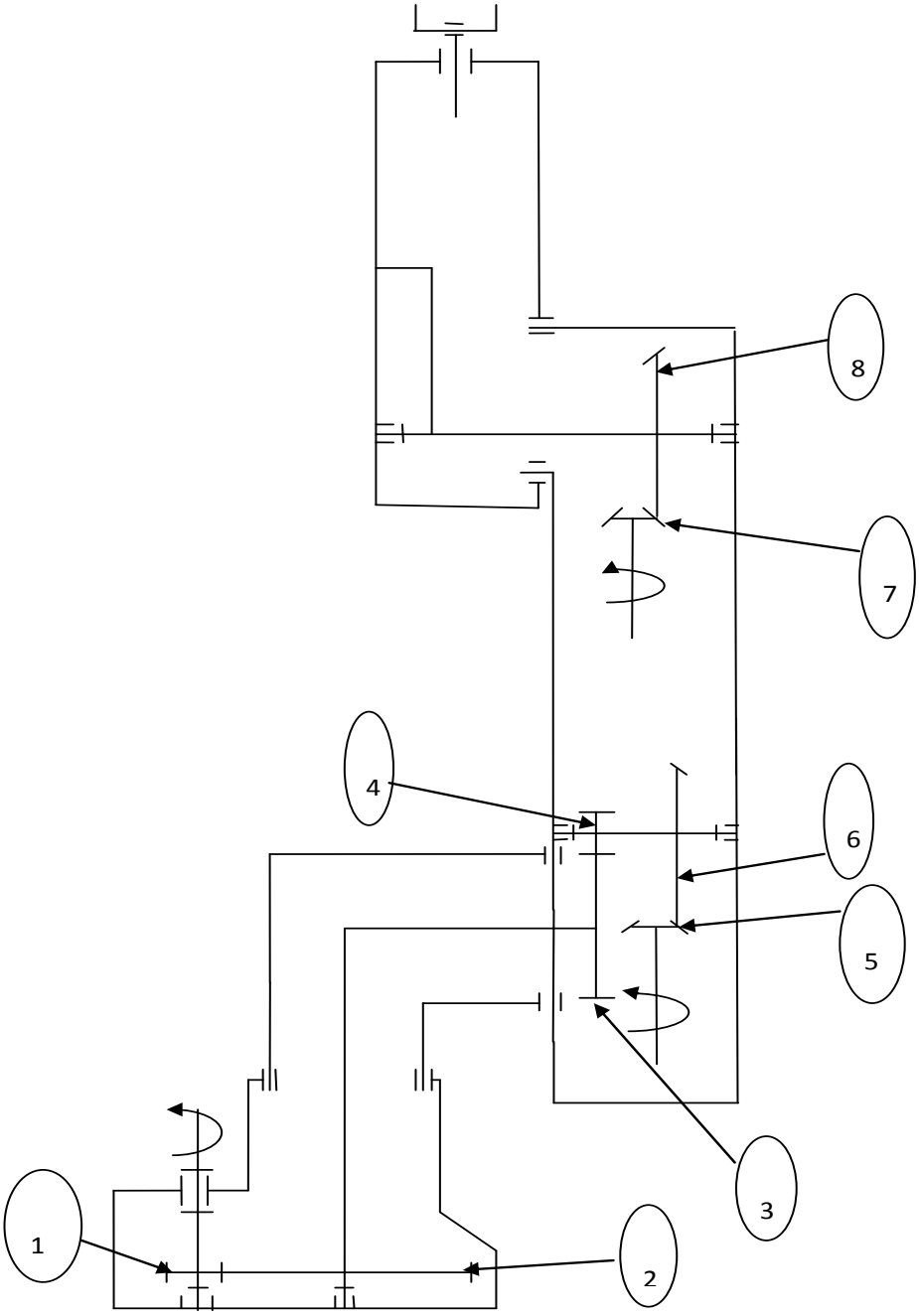


Figure 3.1 : Schématisation cinématique de PUMA 560 (train d'engrenage) [12]

3.5.2Calcul de la résistance pratique à l'extension

-Moteur1 :

-16Mn Cr5=1200n/mm^2 doc R_{pe}=600n/mm^2

-Moteur 2,3,4,5,6 :

-16Mn Cr5=1000n/mm^2 doc R_{pe}=500n/mm^2

3.6Etude cinématique :

A partir de la documentation technique, et sachant que la fréquence de rotation de l'arbre moteur est Nm=1200tr/min, On déterminer le rapport de réducteur et la fréquence de rotation de l'arbre de sortir « Ns » des trois versions de réducteur.
On choisir le matériau des roues et des arbres : acier de construction « acier au manganèse –chrome » 16Mn Cr5 .
Résistance pratique a l'extension du matériau en méga pascals $R_{pe=}R_e/s$ avec R_e : résistance élastique, s : coefficient de sécurité=2

3.6.1Le rapport du réducteur :

-Moteur1

$R=N_m/N_r$=1200/200 donc r=6

r<6 Alor le système une seule couple.

-Moteur2,3,4,5,6

$R=N_m/N_r$=1000/180 donc r=5.55

r<6 Alor le système un seul couple.

3.6.2Calcul du nombre des dents :

a) Pour le moteur 1 :

Les données :

C=0.30N*m

N_1=1200tr/min

N_2=200tr/min

Z_1= 12

Z_2= 32

*i=N_1/N_2=1200/200=6=2*3

i_1=2 , i_2=3

b) Pour le moteur 2 :

Les données :

C=0.20Nm

N_1=1000tr/min

N_2=180tr/min

Z_3= 15

Z_4= 26

*i=N1/N2=1000/180=6=5.55

I_3=2 , i_4=2.76

*$i_3=Z_6/Z_5 \Rightarrow Z_6=i_4*Z_5$=2.7*10=27

*$i_4=Z_8/Z_7 \Rightarrow Z_7=Z_8*i_2$=2.5*4=10

c)Pour le moteur 3 :

Les données :

C=0.20Nm

N_1=1000tr/min

N_2=180tr/min

Z_7= 10

Z_8= 26

Donc on a :

$Z_1 = 12 \quad Z_2 = 32 \quad Z_3 = 15 \quad Z_4 = 27 \quad Z_5 = 10 \quad Z_6 = 26 \quad Z_7 = 10 \quad Z_8 = 26$

3.6.3Calcul des modules:

a)Cas d'un engrenage cylindrique :

Engranage1:

c:couplematériau

k :fixé par des considérationstechnologiques (pression ,échauffement)

R_{pe} :résistance pratique d'extension

$m_{1/2}$=2.3$\sqrt[3]{\frac{c}{kZ_1Rpe}}$ AN $m_{1/2}$= 2.3$\sqrt[3]{\frac{0.30*1000}{10*10*600}}$

$m_{1/2}$ ≈2.5

Donc **$m_{1/2}$=2.50**

Engrenage2:

$m_{2/3}$=2.3$\sqrt[3]{\frac{c}{kZ_3Rpe}}$ AN $m_{2/3}$= 2.3$\sqrt[3]{\frac{0.30}{10*25*600}}$ **$m_{2/3}$ ≈2.5**

b)Cas d'un engrenage conique

Engrenage3 :

$$M_{5/6} = 5\sqrt[3]{c/Z_5^2(i_1^2+1)Rpe} = 5\sqrt[3]{0.20 * 1000/10^2(2^2+1)475}$$

Avec R_{pe}=950/2=475 et s=2 **$M_{5/6}$ ≈2.50**

On obtient

Engrenage4 :

$$M_{7/8} = 5\sqrt[3]{c/Z_7^2(i_1^2+1)Rpe} = 5\sqrt[3]{0.20 * 1000/15^2(2^2+1)475}$$

$M_{7/8}$ ≈2.50

Avec R_{pe}=950/2=475 et s=2

on obtient

3.7Calcul des diamètres des pignons :

$D_1=mz_1=2.5*10=30$

$D_2=mz_2=2.5*32=80$

$D_3=mz_3=2.5*15=36$

$D_4=mz_4=2.5*27=67.5$

$D_5=mz_5=2.5*10=25$

$D_6=mz_6=2.5*26=65$

$D_7=mz_7=2.5*10=25$

$D_8=mz_8=2.5*26=65$

3.8Etude dynamique :

3.8.1Pignons 1 et 2 cylindriques

$Z_{1=}$ 12 $_{dent}$; d_1=30mm ;Z_2= 32dent ;d_2=80mm

Calcule le nouveau couple :

Le couple de sortir $c_2=d_2/d_1*c_1$

AN : c_2=80/30x0.30=0.80Nm

C_2=0.8Nm

Calcule de :

a)La force tangentielle :

$F_{t1}=2c_1/d_1$ AN :F_{t1}= (2x0.30/12)x1000=50N

F_{t1}=50N

$F_{t2}=F_{t1}x2c_2/d_2$ AN: $_{Ft2}=60(2x0.9/80)1000=1350$

F_{t2}=1350N

b)La force radiale:

$F_{r1}=F_{t1}tg\alpha$ AN : $F_{r1}=50tg20=18.19N$

F_{r1}=18.19N

$F_{r2}=F_{t2}tg\alpha$ AN:$F_{r2}=1350tg20=491N$

F_{r2}=491N

c)La force appliquée sur la roue 1

$F_3=\sqrt{F_{t1}^2+F_{r1}^2}$ AN : $F_3=\sqrt{50^2+1350^2}$

F_3=1350.9N

d)La force appliquée sur la roue 2 :

$F_4=\sqrt{F_{t2}^2+F_{r2}^2}$AN : $F_4=\sqrt{18.19^2+491^2}$

F_4=491.33N

e)Calcul des poids :

$P_1=\rho\pi r^2{}_1 b_1 g$ AN: $P_1=7800x3.14x6^2*10^{-3}x\ 25x10^{-3}\ x9.81=1.54N$

Avec $b_1=Km=10x2.5=25mm$ et $8 < k<12$

P_1=1.54N

ρ:masse volumique

Donc

$P_2=\rho\pi r^2{}_2 b_2 g$ AN: $P_2=7800x3.14x(40)^2x10^{-6}x25x9.81=8.44N$

Avec b2=km=2.5x10=25mm

P_2=8.44N

3.8.2Pignons 3 et 4 cylindriques :

$Z_{3=}\ 15_{dent}$; $d_3=36mm$;$Z_4=$ 27dent ;$d_4=67.7mm$

Calcul du nouveau couple

Le couple $c_3=d_3/d_2xc_2$

AN : $c_3=36/80*0.90=0.75Nm$

C_3=0.40Nm

Le couple $c_4=d_4/d_3xc_3$

AN : c_3=67.7/36*0.75=1.5Nm

C_3=1.41Nm

Calcule de :

a)La force tangentielle :

F_{t3}=24N

$F_{t3}=2c_3/d_3$ AN :F_{t3}= (2x0.40/36)x1000=24N

$F_{t4}=F_{t3}x2c_4/d_4$ AN:F_{t4}=24(2x1.5/125)1000=1440

F_{t4}=345.6N

b)La force radiale:

F_{r3}=8.73N

$F_{r3}=F_{t3}tg\alpha$AN : F_{r3}=24tg20=8.73N

$F_{r4}=F_{t4}tg\alpha$ AN:F_{r4}=345.6tg20=125.7N

F_{r4}=125.7N

c)La force appliquée sur la roue 3

$F_3=\sqrt{F_{t3}^2+F_{r3}^2}$ AN : $F_3=\sqrt{24^2+345.6^2}$

F_3=346.43N

d)La force appliquée sur la roue 4 :

F_4=126N

$F_4=\sqrt{F_{t4}^2+F_{r4}^2}$AN : $F_4=\sqrt{8.73^2+125.7^2}$

e)Calcul des poids :

$P_3=\rho\pi r^2{}_3 b_3 g$ AN: P_3=7800x3.14x31^2x10^{-3}x 25x10^{-3} x9.81=5.7N

Avec b_3=Km=10*2.5=25mm et 8 < k<12

Donc

P_3=5.7N

$P_4=\rho\pi r^2{}_4 b_4 g$ AN: P_4=7800*3.14*$(62.5)^2$*10^{-6}*25*9.81=23.46N[15]

Avec b2=km=2.5*10=25mm

donc

P_4=23.46N

3.8.3Caractéristiques des roues cylindriques à dentures droites normales

Caractéristiques et formules des engrenages droits à denture droite		
caractéristiques	symboles ISO	observations et formules usuelles
vitesse angulaire	ω	$\omega = \frac{\pi . n}{30} \approx 0,1n$ (unités : rad/s)
nombre de tours par minute	n	n_1 (roue 1) et n_2 (roue 2)
module	m	valeurs normalisées (tableau des modules)
pas primitif	p	$p = \pi m = 3,14159\ m$ ($p = p_1 = p_2$)
nombre de dents	Z	Z_1 (roue 1) et Z_2 (roue 2)
rayon primitif	r	r_1 (roue 1) et r_2 (roue 2) ; $r = d/2$
diamètre primitif	d	$d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$
entraxe entre les 2 roues	a	$a = r_1 + r_2 = \frac{d_1 + d_2}{2} = \frac{m(Z_1 + Z_2)}{2}$
largeur de la dent	b	$b = k.m\ (7 \leqslant k \leqslant 12)$
saillie	h_a	$h_a = m$
creux	h_f	$h_f = 1.25m$
hauteur de dent	h	$h = h_a + h_f = 2,25m$
diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m$
rayon de tête	r_a	$r_a = r + m = d_a/2$
diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2,5m$
rayon de pied	r_f	$r_f = r - 1,25m = d_f/2$
épaisseur de la dent	s	$s_1 = e_2 = s_2 = e_1 = \pi m/2$ (avec jeu nul)
intervalle	e	$s_1 + e_1 = s_2 + e_2 = p$
angle de pression	α	valeur usuelle : $\alpha = 20°$
rayon de base	r_b	$r_b = d_b/2$
diamètre de base	d_b	$d_b = d.\cos\alpha$
pas de base	p_b	$p_b = p.\cos\alpha$

Tableau3.1 : Caractéristique des roues cylindrique à denture droite normale[13]



[12]

Désignation	**Symbole et formule**	**Résultat**			
		Roue5	Roue6	Roue7	Roue8
Module	$5\sqrt[3]{c/z_{1(1+i_1^2)}^2\delta_{pe}}$ ….R	2.5	2.5	2.5	2.5
Vitesse angulaire	W=2πN/60 avec N=180	w=104.66rad/s	w=104.66rad/s	w=104.66rad/s	w=104.66rad/s
Angle de pression	A	α=20	α=20	α=20	α=20
Angle primitive	$Tg\delta_i=Z_i/Z_j$; $tg\delta_2=90-\delta_1$	δ_1=23.56	δ_2=63.44	δ_1=23.56	δ_2=63.44
Diameter primitive	$D_i=mZ_i=2.5*20$	D_5=25	D_6=65	D_7=25	D_8=65
Diameter de tête	$d_{ai}=d+2m\cos\delta$	d_{a5}=29.60	d_{a6}=59.60	d_{a7}=29.60	d_{a8}=69.60
Diameter de pied	$D_i=d-2.5m\cos\delta_1$;	d_{f5}=20.40	d_{f6}=60.40	d_{f7}=20.40	d_{f8}=60.40
Angle de tête	$\delta_a=\delta+\theta_a$	$\delta_1=28.89^0$	$\delta_2=64.7^0$	$\delta_1=28.89^0$	$\delta_2=64.7^0$
Angle de creux	$Tg\theta_f=2.5m\sin\delta/d$	$\Theta_{f5}=4.57^0$	$\Theta_{f6}=3.19^0$	$\Theta_{f7}=3.12^0$	$\Theta_{f8}=3.11^0$
Angle de s'allie	$tg\Theta_a=2m\sin\delta/d$	$\Theta_{a5}=2.28^0$	$\Theta_{a6}=2.56^0$	$\Theta_{a6}=2.22^0$	$\Theta_{a6}=2.53^0$

Angle de hauteur	$\Theta=\theta_a+\theta_f$	$\Theta_5=6.85^0$	$\Theta_6=5.75^0$	$\Theta_7=7.97^0$	$\Theta_8=5.64^0$
Largeurge neratice primitive	$L_i=d_i/2\sin\delta 1$	L_5=27.95mm	L_6=39.12mm	L_7=41.9mm	L_8=69.87mm
Largeur de dent	L/4<b<L/3	9mm	13mm	14mm	22mm
s'allie	$H_a=m=2.5$	H_a=2.5m[m	H_a=2.5mm	H_a=2.5mm	H_a=2.5mm
Creux	H_f=1.25m	H_f=3.125mm	H_f=3.125mm	H_f=3.125mm	H_f=3.125mm
Hauteur de dent	$H=h_a+h_f$	H=5.625mm	H=5.625mm	H=5.625mm	H=5.625mm

Tableau3.2:Caractéristique des roues cylindrique à denture droite normale (1,2),(3,4):

3.8.4Pignons 5 et 6 « conique »

Z_5=10 dent; d_5=25 mm ; Z_6=26 dent ;d_6=65mm

a)Calcul du nouveau couple

$C_5=d_5/d_4xc_4=25/67.7x1.5=0.75Nm$

C_5=0.75Nm

$C_6=d_6/d_5xc_5=65/25x0.75=2.1Nm$

C_6=2.1Nm

b) La force tangentielle

$F_{t5}=2c_5/d_5=(2x0.75/25)10^3=60$ Nm

$F_{t5=}$60N

Donc

$F_{t6}=2c_6/d_6=(2x2.1/65)10^3=168$ Nm

$F_{t6=}$168N

Donc

c)La force radiale:

$F_{r5}=F_{t5}tg\alpha*\cos\delta=60*tg20\cos(26.56)=19.53N$

F_{r5}=19.53 N

Avec $\delta_1=26.56$ et $\alpha=20$

$F_{r6}=F_{t6}tg\alpha\cos\delta_2=963.6tg20\cos63.44=481.72N$

Avec $\delta_2=90-26.56=63.44^0$

f_{r6}=156.81N

Donc

d) La force axiale :

$f_{a5}=F_{t5}tg\alpha\sin\delta_1=60\ tg\ 20\ \sin26.56=9.71\ N$

Donc

F_{a5}=9.71 N

fa6=Ft6tgαsinδ2=156.81tg20sin63.65=51.11N

Donc

F_{a6}=51.11N

La force totale appliquée sur la roue 5

$F_5=\sqrt{F_{t5}^2+F_{r5}^2+F_{a5}^2}=63.84N$

F_5=63.84 N

La force totale appliquée sur la roue6

$F_6=\sqrt{f_{t6}^2+f_{r6}^2+f_a^2}=235.42N$

F_6=235.42N

Donc

e) Calcul de la largeur génératrice primitive :

$L_5=d_5/2\sin\delta=25/2\sin26.56=27.95$ mm

Donc

L_5=27.95mm

$L_6=d_6/2\sin\delta_2=65/2\sin63.44=39.12$mm

Donc

L_6=39.12mm

f) Calcul des poids :

$P_5=\rho\pi r^2 b_5 g=7800*3.14*(12.5)^2*10^{-3}12.5*10^{-3}*9.81$

P_5=1.87N

Avec b=km=5*2.5=12.5 et 4<k<6

ρ: masse volumique

Donc

$P_6=\rho\pi r^2 b_6 g=7800x3.14x(35)^2 10x9.81=18.01N$

Avec $L_6/4<b<L_6/3$ alors on prend b_2=10mm

Donc

P_6=2.94N

3.8.5Pignons 7 et 8 'conique'

Z_7=10 dent; d_7=25mm ; Z_8=26 dent ;d_8=65 mm

a)Calcul du nouveau couple

$C_7=d_7/d_6 x c_6=25/65x2.1=2.81Nm$

C_7=2.81Nm

$C_8=d_8/d_7 x c_7=65/25x2.81=9.36Nm$

C_8=9.36Nm

b) La force tangentielle

$F_{t7}=2c_7/d_7=(2x2.81/25)10^3=149.8N$

F_{t7}=149.8N

Donc

$F_{t8}=2c_8/d_8=(2x9.36/65)10^3=149.76$ N

F_{t8}=149.76N

Donc

a) La force radiale:

$F_{r7}=F_{t7}$ tgα cos δ=149.8 tg20 cos 26.56 =19.53N

F_{r7}=19.53 N

Avec δ_1=26.56 et α=20

$F_{r8}=F_{t8}tg\alpha cos\delta_2$ =149.7tg20cos63.44=24.36N

Avec δ_2=90-26.56=63.44^0

F_{r8}=24.36N

Donc

d)La force axiale :

$f_{a7}=F_{t7}tg\alpha\ \sin\delta_1=19.53\ tg\ 20\ \sin 26.56=3.17$ N

$F_{a7}=3.17$ N

Donc

$f_{a8}=F_{t8}tg\alpha\sin\delta_2=24.36tg20\sin(63.65)=7.94$N

$F_{a8}=7.94$N

Donc

La force totale appliquée sur la roue 7

$F_7=\sqrt{F_{t7}^2+F_{r7}^2+F_{a7}^2}$ =151.1N

$F_7=151.1$ N

Donc

La force totale appliquer sur la roue8 $F_8=\sqrt{f_{t8}^2+f_{r8}^2+f_{a8}^2}$=151.9N

Donc

$F_8=151.9$N

e) Calcul de la largeur génératrice primitive :

$L_7=d_7/2\sin\delta=37.5/2\sin 26.56=41.93$ mm

$L_7=41.93$mm

Donc

$L_8=d_8/2\sin\delta_2=125/2\sin 63.44=69.87$mm

$L_8=69.87$mm

Donc

f) Calcul des poids :

$P_7=\rho\pi r^2 b_7 g=7800*3.14*(7.5)^2*10^{-3}12.5*10^{-3}*9.81$

$P_7=1.87$N

Avec b=km=5x2.5=12.5 et 4<k<6

Donc

$P_8=\rho\pi r^2 b_8 g=7800x3.14*(62.5)^2 30*9.81=18.01$N

Avec $L_8/4<b<L_8/3$ alors on prend $b_2=30$mm

Donc

$P_8=2.81$N

g)Caractéristiques d'un engrenage conique à des axes perpendiculaires



Principales caractéristiques des engrenages coniques à denture droite

caractéristiques	symboles ISO	observations et formules usuelles
vitesse angulaire	ω	$\omega = (\pi.n)/30 \approx 0{,}1n$ (unités : rad/s)
nombre de tours/minute	n	n_1 (roue 1) n_2 (roue 2)
module	m	valeurs normalisées (tableau 1) mesurée sur cône complémentaire
pas primitif	p	$p = \pi.m = 3{,}141\,59m$ (avec p = $p_1 = p_2$)
nombre de dents	z	Z_1 (roue 1) Z_2 (roue 2)
diamètre primitif	d	$d_1 = mZ_1$ et $d_2 = mZ_2$
angle primitif	δ	δ_1 (roue 1) δ_2 (roue 2)
angle de pression	α	valeur la usuelle $\alpha = 20°$
angle de tête	δ_a	$\delta_a = \delta + \theta_a$
angle de creux	δ_f	$\delta_f = \delta - \theta_f$
angle de saillie	θ_a	$\tan\theta_a = 2m.\sin\delta/d$
angle de creux	θ_f	$\tan\theta_f = 2{,}5m.\sin\delta/d$
angle de hauteur	θ	$\theta = \theta_a + \theta_f$
longueur génératrice primitive		$L = d_1/2\sin\delta_1 = d_2/2\sin\delta_2$
largeur de dent	b	$L/4 \leqslant b \leqslant L/3$ (raisons de taillage)
saillie	h_a	$h_a = m$
creux	h_f	$h_f = 1{,}25m$
hauteur de dent	h	$h = h_a + h_f = 2{,}25m$
diamètre de tête	d_a	$d_a = d + 2m.\cos\delta$
diamètre de pied	d_f	$d_f = d - 2{,}5m.\cos\delta$

$\delta_1 + \delta_2 = 90°$	$\delta_1 + \delta_2 < 90°$	$\delta_1 + \delta_2 > 90°$
$\phi_1 = \delta_2$ $\phi_2 = \delta_1$ $\tan\delta_1 = Z_1/Z_2$ $\tan\delta_2 = Z_2/Z_1$	$\phi_1 = 90 - \delta_1$ $\phi_2 = 90 - \delta_2$ $\tan\delta_2 = \dfrac{\sin(\delta_1 + \delta_2)}{Z_1/Z_2 + \cos(\delta_1 + \delta_2)}$	$\phi_1 = 90 - \delta_1$ $\phi_2 = 90 - \delta_2$ $\tan\delta_2 = \dfrac{\sin[180 - (\delta_1 + \delta_2)]}{Z_1/Z_2 - \cos[180 - (\delta_1 + \delta_2)]}$

Figure3.3: Caractéristique d'un engrenage conique à des axes perpendiculaire

h)Caractéristique des engrenages coniques

Désignation	**Symbole et formule**	**Résultat**			
		Roue5	Roue6	Roue7	Roue8
Module	$5\sqrt[3]{c/z_{1(1+i_1^2}^2)\delta_{pe}}$ ….R1	2.5	2.5	2.5	2.5
Vitesse angulaire	W=2πN/60 avec N=180	w=104.66rad/s	w=104.66rad/s	w=104.66rad/s	w=104.66rad/s
Angle de pression	A	α=20	α=20	α=20	α=20
Angle primitive	$Tg\delta_i=Z_i/Z_j$; $tg\delta_2=90-\delta_1$	$\delta_1=23.56$	$\delta_2=63.44$	$\delta_1=23.56$	$\delta_2=63.44$
Diameter primitive	$D_i=mZ_i=2.5*20$	$D_5=25$	$D_6=65$	$D_7=25$	$D_8=65$
Diameter de tête	$d_{ai}=d+2m\cos\delta$	$d_{a5}=29.60$	$d_{a6}=59.60$	$d_{a7}=29.60$	$d_{a8}=69.60$
Diameter de pied	$D_i=d-2.5m\cos\delta_1$;	$d_{f5=}20.40$	$d_{f6}=60.40$	$d_{f7}=20.40$	$d_{f8}=60.40$
Angle de tête	$\delta_a=\delta+\theta_a$	$\delta_1=28.89^0$	$\delta_2=64.7^0$	$\delta_1=28.89^0$	$\delta_2=64.7^0$
Angle de creux	$Tg\theta_f=2.5msin\delta/d$	$\Theta_{f5}=4.57^0$	$\Theta_{f6}=3.19^0$	$\Theta_{f7}=3.12^0$	$\Theta_{f8}=3.11^0$
Angle de s'allie	$tg\Theta_a=2msin\delta/d$	$\Theta_{a5}=2.28^0$	$\Theta_{a6}=2.56^0$	$\Theta_{a6}=2.22^0$	$\Theta_{a6}=2.53^0$
Angle de hauteur	$\Theta=\theta_a+\theta_f$	$\Theta_5=6.85^0$	$\Theta_6=5.75^0$	$\Theta_7=7.97^0$	$\Theta_8=5.64^0$

Largeurge n-eratice	$L_i=d_i/2\sin\delta 1$	L_5=27.95mm	L_6=39.12mm	L_7=41.93mm	L_8=69.87mm
Largeur de dent	L/4<b<L/3	9mm	13mm	14mm	22mm
s'allie	$H_a=m=2.5$	H_a=2.5m[m	H_a=2.5mm	H_a=2.5mm	H_a=2.5mm
Creux	H_f=1.25m	H_f=3.125mm	H_f=3.125mm	H_f=3.125mm	H_f=3.125mm
Hauteur de dent	$H=h_a+h_f$	H=5.625mm	H=5.625mm	H=5.625mm	H=5.625mm

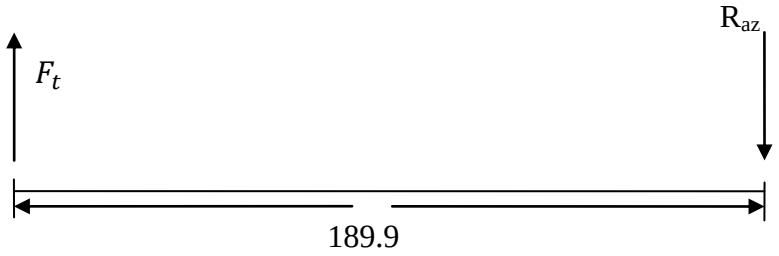
Tableau3.4 : Caractéristiques des engrenages coniques (5,6,7,8)[13]

3.9Calcule de résistance de matériau (RDM) :

3.9.1Premier arbre :

3.9.1.1Plan horizontal :

.



a) Calcul de la réaction

$R_{az}=F_{t=}60$

R_{az}=60N

b) Calcul du moment de flexion horizontal:

M_{fh} :F_t*x si x=0 M_{fh}=0

Si x=189.9M_{fh}=60*189.9=15600Nmm

Donc

M_{fhax}=15.6Nm

3.9.1.2. Plan vertical:



a) Calcul de la réaction:

$R_{ay}=F_r+p=524+8.44=532.44$ N

Donc

R_{ay}=532.44 N

b) Calcul du moment de flexion vertical:

$M_{fv}= (f_{r+}p)l =532.44*189=138.43$ Nm

$M_{fv\ max}$=138.43 Nmm

Donc $M_{f\ max}=\sqrt{M_{fh+}^2 M_{fv}^2}$ $=\sqrt{15.6^2+138.43^2}$

M_{fmax}=139.30 Nm

c) Calcul du moment de torsion:

$M_t=60*p/2\pi r_1=60*8.44*10^3/2\pi$ 37.5

M_{tmax} =2.15Nm

Donc

Donc le moment idéal ca sera :

$M_{fi}=\sqrt{M_f^{2+}M_t^2}=\sqrt{139.30^{2+}2.15^2}=139.31$Nm

Donc

M_{fidea}=139.31Nm

d)Calcul du diamètre D_1 :

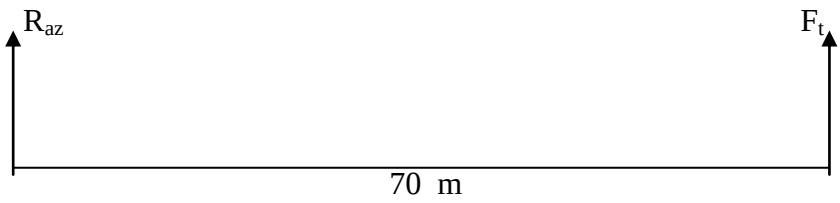
$D_1\geq\sqrt[3]{16*M_{fi}/\pi\delta_{pe}}=\sqrt[3]{16*\frac{139310}{3.14}*475}\approx5.9$mm

$D_1\approx5.9$ mm mais dans la gamme des pignons conique le diamètre minimum c'est de 15mm donc on prend

$D_1\approx$15 mm

3.9.2Deuxième arbre :

3.9.2.1Plan horizontal :



a)Calcul de la réaction

$R_{az}=F_{t=}1440N$

R_{az}=1440N

b)Calcul du moment de flexion horizontal:

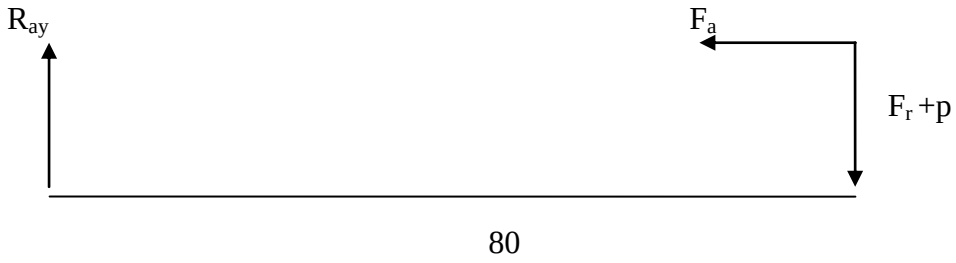
M_{fh} :F_t*x si x=0 M_{fh}=0

Si x=70 M_{fh}=70*1440=115200Nmm

Donc

$M_{fh\ max}$=115.2Nm

c)Plan vertical:



d)Calcul du moment de flexion vertical:

$M_{fv}=(f_{r+}p)l=$ (125.7+23.46)=149.16Nm

Donc

$M_{fv\ max}$=149.16Nm

e)Moment de flexion idéal

$M_{f\,max}=\sqrt{M_{fh+}^2 M_{fv}^2}\ =\sqrt{115.2^2+149.16^2}$

M_{fmax}=188.46 Nm

f) Calcul du diamètre D_2 :

$D_2 \geq \sqrt[3]{16 * M_{fi}/\pi\delta_{pe}} = \sqrt[3]{16 * \frac{188310}{3.14} * 475} \approx 4.9$mm

$D_2 \approx 4.9$ mm mais dans la gamme des pignons conique le diamètre minimum c'est de 15mm donc on prend [14]

$D_2 \approx 15$ mm

3.10Les codeurs optiques

3.10.1Introduction

Les dispositifs d'asservissement destinés aux entraînements réglés impliquent l'utilisation de systèmes de mesure capables de délivrer des valeurs de mesure à la fois pour l'asservissement de position et de vitesse ainsi que pour la commutation électronique.

3.10.2Définition d'un codeur optique

C'est un capteur de position angulaire, lié mécaniquement à un arbre qui l'entraîne, son axe fait tourner un disque qui lui est solidaire. Le disque comporte une succession de parties opaques et transparentes.

Une lumière émise par des Diodes Electro-Luminescentes (DEL), traverse les fentes de ce disque créant sur les photodiodes réceptrices un signal analogique.

Électroniquement ce signal est amplifié puis converti en signal carré, qui est alors transmis à un système de traitement.

3.10.3 Principe

Le fonctionnement des codeurs optiques est simple sur son principe mais extrêmement complexe au niveau de la réalisation. A partir d'une source lumineuse et un condenseur, de la lumière est envoyée au travers d'un réticule de balayage en direction d'un second réticule qui lui est mobile (disque ou règle). En fonction de la

position relative des deux réticules, la lumière incidente sur des photo-éléments (photo-diodes ou photo-transistors) est traduite en signaux électriques (courants) dont les valeurs sont directement fonction de la position relative entre les réticules[11]

3.10.4Le codeur incrémental (ou générateurs d'impulsions).

Le disque comporte au maximum 2 types de pistes :

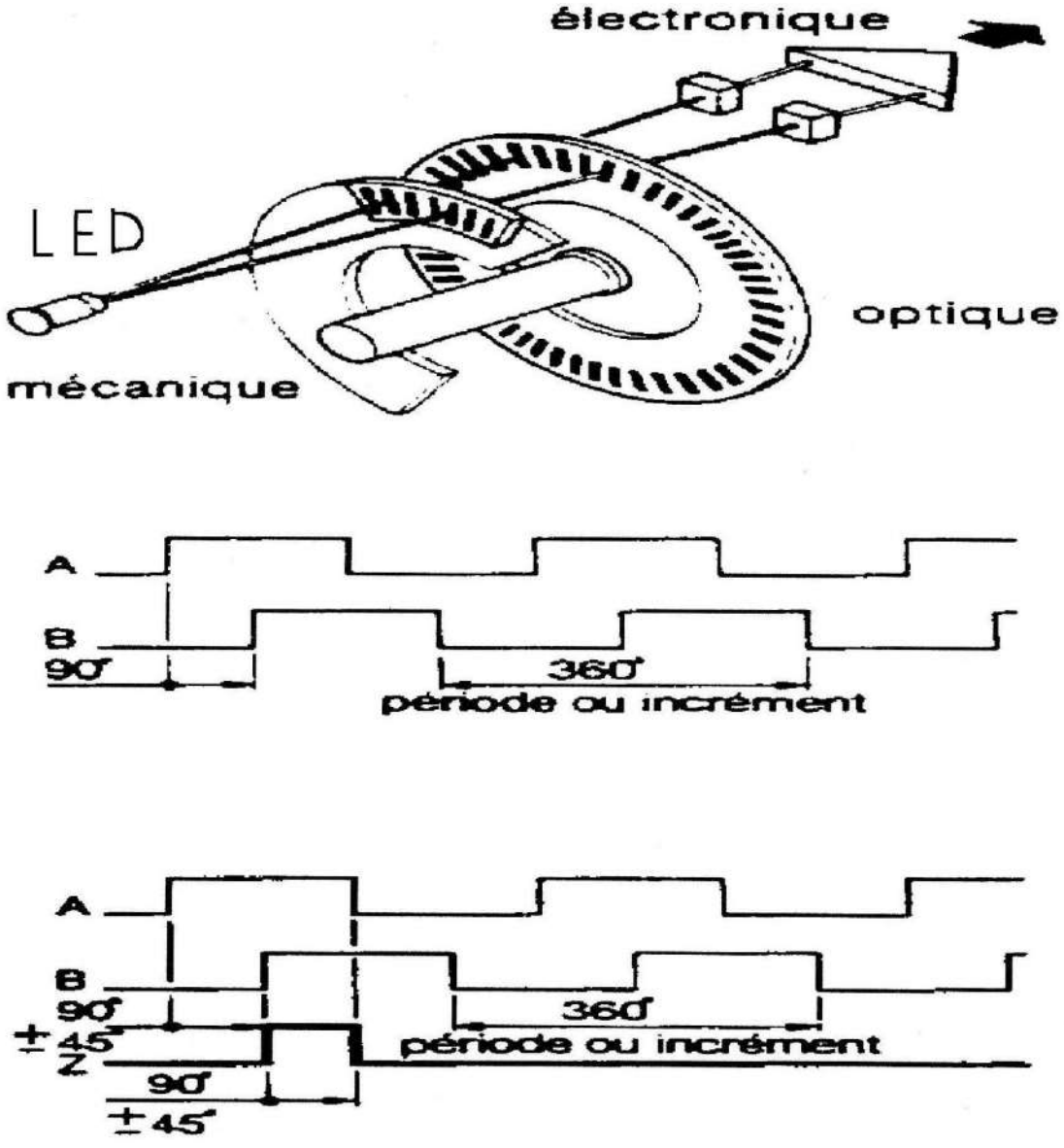


Figure3.2 : Capteur optique incrémental

La piste extérieure est divisée en ‘ n’intervalles d’angles alternativement opaques et transparents, ‘ n ’ s’appelant la résolution ou nombre de points. Pour un tour complet de l’axe du codeur le faisceau lumineux est interrompu ‘ n ’ foiset délivre ‘n’ signaux consécutifs. Derrière la piste extérieure sont installées 2 diodes photosensibles décalées délivrant des signaux carrés A et B. Ledéphasage entre ces deux signaux permet de déterminer le sens de rotation du système.

La piste intérieure comporte une seule fenêtre transparente et délivre un seul signal appelé ‘Top zéro’. Ce signal (Z) détermine uneposition de référence etpermet la réinitialisation àchaque tour.

Le comptage – décomptage des impulsions par le système de traitement (API)Permet de définir la position du mobile.

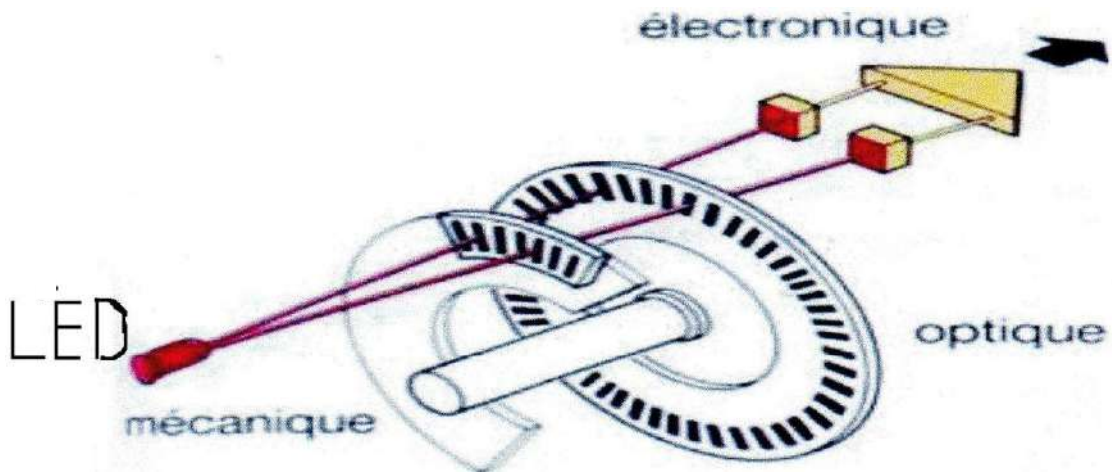


Figure3.3 : Capteur optique incrémental

CHAPITRE IV :

Validation des modèles des caméras et du Robot

Validation des modèles des caméras et du Robot

4.1Introduction

Ce chapitre sera consacré à la validation de l'ensemble des modèles mathématiques que nous avons élaborés. Il sera question de présenter les résultats du modèle sténopé complet direct et inverse de la caméra ainsi que le modèle géométrique direct et inverse de notre robot.

4.2 Résultats expérimentaux pour les deux cameras sans distorsion

Les paramètres utilisés de la camera (Sony XC-75CE)(***Caméra 1***) sont :

t_x= -200 mm, t_y= -180 mm, t_y= 650 mm, α= 15°, β= 1°, δ= 2°)

($f_x = 768$, $f_y = 576$, $c_x = 388$, $c_y = 296$) en pixel.

Les paramètres utilisés de la camera (Sony XCD-X710)(***Caméra 2***) sont :

t_x= -235 mm, t_y= -250 mm, t_y= 650mm, α= 15°, β= 1°, δ= 2°)

($f_x = 999$, f_y =670 ,$c_x = 470$, $c_y = 342$) en pixel.

4.2.1 Caméra 1

Pour valider le modèle direct complet de la camera, nous avons introduit les coordonnées des cibles dans l'espace 3D (x,y,z). Le but étant de déterminer coordonnées de ces points dans le plan image (u.v).

Nous avons choisis les points tests de telle sorte à ce qu'ils couvrent les parties qui peuvent être critiques dans le plan image (les bords, les coins et le centre de l'image).

Le tableau ci-dessous résumeles résultats pour le modèle direct

Points	X	Y	Z	U	V
1	0.007300	0.476715	-0.459600	100.062488	500.060461
2	-0.333900	-0.088454	-0.243900	100.009869	100.015936
3	-0.168400	0.838405	0.210200	700.047945	500.008843
4	-0.509600	0.273235	0.425900	699.995326	99.964319
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	299.950795	199.947653
6	-0.365700	0.294035	0.148700	500.027014	200.036434
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	300.030800	399.988346
8	-0.136600	0.647160	0.013900	500.039372	449.998595
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	387.981548	295.935837

Tableau 4.1 : Résultats de modèle de sténopé direct avec la caméra1

Pour le Modèle inverse complet de la camera nous avons introduit les coordonnées de plusieurs cibles cible dans le plan images (u,v) pour déterminer leur position dans l'espace 3D (x,y,z).

Voici le tableau des résultats pour le modèle inverse

Points	U	V	X	Y	Z
1	100.062488	500.060461	0.007300	0.476715	500.060461
2	100.009869	100.015936	-0.333900	-0.088454	100.015936
3	700.047945	500.008843	-0.168400	0.838405	500.008843
4	699.995326	99.964319	-0.509600	0.273235	99.964319
5	299.950795	199.947653	-0.307200	0.173273	199.947653
6	500.027014	200.036434	-0.365700	0.294035	200.036434
7	300.030800	399.988346	-0.136600	0.455916	399.988346
8	0.013900	449.998595	-0.136600	0.647160	449.998595
9	-0.028100	295.935837	-0.251100	0.361952	295.935837

Tableau 4.2 : Résultats du model sténopé inverse avec la caméra1

Nous remarquons que les résultats du modèle direct et inverse sont les même donc le système est réversible et c'est le but souhaité.

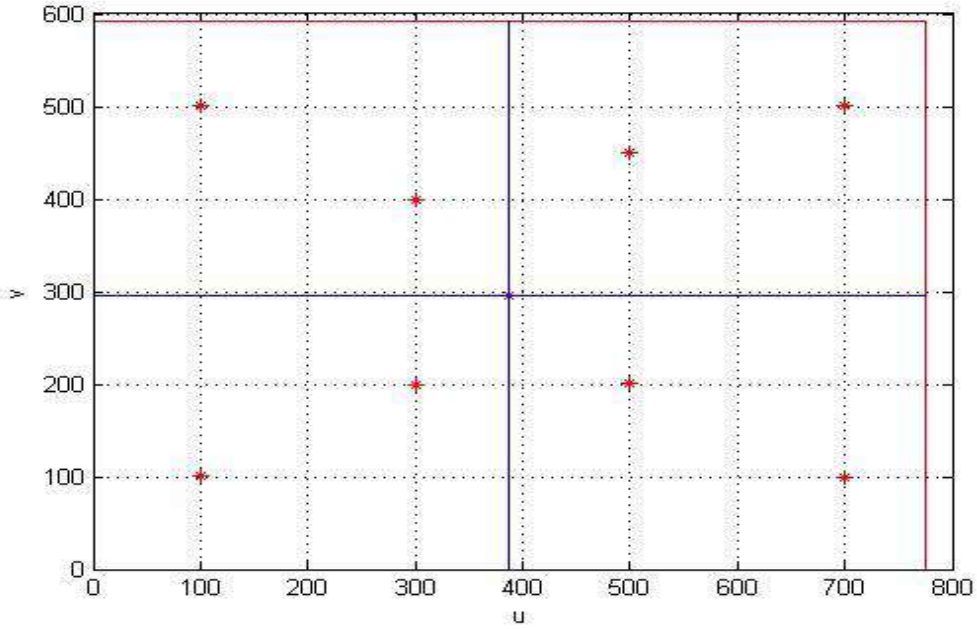


figure4.1 : Représentations de la projection des points fournis à la caméra 1

4.2.2Caméra 2

Nous reprenons les mêmes conditions appliquées à la camera 1 pour les utiliser avec les paramètres de la camera 2.

Les résultats pour le modèle inverse sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Points	U	V	X	Y	Z
1	60.491283	532.461994	0.007300	0.476715	-0.459600
2	60.422837	67.132426	-0.333900	-0.088454	-0.243900
3	840.941116	532.401953	-0.168400	0.838405	0.210200
4	840.872670	67.072384	-0.509600	0.273235	0.425900
5	320.502246	183.372444	-0.307200	0.173273	-0.074600
6	580.757640	183.475713	-0.365700	0.294035	0.148700
7	320.606314	416.058666	-0.136600	0.455916	-0.182400
8	580.773715	474.230310	-0.152500	0.647160	0.013900
9	435.010998	295.025366	-0.251100	0.361952	-0.028100

Tableau 4.3 : Résultats du model sténopé inverse avec la caméra2

Les résultats pour le modèle direct sont résumés dans le tableau ci-dessous.

Points	X	Y	Z	U	V
1	0.007300	0.476715	-0.459600	60.491283	532.461994
2	-0.333900	-0.088454	-0.243900	60.422837	67.132426
3	-0.168400	0.838405	0.210200	840.941116	532.401953
4	-0.509600	0.273235	0.425900	840.872670	67.072384
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	320.502246	183.372444
6	-0.365700	0.294035	0.148700	580.757640	183.475713
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	320.606314	416.058666
8	-0.152500	0.647160	0.013900	580.773715	474.230310
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	435.010998	295.025366

Tableau 4.4 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra2

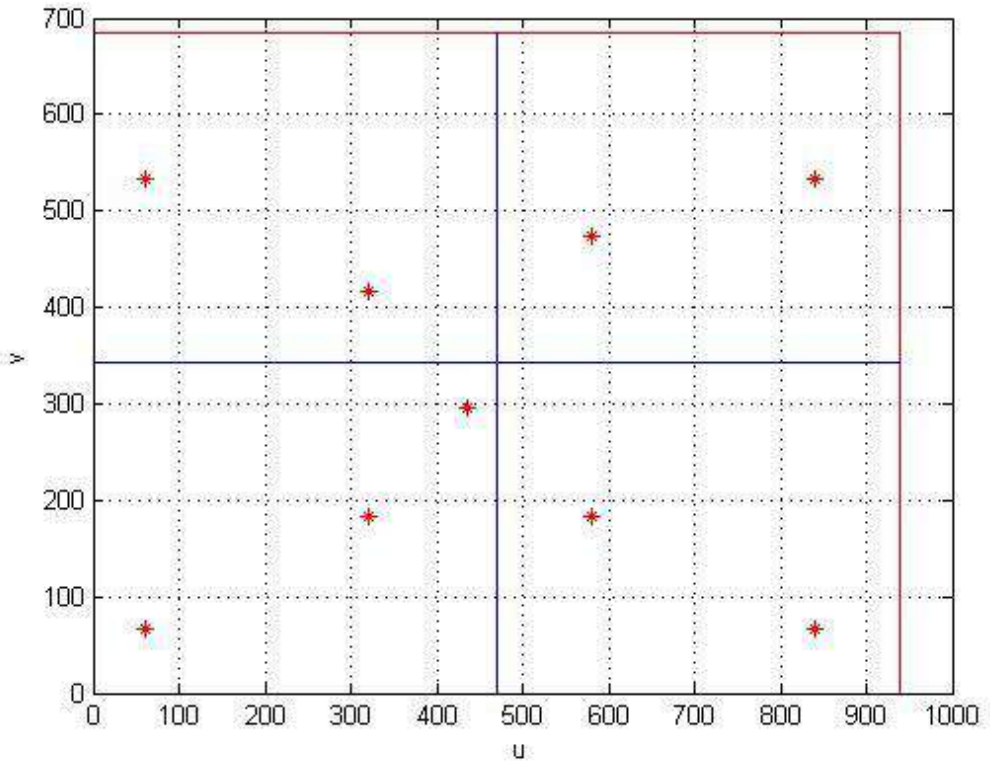


figure4.2 : Représentions de la projection des points fournis à la caméra 2

Nous remarquons que les résultats du modèle direct et inverse sont les même donc le système est réversible et c'est le but souhaité.

Nous avons choisi deux types de cameras avec des caractéristiques différentes et les coordonnés des points que nous avons introduise sont révélés les mêmes.

4.3 Résultats expérimentaux pour les deux caméras avec distorsions

Pour les deux types de distorsions radiales et tangentielles, nous avons envisagé une distorsion de 1er degré. Le tableau suivant représente les niveaux de distorsion.

	K1	P1	P2
1 pixel	$1.09e^{-7}$	$2.13e^{-8}$	$-4.86e^{-9}$
5 pixels	$1.09e^{-7}$	$7.69e^{-8}$	$9.38e^{-9}$
10 pixels	$1.09e^{-7}$	$4.81e^{-9}$	$-7.66e^{-10}$
50 pixels	$1.08e^{-7}$	$1.74e^{-9}$	$2.94e^{-9}$

Tableau 4.5 : Valeurs des facteurs de distorsions K et P utilisées

4.3.1Tests des distorsions avec la Caméra1

Pour1pixel de distorsion

Points	X	Y	Z	U	V
1	0.007300	0.476715	-0.459600	91.905242	505.843496
2	-0.33390	-0.088454	-0.243900	99.382603	99.588792
3	-0.168400	0.838405	0.210200	725.251721	516.474041
4	-0.509600	0.273235	0.425900	717.027898	89.280979
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	298.709327	198.58834
6	-0.365700	0.294035	0.148700	503.58371	197.00489
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	297.64105	402.82432
8	-0.152500	0.647160	0.013900	505.58303	457.59978
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	387.990887	295.93681

Tableau 4.6 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (1 pixel)

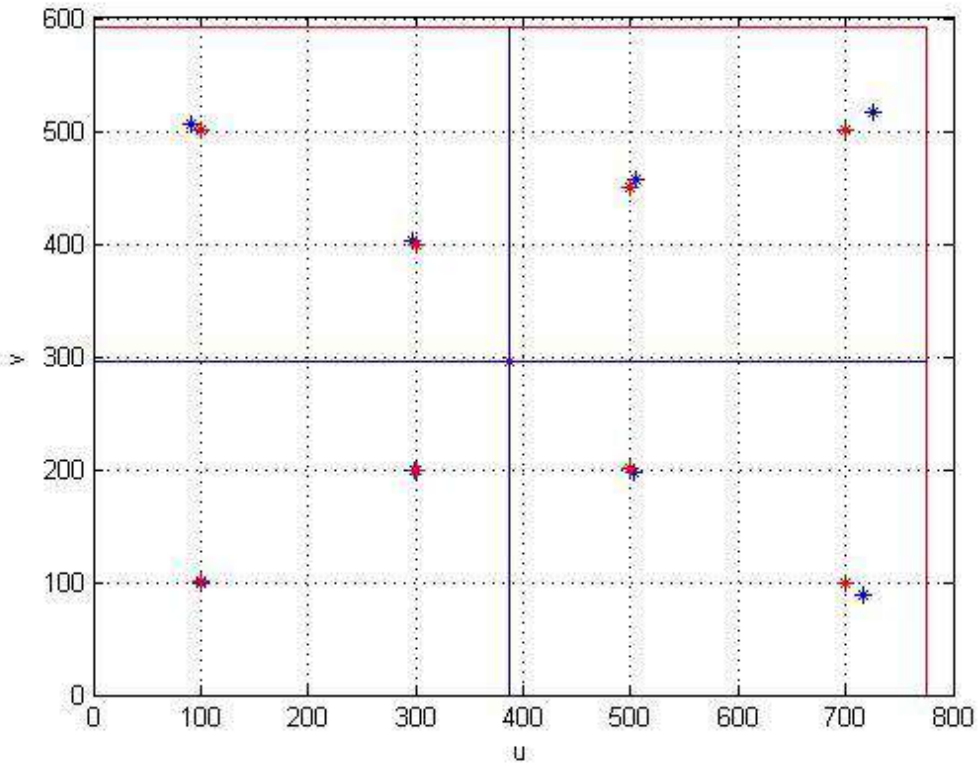


Figure4.3 : Représentation des résultats de la projection avec distorsions

Pour 5pixels de distorsion :

Points	X	Y	Z	u	V
1	0.0073	0.476715	-0.459600	91.903149	505.853077
2	-0.33390	-0.088454	-0.243900	99.382384	99.589110
3	-0.168400	0.838405	0.210200	725.240249	516.483020
4	-0.509600	0.273235	0.425900	717.011359	89.286648
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	298.707135	198.590015
6	-0.365700	0.294035	0.148700	503.576670	197.007613
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	297.639123	402.829341
8	-0.152500	0.647160	0.013900	505.577496	457.599787
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	387.987384	295.9398263

Tableau4.7 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (5 pixels)

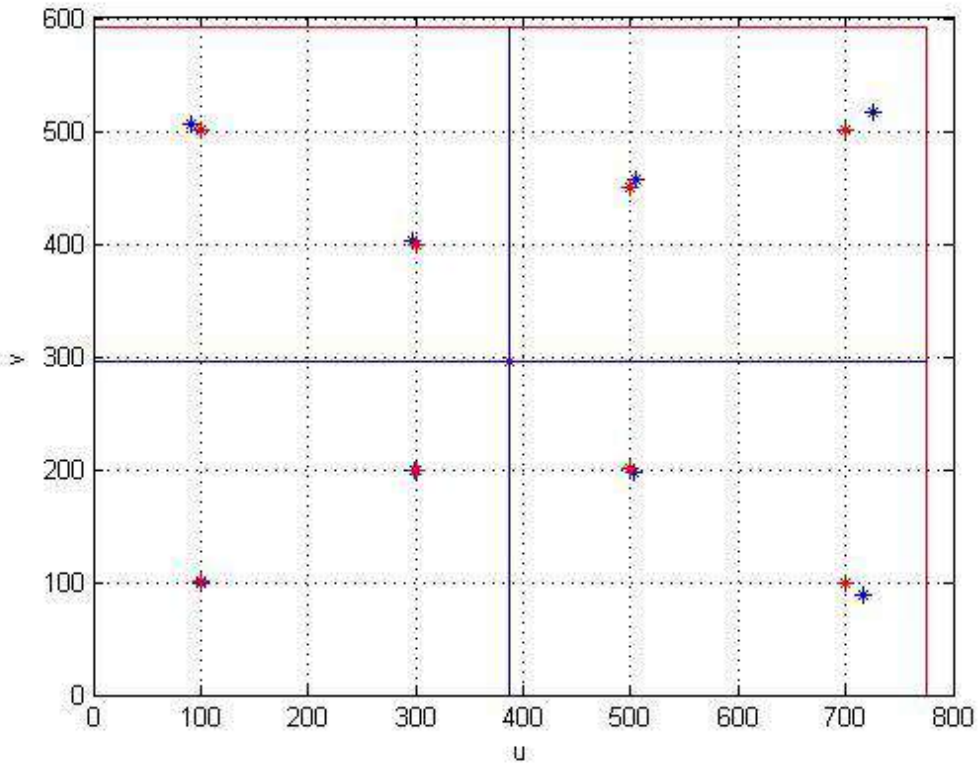


Figure4.4 : Représentation des résultats de la projection avec distorsions

Pour10 pixels de distorsion :

Points	X	Y	Z	u	V
1	0.0073	0.476715	-0.459600	91.901319	505.845056
2	-0.33390	-0.088454	-0.243900	99.382065	99.588646
3	-0.168400	0.838405	0.210200	725.228050	516.468302
4	-0.509600	0.273235	0.425900	717.005615	89.280941
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	298.705021	198.587536
6	-0.365700	0.294035	0.148700	503.572342	197.003269
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	297.635435	402.829341
8	-0.152500	0.647160	0.013900	505.570136	457.596337
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	387.983486	295.934959

Tableau4.8 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (10 pixels)

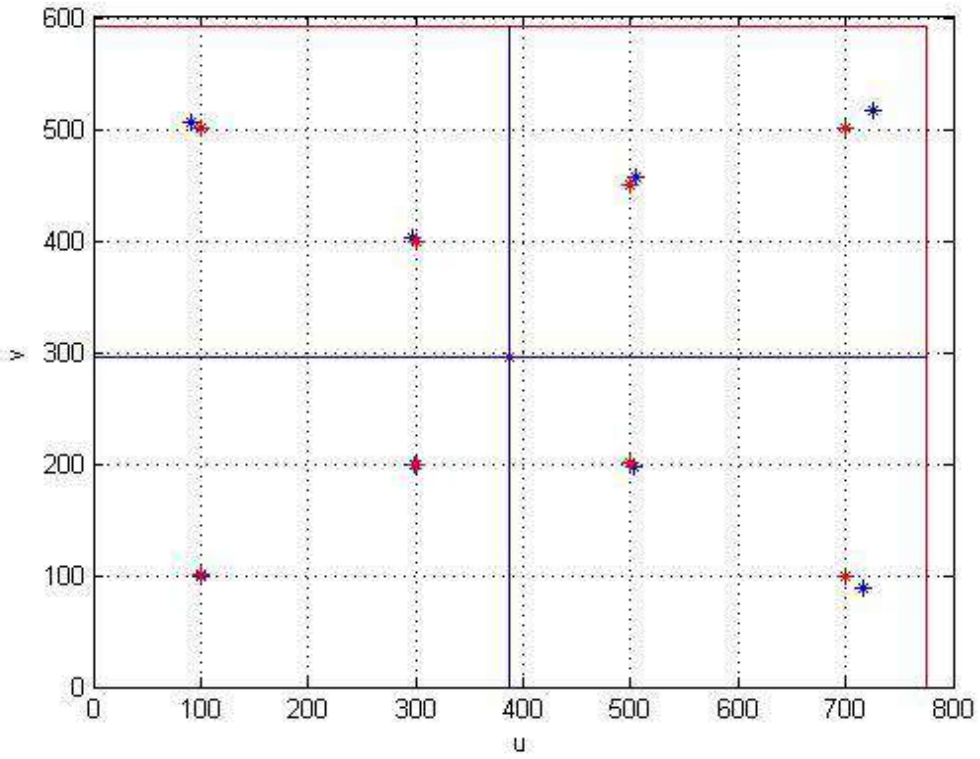


Figure 4.5 : Représentation des résultats de la projection avec distorsions

Pour 50 pixels de distorsion :

Points	X	Y	Z	u	v
1	0.0073	0.476715	-0.459600	91.975716	505.794498
2	-0.33390	-0.088454	-0.243900	99.387778	99.592654
3	-0.168400	0.838405	0.210200	724.994439	516.319778
4	-0.509600	0.273235	0.425900	716.845604	89.380456
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	298.715957	198.600428
6	-0.365700	0.294035	0.148700	503.538168	197.031861
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	297.656999	402.798229
8	-0.152500	0.647160	0.013900	505.518182	457.528448
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	387.982688	295.935802

Tableau 4.9 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra1 (50 pixels)

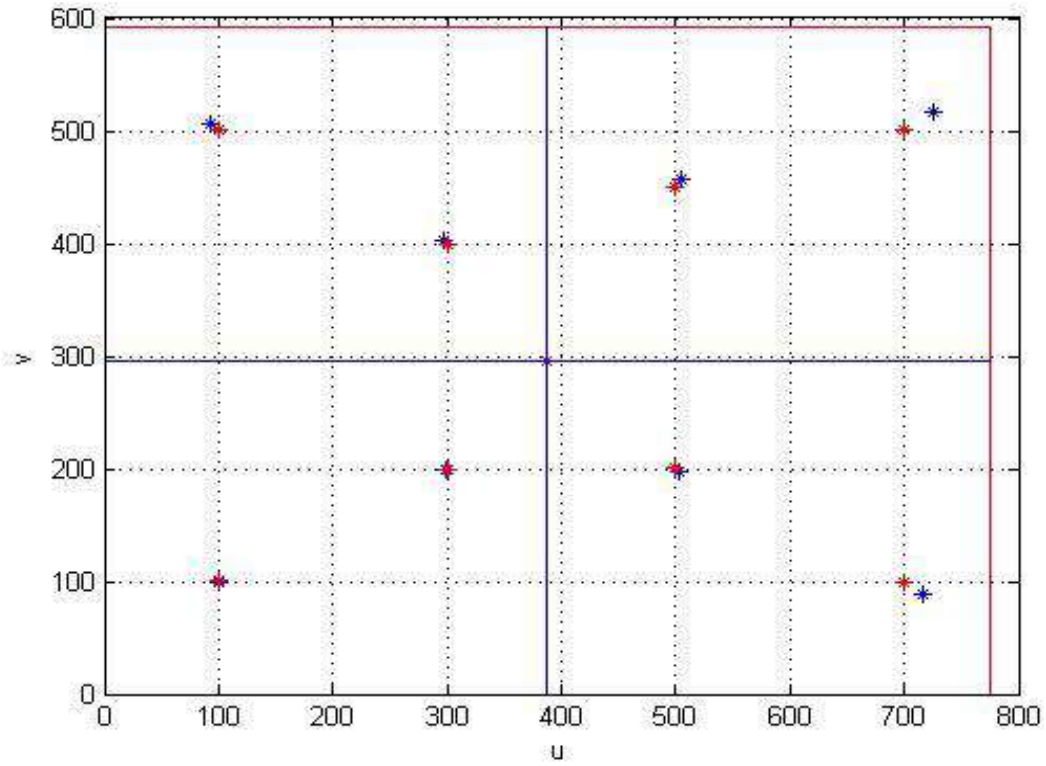


Figure 4.6 : Représentation des résultats de la projection avec distorsions

a) Interprétation

Distorsion	Distance minimum		Distance maximum		Ecart type	
Modèle	U	V	U	V	U	V
Aucune	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
1 pixel	0.010339	0.000951	25.203776	16.465198	25.174437	16.464247
5 pixels	0.011836	0.0039893	25.392349	16.474177	25.186513	16.470187
10 pixels	0.021938	0.004878	25.480105	16.489459	25.198212	16.498581
50 pixels	0.04114	0.005135	26.946494	16.510935	24.945354	16.6109

Tableau4.10 : Erreurs pour les différents types de distorsions

Au vu des résultats obtenus, nous remarquons une faible différence entre les quatre niveaux de distorsions. C'est pour cela que nous pourrons considérer que l'influence de cette distorsion peut être assimilée à celle introduite par 1 pixel.

4.3.2 Tests de distorsions avec la Caméra 2

Pour 1 pixel de distorsion :

points	X	Y	Z	U	v
1	0.007300	0.476715	-0.459600	47.678763	538.421074
2	-0.333900	-0.088454	-0.243900	60.058936	66.888106
3	-0.168400	0.838405	0.210200	881.041647	552.972829
4	-0.509600	0.273235	0.425900	869.682368	45.747726
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	318.287138	181.016460
6	-0.365700	0.294035	0.148700	585.257072	177.068543
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	316.122639	418.288441
8	-0.152500	0.647160	0.013900	587.585417	482.340044
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	433.970024	293.614049

Tableau4.11 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra 2 (1 pixels)

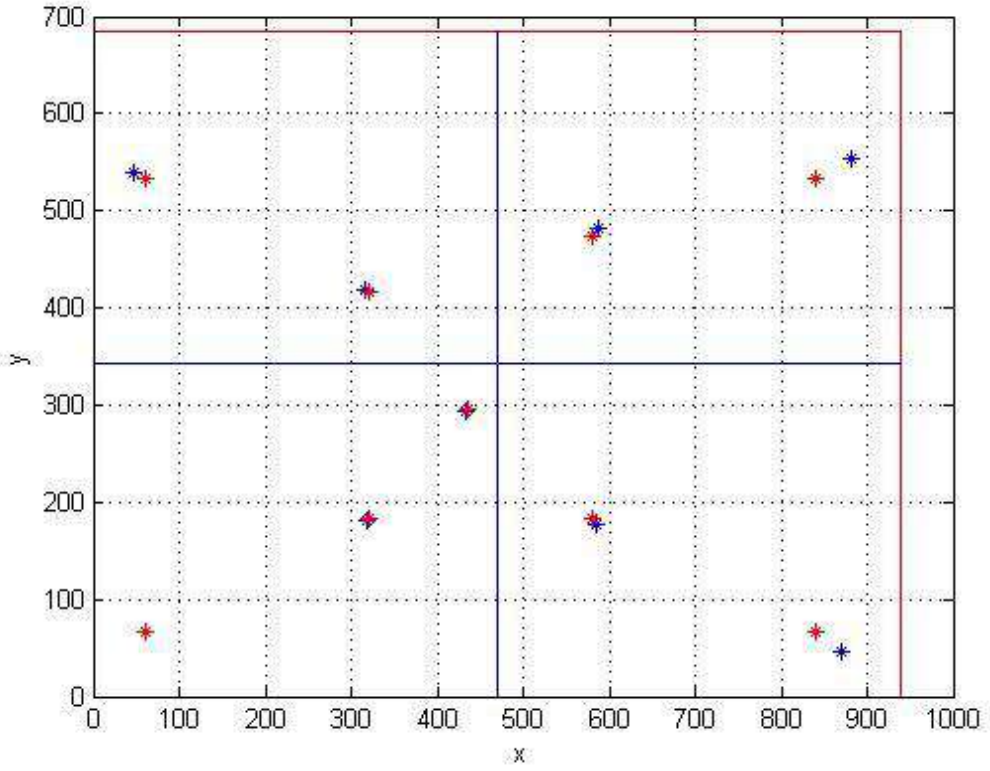


Figure4.7 : Représentation des résultats avec distorsions

Pour5 pixels de distorsion :

Points	X	Y	Z	U	V
1	0.007300	0.476715	-0.459600	47.675688	538.432380
2	-0.333900	-0.088454	-0.243900	60.058841	66.888240
3	-0.168400	0.838405	0.210200	881.022141	552.983077
4	-0.509600	0.273235	0.425900	869.655315	45.756498
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	318.284170	181.017764
6	-0.365700	0.294035	0.148700	585.245951	177.071908
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	316.119914	418.293692
8	-0.152500	0.647160	0.013900	587.576570	482.347049
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	433.964804	293.616989

Tableau 4.12 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra2 (5 pixels)

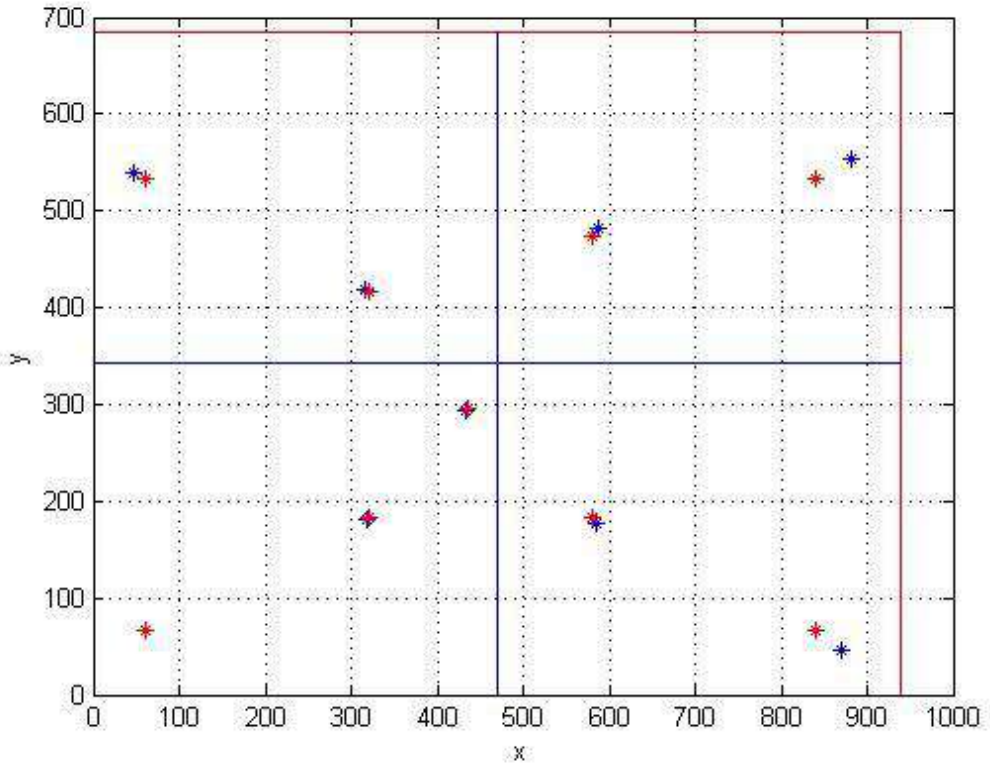


Figure4.8 : Représentation des résultats avec distorsions

Pour 10 pixels de distorsion :

Points	X	Y	Z	u	V
1	0.007300	0.476715	-0.459600	47.674179	538.423505
2	-0.333900	-0.088454	-0.243900	60.058714	66.888043
3	-0.168400	0.838405	0.210200	881.005872	552.964493
4	-0.509600	0.273235	0.425900	869.647926	45.748812
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	318.281988	181.015356
6	-0.365700	0.294035	0.148700	585.240741	177.066827
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	316.115804	418.286592
8	-0.152500	0.647160	0.013900	587.567340	482.335122
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	433.960294	293.611664

Tableau4.13 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra2 (10 pixels)

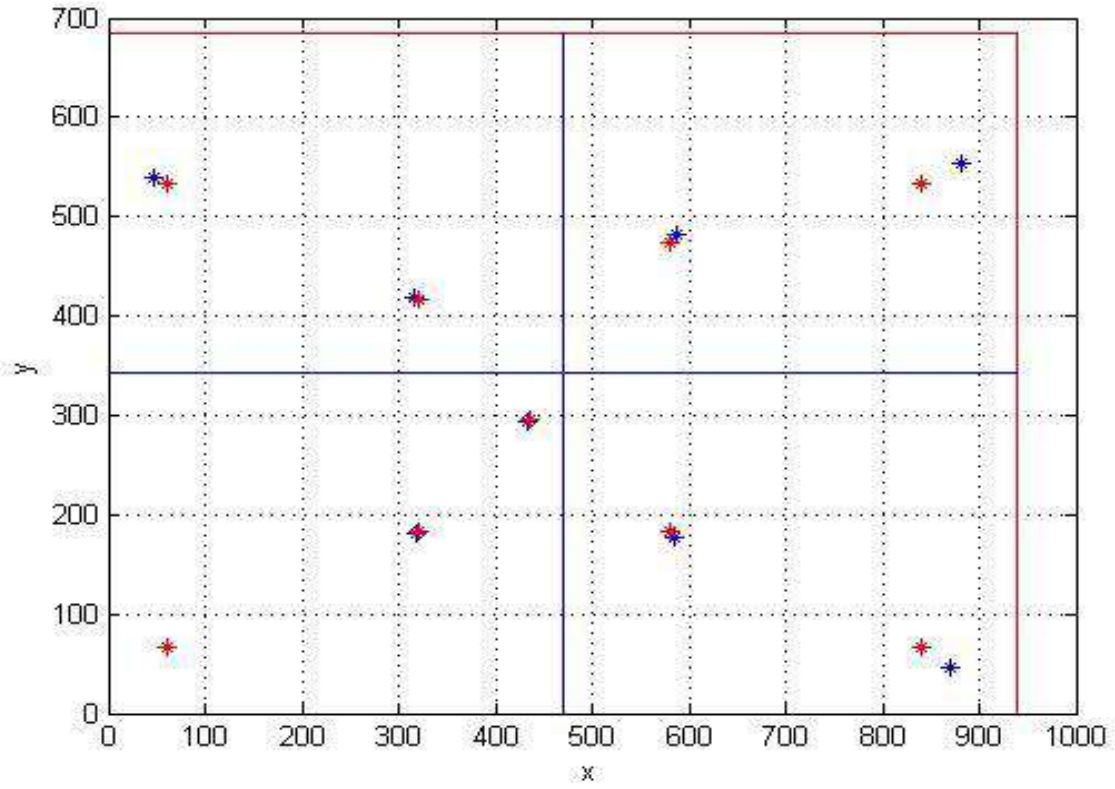


Figure 4.9 : Représentation des résultats avec distorsions

Pour 50 pixels de distorsion

Points	X	Y	Z	U	V
1	0.007300	0.476715	-0.459600	47.791115	538.371779
2	-0.333900	-0.088454	-0.243900	60.062038	66.890324
3	-0.168400	0.838405	0.210200	880.634368	552.778918
4	-0.509600	0.273235	0.425900	869.377932	45.946770
5	-0.307200	0.173273	-0.074600	318.301758	181.037379
6	-0.365700	0.294035	0.148700	585.197241	177.126602
7	-0.136600	0.455916	-0.182400	316.156533	418.267648
8	-0.152500	0.647160	0.013900	587.503317	482.262850
9	-0.251100	0.361952	-0.028100	433.968904	293.625525

Tableau4.14 : Résultats du model sténopé direct avec la caméra2 (50 pixels)

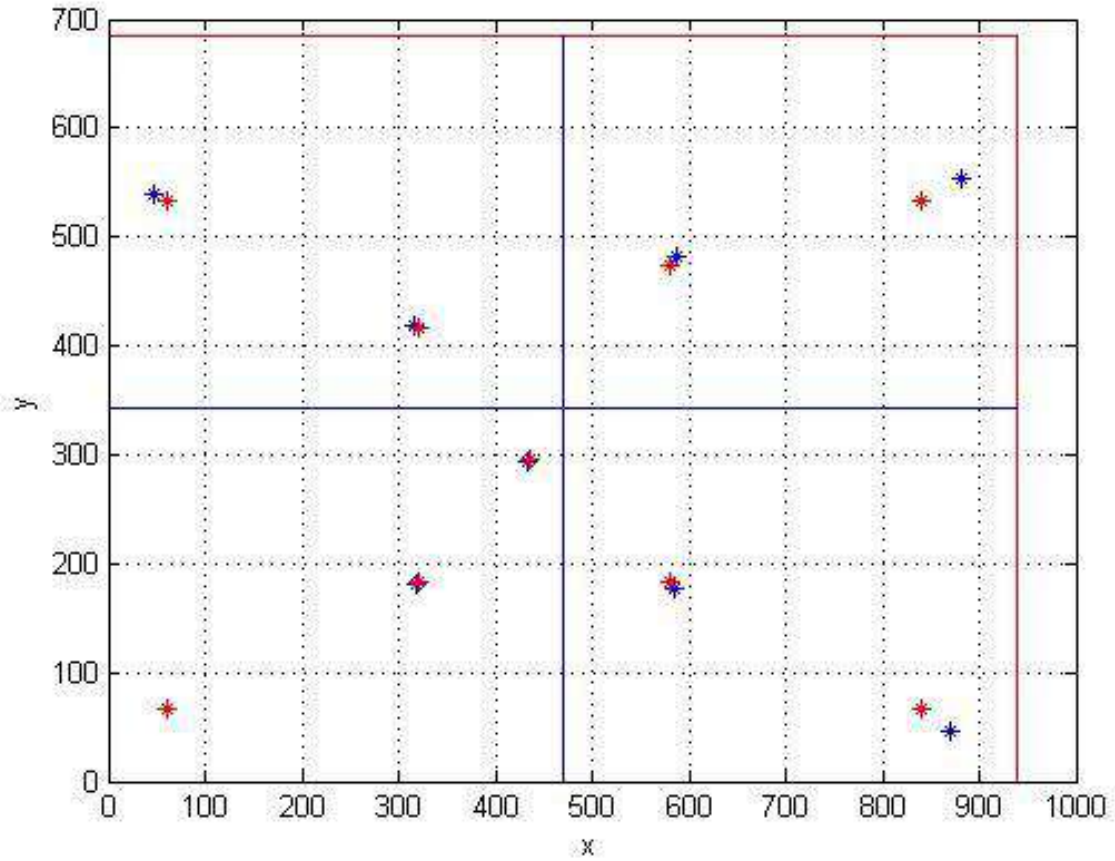


Figure4.10: Représentation des résultats avec distorsions

a)Interprétation

Distorsion	Distance minimum		Distance maximum		Ecart type	
Modèle	U	V	U	v	U	V
Aucune	1.040974	1.411317	40.00531	20.570876	39.059557	19.159559
1 pixel	1.046194	1.418377	40.081025	20.581124	39.064831	19.172747
5 pixels	1.050704	1.413702	40.094756	20.59254	39.074052	19.188838
10 pixels	1.062094	1.429841	40.693252	20.676965	38.651158	18.877124
50 pixels	1.070974	1.431317	40.700531	20.680876	39.759557	19.959559

Tableau 4.15 : Erreurs pour les différents types de distorsions

Au vu des résultats présentés dans les tableaux (5.10) et (5.15), nous avons montré l'influence des distorsions dans le calcul des coordonnées (u,v). En effet, plus la focale de la camera est grande et la taille du capteur CCD importante plus l'erreur de calcul des coordonnées (u,v) augmente. Ceci démontre bien que lorsqu'on modélise une caméra, un des paramètres à ne pas négliger est bien les distorsions, car il peut introduire des incertitudes importantes dans le positionnement du bras.

4.4Résultats expérimentaux pour le modèle géométrique du robot

Position0 :Le robot dans l'état stable

1er position :

q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	X	y	Z
170.6870	68.2767	40.3312	210.0928	-15.8997	-55.8275	0.9153	-0.1501	0.0005549

Tableau 4.16 : valeurs expérimentales

2eme position :

q_1	q_2	q_3	q_4	q_5	q_6	X	y	z
165.8711	50.1935	-86.8344	129.1772	86.7915	80.3082	0.5963	-01.501	-0.01435

Tableau 4.17 : valeurs expérimentales

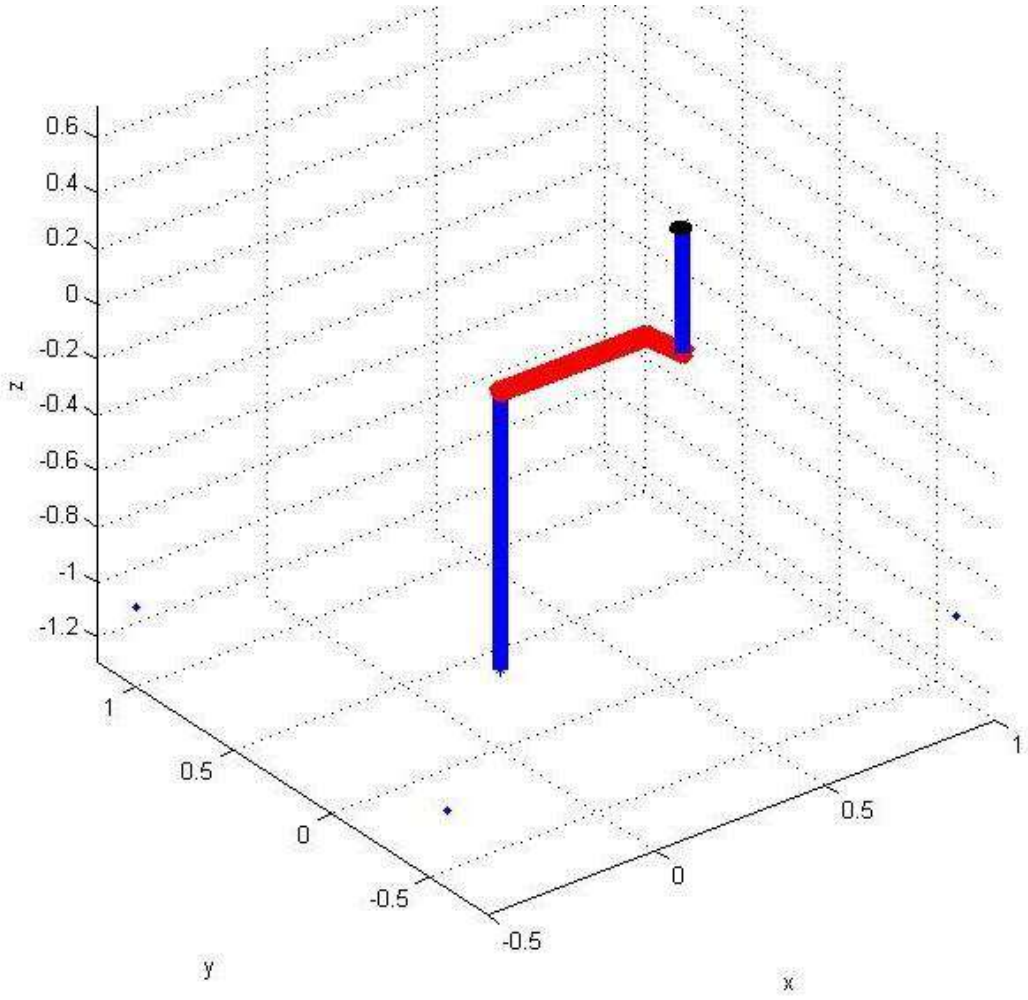


Figure4.11 : Le Robot PUMA560 en Position initiale

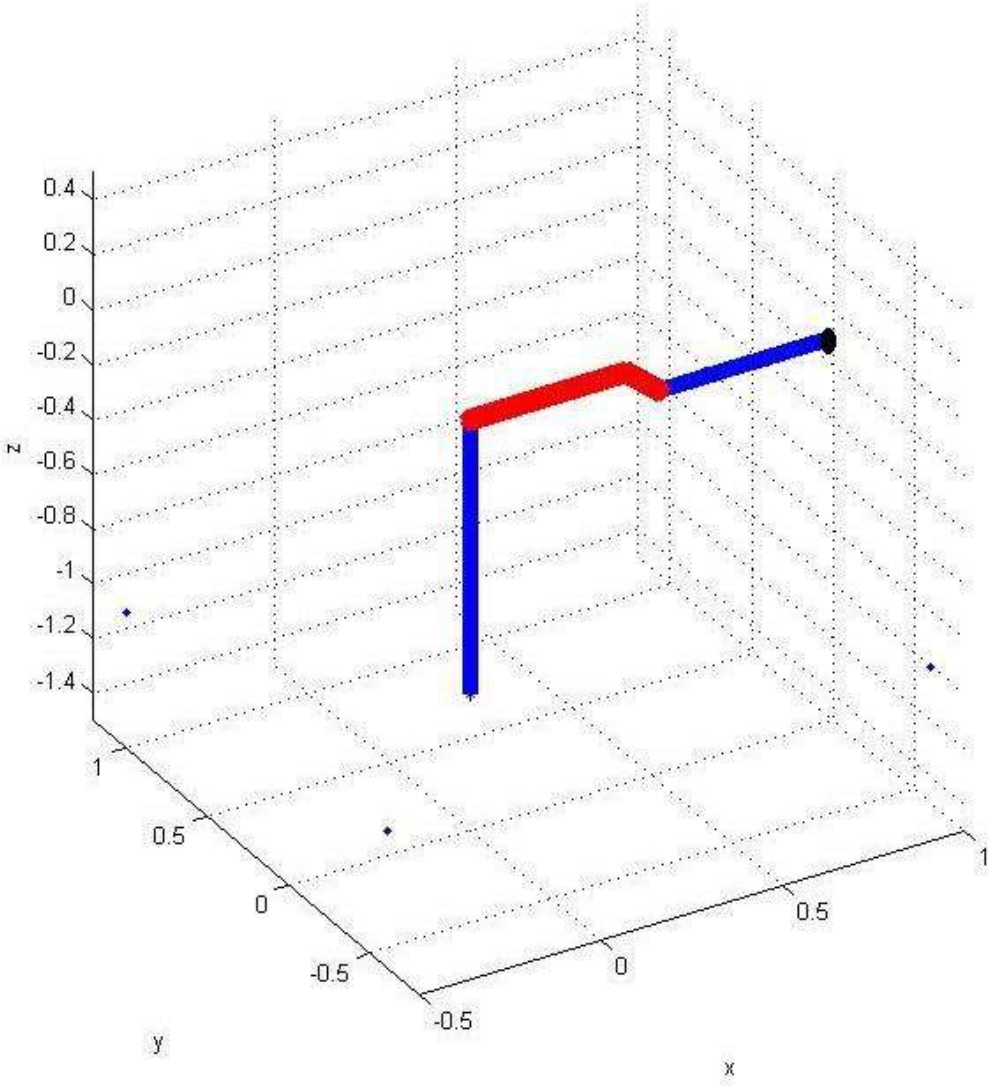


Figure4.12 : Le Robot PUMA 560 en position N°1

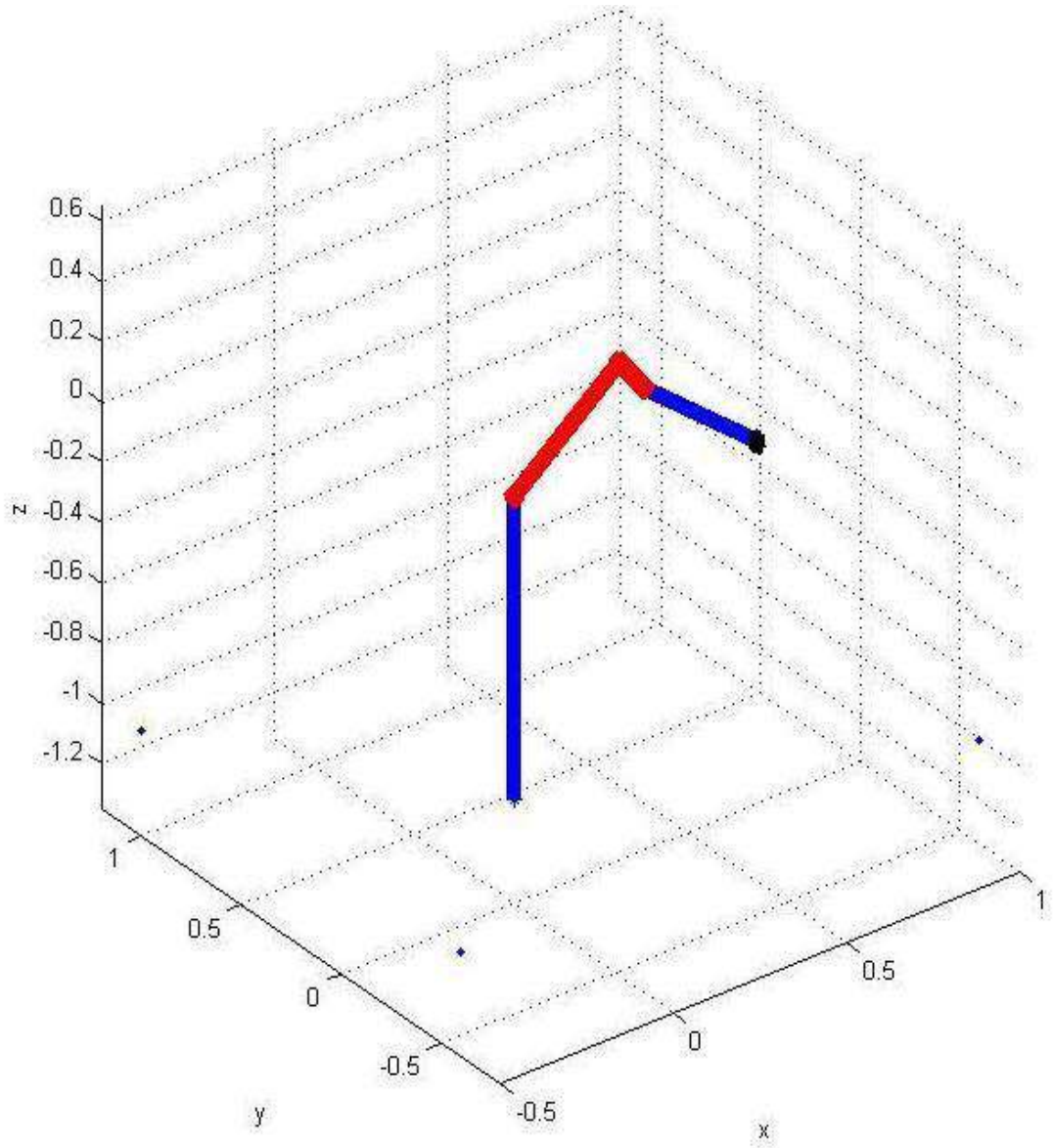


Figure4.13 : Le Robot PUMA 560 en position N°2

4.5 Conclusion :

Ce chapitre a été pour nous l'occasion de valider les modèles mathématiques que nous avons calculé.

Dans un premier temps, nous avons testé la précision des modèles de la caméra. Pour cela, nous avons sélectionné deux types de cameras CCD avec des caractéristiques très différentes. Ce qui nous apermis de démontrer que ces différences de paramètres ne modifiées pas les informations visuelles fournies par les modèles. Par contre, nous avons montré l'influence des distorsions sur ces informations. En effet, les paramètres des caméras comme la focale et la taille du capteur CCD modifient considérablement les informations visuelles.

Dans un second temps, nous avons validé nos calculs des modèles direct et inverse du robot PUMA 560. Le modèle direct nous a permis de simuler le fonctionnement du robot. Grâce à son implémentation sous Matlab, nous avons pu générer des figures qui illustrent sa position dans l'espace 3D. Quant au modèle inverse, il servira à l'asservissement du manipulateur.

Conclusion général

Le travail présenté dans ce mémoire s'insère dans le cadre de l'étude d'un système robotique associé à un capteur extéroceptifs fournissant une grande richesse d'informations, à savoir la caméra **CCD**. Cette association permettra au robot **PUMA 560** d'effectuer des tâches plus complexes dans des environnements partiellement, voire totalement inconnus.

Après une étude bibliographique, nous avons présenté les principaux aspects de notre contribution qui peuvent être résumés en trois grands volets :la modélisation de la camera**CCD**, la modélisation du robot **PUMA 560** et sa la conception mécanique.

Avant d'établir les modèles direct et inverse d'une caméra **CCD**, nous avons procédé à l'étude du fonctionnement physique d'un système de vision classique. Cette expérience nous a permis de mettre en évidence le phénomène de distorsion optique qui influe grandement sur ces relations mathématiques. En conséquence, nous l'avons inclue dans le calcul de nos modèles.

La 2ème grande partie de notre travail a été de mettre en pratique les techniques utilisées en robotique pour modéliser des robots séries. Nous avons appliqué respectivement,les méthodes de Denavit-Hartenberget de PAUL pour calculer les modèles géométriques direct et inverse du robot manipulateur **PUMA 560**.

Après une recherche bibliographique sur la structure mécanique du robot PUMA 560, nous nous sommes rendu compte qu'il n'existait que des données mécaniques sommaires sur le robot. De ce fait, nous avons réaliséune conception mécanique détailléede la structure du**PUMA 560**. Nous avons calculé les différents couples et l'ensemble des forces exercés sur la structure mécanique du robot ainsi que le dimensionnement de l'ensemble des pièces, des engrenages et des moteurs qui constituent le **PUMA 560**.Avec le logicielSolide Works, nous avons réalisé des schémas détaillés de l'ensemble de la structure mécanique.

Enfin, nous avons évalué et de validé l'ensemble des modèles mathématiques que nous avons implémenté sous Matlab. Nous avons réalisé une série d'expériences qui nous ont permis de :

- ✓ montrer l'influence des distorsions sur lecalcul des coordonnées d'un point cible dans le plan image. Ces erreurs sont d'autant plus importantes que la focale et la taille du capteur **CCD** sont grandes. D'où la nécessité de bien choisir les paramètres du système de vision et surtout de ne pas négliger le phénomène des distorsions dans l'implémentation du modèle de la caméra,

- ✓ valider nos calculs des modèles direct et inverse du robot **PUMA 560** dans le but de simuler son fonctionnement.

Perspectives :

Le travail prospectif de ce mémoire et les résultats obtenus nous permettent d'envisager des approfondissements et des perspectives dans diverses directions.

La perspective légitime et naturelle de ce travail réside dans la réalisation de la structure mécanique du robot manipulateur **PUMA 560**, à partir de l'étude et des données que nous avons fournies. Cette réalisation permettra par la suite, la validation expérimentale des modèles calculés dans un contexte réel.

Par ailleurs, un prolongement intéressant à ce travail serait d'utiliser soit une caméra 3D soit un système binoculaire utilisant des informations visuelles fournies par deux caméras. Dans le deuxième cas (le moins couteux), nous pourrons déduire directement l'information de la profondeur dans la scène observée.

Enfin, les modèles que nous avons calculés et validés pourront servir de références dans l'utilisation des techniques modernes de contrôle. Ces contrôleurs adaptatifs (réseaux de neurones par exemple),sont basés sur une estimation robuste et précise des relations mathématiques qui entrent en jeux dans l'asservissement visuel de robots.

Bibliographie : sites internet

[1]-site : www.histoirede camera .com.

[2]-site : www.chambre noire et sténopé.

[3]-site : www.type de camera.com.

[4]-site : www.définition de camera ccd.com.

Bibliographies : livres

[5]**Nicolas Ayache** « Un système de vision bidimensionnel en robotique industriell » Thése de doctorat,université de paris-sud,Centre d'orsay,juin1983.

[6] **Jean- José Orteu**« Calibrage géométrique d'une camera ou d'un capteur de vision stéréoscopique »*ThéseDoctorat,univercité de toulous,1989.*

[7]**D Meizel** « Modélisation calibration du capteur de vision omnidirectionnelle » Diplôme d'études approfondies,1998.

[8] **HORAUD et Olivier MONGA** « Vision par ordinateur -outils fondamentaux » 2e édition revue et augmentée 2010 .

[9]**Wisamakhalil &Dombre Etienne**« Modélisation identification et commande des robots »2eme édition revue et augmentée,Edition :Hermes,1988.

[10] **Khalil, Wisama** « Commande des robots manipulateurs » Paris : Lavoisier, 2002.

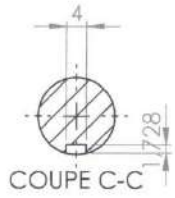
[11**]** **Lacroux, Gérard** « Les Actionneurs électriques pour la robotique et les asservissements » 2eme edition,Paris : Technique et documentation, 1994.

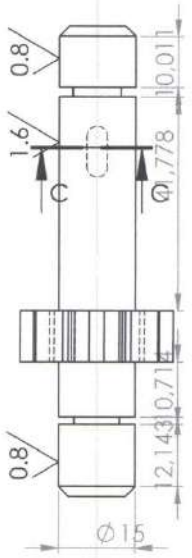
[12] **André** « chavalier guide du dessinateur industriél » edition 2004.

[13] **Jean.Louis Fanchon** « Guide des sciences et technologies industrielles » nouvelle editionindusturiéllecomplétée.Nathan, avril 2004.

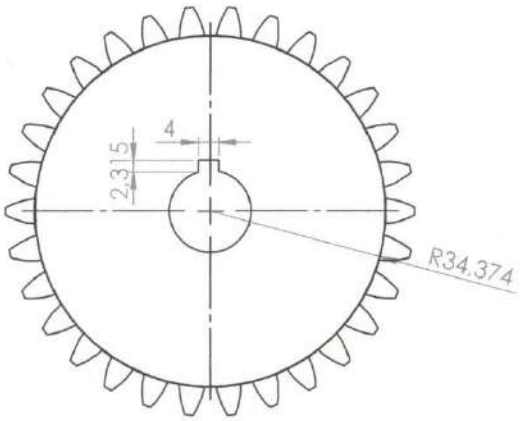
[14] **Y.Qian-Z.Xiong-D.picard** « formulaire de mécanique piecde de construction »J-c Doubrere 2001.

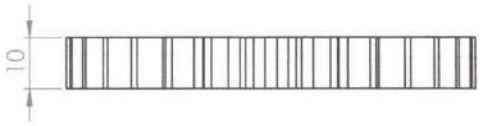
[15] **Julien napleon Haton de la poupillier** « Traité pratique et théorique des engrenages » imprimerie de Meallet-Bachelier 1861.



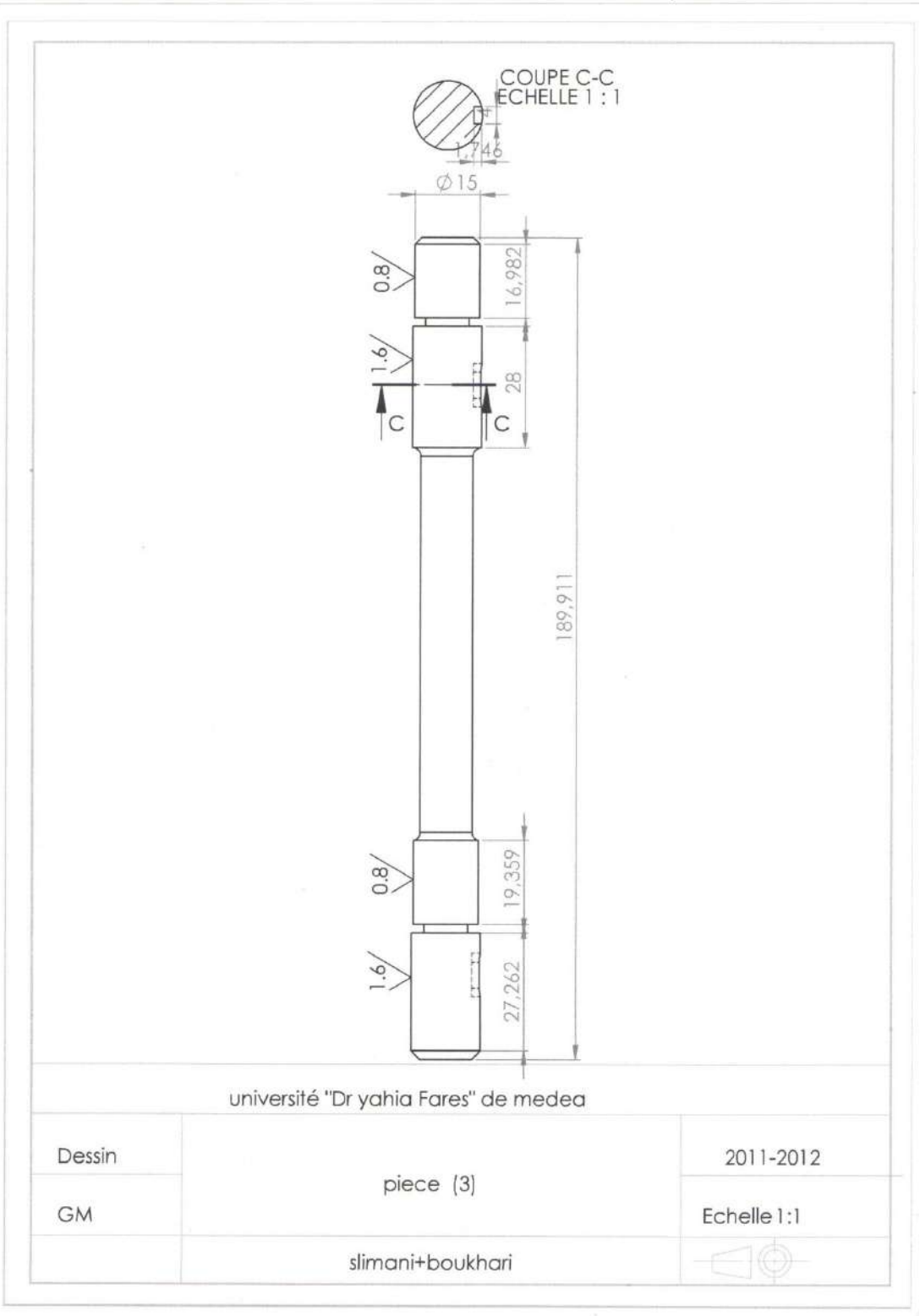


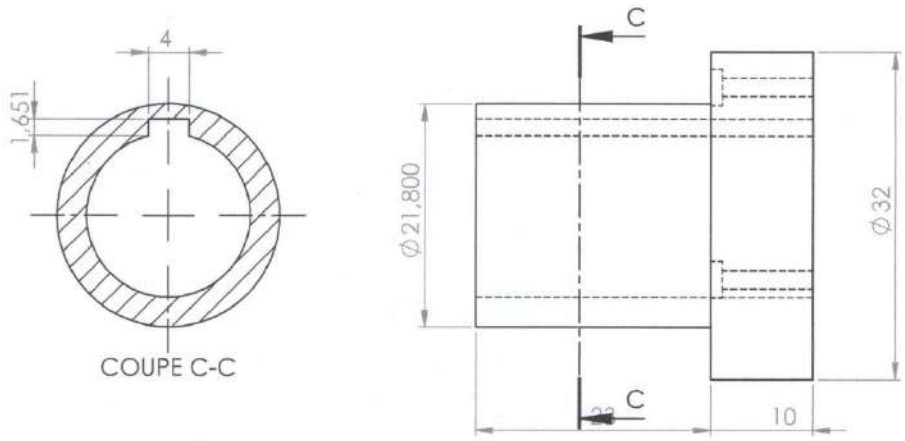
université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (1)	2011-2012
GM		Echelle 1:1
	slimani+boukhari	



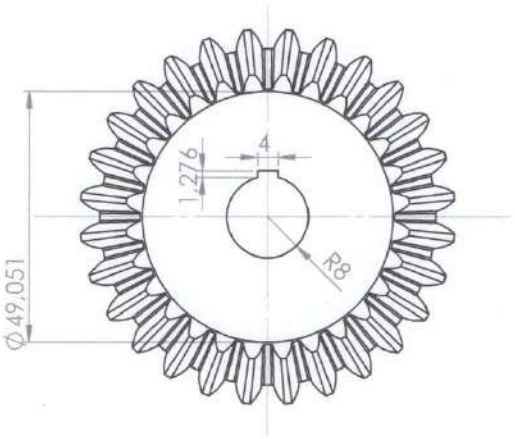


université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (2)	2011-2012
GM		Echelle 1:1
	slimani+boukhari	

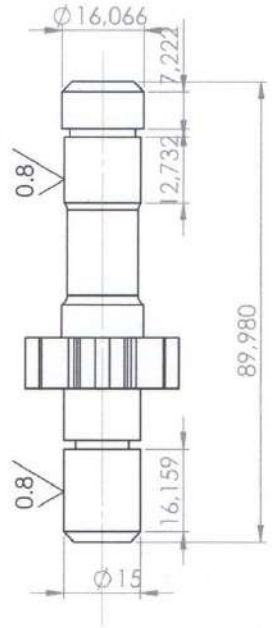

COUPE C-C
ECHELLE 1 : 1
1,746
Ø15
0.8
16,982
1.6
28
C
C
189,911
0.8
19,359
1.6
27,262
université "Dr yahia Fares" de medea
Dessin
piece (3)
2011-2012
GM
Echelle 1:1
slimani+boukhari



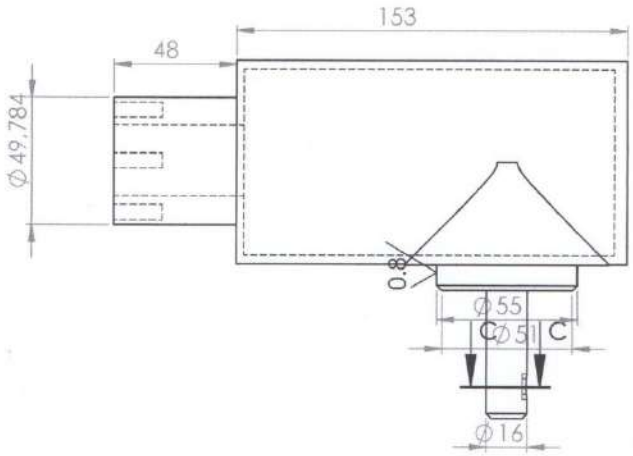
université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (4)	2011-2012
GM		Echelle 1:1
	slimani+boukhari	



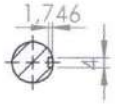
université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (5)	2011-2012
GM		Echelle 2:1
	slimani+boukhari	



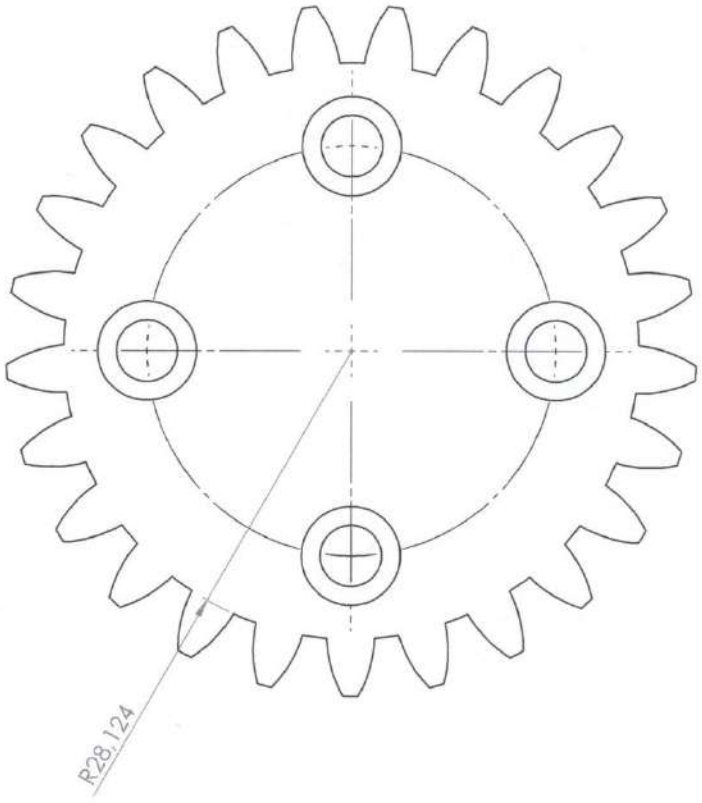
université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (6)	2011-2012
GM		Echelle 1:1
	slimani+boukhari	



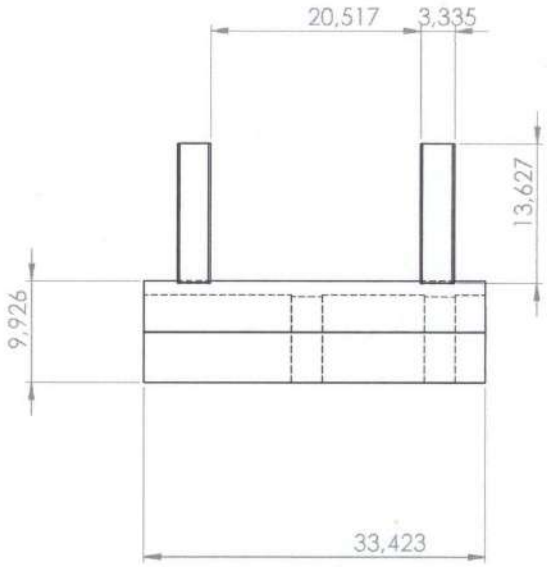
COUPE C-C
ECHELLE 1 : 2



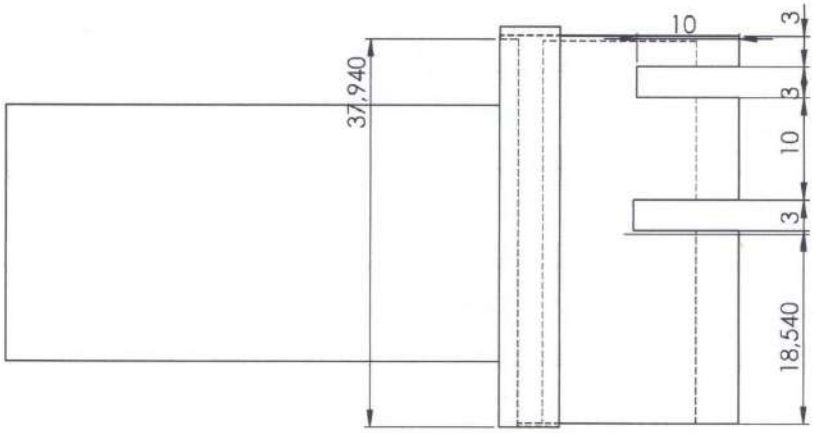
université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (7)	2011-2012
GM		Echelle 1:2
	slimani+boukhari	



université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (8)	2011-2012
GM		Echelle 2:1
	slimani+boukhari	

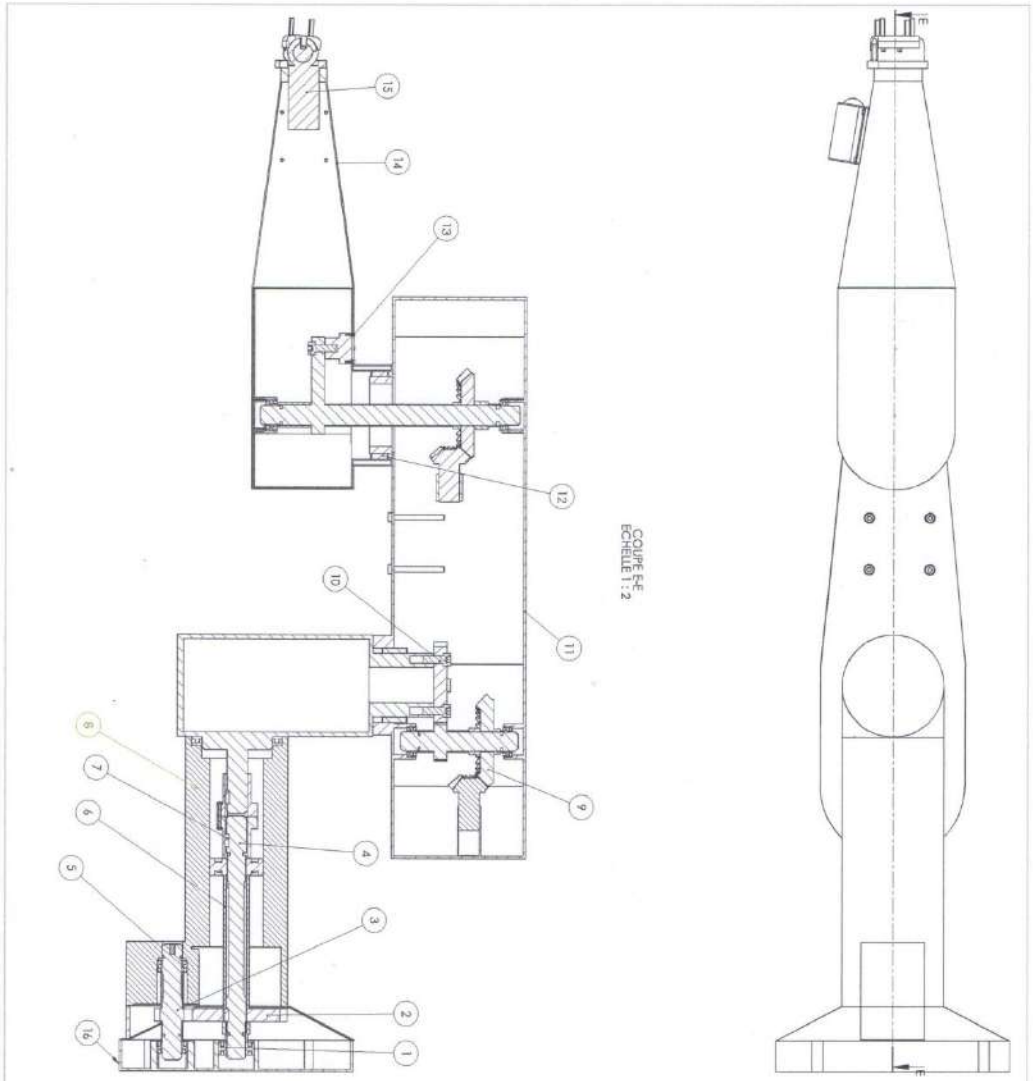


université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (9)	2011-2012
GM		Echelle 2:1
	slimani+boukhari	



université "Dr yahia Fares" de medea		
Dessin	piece (10)	2011-2012
GM		Echelle 2:1
	slimani+boukhari	

Annexes



repere	nombre	Désignation	matériaux
16	1	socle	
15	1	pince	
14	1	couvercle	A60
13	4	Vis H M3* 1.6	
12	2	roulement a rouleaux	
11	1	couvercle	A60
10	9	Vis HCH M10*6	
9	4	pignon conique	16M.Cr5
8	1	couvercle	A60
7	5	clavette	
6	10	palier lisse	
5	6	roulement oblique	
4	2	Axe	C60
3	2	Arbre +pignon	C60
2	2	pignon	16M.Cr5
1	3	roulement BC	

département génie mécanique univ-msila
FUMA 560
2012-2013
allmani.bouthadi

Echelle 1:2

Titre :

Conception mécanique et modélisation d'un système Robot-Vision

Résumé : Le problème général traité dans ce travail est essentiellement la conception mécanique d'un robot manipulateur série à six (06) degrés de liberté de type ***PUMA 560***. Au-delà des dimensions des axes et de quelques caractéristiques mécaniques simples existants dans la littérature, nous avons mis l'accent sur le calcul des taux de réductions, des moments que subit chaque axe au cours d'un mouvement ainsi que le dimensionnement de chaque piècequi constitue la structure. Par ailleurs, nous avons fourni des outils en élaborant des modèles mathématiques du robot ***PUMA 560***et du système de vision (caméra CCD) de sorte à ce que, dans le futur, on puisse l'asservir en tenant compte de son environnement extérieur.

Mots clés : Modélisation, Robot,Vision,conception mécanique.

Title:

Mechanical design and modeling of a Robot-Vision System

Abstract: The general problem addressed in this work is essentially the mechanical design of a robot manipulator with six series (06) degrees of freedom PUMA 560 type. Beyond the dimensions of the axes and some simple mechanical properties existing in the literature, we focused on the calculation of rate reductions, moments experienced by each axis during movement and sizing of each part which constitutes the structure. Moreover, we have provided tools by developing mathematical models of the PUMA robot 560et vision system (CCD camera) so that, in the future, we can enslave taking into account the external environment.
Keywords: Modeling, Robot Vision, mechanical design.

العنوان

تصميم ميكانيكي و نمذجة نظام ربوت-رؤية

الخلاصة:المشكلة العامة المعالجة في هذه المذكرة هي في الأساس التصميم الميكانيكي للروبوت ب6 درجات حرية نوع بيما 560.وراء ذلك وضعنا إبعاد المحاور وبعض الخصائص الميكانيكية البسيطة المتوفرة في الكتب,وركزنا على حساب تخفيض النظام السرعة, العزم الذي يتلقاه كل محور إثناء الحركة وأيضا تحديد إبعاد كل قطعة المشكلة للهيكل, علاوة على ذلك,حضرنا ألرياضياتي للروبوت بيما 560 ونضام الرؤية (كاميرا سي سي دي) بحيث في المستقبل يمكن نمذجته والتحكم به واخذ بعين الاعتبار المحيط الخارجي

المفاتيح: النمذجة,روبوت,الرؤية,تصميم ميكانيكي.