

Table des matières

Chapitre I :Étude préliminaire du projet.....	1
I.1 Contexte du projet et Problématique :	2
I.2 Formulation préliminaire du projet :	6
I.2.1 Énoncé du besoin :	6
I.2.2 Contrôle de validité :	6
I.3 Préfaisabilité du projet :	7
I.3.1 Définition des ressources :	7
I.3.2 Estimation des couts :	8
I.4 Échéancier :	8
Chapitre II :Etude conceptuelle du projet.....	9
II.1 Analyse Fonctionnelle :	10
II.2 Analyse fonctionnelle externe :	10
II .2.1 Identification des éléments du milieu extérieur	10
II .2.2 Diagramme des intérateurs	11
II.3 Analyse fonctionnelle interne :	12
II.3.1 La méthode FAST :	12
II.4 Structure fonctionnelle du projet :	13
II.5 Cahier des charges fonctionnel du robot :	15
Chapitre III :Processus de conception	18
III.1 Solutions technologiques :.....	19
III.1.1 Structure :	19
III.1.2 Sous systèmes de déplacement (X, Y et Z) :	21
III.1.3 Commande	27
III .2 Conception du système.....	27
III.2.1 le support :	27
III.2.2 Axe Z :	31
III.2.2 Graphe des liaisons :	32
III.2.3 solution technologie de l'axe Z :	32
III.2.4 Mise en plan de l'axe Z :	32
III.2.3 Axe Y :	33
III.2.7 Graphe des liaisons de l'axe Y :	34
III.2.8 solution technologique de l'axe Y :	35
III.2.9 Mise en plan de l'axe Y :	35
35III.2.11 Graphe des liaisons d'axe X :	37
37III.2.13 mise en plan de l'axe X :	37
III.2.14 dessin d'assemblage du système CAO :	39
III.2.15 dessin d'assemblage du système :	40

Table des matières

Chapitre IV :Validation des solutions technologique retenues	41
IV.1 Schéma bloc d’une transmission linéaire :	42
IV.2 Caractéristiques cinématiques du mouvement du rotor pour une loi de commande trapézoïdale :	44
IV.2.1 Conditions à respecter :	46
IV.2.3 Puissances et couples moteur :	47
IV.3 Transmission par le système vis-écrou :	49
IV.3.1 Filetage trapézoïdal :	52
IV.3.2 Contrôle du noyau de la vis.....	54
IV.3.3 Pression superficielle de contact vis-écrou :	56
IV.4 Transmission par pignons et courroie crantée :	56
IV.4.1 Paramètres géométriques :	57
IV.4.2 Rapport de vitesse et vitesse linéaire de la courroie :	57
IV.4.3 Puissance de calcul :	58
IV.4.4 Tensions dans les brins :	58
IV.4.5 La largeur théorique minimale l de la courroie :	60
IV.4.6 Organigramme de détermination de la courroie :	60
IV.5 Rapport de calcul :	61
IV.5.1 Interprétation des résultats	64
IV.6 Étude statique du support :	64
IV.6.1 Résultats de l’étude :	67
IV.7 commande :	69
Chapitre V :Réalisation du robot cartésien 3 axes.....	72
V.1 Assemblage des sous-système :	73
V.1.1Assemblage du portique :	73
V.1.2 assemblage de l’axe Z :	73
V.1.3 assemblage de l’axe Y :	74
V.1.4 assemblage de l’axe X :	74
V.1.5 commande (alimentation, driver, arduino)	76
V.2 Assemblage du système :	77
ANNEXE	79
Conclusion générale	96

Liste des figures

- Figure I.1: types de robots.
- Figure I.2 : robots cartésiens.
- Figure I.3 : application du robot cartésien en industrie.
- Figure I.4 : bête a cornes .
- Figure II .1: analyse fonctionnelle.
- Figure II .2 : pieuvre du système en phase conception.
- Figure II .3 : méthode FAST.
- Figure II.4 : diagramme FAST de fonction principale.
- Figure II .5 : structure fonctionnelle du système.
- Figure II .6 : cahier des charges fonctionnelles.
- Figure III.1 : structures de robots linéaires.
- Figure III.2 : éléments de transmission.
- Figure III.3.: guidage a éléments roulants.
- Figure III.4: support du système.
- Figure III.5: dimension de la section droite du profilé 1.
- Figure III.6 : dimension de la section droite du profilé 2.
- Figure III.7 : chaine cinématique de l'axe Z.
- Figure III.8: graphe des liaisons axe Z.
- Figure III.9: dessin CAO de l'axe Z.
- Figure III.10: dessin CAO de l'axe Y.
- Figure III.11: dessin CAO de l'axe X.
- Figure III.12 : dessin d'assemblage du système CAO.
- Figure IV.1 : schéma bloc d'une transmission linéaire.
- Figure IV.2 : loi de vitesse trapézoïdale.
- Figure IV.3.: profils de vitesse pour un déplacement 3m en 1.5 s.
- Figure IV.4: transmission par système vis-écrou.
- Figure IV.5: efforts sur le filet de la vis .
- Figure IV.6 : plan apparent AA et plan réels de la vis.
- Figure IV.7 : transmission par pignons et courroie crantée .
- Figure IV.8: parametre d'une transmission poulies –courroies
- Figure IV.9: tensions dans les brain
- Figure IV.10: organigramme de détermination des courroies crantées
- Figure IV.11: maillage
- Figure IV.12 : chargement extérieure.

Liste des figures

Figure IV.13: contrainte de Von Mises.

Figure IV.14 : déplacement.

Figure IV.15 :Arduino UNO

Figure IV.16 : Driver TB6560

Figure IV.17 : électro-aimant

Figure IV.15 : schéma du circuit commande .

Figure V.1: assemblage du portique.

Figure V.2 : assemblage de l'axe Z.

Figure V.3 : assemblage de l'axe Y.

Figure V.4 : assemblage de l'axe X.

Figure V.5 : assemblage du système.

Liste des tableaux

Tableaux II.1 : identification des sous système.

Tableaux III 2 : les caractéristiques des systèmes de transformation.

Tableaux III.3 : comparatif des dispositifs de guidage.

Tableaux IV.1 : coefficients et en fonction des conditions aux limites

Tableaux IV.2 : contrôle de la pression.

Tableaux IV.3 : rapport de calcul .

INTRODUCTION GENERALE

Le mot robot vient du mot tchèque "robota" signifie travail forcé. Un robot est un dispositif mécanique capable d'imiter certaines fonctions humaines telles que la manipulation d'objets ou la locomotion, dans le but de se substituer à l'homme pour la réalisation de certaines tâches matérielles.

Il existe différents types de robots : robots industriels, robots logistiques, robots agricoles, robots militaires, robots de santé, robots ménagers, robots jouets, robots compagnons.


Les robots cartésiens trouvent leurs places dans beaucoup d'applications on peut citer : positionnement, palettisation, assemblage, application de colle, soudage, indexation et dans des secteurs aussi variés que l'automobile, l'aviation, l'emballage, le domaine médical, ...

L'objectif de ce travail est de concevoir et de réaliser un robot cartésien trois axes capable de manipuler une charge avec une grande précision en tenant compte de plusieurs contraintes imposées : Rigidité, précision, utilisation des ressources disponibles en respectant un cahier de charge bien défini.

Le travail est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, il y a l'étude préliminaire du projet qui consiste à bien définir le besoin, identifier les ressources et élaborer le planning du projet ;

Le deuxième chapitre, présente les différentes phases de l'analyse conceptuelle qui Permettent de recenser, caractériser et ordonner les fonctions de la machine afin de construire l'arbre fonctionnel et d'identifier les sous-systèmes du projet ;



Le troisième chapitre est consacré à la conception du système, une sélection des solutions technologiques est faite, les plans de détail sont réalisés avec le logiciel de conception « Solidworks » ;

Le quatrième chapitre résume les résultats de la phase de dimensionnement et calculs afin d'estimer les besoins en termes des efforts d'entraînement des axes, valide le choix des solutions technologiques ;

Dans le dernier chapitre, une présentation de la réalisation du robot est mise en évidence.

La dernière partie de ce mémoire englobe une conclusion générale et les perspectives du Travail.

CHAPITRE I :

ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DU PROJET

Chapitre I : Étude préliminaire du projet

Ce chapitre concerne la phase préliminaire du projet. Cette étude s'attache à vérifier que le projet soit techniquement faisable et économiquement viable, et de mettre en exergue les objectifs et les contraintes liées à sa réalisation.

I.1 Contexte du projet et Problématique :

Selon le dictionnaire Larousse, un robot est un appareil automatique capable de manipuler des objets ou d'exécuter des opérations selon un programme fixe, modifiable ou adaptable. C'est un mécanisme automatique complexe pouvant se substituer à l'homme pour effectuer certaines opérations.

La robotique est la science et technique de la robotisation, de la conception et de la construction des robots.

Il existe différents types de robots : robots industriels, robots logistiques, robots agricoles, robots militaires, robots de santé, robots ménagers, robots jouets, robots compagnons.

Selon la définition normalisée ISO-8373 2012, Il existe aujourd'hui deux grands domaines dans la robotique : les robots industriels et les robots de services.

Les robots industriels sont ceux qui sont dédiés à la production. Ils réalisent des fonctions précises sur des chaînes de montage et ils sont capables de se mouvoir dans différents milieux : dangereux (pollués, radioactifs...), aérien, sous-marins, spatiaux...

Alors que dans le secteur de service, on trouve à la fois des machines pour un usage éducatif, domestique (robots aspirateurs par exemple) ou professionnel (drones de sécurité par exemple). Les usages se sont multipliés on peut citer la téléprésence, l'exploration, l'irrigation, l'agriculture, l'exploitation minière ou encore la réhabilitation.

Outre l'industrie et les services, la robotique concerne aussi la recherche scientifique, l'exploration spatiale et les activités de défense militaire. Elle intéresse également le secteur médical, pour les prothèses, l'assistance aux chirurgiens ou aux infirmiers.

Chapitre I : Étude préliminaire du projet

La robotique est devenue un enjeu majeur pour la compétitivité des entreprises. Les investissements dans la robotique ont augmenté considérablement ces dernières années. Selon la Fédération internationale de la robotique (IFR) [1], le marché de la robotique pourrait atteindre 200 milliards d'Euro en 2023. En 2015, ce sont les Etats-Unis, le Japon et la Chine qui ont le plus investi dans ce domaine.

Les robots sont classés sur la base de leurs structures [2], voire la figure 1.1

- Robots linéaires (y compris les robots cartésiens et portiques)
- Les robots SCARA
- Robots articulés
- Robots parallèles (delta)
- Robots cylindriques

Les robots cartésiens (figure 1.2, et 1.3) trouvent leurs places dans beaucoup d'applications on peut citer : palettisation, assemblage, positionnement, indexation, ... et dans des secteurs aussi variés que l'aéronautique, l'automobile, l'emballage, le domaine médical, etc.

L'idée du projet est de réaliser un robot cartésien selon un cahier de charge bien défini, permettant de transporter et de positionner un objet de manière fiable tout en atteignant la vitesse, l'accélération et la précision nécessaires.

I.2 Formulation préliminaire du projet :

La formulation préliminaire est la première phase d'un projet. Elle est fondamentale, car elle doit permettre de préciser les enjeux du projet, de conforter le bienfondé de son existence ou de la rejeter.

I.2.1 Énoncé du besoin :

Avant de concevoir un système, il est nécessaire de s'assurer que ce produit répond effectivement à un besoin, d'où l'énoncé du besoin de façon claire et précise.

La méthode d'expression du besoin repose sur trois questions [3,4] :

- A qui le produit rend-il service ?
- Sur quoi le produit agit-il ?
- Dans quel but ?

Chapitre I : Étude préliminaire du projet

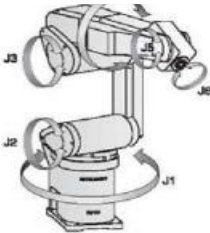
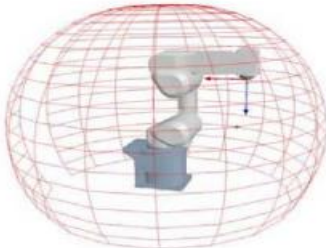

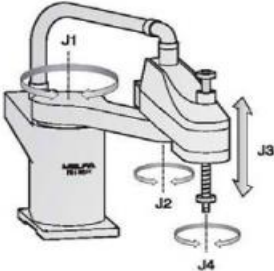
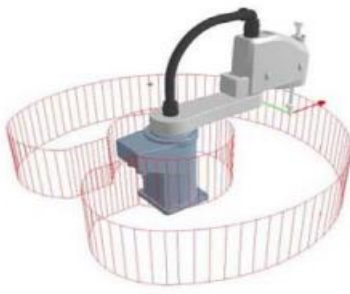

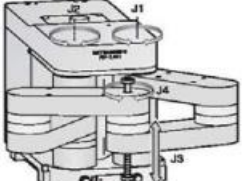
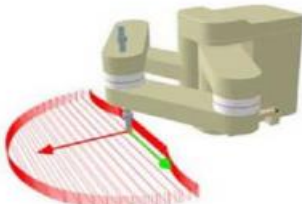


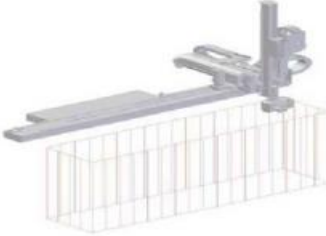




Architecture	Enveloppe	Photo
Robots articulés 		
Robots SCARA 		
Robots SCARA 		
Robots cartésiens 		
Robots parallèles 		

Figure I.1 : types de robots [1]

Chapitre I : Étude préliminaire du projet



Robot linéaire



Robot portique

Figure I.2 : les robots cartésiens [1]



Figure I.3 : Application des robots cartésiens en industrie [1]

Chapitre I : Étude préliminaire du projet

On obtient ainsi le diagramme Bête à cornes suivant : voir figure I.4

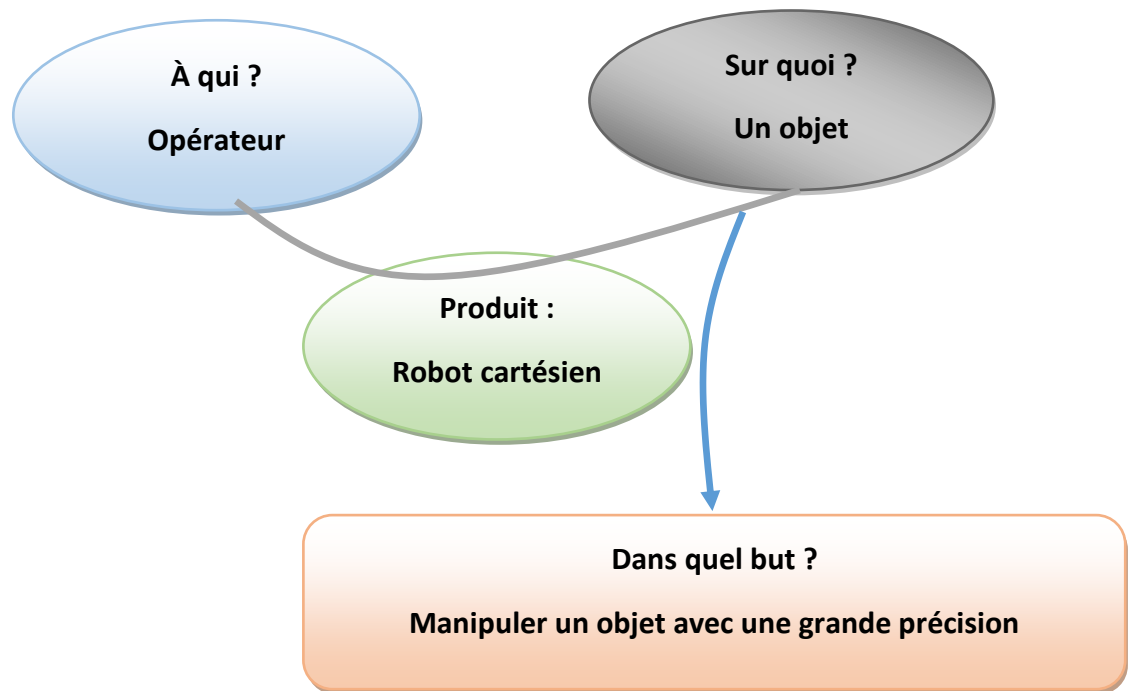


Figure I.4 : Bête à cornes

I.2.2 Contrôle de validité :

Pour valider l'expression du besoin, il faut se poser les questions complémentaires suivantes :

➤ *Pourquoi le système existe-t-il ?*

Des opérations de positionnement, de palettisation, d'assemblage, de soudage, d'indexation, ...

➤ *Qu'est-ce qui pourrait faire disparaître ou évoluer le besoin ?*

Cette question permet de valider la stabilité du besoin, elle permet aussi d'anticiper les évolutions du besoin.

L'enveloppe de travail carrés ou cubiques des robots cartésiens ne nécessitent aucun gaspillage d'espace et sont plus efficaces que les robots multiarticulés et les robots à liaison parallèle qui ne peuvent fonctionner que dans un espace de travail borné en raison des limitations sur les longueurs des segments, des limitations sur le débattement des articulations passives ainsi que par les collisions entre segments.

Chapitre I : Étude préliminaire du projet

Un autre avantage des robots cartésiens est le coût d'achat ainsi que le temps d'installation et de mise en fonction, en plus d'une programmation aisée du fait des déplacements linéaires en 2 ou 3 dimensions.

L'évolution technologique d'autres types de robots autres que ceux cités précédemment semble aujourd'hui encore limitée ou inexistante.

Dans le contexte défini ci-dessus, le risque de disparition est faible. Le besoin est validé par conséquent, le projet est stable.

I.3 Préfaisabilité du projet :

Pour savoir si un projet est faisable, il faut que les objectifs de conception soient raisonnables et techniquement réalisables compte tenu des ressources existantes. Le pré-projet doit être confronté aux réalités de l'environnement.

I.3.1 Définition des ressources :

Il est question dans cette partie des connaissances scientifiques et techniques essentielles pour créer le système. Il faut être en mesure de les connaître, et si possible, de les faire évoluer suivant les besoins du projet.

- Les connaissances scientifiques : mécanique, informatique, automatique, électronique
- Les connaissances techniques : d'ajustage, de soudage, de montage, ...
- Ressources documentaires : bibliothèque de la faculté, ressources en ligne, cours, ...
- Ressources logiciels : SolidWorks, ANSYS, ...
- Ressources matérielles : machines de tournage, fraisage, perçage, soudage, ...
- Ressources humaines : encadreurs, enseignants, ingénieurs de laboratoires
- Ressources financières : autofinancement, aides financières, ...

I.3.2 Estimation des coûts :

Afin d'estimer les coûts de l'ensemble du projet on a utilisé les approches suivantes [5] :

Par expérience : prix associés à la mise en œuvre d'une technique donnée, un concept préliminaire ou encore un ensemble de caractéristiques d'un produit (matériaux, pièces, méthodes de fabrication, etc.).

Par similitude : comparaison avec un produit similaire existant sur le marché.

Le coût du projet est estimé à environ 60000.00 DA

I.4 Échéancier :

L'échéancier de projet permet d'inventorier l'ensemble des activités du projet, en identifiant les dates de début et de fin de projet. Il faut connaître aussi le temps alloué à la réalisation du projet.

Dans notre cas :

Temps alloué à la réalisation du projet : 5 mois

Début du projet : janvier 2018.

Fin du projet : juin 2018.

CHAPITRE II : ETUDE CONCEPTUELLE DU PROJET

Dans ce chapitre la configuration générale du système est déterminée sur la base de l'étude conceptuelle.

II.1 Analyse Fonctionnelle

L'analyse fonctionnelle permet de décrire un système par les fonctions qu'il doit remplir, mais aussi les contraintes qui va subir. Elle consiste à rechercher, caractériser, ordonner, hiérarchiser et valoriser les fonctions [6], voir Figure II.1.

L'analyse fonctionnelle est divisée en deux parties :

- analyse fonctionnelle externe
- analyse fonctionnelle interne

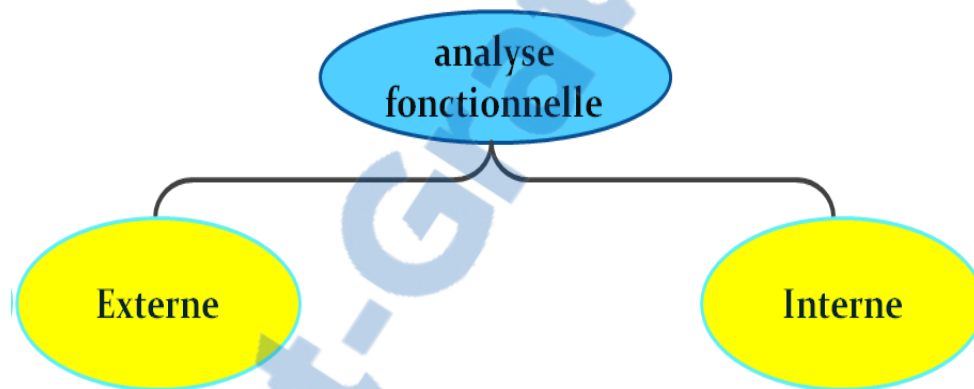


Figure II.1 : Analyse fonctionnelle

II.2 Analyse fonctionnelle externe

L'analyse fonctionnelle externe décrit le point de vue de l'utilisateur, et ne s'intéresse au produit qu'en tant que « boîte noire » capable de fournir des services dans son environnement durant son cycle d'utilisations.

II .2.1 Identification des éléments du milieu extérieur

L'examen de l'environnement du système, conduit à :

- Identifier les composantes extérieures (tout ce qui est en contact direct ou indirect avec le produit).
- Etablir les relations entre le produit et les composantes extérieures en termes de fonctions appelées fonctions de service.

Chapitre II :Etude conceptuelle du projet

Dans notre cas, les éléments du milieu extérieur sont :

- Opérateur
- Objet
- Environnement
- Normes
- Commande
- Milieu ambiant
- Énergie électrique
- Temps
- Prix

II .2.2 Diagramme des interacteurs

Le diagramme suivant donné par la figure 2.2 représente le diagramme des interacteurs du système avec les éléments du milieu extérieur appelé aussi diagramme de la pieuvre du système.

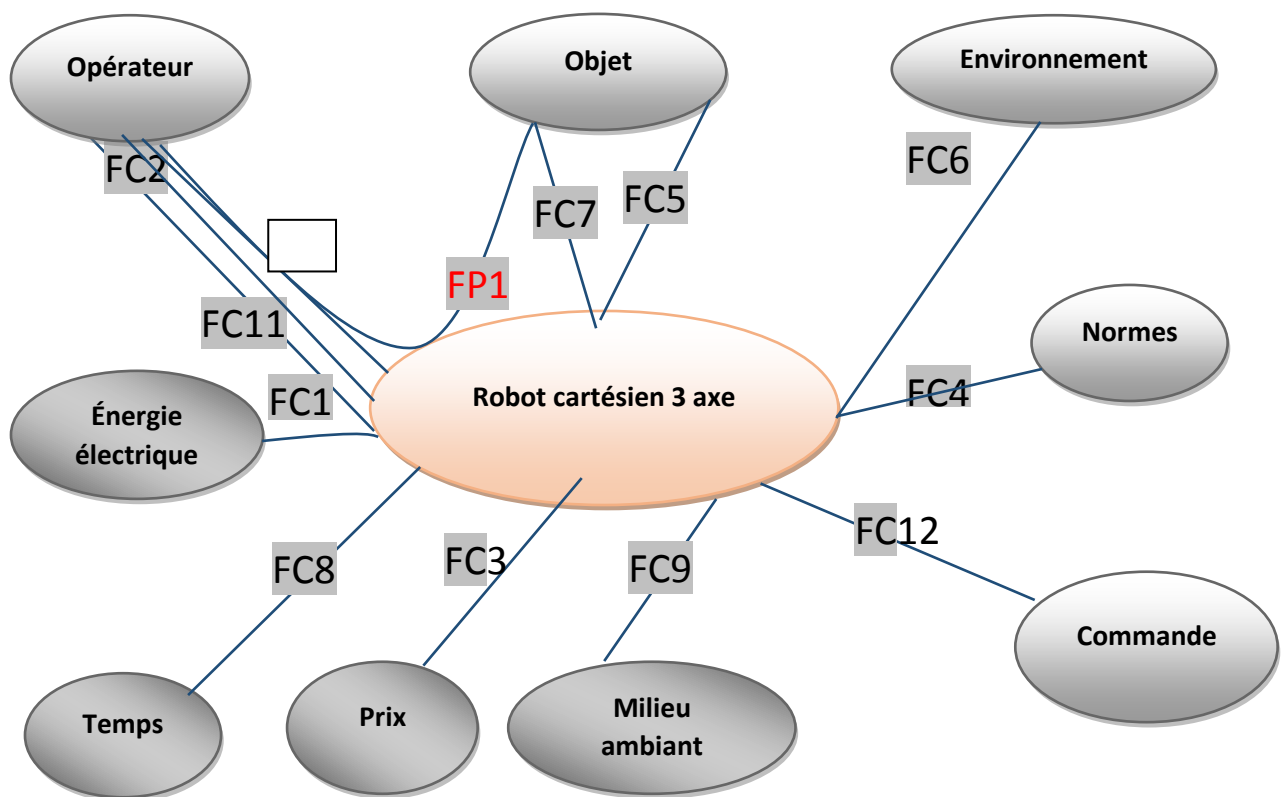


Figure II.2 : Pieuvre du système en phase conception

Chapitre II :Etude conceptuelle du projet

Les fonctions de service retenues pour le reste de l'étude se décomposent en : Fonctions principales notées FP et les fonctions contraintes notées FC.

FP1 : manipuler un objet avec précision

FC1 : utiliser énergie électrique

FC2 : être esthétique

FC3 : être commercialisé à un prix raisonnable

FC4 : respecter les normes de sécurité pour les utilisateurs

FC5 : assurer la sécurité de l'objet

FC6 : respecter l'environnement

FC7 : respecter la charge à manipuler

FC8 : respecter le temps de conception et de réalisation

FC9 : résister au milieu ambiant

FC11 : facile à mettre en œuvre par l'utilisateur

FC12 : commander le système

II.3 Analyse fonctionnelle interne

L'analyse fonctionnelle interne, décrit le point de vue concepteur en charge de fournir le produit devant répondre aux besoins exprimés. Le système n'est plus considéré comme une boîte noire, mais au contraire l'analyse va porter sur l'intérieur de la boîte pour comprendre ses fonctionnalités internes. Le système est considéré comme un assemblage de constituants dont chacun remplit certaines fonctions vis-à-vis des autres. L'analyse fonctionnelle interne met en évidence les fonctions techniques.

II.3.1 La méthode FAST

Le diagramme FAST (Function Analysis System Technic) permet de traduire chacune des fonctions de service en fonction(s) technique(s), puis matériellement en solution(s) techniques(s). Dès lors que les fonctions de services sont identifiées, cette méthode les ordonne et les décompose logiquement pour aboutir aux solutions techniques de réalisation.

Chapitre II : Etude conceptuelle du projet

La méthode, voir figure II.3, s'appuie sur une technique interrogative. En partant d'une fonction principale, elle présente les fonctions dans un enchaînement logique en répondant aux trois questions suivantes :

- **Pourquoi** ? pourquoi une fonction doit-elle être assurée ?
- **Comment** ? comment cette fonction doit-elle être assurée ?
- **Quand** ? Quand cette fonction doit-elle être assurée ?

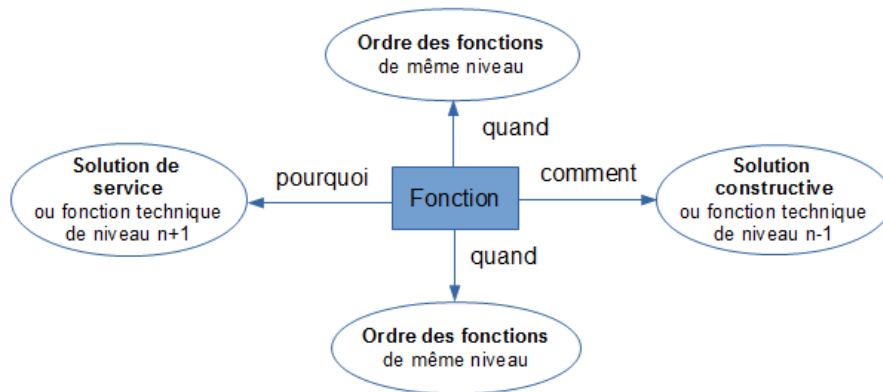


Figure II.3 : Méthode FAST

Le diagramme FAST de la fonction principale : '**Manipuler un objet avec précision**' est donné par la figure II.4 suivante.

II.4 Structure fonctionnelle du projet

Il est très important de remarquer qu'après la réalisation de l'arbre fonctionnel, les sous-systèmes du produit apparaissent et qui sont donnés par tableau 2.1 :

Tableau 1 ; Identification des sous systèmes

Fonctions techniques	Sous système
Déplacer l'objet suivant l'axe X	Sous système de déplacement suivant X
Déplacer l'objet suivant l'axe Y	Sous système de déplacement suivant Y
Déplacer l'objet suivant l'axe Z	Sous système de déplacement suivant Z
Piloter les trois axes	Sous système de commande
Prenez l'objet	Sous système de préhension

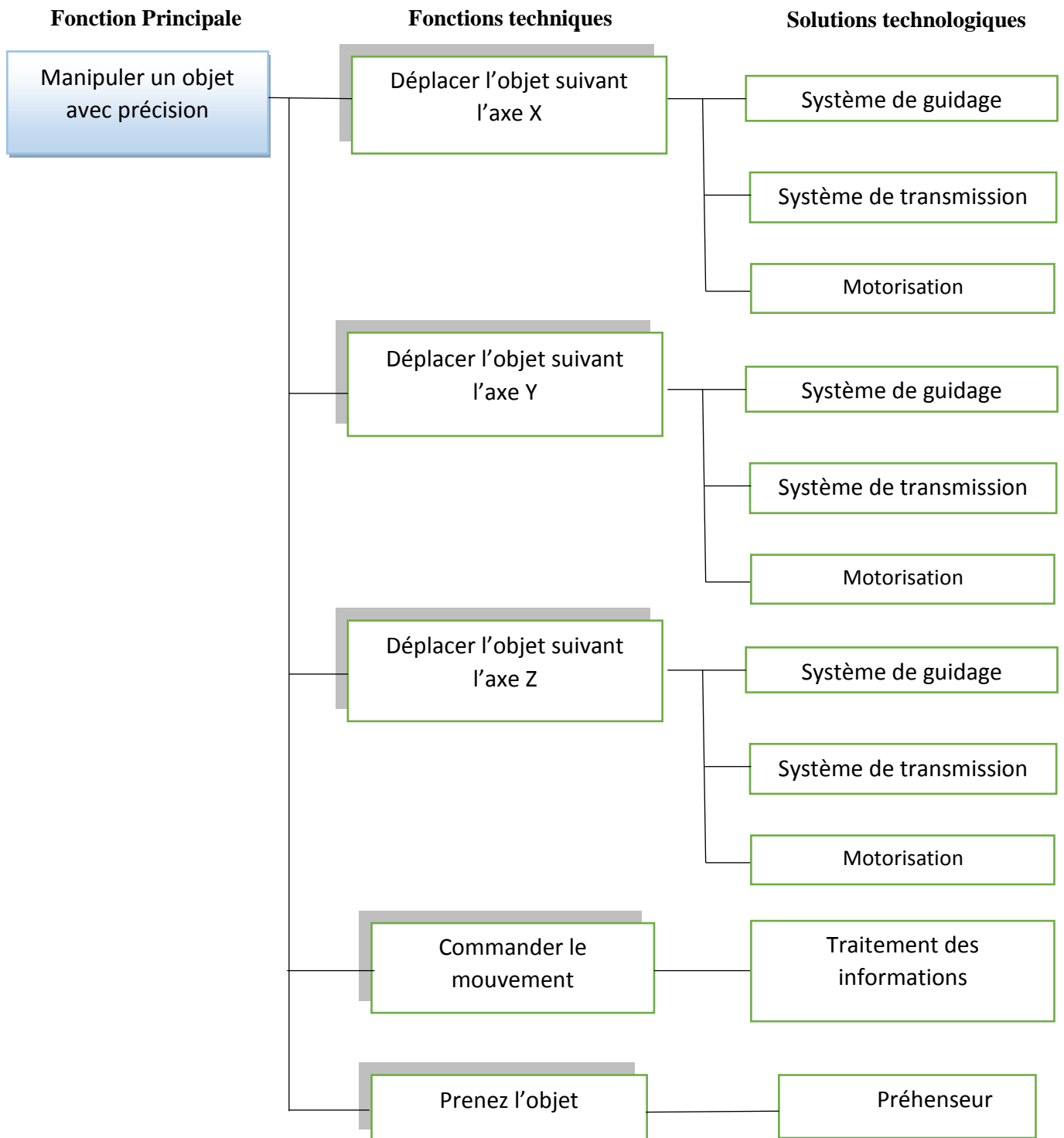


Figure II.4 : Diagramme FAST de la fonction principale

Ces cinq sous-systèmes couvrent tous les aspects de conception sur lesquels il faudra travailler pendant la phase de recherche des concepts. Voir la structure fonctionnelle du système, figure II.5.

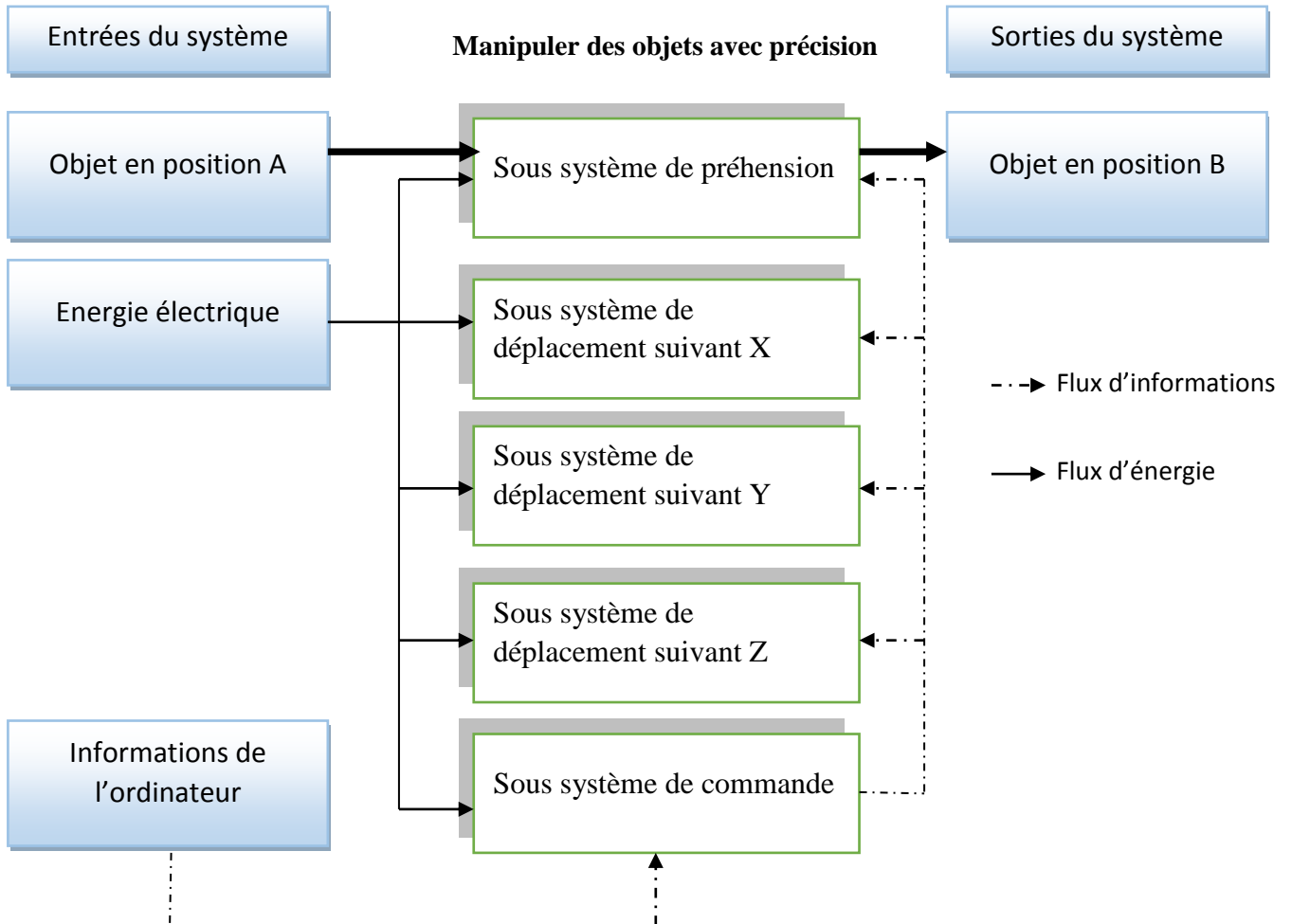


Figure II.5 : Structure fonctionnelle du système

II.5 Cahier des charges fonctionnel du robot

Le cahier des charges fonctionnel (CdCF) est un document formalisant un besoin, en détaillant les fonctionnalités attendues du système, ainsi que les contraintes (techniques, réglementaires, budgétaires...) auxquelles il est soumis.

Chapitre II :Etude conceptuelle du projet

Le cahier des charges fonctionnel du robot est donné par le tableau II.2

Tableau II.2 : Cahier des charges fonctionnel

Repères	Fonctions	Critère d'appréciation	Niveau
FP1	Manipuler un objet	enveloppe de travail	700mmx700mmx450mm
		accélération maximale-	5 m/s ²
		vitesse maximale	0.6 m/s
		Précision	± 0.5 mm
		mode de fixation de l'objet	Minium : un coté
		masse de l'objet	≤ 3 Kg
FC1	Utiliser l'énergie électrique	type de générateur	Energie électrique 12V
		type de technologie	Toute technologie permettant d'assurer l'alimentation
FC2	Être esthétique	encombrement (forme)	dimensions compatibles
		couleur	doit être attractif pour être commercialisé
		masse totale du robot	≤ 15kg
FC3	Être commercialisé à un prix raisonnable	prix total du robot	≤ 150 000DA
FC4	Respecter les normes de sécurité	normes de sécurité	-ISO ; AFNOR ...
FC5	Ne pas déformer l'objet	sécurité de l'objet	Pas d'empreintes sur l'objet
FC6	respecter l'environnement	recyclage	Utiliser les matériaux recyclables

Chapitre II :Etude conceptuelle du projet

FC8	respecter le temps	Conception et réalisation	5 mois
FC9	résister au milieu ambiant	<ul style="list-style-type: none"> ➤ chocs ➤ température ➤ corrosion 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ légers ; ➤ de 15 °c à 50 °c ➤ Aluminium, peinture, ...
FC11	Le robot doit être facile à mettre en œuvre par l'utilisateur	mise en service du robot	manuelle, automatique
		maintenance	montage et démontage facile
FC12	Commander le système	pilotage du robot	Commande simple avec visionnage des déplacements

CHAPITRE III :

PROCESSUS DE CONCEPTION

Chapitre III :Processus de conception

Dans cette partie, la conception du système sera abordée (géométrie 3D, matériaux, dimensionnement de la motorisation, ...)

III.1 Solutions technologiques

Dans cette partie les solutions technologiquement possibles seront présentées dans le but de sélectionner les plus pertinentes.

III.1.1 Structure :

Les principaux types de structures à mouvement linéaire sont : structure en porte à faux ou cantilever, structure à colonne, structure à pont mobile, structure à pont fixe et structure à portique, voir figure III.1 suivante.

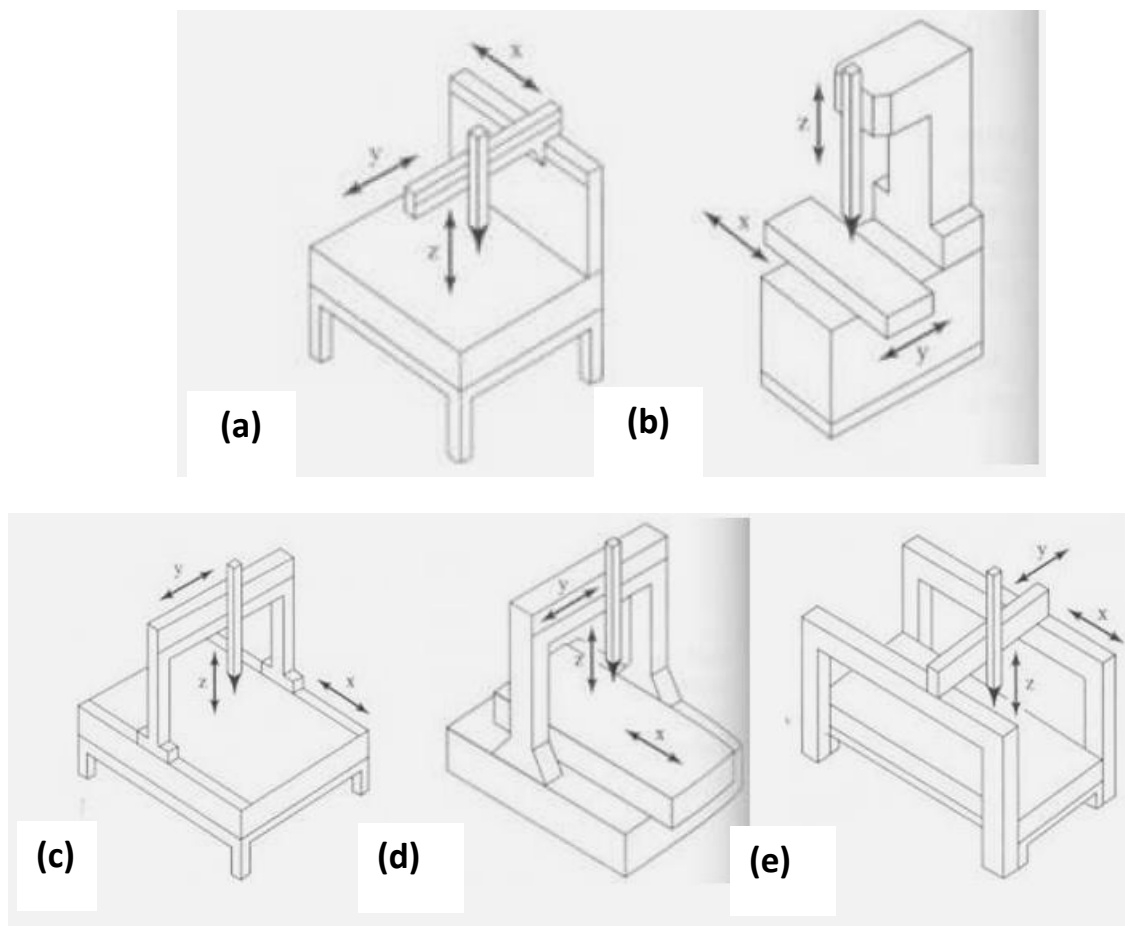


Figure III.1 : Structures de robots linéaires : (a) porte à faux, (b) colonne, (c) pont mobile, (d) pont fixe, (e) portique [7].

Chapitre III :Processus de conception

Les structures en porte-à-faux et colonnes, illustrées sur la figure III.1 (a) et (b) respectivement, présentent un minimum d'obstacles mais avec une flèche importante puisque l'axe Z est supporté uniquement d'un côté.

La structure à colonne découple l'axe Z de l'axe des X et de l'axe des Y, ce qui pourrait améliorer la précision, les inexactitudes dans l'axe Z seront indépendantes de la précision de l'axe X et Y. cette structure reste impraticable pour beaucoup d'applications en robotique.

Le pont mobile, le pont fixe et les structures de type portique, illustrés dans Les figures (c), (d) et (e), respectivement, sont supportées symétriquement et peuvent être utilisées pour de grandes portées avec un minimum de flèche comparées aux structures en porte-à-faux et colonnes. Cet avantage structurel leurs permet d'avoir une plus grande zone de travail.

Dans la structure à pont mobile comme son nom l'indique, c'est le cadre qui se déplace, cela permet à l'axe des X d'être monté près du sol, ce qui est avantageux lorsque la masse du mécanisme de l'axe X est grande par rapport à la masse de la structure. Ce type de structure est susceptible de lacet, dans lequel les deux pieds du pont se déplacent à vitesses différentes, entraînant une torsion du pont.

Une structure à pont fixe élimine ce problème de lacet en actionnant le composant au lieu du cadre. Ce type de structure dissocie l'axe X des autres axes Y et Z, ce qui peut fournir une grande précision puisque les inexactitudes de l'axe X sont indépendantes des axes Y et Z. Le composant est actionné en plus du cadre, ce qui nécessite un grand encombrement, ce qui constitue un inconvénient majeur de ces structures.

Une structure à portique actionne la section supérieure du pont plutôt que la structure entière du pont, la masse mobile suivant X est réduite comparée aux autres cas. C'est une structure rigide, elle permet d'améliorer la précision de positionnement.

Dans cette étude, la structure à portique est choisie pour la réalisation du robot cartésien 3 axes. La structure à portique offre les avantages suivants : grande rigidité, bonne précision obtenue grâce au découplage partiel des axes, vitesse et accélération importantes grâce à la diminution de la masse mobile.

III.1.2 Sous systèmes de déplacement (X, Y et Z) :

III.1.2.1 Systèmes de transformation de mouvement :

La transformation du mouvement est une fonction mécanique qui consiste à transmettre un mouvement d'une pièce à une autre, tout en modifiant sa nature. Le mouvement recherché dans notre cas, s'obtient en transformant un mouvement de rotation donné par le moteur en un mouvement de translation des éléments du portique.

Parmi les systèmes de transformation du mouvement les plus utilisés en robotique cartésienne, on retrouve les systèmes suivants [8,9]: figure III.2

A. Système vis-écrou : Le système vis-écrou permet de transformer un mouvement de rotation en un mouvement de translation en combinant les mouvements d'une vis et d'un écrou.

- Les avantages : Ce mécanisme permet d'exercer des forces et des pressions importantes. Il permet aussi des ajustements fins.
- Les inconvénients : Ce mécanisme génère beaucoup de frottement. Sa fragilité peut entraîner des problèmes de guidage. Le système est lent à moins d'avoir un pas de vis important. Les mécanismes vis-écrou sont limités aux systèmes de mouvement linéaire de petite et moyenne taille, leurs vitesses de rotation sont généralement limitées en particulier dans les applications nécessitant une résolution élevée.

Les deux principaux types de mécanismes vis-écrous sont les vis à billes et les vis ACME. Une vis à billes utilise des roulements à billes à recirculation. Le mécanisme est plus cher que le système à vis ACME mais avec un bon rendement, une précision et une espérance de vie plus élevées que les vis ACME. Les vis ACME ne sont pas aussi précises que les vis à billes et fonctionne avec un rendement plus faible que les vis à billes, mais par contre elles sont nettement moins cher et nécessite peu ou pas d'entretien, voir tableau III.1.

B. Système pignon-crémaillère : Le système pignon-crémaillère transforme le mouvement de rotation du pignon en un mouvement de translation de la crémaillère.

Chapitre III :Processus de conception

- Les avantages : Il n'y a aucun glissement lors de la transformation de ce mouvement. La force motrice de ce système est relativement grande. Utilisé pour les grandes courses sans risques de déformations importantes, contrairement à la transmission vis-écrou.
- Les inconvénients : Les engrenages utilisés peuvent nécessiter une lubrification importante. Ce mécanisme nécessite un ajustement précis à cause des dents entre la roue et la crémaillère. Il y a beaucoup d'usure. Les pignons de grandes dimensions s'usent plus lentement que les petits et offrent un meilleur transfert de puissance. Cependant, les pignons de grande taille sont moins précis.

C. Système poulies-courroie : Les poulies crantées et la courroie associée assurent une transformation de mouvement sans glissement.

- Les avantages : Souplesse de la transmission due à l'élasticité de la courroie, possibilité de faire varier l'entraxe, pas de lubrification, silencieux. Les transmissions poulies-courroie sont efficaces dans les applications dont la charge utile à déplacer est faible. Les vitesses linéaires de déplacement et les accélérations sont élevées.
- Les inconvénients : Usure de la courroie, utiliser pour les faibles et moyennes courses de déplacement, entretien régulier.

Le choix des solutions est basé essentiellement sur une comparaison avec des systèmes industriels existants (voir figure 3.3), et par les contraintes de coût et disponibilité sur le marché. Le choix est porté sur une transmission par poulies courroies crantées pour les axes X et Y (coût et disponibilité) et une transmission vis-écrou pour l'axe Z.

Chapitre III :Processus de conception

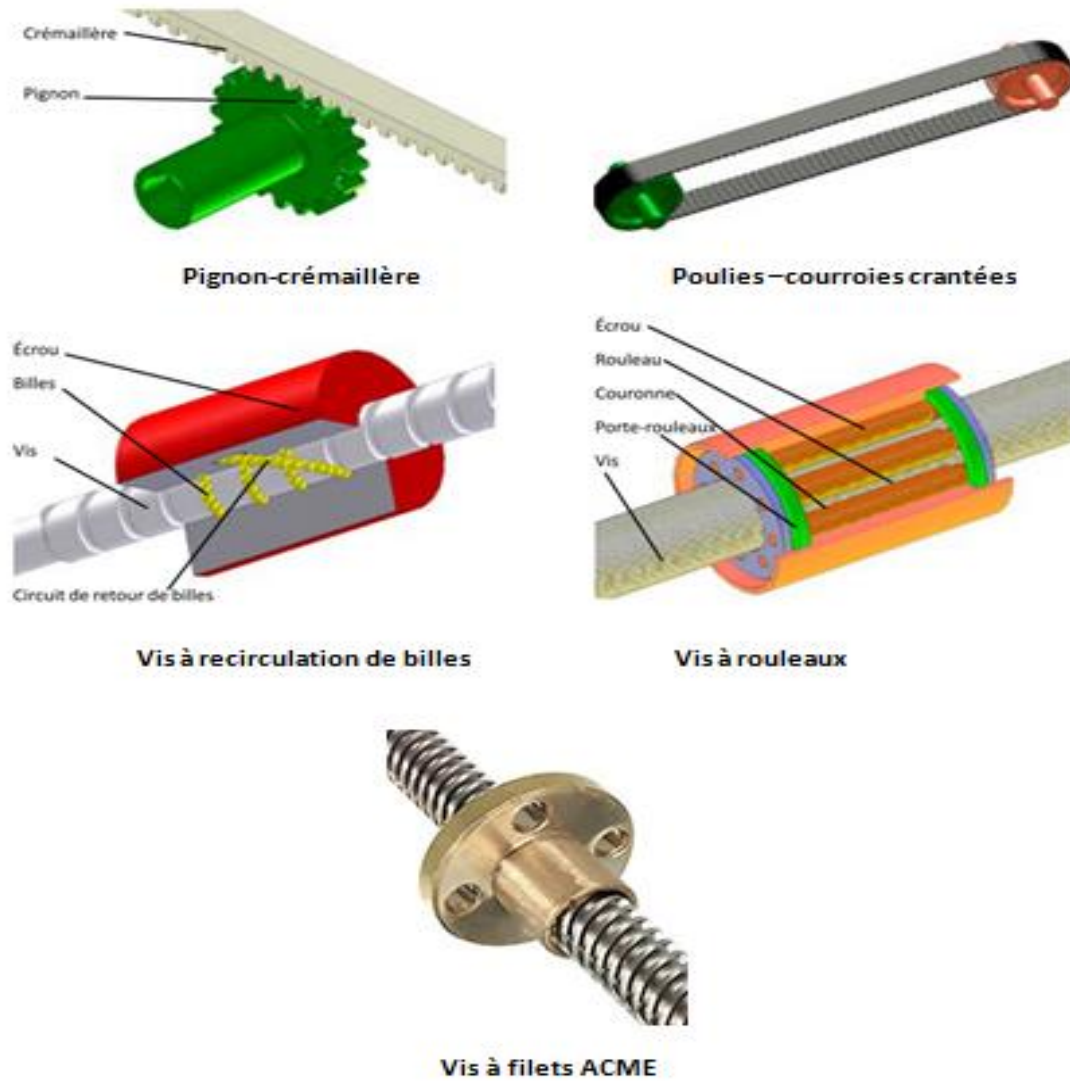


Figure III.2 : Eléments de transmission [9]

Tableau III.1 : Caractéristiques des systèmes de transformation [9]

Solution	Variante	Charge admissible	Vitesse	Performances				Réversibilité	Endurance mécanique
				Rigidité	Jeu	Précision de positionnement	Rendement		
Vis à billes	filets roulés	élevée	<2500 mm/s	bonne	faible	bonne	>80 %	bonne	bonne
	filets rectifiés	moyenne	<3000 mm/s	bonne	très faible	très bonne	>80 %	bonne	très bonne
Vis à rouleaux	écrou planétaire	très élevée	>3000 mm/s	très élevée	très faible	très bonne	>85 %	bonne	excellente
	rouleaux planétaires	très élevée	>3000 mm/s	très élevée	nul avec précontrainte	très bonne	>90 %	très bonne	excellente
	recirculation de rouleaux	très élevée	>3000 mm/s	très élevée	nul avec précontrainte	très bonne	>90 %	très bonne	excellente
Crémaillère		élevée	<4500 mm/s	très bonne	très faible	bonne à très bonne suivant réalisation et rattrapage de jeu	< 60%	très bonne	bonne
Courroie		modéré	<3000 mm/s	faible	faible	moyenne	< 70%	bonne	bonne
Bielle-manivelle		modéré	Vitesse de déplacement périodique non uniforme	modérée	faible	moyenne	< 60 %	variable	modérée

III.1.2.2 Systèmes de Guidage :

Le guidage permet de déplacer une charge suivant une trajectoire linéaire avec une grande précision. De nombreuses solutions existent, leur objectif commun est d'offrir un jeu mécanique réduit, un rendement maximal et une longue durée de vie. Les termes courants associés sont nombreux : rail, guide, coulisseau, glissière, etc...

Les guidages utilisés en robotique sont très nombreux, on peut les classer ainsi :

Guidage à contact directe : guidage prismatique, guidage par arbre coulissant, guidage par liaisons multiples.

Guidage à Eléments roulants : Il existe une grande variété d'éléments roulants standards permettant de réaliser une liaison glissière. Le coût de ces éléments limite leur utilisation aux cas pour lesquels le frottement doit être réduit et les efforts sont importants. Ces éléments admettent des vitesses importantes, un bon rendement et une grande précision.

En général les guidages à éléments roulants voir la figure III.3 suivante sont les plus utilisés en robotique [8,9].

1. Guidage par galets
2. Guidage par règle à billes ou à rouleaux
3. Guidage à douille à recirculation de billes

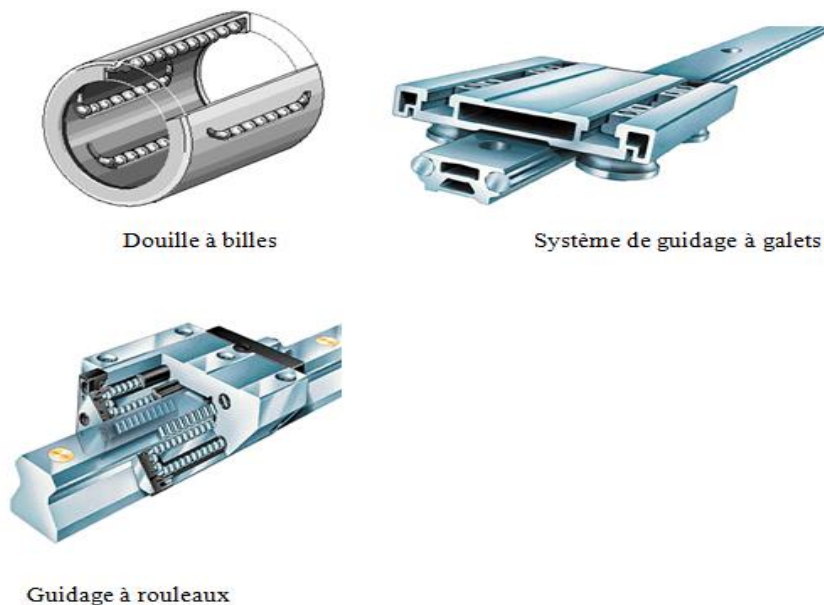


Figure III.3 : Guidage à éléments roulants [9]

Chapitre III :Processus de conception

Les douilles à billes à recirculation doivent fonctionner avec un coefficient de frottement très faible pour éviter les à-coups pendant les déplacements. Les rails ronds sont généralement moins chers, moins précis et supportent des charges plus faibles que les rails profilés. Les rails profilés sont généralement plus chers que les rails ronds et peuvent être plus difficile à aligner. Par conséquent, les rails profilés sont généralement utilisés dans des applications avec les exigences suivantes : fortes charges et/ou haute précision, voir figure 3.5

Les systèmes de guidage à galets roulent sur des profilés avec des rainures en « V ». Bien qu'ils ne soient pas aussi précis que les rails ronds et les rails profilés, par contre ils sont plus faciles à mettre en œuvre. Leur conception simple nécessite peu ou pas d'entretien tout en offrant une longue durée de vie. Ils coûtent moins cher que les rails ronds et les rails profilés, sont plus faciles à installer et peuvent couvrir de longues distances. Dans cette étude le choix s'est porté sur le système de guidage à galets pour les raisons citées précédemment.

Tableau III.2 : Comparatif des dispositifs de guidage [9]

Solution	Variante	Charge admissible	Vitesse de déplacement	Performances			Prix	Endurance mécanique
				Rigidité	Jeu	Rendement		
Galet		modérée	élevée	bonne	faible	moyen	faible	moyenne
Douille à billes		modérée	élevée	bonne	très faible	bon	modéré	bonne
Rail	billes	élevée	très élevée	très bonne	très faible	très bon	modéré	très bonne
	rouleaux	très élevée	élevée	excellente	nul (précontrainte)	très bon	élevé	très bonne

III.1.2.3 Motorisation :

Les moteurs sont essentiels dans la chaîne de commande de mouvement. Ils doivent réagir rapidement aux ordres de commande, être capables de fonctionner de l'arrêt jusqu'à plusieurs milliers de tours par minute, accepter les surcharges et nécessiter le moins d'entretien possible.

Chapitre III :Processus de conception

Les deux types de moteurs électriques les plus utilisés dans les systèmes robotiques linéaires sont : les moteurs pas à pas et les servomoteurs DC (Direct Current) ou AC (Alternative current).

Les moteurs pas à pas sont des moteurs spéciaux, composés simplement d'un stator réunissent des pièces polaires et des bobinages, et utilisés pour commander avec grande précision le déplacement et la position d'un objet.

Les moteurs pas à pas fonctionnent avec un signal de direction 0-5V et un autre signal en onde carrée pulsé à une certaine fréquence. Le signal de direction directe le sens de rotation et, le signal pulsé détermine les déplacements du rotor et la vitesse selon la fréquence. Chaque pulse correspond au déplacement du rotor d'un pas. La Majorité des moteurs pas à pas ont une résolution de 200 pas par tour (pas complet 'Full Stepping'). Les variateurs permet d'obtenir une résolution plus élevée que 200 pas par tour (exemple : 400 pas/tour [1/2 pas 'Half-stepping'], plus de 400 pas/tour [micro pas 'Microstepping']) et donc un positionnement plus fin. Les moteurs pas à pas développent leur couple maximal à basse vitesse. Le moteur pas à pas est l'organe de positionnement et de vitesse travaillant généralement en boucle ouverte [].

On trouve trois types de moteurs pas-à-pas :

- Le moteur à réluctance variable,
- Le moteur à aimants permanents,
- Le moteur hybride, qui est une combinaison des deux technologies précédentes.

Avantages

- Positionnement avec une certaine immobilisation,
- Robuste et fiable,
- Précision de positionnement relativement bonne,
- Asservissement simple (pas de boucle d'asservissement requise),
- Pas d'ajustement requis

Le servomoteur doit être absolument utilisé en boucle fermée. Il est généralement constitué d'un moteur CA ou CC intégré à un codeur. Le codeur est un capteur qui fournit au contrôleur la position et la vitesse de l'axe. Par la suite, des consignes de position peuvent être atteintes en incluant un PID. Le servomoteur intègre dans un même boîtier, la mécanique (motoréducteur), et l'électronique, pour la commande et l'asservissement du moteur. Il est utilisé surtout pour les grandes vitesses de déplacement et pour une grande précision

($\pm 0.002\text{mm}$), mais son prix est nettement plus élevé à celui d'un moteur pas à pas à cause de toute l'électronique associée au système. Les servomoteurs sont plus sensibles aux dommages dus à la surchauffe et la surcharge.

Vue les avantages que présente le moteur pas à pas : prix abordable, pas de boucle d'asservissement, précision de positionnement relativement bonne, facile à installer, c'est évidemment la solution qui sera utilisée pour la motorisation des trois axes du robot.

III.1.3 Commande

L'électronique pilotant un moteur pas à pas se divise en 3 fonctions :

- L'alimentation du moteur avec ses contraintes de tensions, courants et puissances à dissiper. C'est l'électronique de puissance.
- Le séquenceur qui gère la chronologie des impulsions.
- L'oscillateur

L'électronique de puissance alimente depuis la tension d'utilisation les bobinages.

Le séquenceur : Il gère la chronologie des impulsions. Les signaux de commande sont de type logique c'est à dire tension- pas de tension. La chronologie des impulsions dépend :

- du sens de rotation désiré du moteur,
- du fonctionnement en monophasé (pleine onde ou faible puissance) ou fonctionnement biphasé,
- du fonctionnement en pas ou demi pas (half-step).

III .2 Conception du système

La partie conception contient les solutions techniques développées dans ce travail des sous-systèmes composants le robot cartésien.

III.2.1 le support :

Le support choisi (voir figure III.4) est un portique qui permet une grande rigidité au système il est compatible avec notre besoin, il est constitué de deux types de profilés

a) Profilé 1 :

Le profilé utilisé est un profilé en aluminium 6063 T5, la section droite du profilé est donnée par la figure III.5 suivante. Le profilé permet aussi le guidage des galets de roulement.

a) Profilé 2

Le profilé utilisé est un profilé en aluminium 6063 T5, la section droite du profilé est donnée par la figure III.6. Le profilé permet aussi le guidage des galets à roulement.

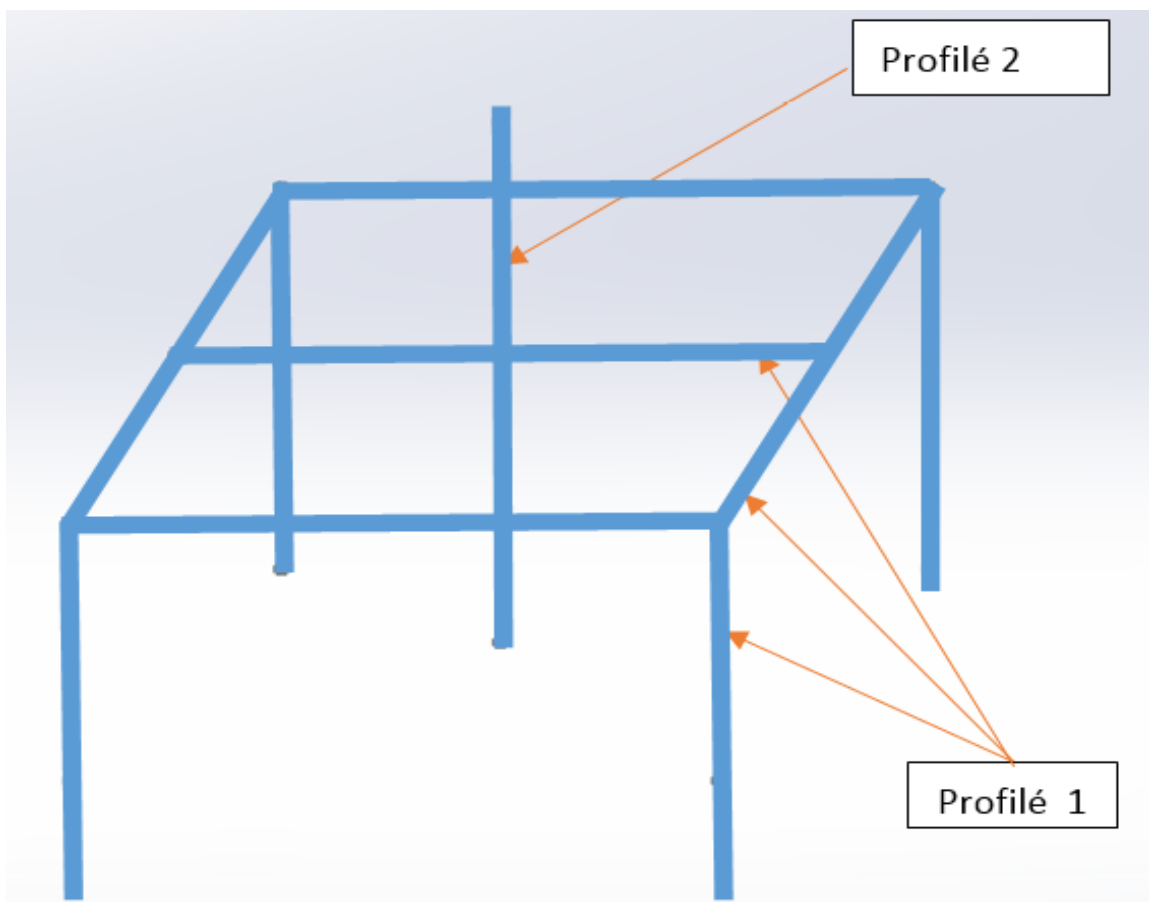


Figure III.4 : Support du système



Figure III.5 : Dimensions de la section droite du profilé 1 []

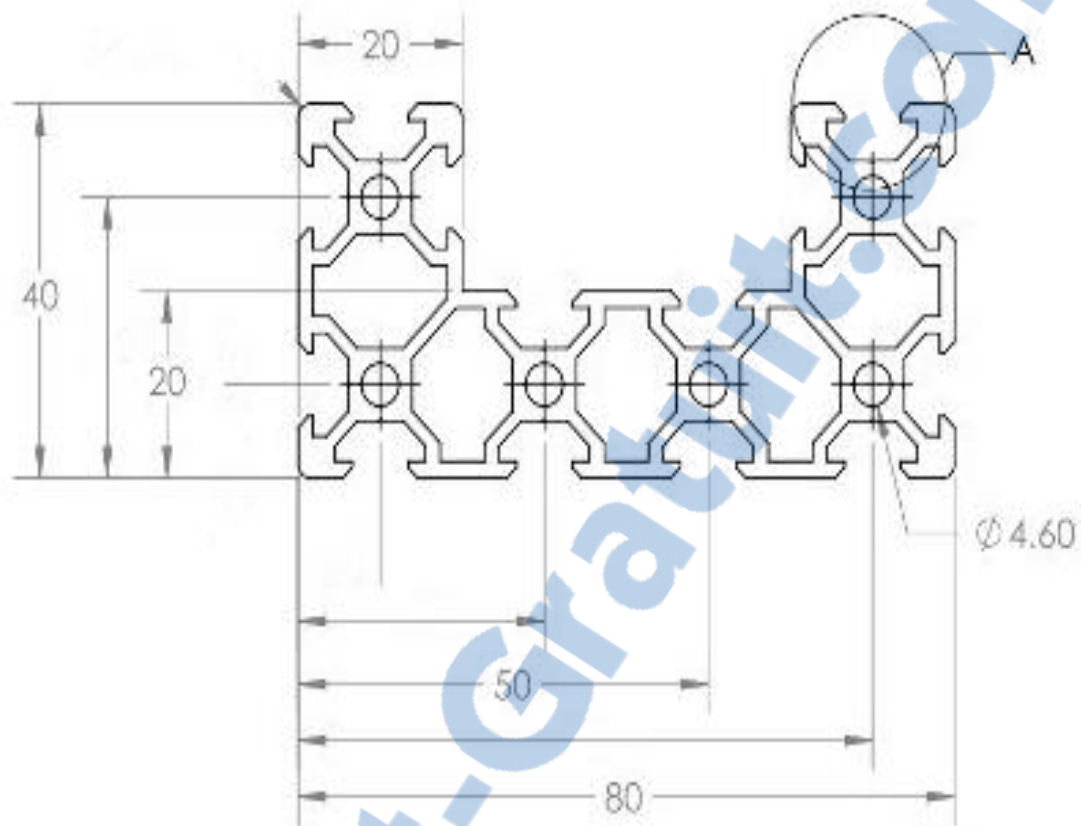


Figure III.6 : Dimensions de la section droite du profilé 2 []

III.2.2 Axe Z :

La conception de l'axe Z passe en premier lieu par l'élaboration de la chaîne cinématique minimale.

III.2.2.1 Chaîne cinématique de l'axe Z :

La chaîne cinématique utilisée pour développer l'axe Z est constituée de trois classes d'équivalences, notées SE_0 , SE_1 et SE_2 , voir figure III.7

SE_0 Constitue le support de l'axe Z composé de 4 galets et d'un écrou permettant la rotation et le déplacement de la vis, tous les deux (galets et écrous) fixés sur une plaque immobile en translation assurant ainsi le déplacement de SE_1 et SE_2 .

SE_1 est constituée de la motorisation et le système de transformation de mouvement : moteur+accouplement+vis. SE_1 est en liaison pivot avec SE_2 .

SE_2 est constitué du profilé 2.

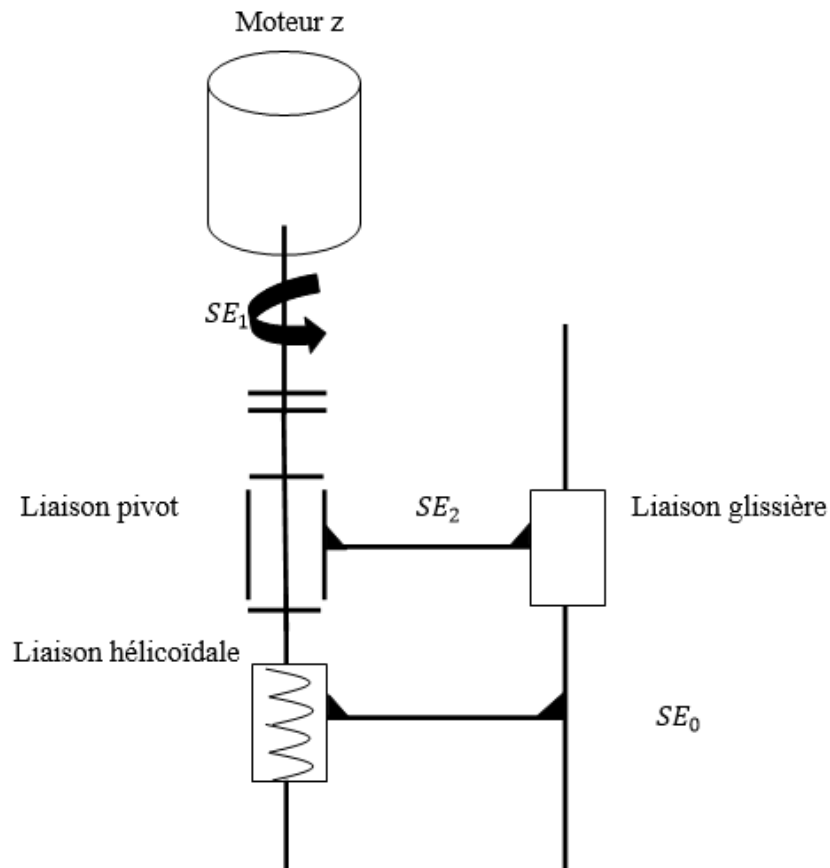


Figure III.7 : Chaîne cinématique de l'axe Z

III.2.2 Graphe des liaisons :

Le graphe des liaisons est donné par la figure III.8 suivant

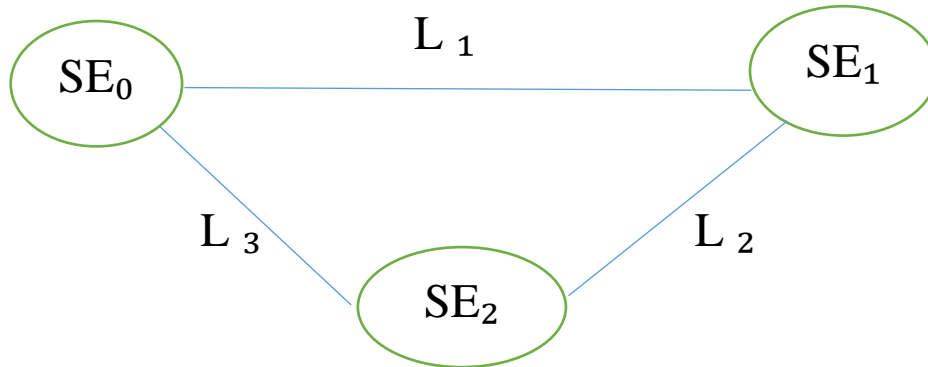


Figure III.8 : Graphe des liaisons de l'axe Z

Où

L_1 : liaison hélicoïdal

L_2 : liaison pivot

L_3 : liaison glissière

- la liaison pivot L_2 entre la vis et le profilé est réalisation deux palier sa roulement
- la liaison glissière L_3 entre la plaque immobile plus écrou et le profilé 2 est réalisée par 4 galets à roulement et la rainure de forme V sur le profilé 2. Il faut noter que les galets sont fixés sur la plaque immobile.
- la liaison hélicoïdale L_1 entre la vis et l'écrou, fixé sur la plaque immobile permet la rotation et le déplacement de SE_1 entrainant ainsi la translation du profilé 2.

III.2.3 solution technologie de l'axe Z :

La solution technologique décrite par la chaine cinématique précédente de l'axe Z est donnée ci-dessous par la figure III.9. La solution est réalisée par le logiciel Solidworks 2017.

III.2.4 Mise en plan de l'axe Z :

La solution technologique de l'axe Z est donnée par le dessin d'ensemble de l'axe Z ainsi que les matériaux et les dimensions réelles du système (Voir la mise en plan 1).



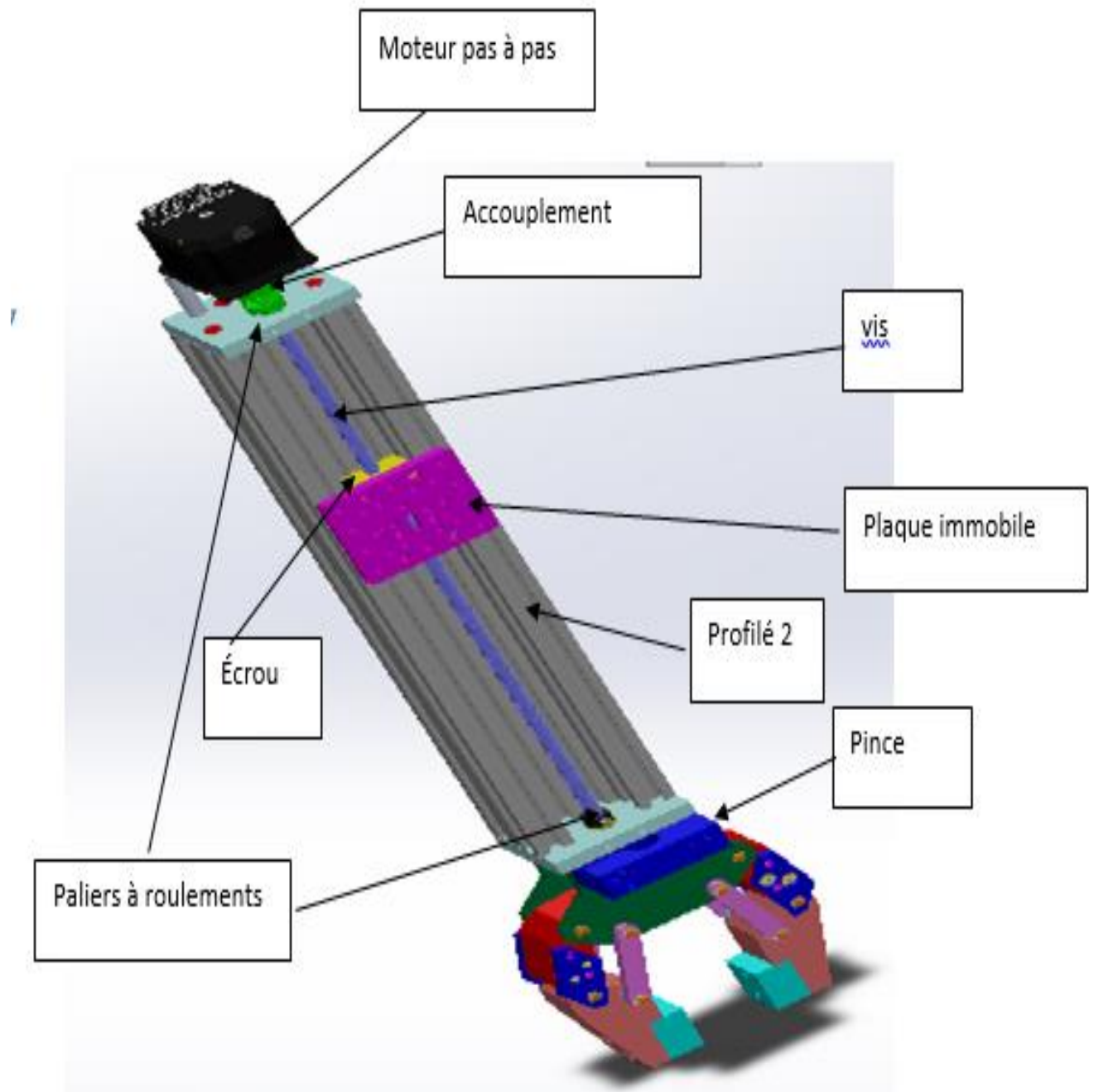


Figure III.9 : CAO 3D de l'axe Z sous Solidworks

III.2.3 Axe Y :

III.2.3.1 Chaîne cinématique de l'axe Y :

La chaîne cinématique utilisée pour développer l'axe Y est constituée de trois classes d'équivalences, notées SE_3 , SE_4 et SE_5 .

La classe SE_3 est constituée des deux poulies (motrice et réceptrice)

Chapitre III :Processus de conception

SE_4 est constituée d'une plaque liée à la courroie crantée pour assurer ainsi la transformation du mouvement, et de 4 galet pour assurer le guidage linéaire.

SE_5 est constituée du profilé 1 assurant le guidage des 4 galets.

Le moteur de l'axe Y permet la rotation de SE_3 d'où la translation de SE_4 par la liaison glissière avec SE_5 .

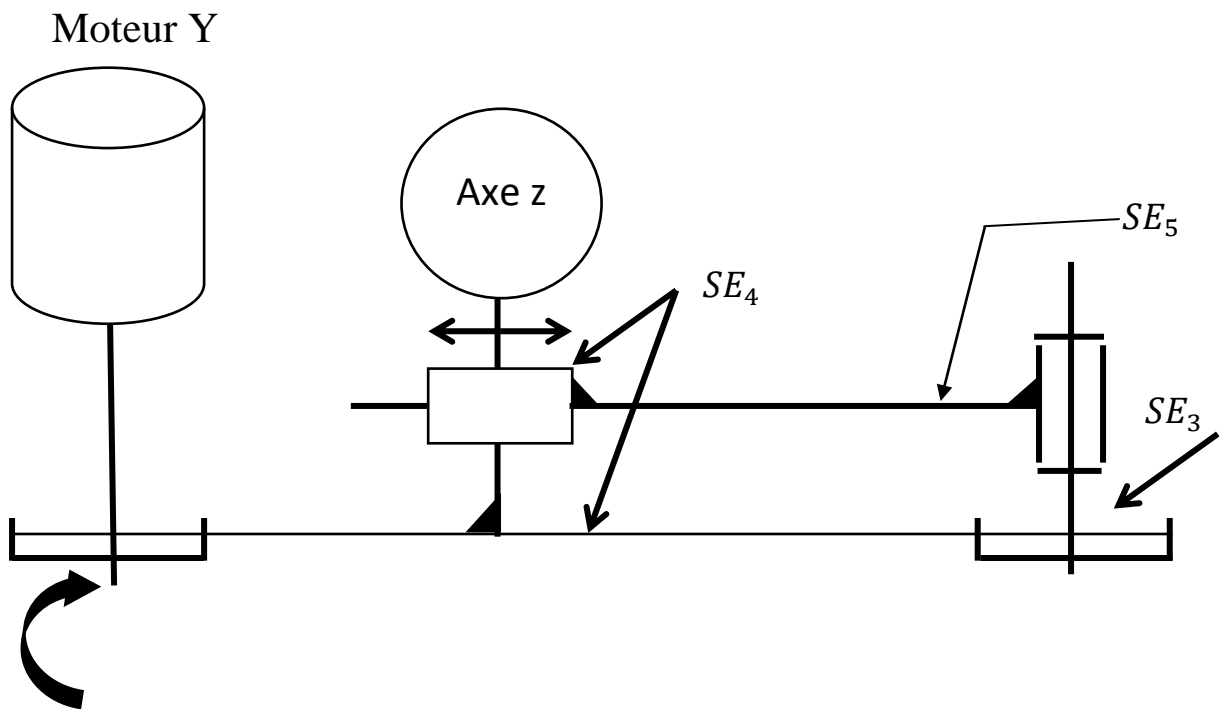


Figure III.10 : Chaîne cinématique de l'axe Y

III.2.7 Graphe des liaisons de l'axe Y :

Le graphe de liaison est donné ci-dessous par la figure III.11

où :
 L_4 : liaison linéaire
 L_5 : liaison glissière
 L_6 : liaison pivot

- la liaison pivot L_6 entre SE_3 et SE_5 est réalisée grâce à des paliers à roulements,
- la liaison glissière L_5 entre SE_4 et SE_5 est réalisée par 4 galets à roulements qui roulent sur le profilé 1 à rainure en V,
- la liaison linéaire L_4 est réalisée par la courroie crantée et les poulies.

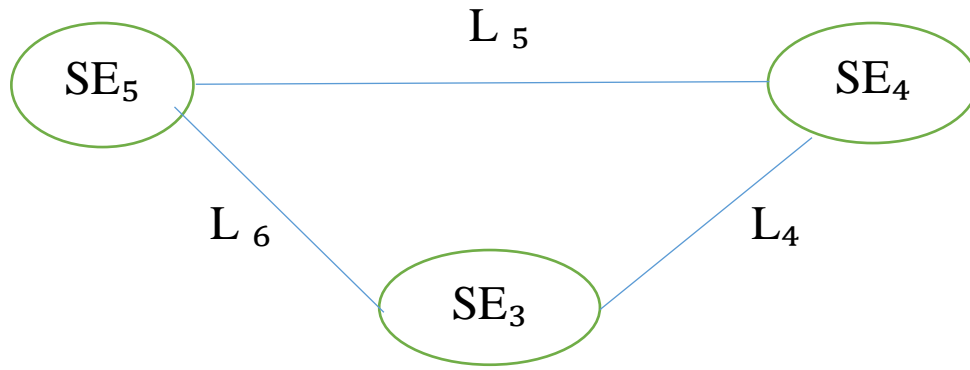


Figure III.11 : Graphe des liaisons de l'axe Y

III.2.8 Solution technologique de l'axe Y :

La solution technologique décrite par la chaîne cinématique précédente de l'axe Y est donnée ci-dessous par la figure III.12. La solution est réalisée par le logiciel Solidworks 2017.

III.2.9 Mise en plan de l'axe Y :

La solution technologique de l'axe Y est donnée dans le dessin d'ensemble de l'axe Y ainsi que les matériaux et les dimensions réelles du système (Voir la mise en plan 2).

III.2.10 la Chaîne cinématique de l'axe X :

Moteur X

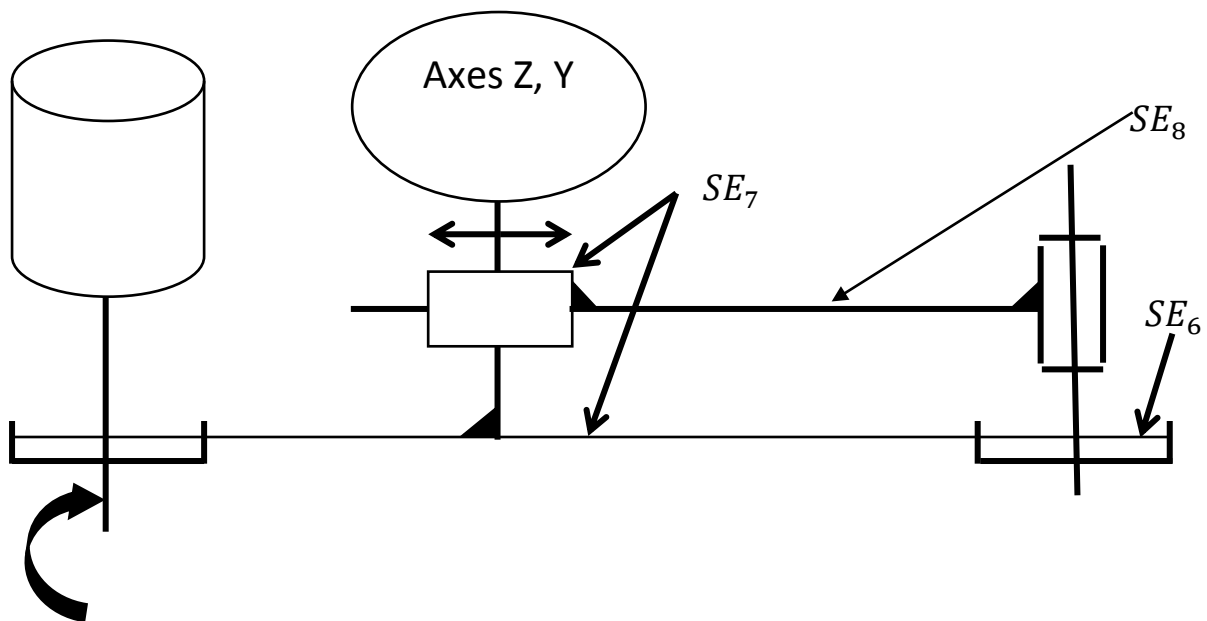


Figure III.13 : Chaîne cinématique de l'axe Y

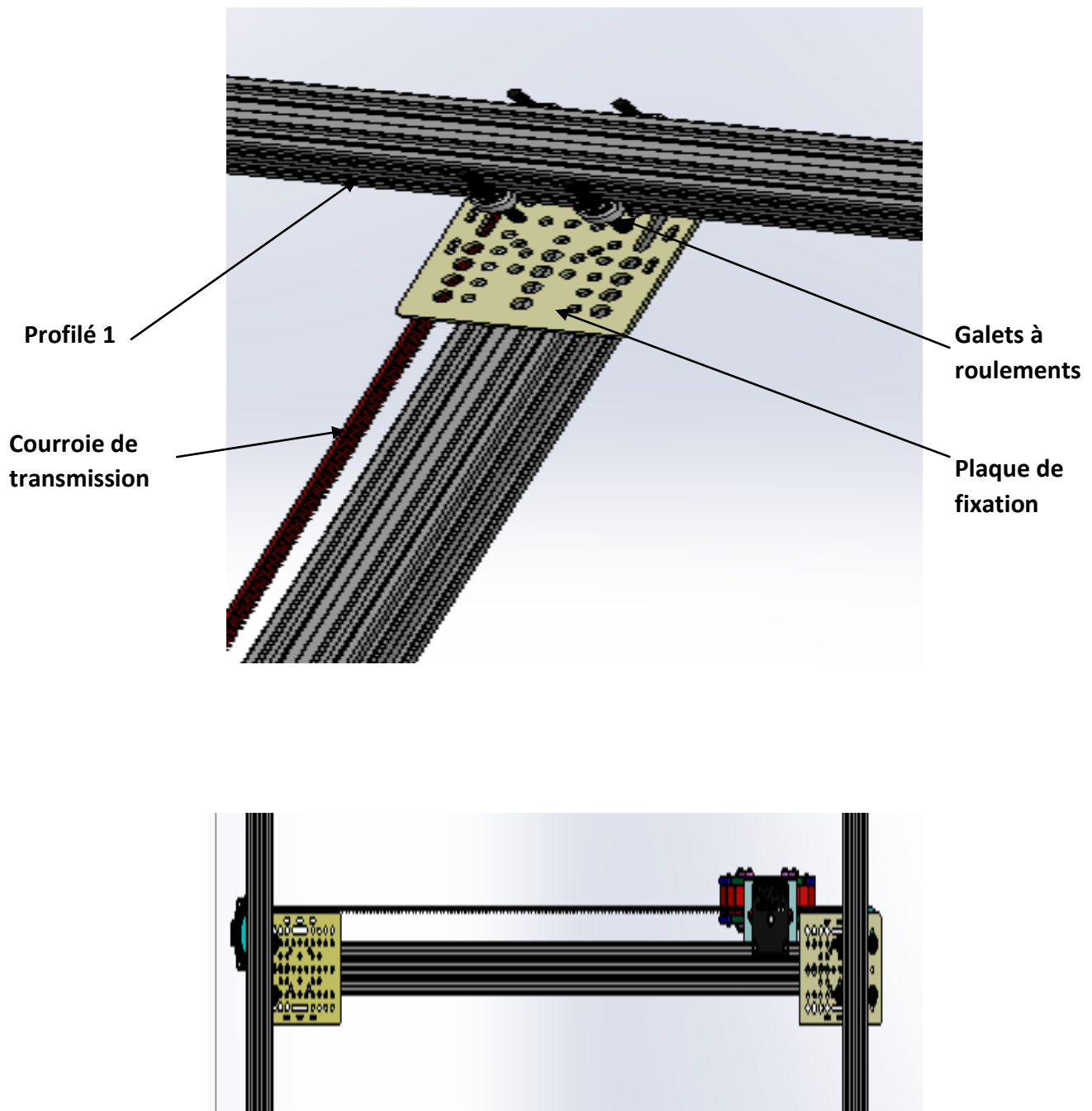


Figure III.12 : Dessin CAO de l'axe Y

III.2.11 Graphe des liaisons de l'axe X :

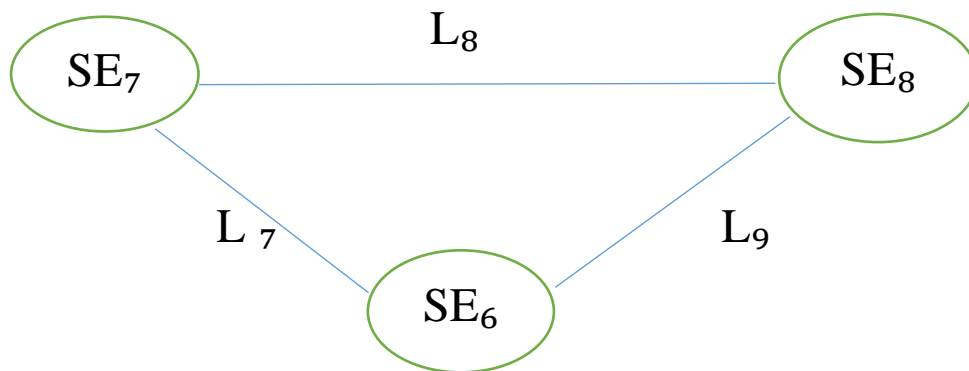


Figure III.13 : Graphe des liaisons de l'axe X

L_7 : liaison linéaire

L_8 : liaison glissière

L_9 : liaison pivot

Le même principe que l'axe Y.

- la liaison pivot L_9 entre SE_6 et SE_8 est réalisée grâce à des paliers à roulements,
- la liaison glissière L_8 entre SE_7 et SE_8 est réalisée par 4 galets à roulements qui roulent sur le profilé 1 à rainure en V,
- la liaison linéaire L_4 est réalisée par la courroie crantée et la poulie motrice reliée au moteur de l'axe X.

III.2.12 Solution technologique de l'axe X :

La solution technologique est donnée par la figure III.14.

III.2.13 mise en plan de l'axe X :

La solution technologique de l'axe X est donnée dans le dessin d'ensemble de l'axe X ainsi que les matériaux et les dimensions réelles du système (Voir la mise en plan 4).

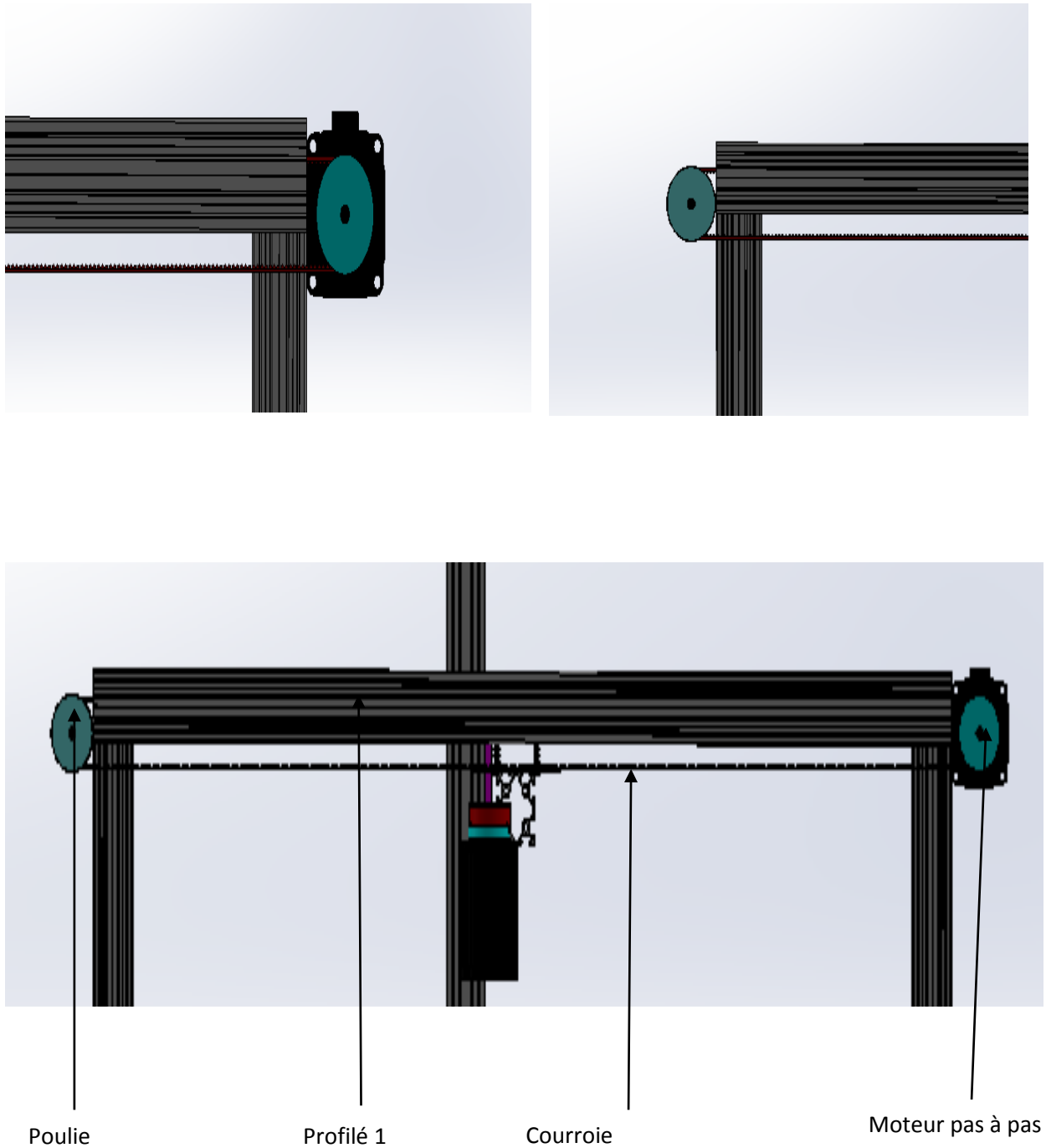


Figure III.14 dessin CAO de l'axe X

III.2.14 CAO du robot cartésien :

La CAO du robot cartésien avec les différents sous-systèmes assemblés est donnée par la figure III.15 suivante.

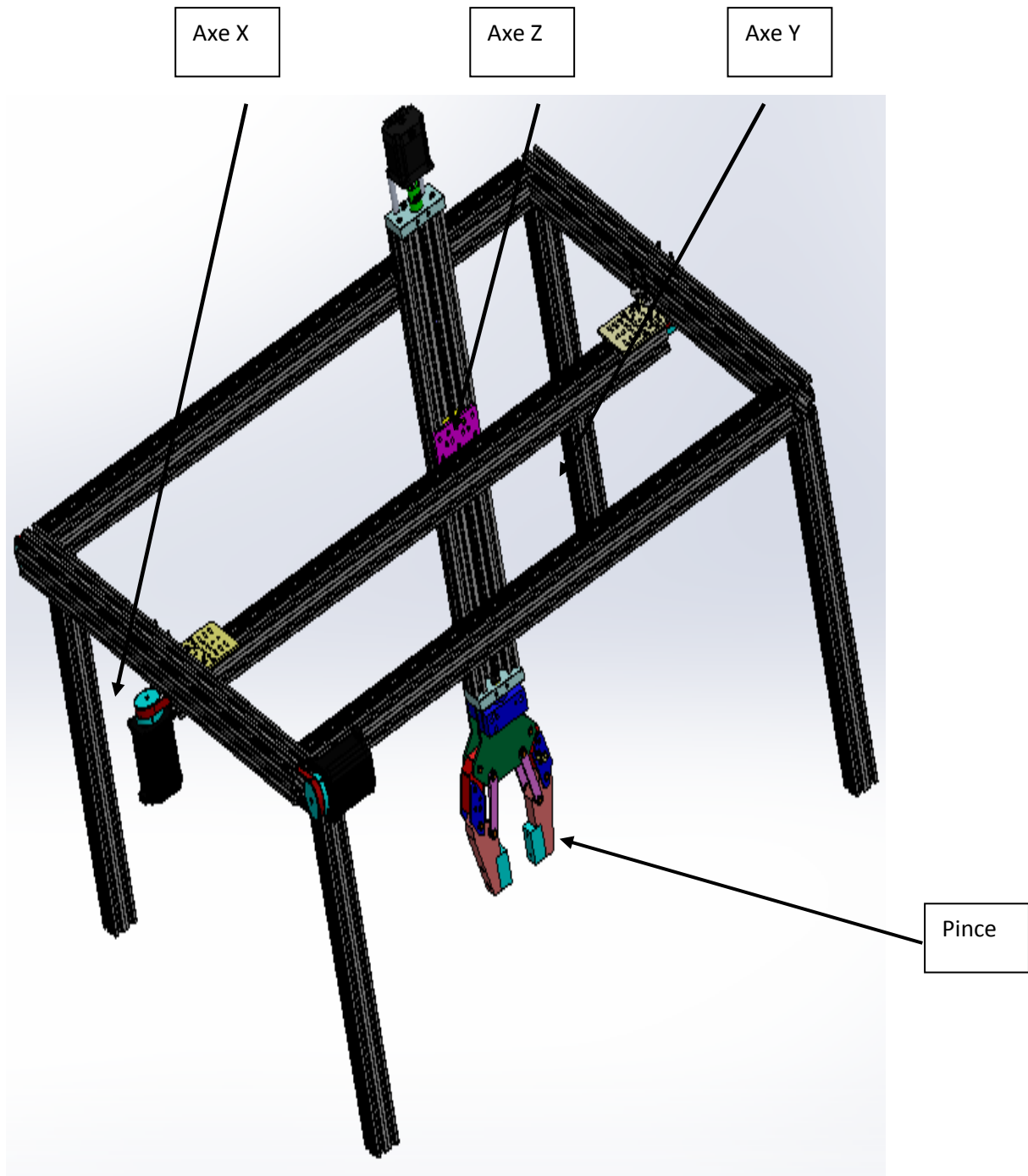


Figure III.15 : CAO du robot cartésien

III.2.15 Dessin d'ensemble du robot cartésien:

La solution technologique du système est donnée sous forme de dessin d'ensemble du système ainsi que les matériaux et les dimensions réelles du système (Voir la mise en plan 5).

Rapport-Gratuit.com

CHAPITRE IV :

VALIDATION DES SOLUTIONS TECHNOLOGIQUES RETENUES

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

Ce chapitre est consacré à la validation par un calcul de dimensionnement des solutions technologiques choisies.

IV.1 Schéma bloc d'une transmission linéaire

L'augmentation de la productivité des systèmes de positionnement (Machines-outils, manipulateurs cartésiens, portiques,) passe globalement par la réduction de la durée des mouvements.

L'accroissement des demandes dynamiques en termes d'accélération et de vitesse maximale conduit ces systèmes à la limite de leurs possibilités technologiques, invalidant de ce fait l'hypothèse classiquement retenue d'un comportement rigide de la charge à positionner.

La validation des solutions technologiques consiste à dimensionner les différents sous-systèmes qui composent le robot, principalement :

- La Motorisation
- Les systèmes de transformation de mouvement
- Le support

Concernant la motorisation le dimensionnement consiste à déterminer les couples et les puissances du moteur nécessaire au déplacement des différent charge selon le cahier de charge établi au paravent.

Pour les systèmes de transformation de mouvement, un calcul de vérification sera réalisé (statique, flambage, pression de contacte, ...)

Concernant le support, un calcul statique permettra de vérifier la rigidité du support.

En général une transmission linéaire est composée d'un organe moteur en entrée et d'une charge à déplacer de masse M en sortie par l'intermédiaire d'un réducteur de vitesse et d'un transformateur de mouvement.

Le moteur d'inertie J_m produit un mouvement de rotation, caractérisé par la vitesse angulaire ω_m et un couple moteur C_m . La charge M , se déplace d'une vitesse V et d'une accélération a .

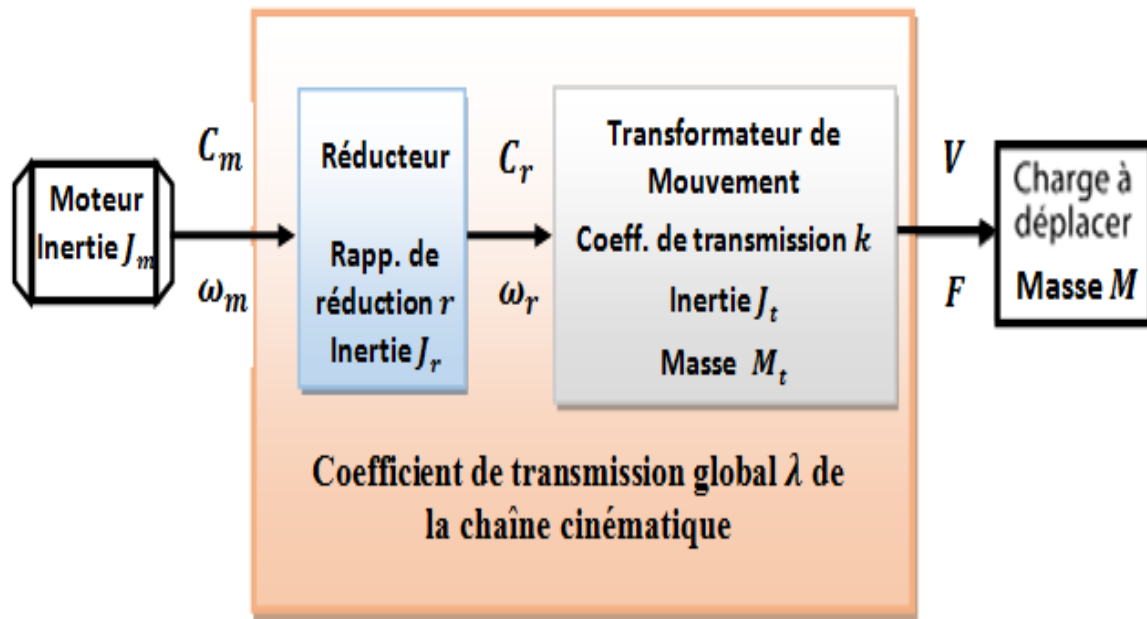


Figure IV.1 : Schéma bloc d'une transmission linéaire

C_m : couple moteur

J_m : inertie du rotor autour de son axe

J_r : inertie du réducteur sur l'arbre d'entrée (côté moteur)

J_t : inertie du transformateur de mouvement sur son arbre d'entrée (côté réducteur)

r : coefficient de réduction du réducteur : $r = \frac{\omega_m}{\omega_r}$

k : coefficient de transmission du transformateur de mouvement: $k = \frac{V}{\omega_r}$

λ : coefficient de transmission global (gain en vitesse) de la chaîne cinématique :

$$\lambda = k r \quad (1)$$

F : effort appliqué sur la charge.

En général, le cahier des charges impose un déplacement donné x_c en un temps maximal t_t dicté par le temps de cycle de la machine t_{cyc} .

On va chercher à déterminer la vitesse et l'accélération maximales à fin de dimensionner le moteur.

IV.2 Caractéristiques cinématiques du mouvement du rotor pour une loi de commande trapézoïdale :

La loi de commande utilisée est une loi trapèze en vitesse [11], c'est une loi à accélération constante, c'est une loi très utilisée en robotique à cause de sa simplicité, mais quand même elle présente certains inconvénients tels que : un jerk théoriquement infini et une puissance importante en fin d'accélération.

Le déplacement sur les axes Z, Y ou X est commandé par une loi de vitesse trapézoïdale donnée par la figure IV.2 suivante

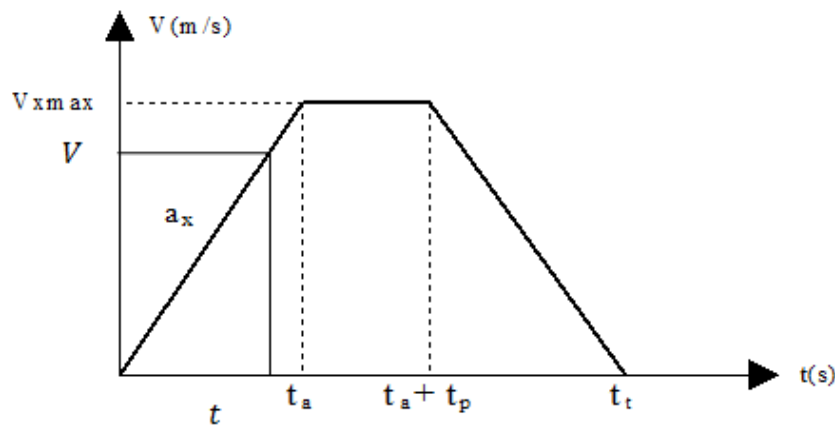


Figure IV.2 : loi de vitesse trapézoïdale

Notons que

V : vitesse à l'instant t suivant l'axe de commande ;

V_{max} : vitesse maximale suivant l'axe de commande ;

a_x : accélération linéaire sur l'axe de commande ;

t_a : temps d'accélération = temps de décélération ;

t_p : temps de déplacement à vitesse constante ;

t_t : temps de déplacement total ;

La distance parcourue par l'axe est précisément l'aire du trapèze de vitesse, la position x_c étant l'intégrale de la vitesse :

$$x_c = \int_0^{t_t} V \, dt \quad (2)$$

d'où

$$x_c = V_{\max} (t_a + t_p) \quad (3)$$

Par ailleurs, la valeur de l'accélération a_x est la pente de la vitesse et donc :

$$a_x = \frac{V_{\max}}{t_a} \quad (4)$$

D'où le temps d'accélération t_a est donné par

$$t_a = \frac{V_{\max}}{a_x} \quad (5)$$

De ces deux équations, on tire la course x_c

$$x_c = V_{\max} \left[\frac{V_{\max}}{a_x} + t_p \right] \quad (6)$$

et finalement le temps de déplacement à vitesse constante t_p est donné par

$$t_p = \frac{x_c}{V_{\max}} - \frac{V_{\max}}{a_x} \quad (7)$$

de même on peut déterminer le temps total t_t

$$t_t = 2t_a + t_p = 2 \frac{V_{\max}}{a_x} + t_p \quad (8)$$

En utilisant l'expression précédente, il vient

$$t_t = 2 \frac{V_{\max}}{a_x} + \frac{x_c}{V_{\max}} - \frac{V_{\max}}{a_x} = \frac{V_{\max}}{a_x} + \frac{x_c}{V_{\max}} \quad (9)$$

ce qui nous permet aussi d'exprimer a_x en fonction de V_{\max} , t_t et x_c

$$a_x = \frac{V_{\max}}{t_t - \frac{x_c}{V_{\max}}} \quad (10)$$

IV.2.1 Conditions à respecter :

Les contraintes de distance x_c , de temps t_t et du profil cinématique exigent les conditions suivantes

- 1) Que l'accélération a_x ne dépasse pas un seuil maximal pour éviter des sollicitations mécaniques élevées, d'où

$$\frac{V_{max+}}{t_a} \leq a_{maxi} \quad (11)$$

- 2) Et que a_x ne soit pas inférieure à un seuil minimal pour éviter les régimes dynamiques prolongées et qui peuvent surchauffer le moteur

$$a_{mini} > \frac{V_{max-}^2}{x_c} \quad (12)$$

Où V_{max+} et V_{max-} sont les limites supérieures et inférieure de la vitesse V_{max} .

A titre d'exemple le schéma ci-dessous donne l'allure de différentes combinaisons vitesse/accélération ainsi que les limites pour un déplacement de 3m en 1.5s. La vitesse maximale est comprise entre deux limites qui sont respectivement égales à 2m/s et 4m/s. En dessous de 2m/s la distance ne peut être parcourue dans le temps imparti, même avec une accélération infinie. Au-dessus de 4m/s une distance trop grande sera parcourue quelle que soit la valeur de l'accélération, c.à.d. qu'il faudra se limiter à 4m/s pour respecter le cycle. Voir figure IV.3

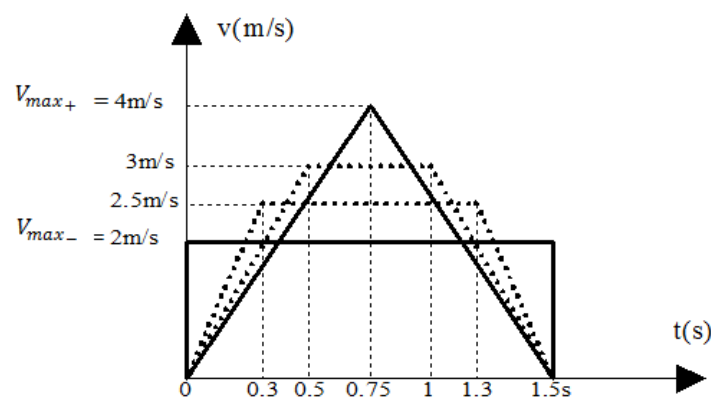


Figure IV.15 : Profils de vitesse pour un déplacement de 3m en 1.5s

IV.2.3 Puissances et couples moteur

L'application du théorème de l'énergie cinétique au système composé de toutes les pièces en mouvement aboutit à l'expression suivante

$$\sum C_m - \sum C_r = \sum J \cdot \dot{\omega}_m \quad (13)$$

$\sum C_m$: somme des moments moteurs ramenés sur l'axe du rotor

$\sum C_r$: somme des moments résistants ramenés sur l'axe du rotor

$\sum J$: somme des moments d'inertie des pièces en mouvement ramenés sur l'axe du rotor, comprenant

- le moment de toutes les inerties extérieures J_{ext}

$$J_{ext} = J_r + \frac{J_t + k^2 M}{r^2} \quad (14)$$

- le moment d'inertie du rotor J_m

D'où

$$\sum J = J_m + J_r + \frac{J_t + k^2 M}{r^2} \quad (15)$$

avec $\dot{\omega}_m$ l'accélération angulaire du rotor et ω_m est sa vitesse angulaire.

Le couple moteur C_{ma} requis en phase d'accélération est donné par

$$C_{ma} = \sum J \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{\sum J}{\lambda} \frac{dV}{dt} = \frac{a_x [(J_m + J_r)r^2 + J_t + k^2 M]}{rk} \quad (16)$$

Le couple moteur permanent C_{mp} à vitesse constante est exprimé par

$$C_{mp} = \frac{\lambda F}{\eta} = \frac{k F}{r \eta} \quad (17)$$

Le couple crête C_{max} est donné par

$$C_{max} = C_{ma} + C_{mp} = \frac{a_x [(J_m + J_r)r^2 + J_t + k^2 M]}{rk} + \frac{k F}{r \eta} \quad (18)$$

où η est le Rendement global de la chaîne cinématique et F est l'effort appliqué sur la charge.

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

La puissance maximale sera nécessairement atteinte en phase d'accélération et à la vitesse maximale, soit :

$$P_{max} = P_a = \frac{\sum J V_{max}^2}{\lambda^2 t_a} = \frac{\sum J}{\lambda^2} \frac{x_c^2}{t_a(t_t - t_a)^2} \quad (19)$$

De même on peut exprimer la puissance d'accélération par

$$P_a = M a_x V_{max} \quad (20)$$

Et la puissance permanente par

$$P_p = \frac{F V_{max}}{\eta} \quad (21)$$

La puissance totale P_t est donnée par

$$P_t = M a_x V_{max} + \frac{F V_{max}}{\eta} \quad (22)$$

En théorie, on obtient les meilleures performances lorsque le rapport d'inertie est de 1:1. On ne peut pas toujours atteindre cet objectif, la vitesse de rotation du moteur devenant trop élevée. En pratique, le rapport d'inertie ne doit pas dépasser une valeur comprise entre 5 et 10 pour les applications courantes, suivant la qualité de la mécanique

$$r_i = \frac{\frac{J_t + k^2 M}{r^2}}{J_m + J_r} \quad (23)$$

IV.3 Transmission par le système vis-écrou [12,13]

La fonction principale ou l'exigence de conception d'une vis de puissance est de déplacer un axe chargé par une force F sur une distance linéaire spécifiée, appelée course.

La vitesse linéaire de la vis V est obtenue en fonction de la vitesse de rotation N , comme suit

$$V = \frac{N}{60} \frac{p}{10^3} \quad (24)$$

D'où

N est la vitesse de rotation de la vis en tr/mn

p est le pas de la vis en mm

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

V est la vitesse linéaire en m/s

La vitesse d'entrée peut varier en fonction du temps t , ce qui entraîne une variation proportionnelle de la vitesse de sortie

$$V(t) = \frac{p}{2\pi} \omega(t) \quad (25)$$

$\omega(t)$ est la vitesse angulaire en rd/s

De même, les accélérations linéaire $a(t)$ et angulaire $\dot{\omega}(t)$ de la vis sont liées comme suit:

$$a(t) = \frac{p}{2\pi} \dot{\omega}(t) \quad (26)$$

Dans des conditions d'équilibre statique, la vis tourne à une vitesse constante sous l'action d'un couple d'entrée C nécessaire pour lever la charge, voir la Figure suivante.

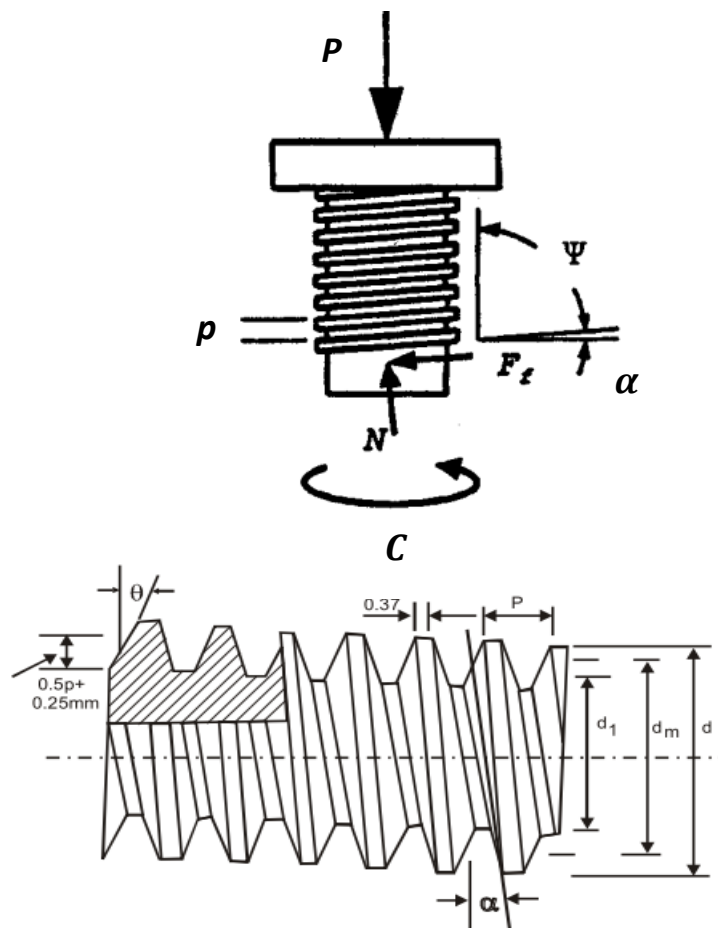


Figure IV.4 : Transmission par système vis-écrou

Examinons les forces exercées sur un plan incliné (filet de la vis). La vis est soumise à :

- la force P due au chargement extérieur,

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

- la force normale N ,
- la force de frottement $T = \mu N$,
- la force F nécessaire pour lever la charge.

Où μ est le coefficient de frottement entre la vis et l'écrou, avec

$$\mu = \tan \phi \quad (27)$$

Où ϕ est l'angle de frottement.

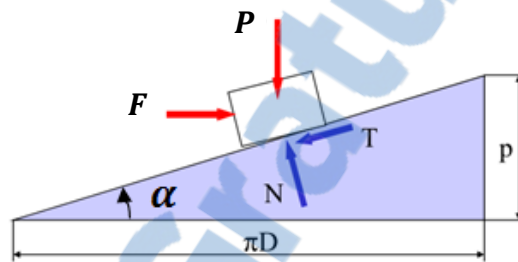


Figure IV.5 : Efforts sur le filet de la vis

Le couple d'entrée C nécessaire pour lever la charge est exprimé par

$$C = F \frac{d_2}{2} \quad (28)$$

Où d_2 est le diamètre sur flancs des filets du filetage.

Comme on peut exprimer l'angle d'hélice α relatif au diamètre d_2 du filetage par la relation suivante

$$\tan \alpha = \frac{p}{\pi d_2} \quad (29)$$

L'équilibre des efforts nous permet d'écrire

$$F = T \cos \alpha + N \sin \alpha = N(\mu \cos \alpha + \sin \alpha) \quad (30)$$

$$P = N \cos \alpha - T \sin \alpha = N(\cos \alpha - \mu \sin \alpha) \quad (31)$$

Ce qui nous permet de tirer

$$N = \frac{P}{\cos \alpha \left(1 - \frac{\mu p}{\pi d_2}\right)} = \frac{P}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \quad (32)$$

$$F = P \frac{p + \mu \pi d_2}{\pi d_2 - \mu p} = P \left(\frac{\mu \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) \quad (33)$$

Le couple nécessaire pour lever la charge est donné par

$$C = F \frac{d_2}{2} = P \frac{d_2}{2} \left(\frac{\mu \cos \alpha + \sin \alpha}{\cos \alpha - \mu \sin \alpha} \right) \quad (34)$$

Le couple C peut être écrit en fonction du pas de la vis

$$C = P \frac{d_2}{2} \left(\frac{\mu \pi d_2 + p}{\pi d_2 - \mu p} \right) \quad (35)$$

Le couple nécessaire pour baisser la charge est donné par

$$C = P \frac{d_2}{2} \left[\frac{\mu \pi d_2 - p}{\pi d_2 + \mu p} \right] \quad (36)$$

IV.3.1 Filetage trapézoïdal

Dans un filetage trapézoïdal on peut constater deux plans le plan apparent ou axial et le plan réel. L'angle de flanc θ dans le plan apparent est différent de l'angle de flanc réel θ_n , voir figure suivante. La relation entre ces deux angles est exprimée en fonction de l'angle d'hélice α par la relation suivante

$$\tan \theta_n = \tan \theta \cos \alpha \quad (37)$$

Les équations d'équilibre peuvent être écrites dans le plan réel ainsi

$$F = T \cos \alpha + N \cos \theta_n \sin \alpha = N(\mu \cos \alpha + \cos \theta_n \sin \alpha) \quad (38)$$

$$P = N \cos \theta_n \cos \alpha - T \sin \alpha = N(\cos \theta_n \cos \alpha - \mu \sin \alpha) \quad (39)$$

On peut tirer des deux équations précédentes la force nécessaire pour déplacer la charge P

$$F = P \left(\frac{\mu + \tan \alpha \cos \theta_n}{\cos \theta_n - \mu \tan \alpha} \right) \quad (40)$$

Le couple pour lever la charge est donné par

$$C = F \frac{d_2}{2} = P \frac{d_2}{2} \left(\frac{\mu + \tan \alpha \cos \theta_n}{\cos \theta_n - \mu \tan \alpha} \right) \quad (41)$$

avec ($d_2 = d - 0.5 p$) et d le diamètre nominal de la vis.

Du moment que $\tan \alpha = \frac{p}{\pi d_2}$ on obtient alors

$$C = P \frac{d_2}{2} \left(\frac{\mu \pi d_2 + p \cos \theta_n}{\pi d_2 \cos \theta_n - \mu p} \right) \quad (42)$$

De même pour le couple pour baisser la charge est donné par

$$C = P \frac{d_2}{2} \left(\frac{\mu \pi d_2 - p \cos \theta_n}{\pi d_2 \cos \theta_n + \mu p} \right) \quad (43)$$

Le rendement de la transmission est donné par

$$\eta = \frac{C_0}{C} \quad (44)$$

Où C_0 est le couple nécessaire pour lever la charge sans frottement ($\mu = 0$), d'où

$$C_0 = P \frac{p}{2\pi} \quad (45)$$



$$\eta = \frac{p}{\pi d_2} \frac{\pi d_2 \cos \theta_n - \mu p}{\mu \pi d_2 + p \cos \theta_n} \quad (46)$$

Du moment que $\tan \alpha = \frac{p}{\pi d_2}$ on obtient alors

$$\eta = \frac{\cos \theta_n - \mu \tan \alpha}{\cos \theta_n + \mu \cos \alpha} \quad (47)$$

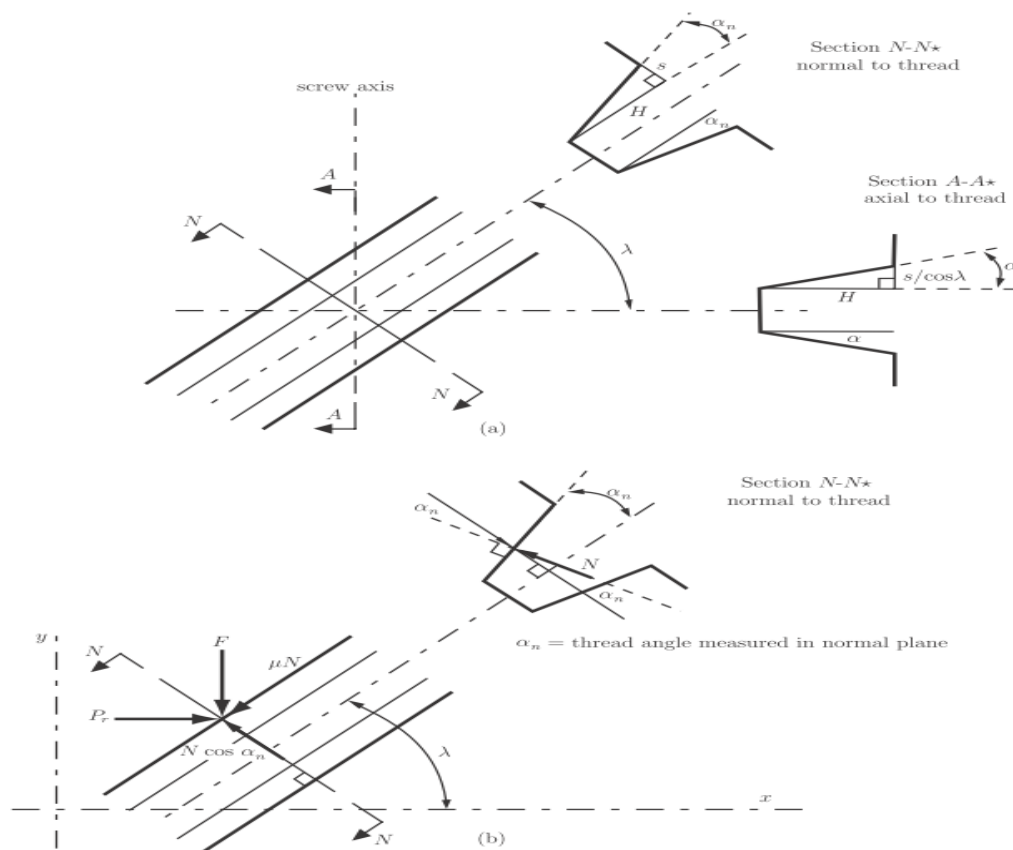


Figure IV.6 : plan apparent AA et plan réel NN de la vis

La vis est autobloquante si

$$\mu \geq \tan \alpha \cos \theta_n \quad (48)$$

IV.3.2 Contrôle du noyau de la vis

Les contraintes normales

$$\sigma = \frac{4F}{\pi d_3^2} \quad (49)$$

La contrainte de cisaillement

$$\tau = \frac{16 C}{\pi d_3^3} \quad (50)$$

La contrainte équivalente de Von Mises est donnée par

$$\sigma_e = \frac{4}{\pi} \sqrt{\left(\frac{F}{d_3^2}\right)^2 + 48 \left(\frac{C}{d_3^3}\right)^2} \quad (51)$$

La condition de résistance s'écrit alors

$$\sigma_e = \frac{4}{\pi} \sqrt{\left(\frac{F}{D^2}\right)^2 + 48 \left(\frac{C}{D^3}\right)^2} \leq \frac{Re}{\alpha_s} \quad (52)$$

où Re est la limite élastique du matériau et α_s le coefficient de sécurité en statique.

Selon la formule d'Euler, l'effort maximum admissible F_{adm} au flambage que peut supporter la vis en compression est donné par

$$F_{adm} = \frac{\zeta}{2} 10^4 \frac{d^4}{L_k^2} \quad (53)$$

La vitesse de rotation admissible de la vis N_c est obtenue ainsi

$$N_c = \epsilon 10^7 \frac{d}{L_k^2} \quad (54)$$

Ou

F_{adm} : effort maximum admissible au flambage, en N

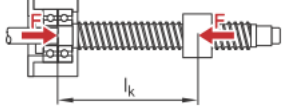
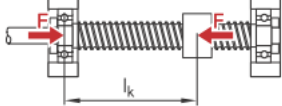
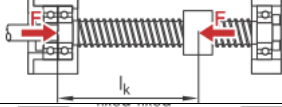
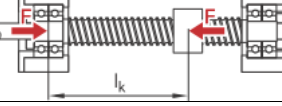
N_c : vitesse critique, en tr/mn

d : diamètre nominal du filetage extérieur, en mm

L_k : longueur libre de flambage mesurée entre l'écrou et l'appui le plus éloigné, en mm

ϵ et ζ : coefficients fonction des conditions aux limites avec le bati, voir tableau suivant

Tableau IV.1: coefficients ϵ et ζ en fonction des conditions aux limites

Conditions aux limites		ϵ	ζ
Encastrée-libre		4.3	2.6
Appuyée-appuyée		12.1	10.2
Encastrée- appuyée		18.9	20.4
Encastrée- Encastrée		27.4	40.6

IV.3.3 Pression superficielle de contact vis-écrou :

Le contrôle de la pression moyenne p_G entre les filetages de la vis et de l'écrou à profils trapézoïdal s'effectue à partir de la surface projetée perpendiculairement à l'axe de la vis :

$$p_G = \frac{P}{z_u \pi a_p d_2} \quad (55)$$

le nombre de filets porteurs de calcul z_u dans l'écrou est égal à

$$z_u = \frac{b}{p} - 1 \quad (56)$$

b étant la longueur de l'écrou

a_p est la projection de la largeur réelle de contact, donnée par

$$a_p = \frac{d - D_1}{2} \quad (57)$$

D_1 est le diamètre intérieur de l'écrou

$$D_1 = d - p \quad (58)$$

IV.4 Transmission par pignons et courroie crantée [12,13]

Les poulies et courroie crantée sont utilisées dans les transmissions sans glissement.

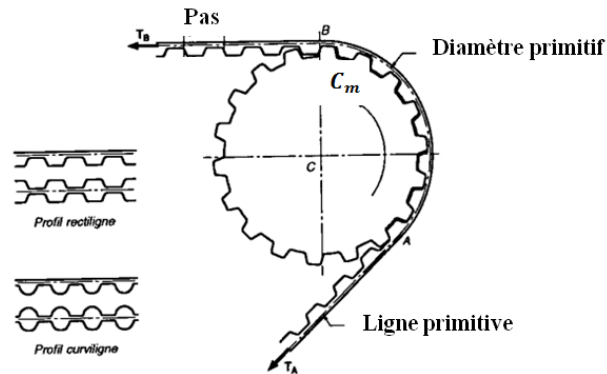


Figure IV.7 : Transmission par pignons et courroie crantée

IV.4.1 Paramètres géométriques

En fonction de l'entraxe e et des rayons primitifs r_1 et r_2 on peut déterminer la longueur de courroie théorique L

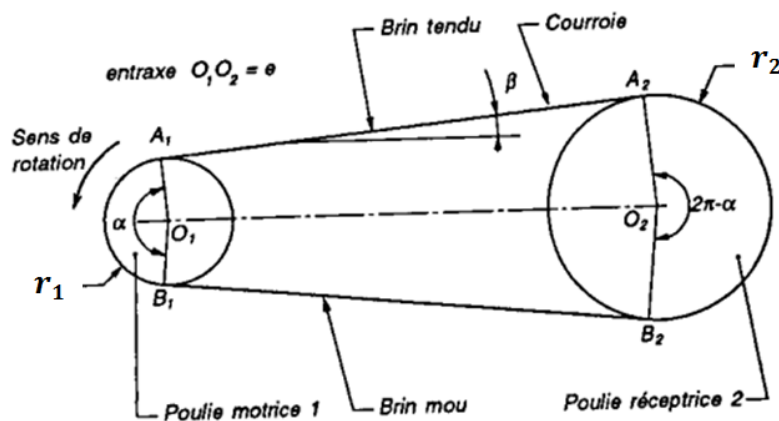


Figure 4.8 : Paramétrage géométrique d'une transmission poulies-courroie

En fonction de l'entraxe e et des rayons primitifs r_1 et r_2 on peut déterminer la longueur de courroie théorique L

$$L = 2 e \cos \beta + \pi (r_1 + r_2) + 2\beta(r_2 - r_1) \quad (59)$$

Avec

$$\sin \beta = \frac{r_2 - r_1}{e} \quad (60)$$

$$\cos \beta = \sin \frac{\alpha}{2} \quad (61)$$

$$L = 2 e \sin \frac{\alpha}{2} + 2\pi r_2 + \alpha(r_1 - r_2) \quad (62)$$

où α est l'angle d'enroulement en rd .

IV.4.2 Rapport de vitesse et vitesse linéaire de la courroie

L'entraînement s'effectuant au moyen d'un pignon moteur de diamètre primitif d_1 monté directement sur l'arbre moteur, la vitesse linéaire de la courroie est donnée par

$$V_c = \omega_m \frac{d_1}{2} \quad (63)$$

Le rapport de vitesse de la transmission est donné par

$$\frac{N_m}{N_r} = \frac{1}{1 - \varepsilon_g} \frac{d_2}{d_1} \quad (64)$$

ε_g : facteur de glissement

N_m : vitesse de rotation de la poulie motrice en tr/mn

N_r : vitesse de rotation de la poulie réceptrice en tr/mn

d_1 : diamètre de la poulie motrice en mm

d_2 : diamètre de la poulie réceptrice en mm

V_c : Vitesse linéaire de la courroie en m/s

IV.4.3 Puissance de calcul

La puissance de calcul P_c est exprimée en fonction de la puissance nominale P à transmettre

$$P_c = K_t P \quad (65)$$

avec K_t est le coefficient d'utilisation (voir tableau suivant) donné par

$$K_t = K_1 + K_2 + K_3 \quad (66)$$

K_1 : facteur d'application dépendant du type de machines motrice et réceptrice

K_2 : facteur dépendant du rapport de réduction

K_3 : facteur dépendant de la durée quotidienne de fonctionnement

P_c : puissance de calcul en W

P : puissance nominale en W

IV.4.4 Tensions dans les brins

L'équation du moment dynamique appliquée à la poulie motrice nous donne

$$C_m + (T_B - T_A)r_1 = 0 \quad (67)$$

De la même façon l'étude de la poulie réceptrice donne

$$C_r + (T_A - T_B)r_2 = 0 \quad (68)$$

où C_r est le couple de sortie au niveau de la poulie réceptrice

T_A et T_B sont les tensions dans les deux brins mou et tendu, respectivement, voir figure suivante.

La relation entre T_A et T_B est donnée par

$$T_A = T_B e^{f\alpha} \quad (69)$$

f : coefficient de frottement entre la courroie et la poulie

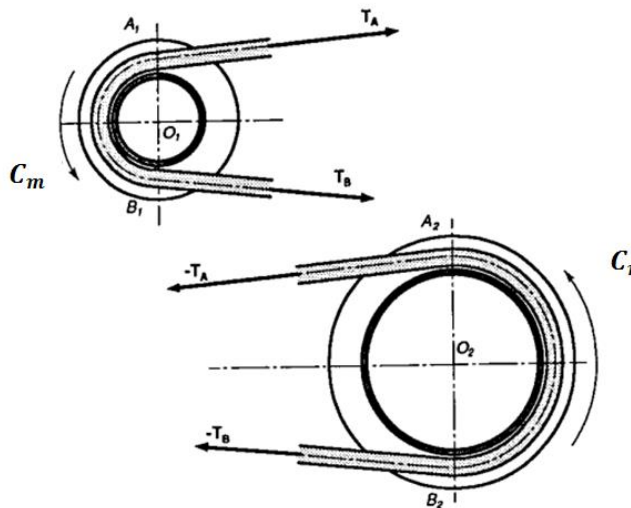


Figure IV.9 : tensions dans les brins

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

La tension effective T_e est donnée par :

$$T_e = \frac{30P_c}{r_1 \pi N_m} \quad (70)$$

La tension centrifuge unitaire T_c est donnée par :

$$T_c = \mu r_2 \frac{\pi N_r}{30} \quad (71)$$

Force centrifuge F_c

$$F_c = \mu V^2 \quad (72)$$

μ : masse linéique de la courroie en kg/m

IV.4.5 La largeur théorique minimale l de la courroie

$$l = \frac{K_d T_e}{T_{adm} - T_c} \quad (73)$$

où K_d coefficient correcteur en fonction du nombre de dents en prise, voir tableau 11

T_{adm}

Le nombre de dents en prise z_m est donné par

$$z_m = \frac{\theta}{360} z_d \quad (74)$$

$$\theta = 180 - \frac{57.3 (d_2 - d_1)}{e} \quad (75)$$

z_d : nombre de dents de la petite poulie

IV.4.6 Organigramme de détermination de la courroie :

L'organigramme ci-dessous précise le principe de cette détermination

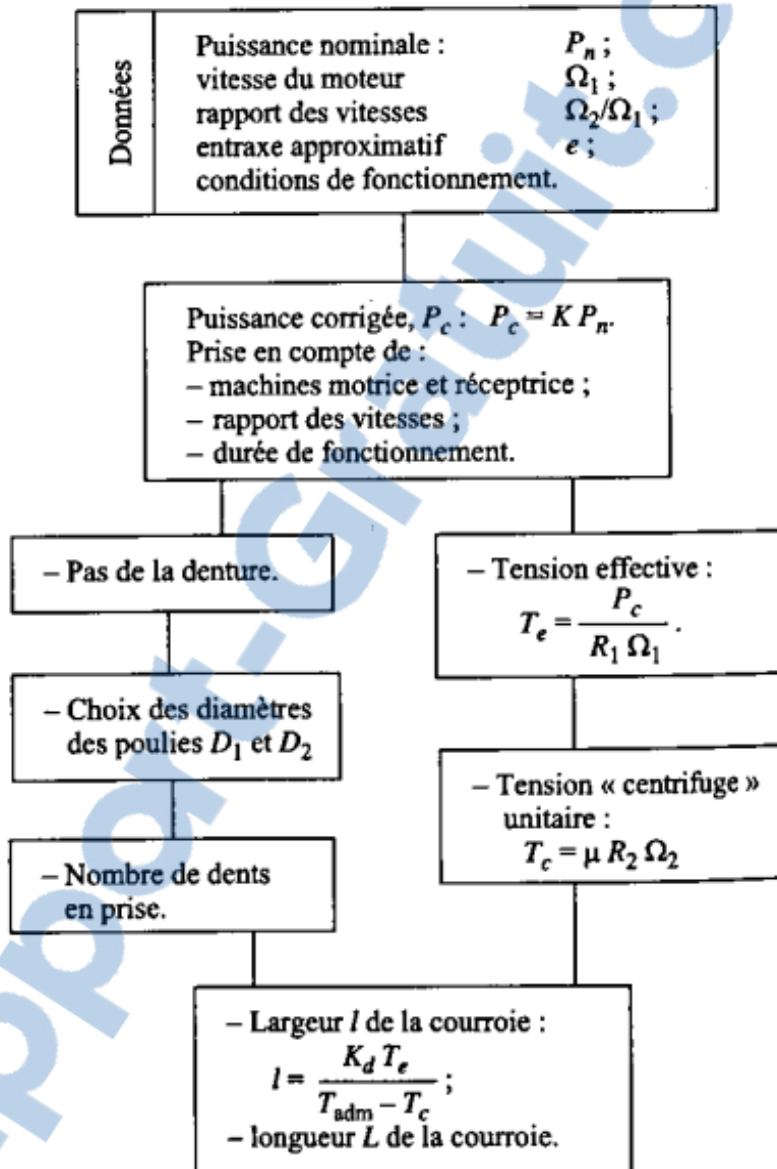


Figure IV.10 : Organigramme de détermination des courroies crantées

IV.5 Rapport de calcul :

Dans ce rapport de calcul tous les paramètres seront calculés on se basant sur les données des charges, les dimensions géométriques et les propriétés mécaniques des éléments.

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

Tableaux IV.3 Rapport de calcul

➤ Contrôle de la transmission vis /écrou :

Données et résultats :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Course de l'axe z	X_c	450	mm
Temps de la course	T_t	5	S
Vitesse maximale	v_{max}	0.1	m/s
Accélération maximale	a_{max}	0.2	m/s^2
Masse totale à déplacer	M_z	6	Kg
Pas de la vis	P	2	mm
Diamètre nominale de la vis	d	8	mm
Coefficient de frottement vis/écrou	μ	0.15	
Nombre de fillettes de la vis	N	4	
Angle de flancs	θ	14.5	Degré
Moment d'inertie du rotor	J_m	$4.4 * 10^{-5}$	Kgm^2
Moment d'inertie accouplement	J_{ac}	$1.7 * 10^{-6}$	Kgm^2
Moment d'inertie de la vis	J_{vis}	$1.256 * 10^{-6}$	Kgm^2
Longueur de l'écrou	b	10	mm
Matériaux de la vis	Acier inoxydable		
limite élastique de la vis	Re	370	Mpa
Pression admissible vis /écrou	P_b	3	Mpa
Coefficient de flambage	ξ	10.2	
Coefficient de la vitesse critique	ϵ	12.1	
Largeur de flambage	L_L	450	
Moteur Nema 23	Pas complet		
Couple moteur	C_m	1.9	N.m
Nbr de pas/tour	P	200	
Pas en degré		1.8	Degré
Temps d'accélération décélération	T_a	0.5	S
Temps de vitesse constante	T_p	4	S
Accélération minimale	a_{min}	0.022	m/s^2
Fonction n moteur en micro pas :1/16			
Pas		0.1125	Degré
Nbr de pas/tour		3200	
Poids total à déplacer	P	58.86	N
Diamètre sur flanc de lavis	d_2	7	mm
Pas hélicoïdale	P	8	mm
Angle d'hélice	A	19.991	Degré
Angle de profil	Θ_n	13.66	Degré
Couple pour lever la charge	c_r	0.133	Nm
Couple pour lever la charge sans frottement	c_o	0.075	Nm
Rendement de la vis	η	66.3%	
Moment d'inertie total	J_t	$2.956 * 10^{-6}$	Kgm^2

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

Rapport de réduction	R	1	
Coefficient de transmission	K	1.27	
Couple démarrage	C_{ma}	0.009	Nm
Puissance du démarrage	P_a	0.122	W
Puissance a vitesse constant	p_p	8.882	W
Puissance totale	P_t	9.04	W
Couple vitesse constant	C_p	0.122	Nm
Couple crête	C_{max}	0.122	Nm
Rapport d'inertie	R	0.292	
Contrainte normale	σ	2.082	Mpa
Contrainte tangentielle	T	2.877	Mpa
Contrainte de Von-misses	σ_v	5.4	Mpa
Coefficient de sécurité	α_s	68	
Nombre de filets porteur	Z_u	4	
Coefficient a_p	a_p	$5 \cdot 10^{-4}$	m
Pression vis/écrou	P_G	1.338	Mpa
Force admissible de flambage	F_{adm}	1031	N
Vitesse critique de la vis	N_c	4780	tr/mn
Vitesse angulaire de la vis	ω	78.54	rd/s
Vitesse de rotation de la vis	N	750	tr/mn

➤ Calcul courroie crantée type GT3 3mm POWER-GRIP-HTD :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Pas de la courroie	T	3	mm
Poids par longueur	WL	0.0015	Kg/mm/m
Nombre de dents de la courroie	Zb	642	
Longueur	L	1932.01	mm
Puissance nominale	P	0.01	Kw
Facteur de service	F1	1	
puissance de service	P_{max}	0.01	Kw
Entrée roue 1			
Rapport de transmission	I	1	
Entraxe	a	942	mm
Vitesse de rotation	n	229	tr/min
Nombre de dents	z	40	
Enroulement	α	180	(degré)
Couple de service	$T \cdot f_1$	0.63	N.m
Vitesse de la courroie	V	0.6	m/s
Effort tangentiel à	F_u	81.88	N

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

partir du couple			
Force centrifuge	F_f	0	N
Nombre de dents en contact	Z_e	20	
Facteur de correction pour nombre de dents en contact	f_{ze}	1	
Facteur de longueur	f_L	1.2	
Facteur pour largeur de courroie	f_b	0.87	
Largeur de courroie théorique	B_{th}	5.19	mm
Largeur de courroie effective	B_{eff}	9	mm
Longueur de courroie théorique	L_{th}	5.19	mm
Longueur de courroie effective	L_{eff}	9	mm

➤ Contrôle de la transmission poulie /courroie :

Données cahier des charges :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Course de l'axe X	X_c	700	mm
Temps de la course	T_t	1.3	S
Vitesse maximale	V_{max}	0.6	m/ s
Accélération maximale	a_{max}	5	m/ s ²
Temps accélération	T_a	0.133	S
Temps	T_p	1.033	S
Accélération minimale	a_{min}	0.514	m/ s ²
Rayon de la poulie	R_p	0.024	M
Moment d'inertie du rotor	J_m	$4.4 \cdot 10^{-5}$	kg.m ²
Moment d'inertie du réducteur	J_r	0	kg.m ²
Moment d'inertie du système de transformation	J_t	$4.348 \cdot 10^{-5}$	Kg.m ²
La masse à déplacer	M	5	Kg
Rapport de réduction	r	1	
Coefficient de transmission	K	0.024	

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

Rendement globale de la transmission	η	0.8	
Force de frottement + force sur charge	F	2	N
Couple d'accélération	C _{ma}	0.551	N.m
Puissance d'accélération	P _a	13.5	W
Couple a vitesse cts	C _p	0.063	N.m
Puissance a vitesse cts	P _p	1.5	W
Couple crête	C _{max}	0.613	N.m
Puissance total	P _t	15	W
Rapport d'inertie	r _i	65.086	

IV.5.1 Interprétation des résultats

a) dimensionnement du moteur de l'axe X :

Nous avons sélectionné le même moteur Nema 23 pour les 3 axes, par conséquent les calculs seront faits que pour l'axe X, le plus sollicité.

Le couple moteur calculé nécessaire pour déplacer la charge est de 0.613Nm, le moteur choisi dans ce cas est le Nema 23 de couple développé est de 1.9 Nm.

b) vérification à la statique de la vis :

le coefficient de sécurité $\alpha_s = 68$ donc la vis résiste au charge extérieur

c) vérification à la pression vis écrou

On voit que PG est de 1.338 Mpa inférieure à la pression admissible $P_b = 3\text{Mpa}$ d'où vérification au flambage de la vis

La force admissible au flambage $F_{adm} = 1031\text{ N}$, alors que la charge appliquée ne dépasse pas F_{adm} donc il y'a aucun risque de flambage

e) vitesse de rotation critique de la vis

La vitesse de rotation critique de la vis est de 4780 tr/mn, cette vitesse ne sera jamais atteinte

f) largeur minimale de la courroie

La largeur minimale de la courroie nécessaire à la transmission des efforts est de 5.19mm

La longueur de la courroie crantée que nous avons utilisée est de 9mm, donc le choix est validé.

IV.6 Étude statique du support :

Le rapport du robot est soumis à la charge à déplacer, aux efforts d'inertie provoqués par les accélérations et les décélérations en phase d'accélération et de décélération

Le calcul statique permet de déterminer la rigidité du support en vue de valider la précision du robot et les contraintes appliquées.

Le calcul statique se fait par la méthode des éléments finis en utilisant solidworks.

L'équation de la statique à résoudre est :

$$[K]\{q\} = \{F\}$$

Où $[K]$ est la matrice de rigidité, $\{q\}$ est le vecteur de déplacement et $\{F\}$ est le vecteur charge extérieur.

IV.6.1 Paramètres de l'étude

a) Maillage :

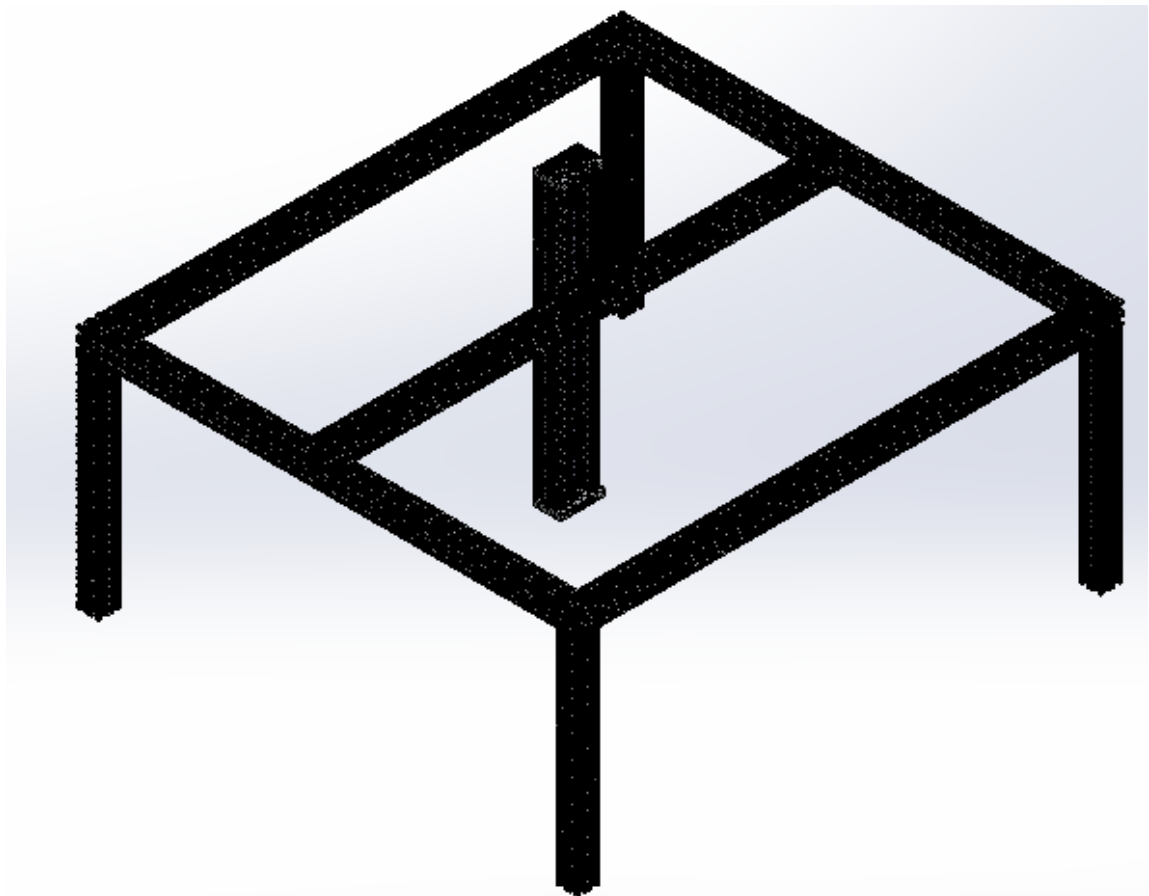
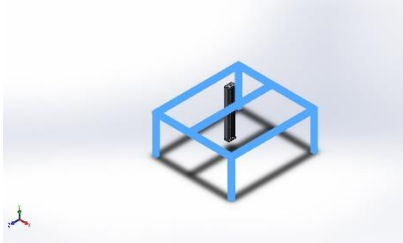
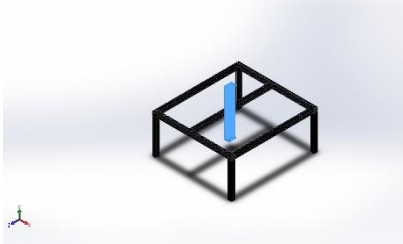
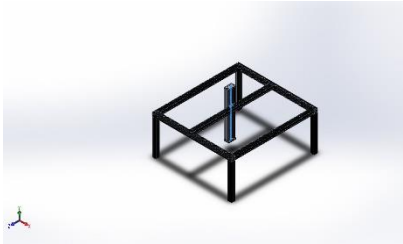


Figure IV.11 : Maillage.

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

b) Propriété de matériaux :

Référence du modèle	Propriétés
	<p>Nom: 6063-T5</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Inconnu</p> <p>Limite d'élasticité: $1.45e+008 \text{ N/m}^2$</p> <p>Limite de traction: $1.85e+008 \text{ N/m}^2$</p> <p>Module d'élasticité: $6.9e+010 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de Poisson: 0.33</p> <p>Masse volumique: 2700 kg/m^3</p> <p>Module de cisaillement: $2.58e+010 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: $2.3e-005 / \text{Kelvin}$</p>
	<p>Nom: 6063-T5</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max.</p> <p>Limite d'élasticité: $1.45e+008 \text{ N/m}^2$</p> <p>Limite de traction: $1.85e+008 \text{ N/m}^2$</p> <p>Module d'élasticité: $6.9e+010 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de Poisson: 0.33</p> <p>Masse volumique: 2700 kg/m^3</p> <p>Module de cisaillement: $2.58e+010 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: $2.34e-005 / \text{Kelvin}$</p>
	<p>Nom: 201 Acier inoxydable recuit (SS)</p> <p>Type de modèle: Linéaire élastique isotropique</p> <p>Critère de ruine par défaut: Contrainte de von Mises max.</p> <p>Limite d'élasticité: $2.92e+008 \text{ N/m}^2$</p> <p>Limite de traction: $6.85e+008 \text{ N/m}^2$</p> <p>Module d'élasticité: $2.07e+011 \text{ N/m}^2$</p> <p>Coefficient de Poisson: 0.27</p> <p>Masse volumique: 7860 kg/m^3</p> <p>Coefficient de dilatation thermique: $1.7e-005 / \text{Kelvin}$</p>

a) Actions extérieurs :

Le chargement extérieur est donné par la figure suivante

Chapitre IV : Validation des solutions technologique retenues

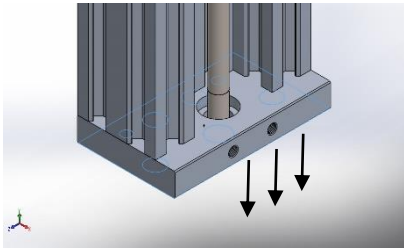
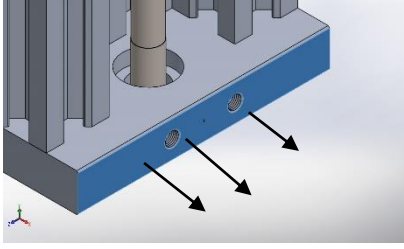
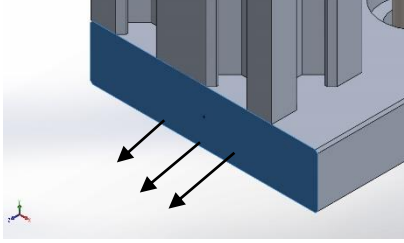
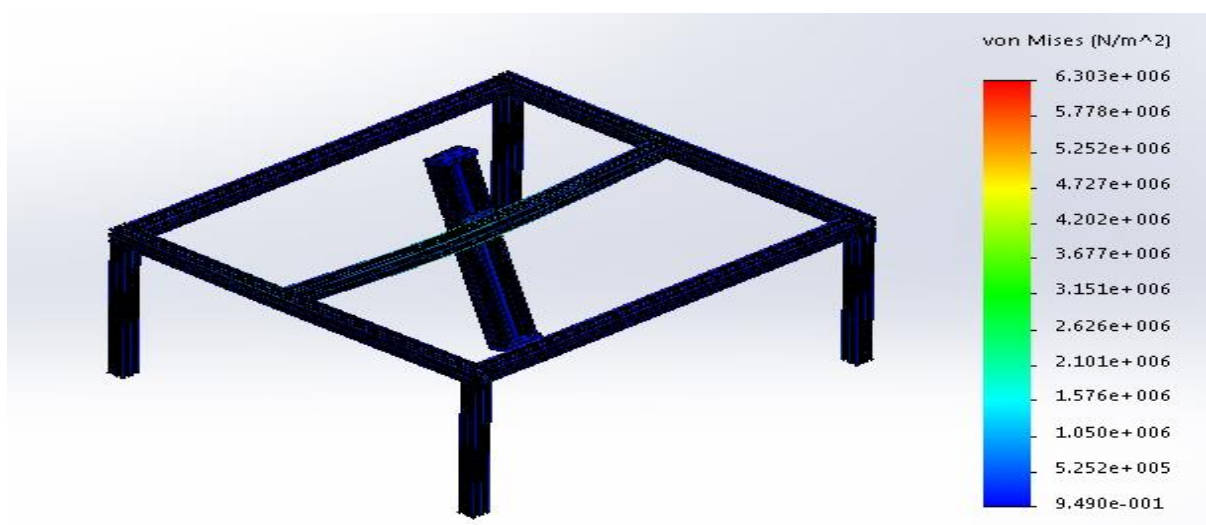
Nom du chargement	Image du chargement	Détails du chargement
Force-1		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: -30 N
Force-2		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: -13.5 N
Force-3		Entités: 1 face(s) Type: Force normale Valeur: 13.5 N

Figure IV.12 : chargement extérieure

IV.6.1 Résultats de l'étude :

Les contraintes de Von-Mises sont données par la figure suivante



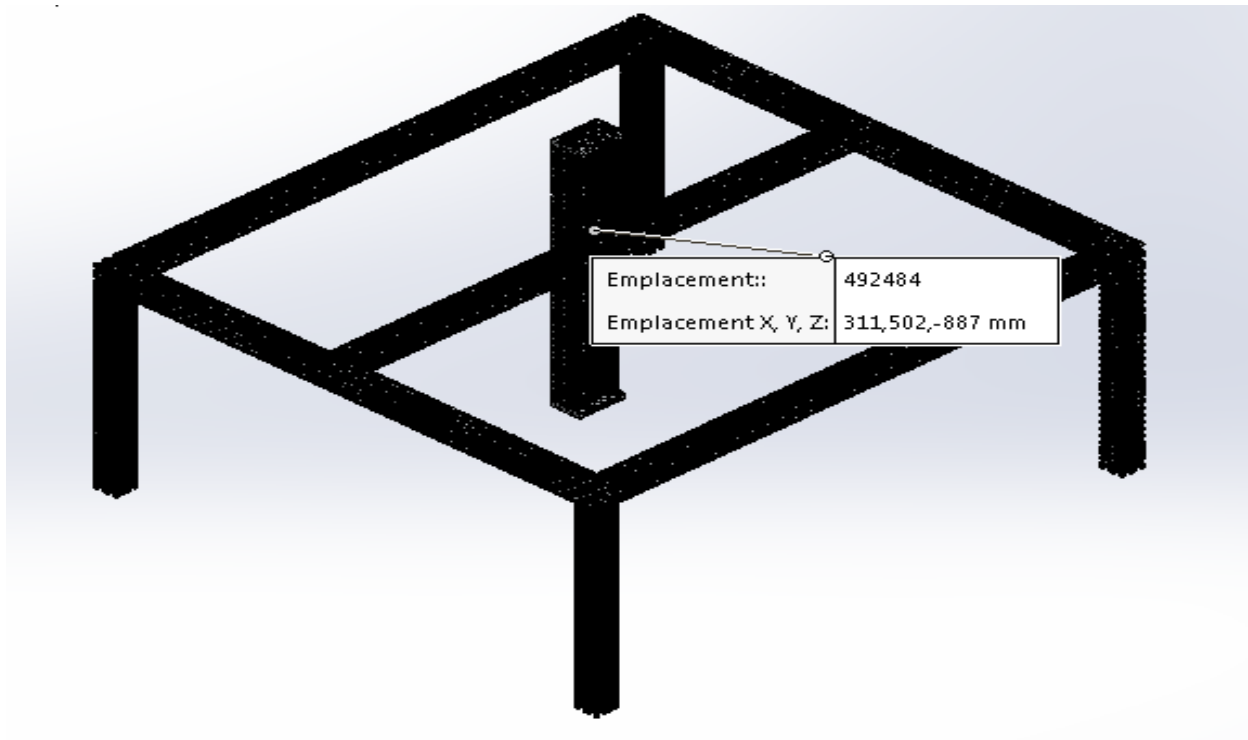
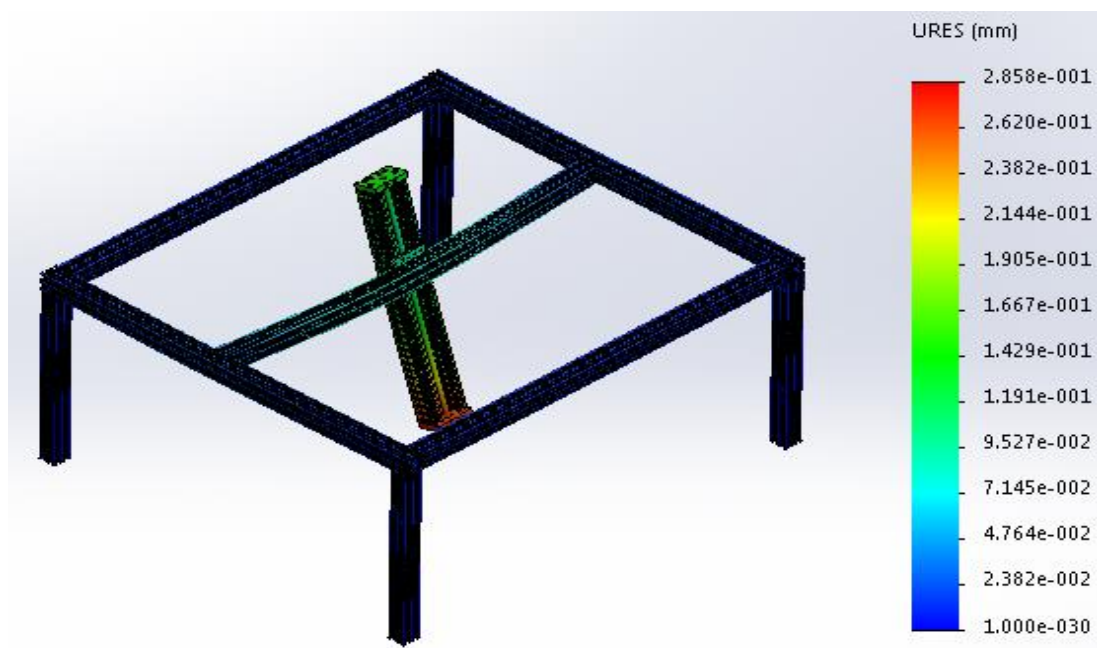


Figure IV.13 : contrainte maximale de Von Mises

On remarque que l'axe Z est le plus sollicité dont la contrainte maximale est de $6.303 \cdot 10^6$ N/m² cette contrainte maximale est largement inférieure à la limite élastique du matériau constituant le portique qui est de $1.45 \cdot 10^8$ N/m², donc le support résiste bien aux charges extérieurs.

Les déplacements du support sont donnés par la figure suivante :



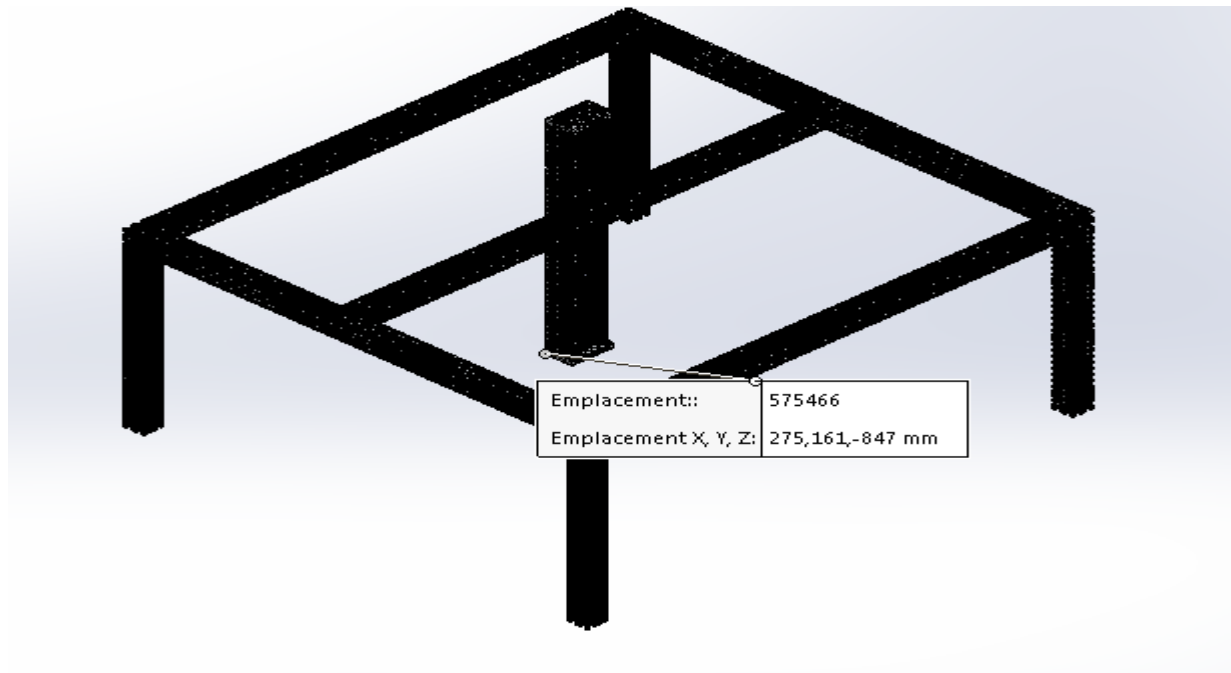


Figure IV.14 : Déplacement maximal du portique

Le calcul de déplacement permet de valider la rigidité du support, on constate que le déplacement maximal est au niveau de la zone de fixation du préhenseur. Ces déplacements peuvent affecter la précision du robot. Dans notre cas le déplacement maximal est de 0.2858 mm, cette valeur est tout à fait acceptable si on considère que la précision retenue par le cahier de charge est de ± 0.5 mm

IV.7 commande :

a) Carte d'interface arduino UNO

La commande du système se fait par une carte arduino uno qui est basée sur un ATmega328 cadencé à 16 MHz. C'est la plus récente. Elle peut se programmer avec le logiciel Arduino. Le contrôleur ATmega328 contient un boot loader qui permet de modifier le programme sans passer par un programmeur. Le logiciel est téléchargeable gratuitement.

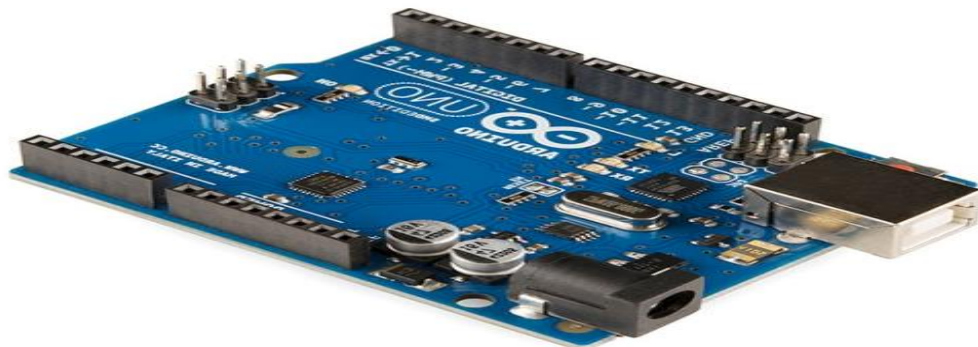


Figure IV.15 arduino UNO

b) driver

Trois drivers de type Tb 6560 sont utilisées pour manipuler librement les moteurs. La Tension de fonctionnement entre 10V et 35V et la puissance évaluée 3A. Très facile à utiliser.



Figure IV.16 driver TB6560

c) Préhenseur

On peut adapter à notre système plusieurs types de préhenseur : préhenseur pneumatique, préhenseur électrique parallèle, préhenseur électrique magnétiques, préhenseur hydraulique. Pour notre système nous avons choisi le préhenseur est un préhenseur électromagnétique alimenté par une tension de 12V, leur capacité de levage peut aller jusqu'à 5Kg.



Figure 3.17 électro-aimant

d) circuit de commande :

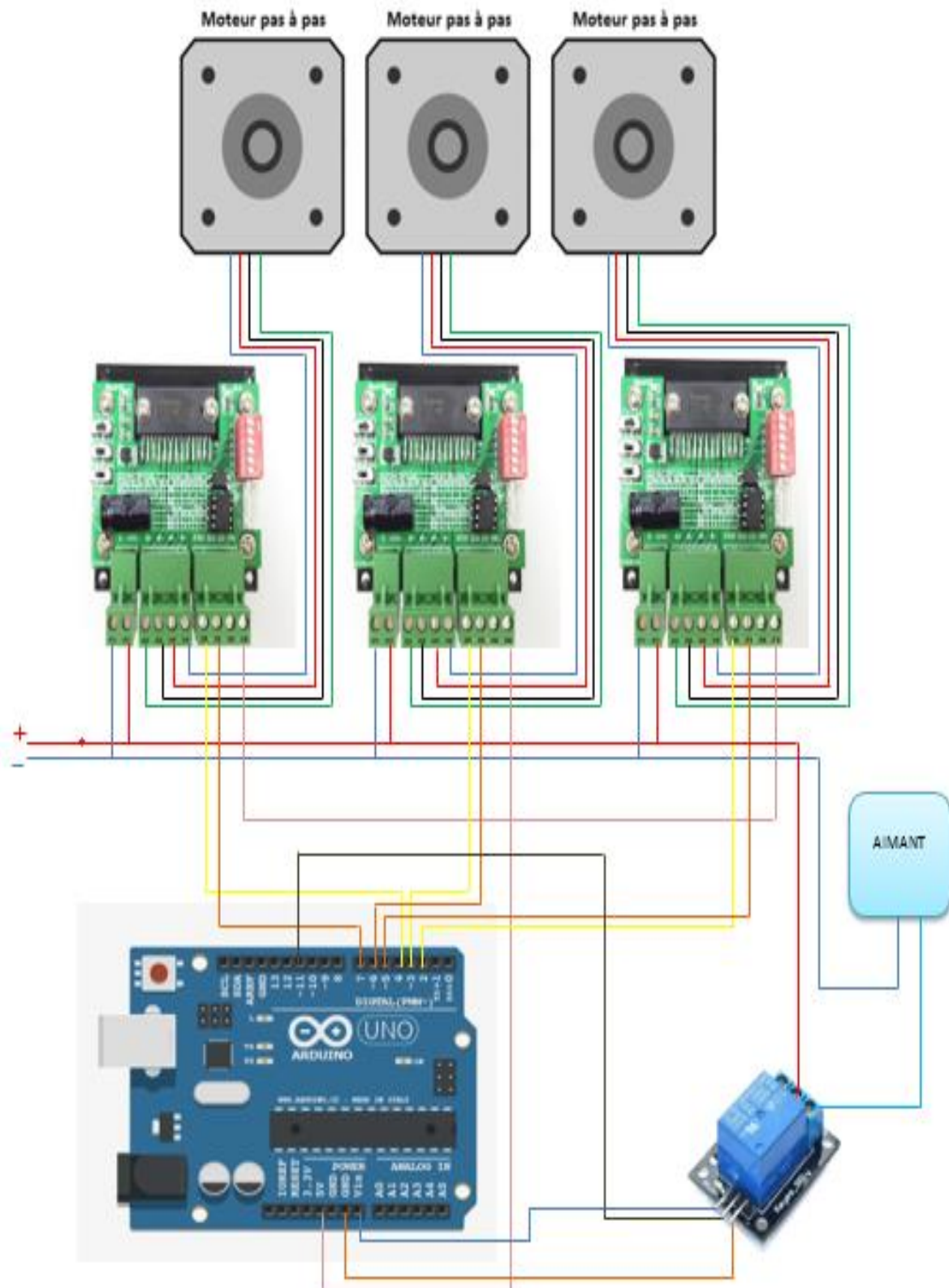


Figure IV.18 : schéma du circuit de commande

CHAPITRE V :

RÉALISATION DU ROBOT CARTÉSIEN 3 AXES

Chapitre V :Réalisation du robot cartésien 3 axes

V.1 Assemblage des sous-système :

V.1.1Assemblage du portique :

Le portique est assemblé par deux types de pièce dans les quatre cotées voir la figure



Figure V.1 : Assemblage du portique

V.1.2 assemblage de l'axe Z :

L'axe Z est composé d'un système vice –écrou de type trapezoidale qui est fixé avec une plaque de quatre roues sur le profil C et deux plaque avec roulement a bille sur l'extrémité du profil C .

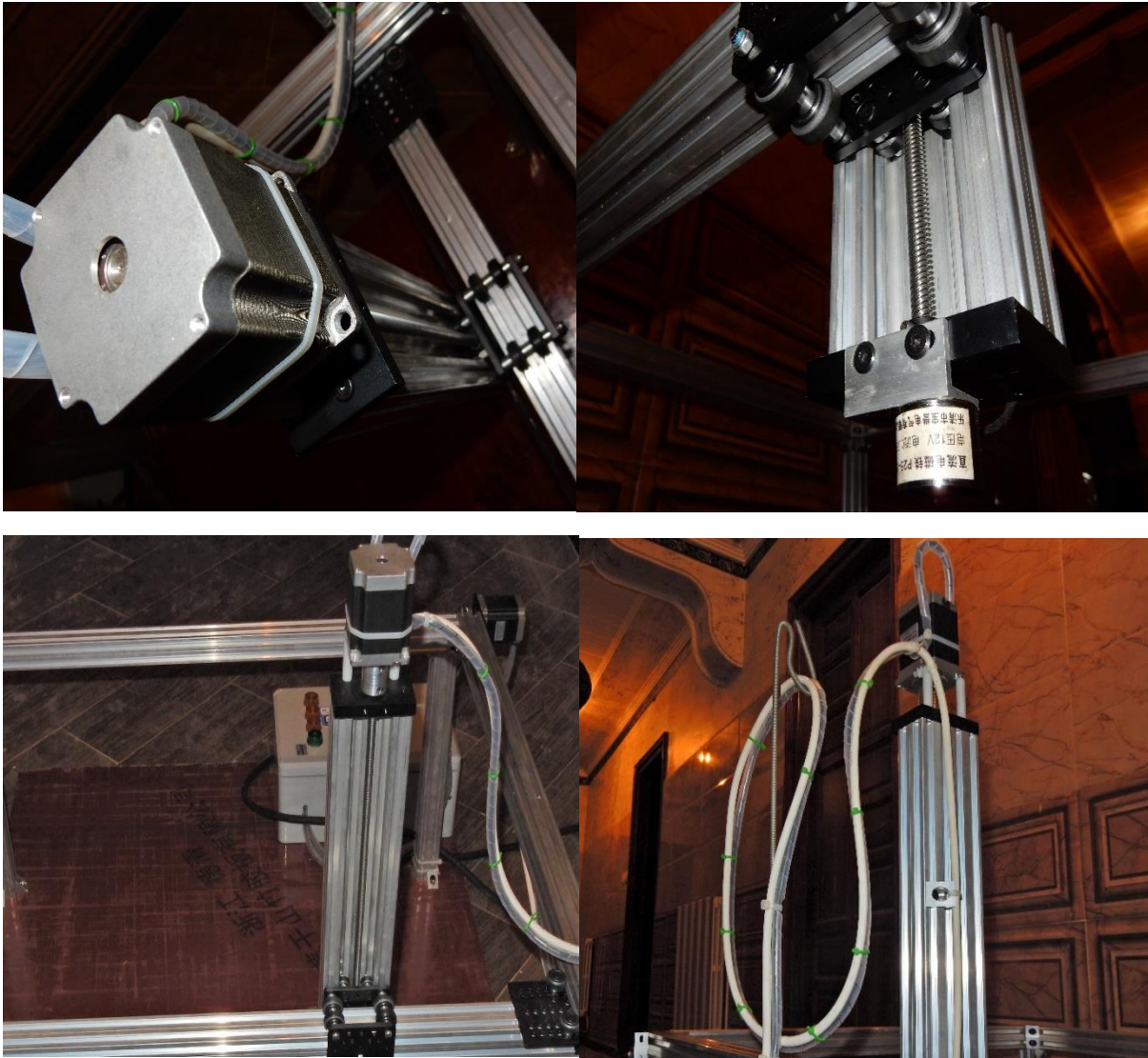


Figure V.2 : assemblage de l'axe Z

V.1.3 assemblage de l'axe Y :

L'axe Y est l'intermédiaire entre les deux axes X et Z. L'assemblage est assuré par des plaques avec roues comme indique les figures suivantes :



Figure V.3 : assemblage de l'axe Y

Chapitre V :Réalisation du robot cartésien 3 axes

V.1.4 assemblage de l'axe X :

L'assemblage de l'axe X est assuré par deux plaques qui portent quatre roues à chaque côté. Les quatre roues roulent sur le long du profil du portique. voir figure

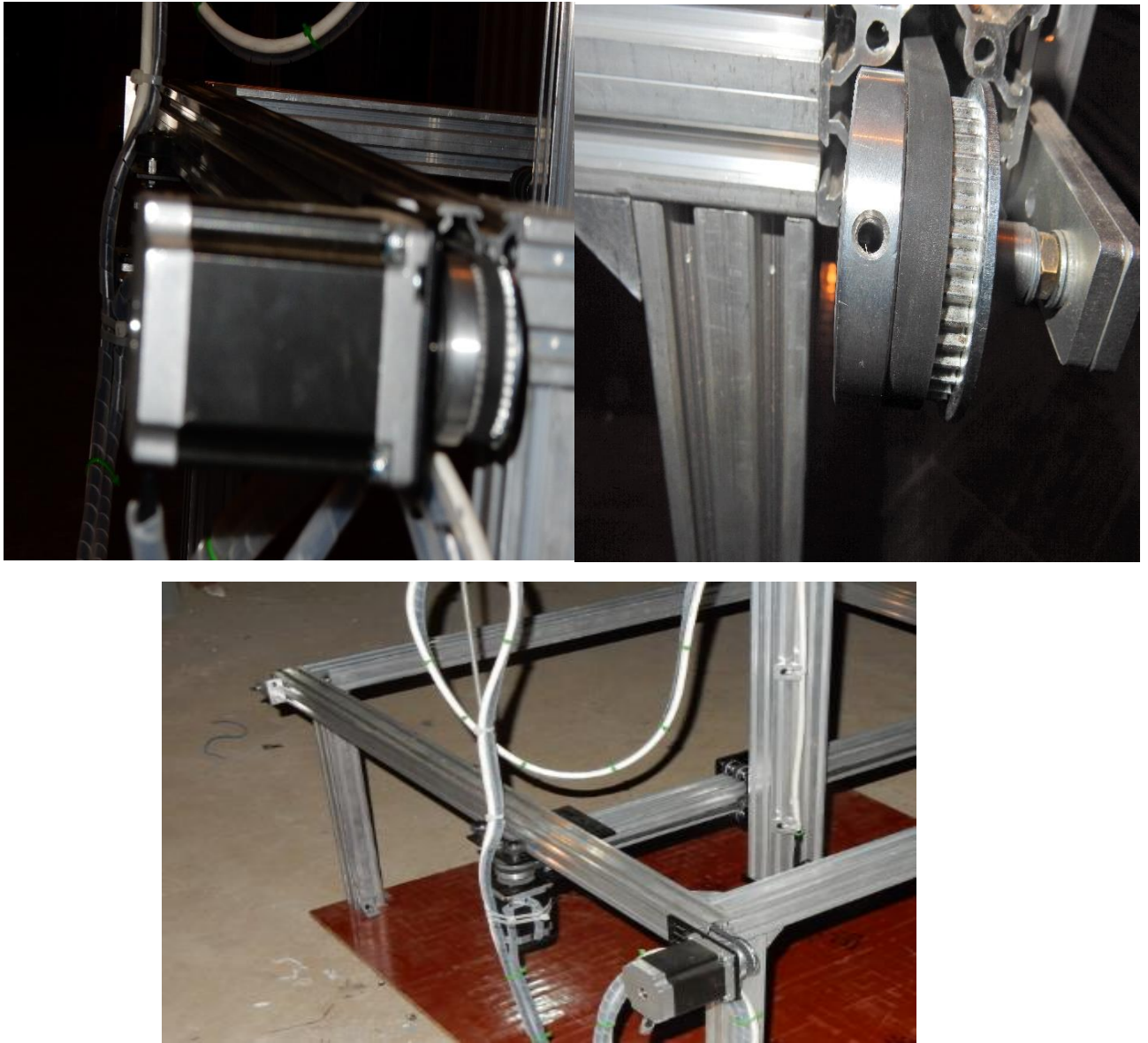


Figure V.4 : assemblage de l'axe X

V.1.5 commande (alimentation, driver, arduino)



Figure V.5 : composantes électrique du système

V.2 Assemblage du système :

Le système est composé de trois axes (X, Y et Z), portique et un préhenseur.

L'axe X est assemblé par des plaque à quatre roue sur le profil du portique

L'axe Y est assemblé avec l'axe X par les roues et avec l'axe Z par les roues et la vis trapézoïdale.

Le préhenseur est assemblé avec une vis à l'extrémité de l'axe Z

Donc l'assemblage du système est donné par la figure suivant :





Figure V.6 : Assemblage du système

Conclusion générale

L'élaboration de travail dans le cadre du projet de fin d'étude, nous a permis d'approfondir nos connaissances en électronique (commande), mécanique et d'acquérir une bonne expérience au niveau de la réalisation pratique

Dans la première partie nous avons d'abord entamé la première étape qui est basée sur l'étude de marché (cahier des charges)

Dans la deuxième partie nous avons d'abord entamé l'étude statique et cinématique, en suite la partie commande qui contient les moteurs, les drivers, la carte d'interface, relais, etc.

Dans la troisième partie on a fait l'assemblage du système avec les différentes techniques d'assemblage

Finalement, notre travail nous a permis la réalisation pratique et le test des différents composants du système.

ANNEXE

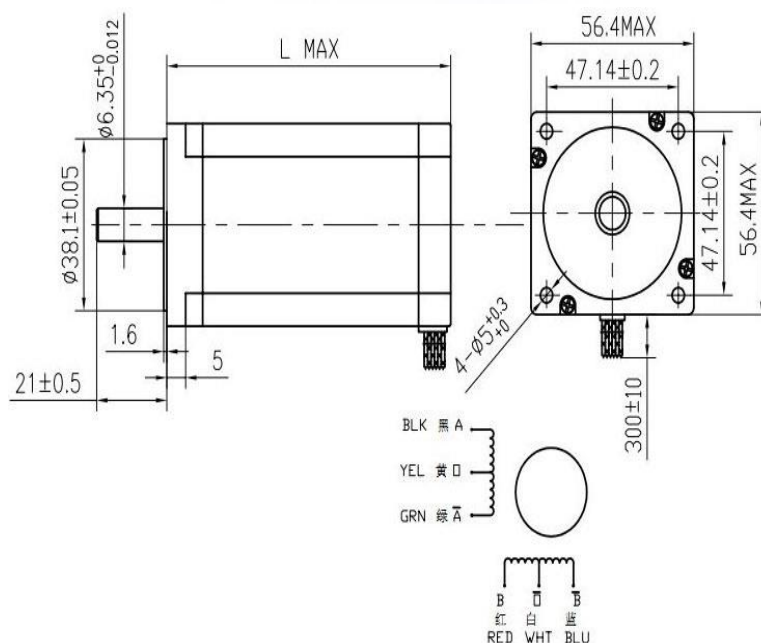
Annexe -A- : Moteur pas à pas nema 23

A.1 Description :

Moteur pas à pas par Wantai avec étape 1.8 deg, idéal pour les imprimantes et autres applications CNC. Il a un couple suffisant (4500g.cm) pour une utilisation dans les axes de déplacement mais également dans les extrudeuses qui requièrent souplesse et stabilité.

A.2 Les caractéristiques de moteur pas à pas nema 23 :

- Pas : 1.8 °
- Longueur du moteur 76mm
- Diamètre de l'arbre 6.35mm
- Profil d'arbre rond
- Tension nominale 3V
- Courant nominal 3A
- Résistance de phase 1Ω
- Couple de maintien 19 Kg.cm
- Fils 4
- Poids du moteur 1030g
- La référence : 57bygh633b
- Le prix : 6 300,00 DA



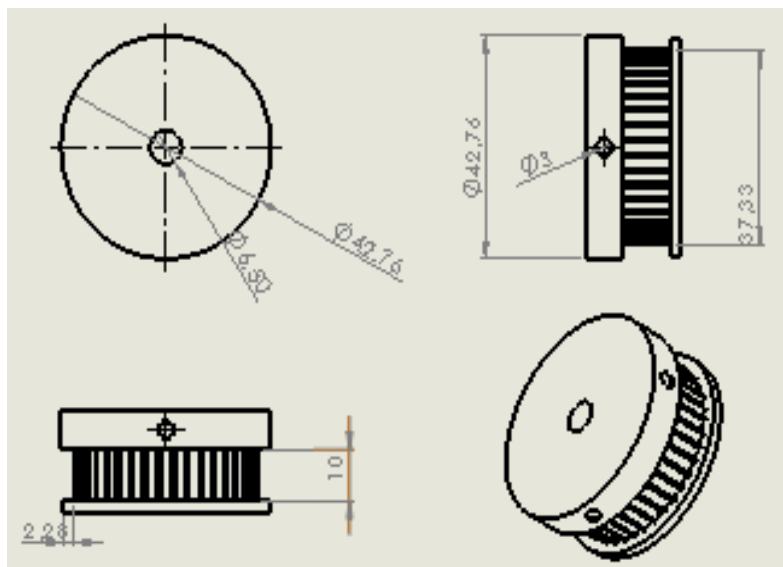
Annexe-B- : Les Poulies

B.1 Description :

Il s'agit d'un pignon en aluminium de haute qualité pour courroie, parfaite pour vos projets d'automation, conçu spécialement pour une haute puissance.

Il possède une dent plus agressive pour être utilisée dans des applications avec un couple important. Cette poulie a un diamètre intérieur de 8mm pour vis sans fin ou came.

- GT3 (GT2 3mm)
- 40 dents
- Aluminium
- Supporte des courroies jusqu'à 9mm (0.354") de largeur
- Pour axe de 8mm
- Avec 2 rebords
- Longueur totale : 20.65mm (0.813")
- Diamètre extérieur de 37.4mm
- La Masse = 61.76 g
- Le prix : 1 500,00 DA



Annexe-C- : Courroie de distribution GT3

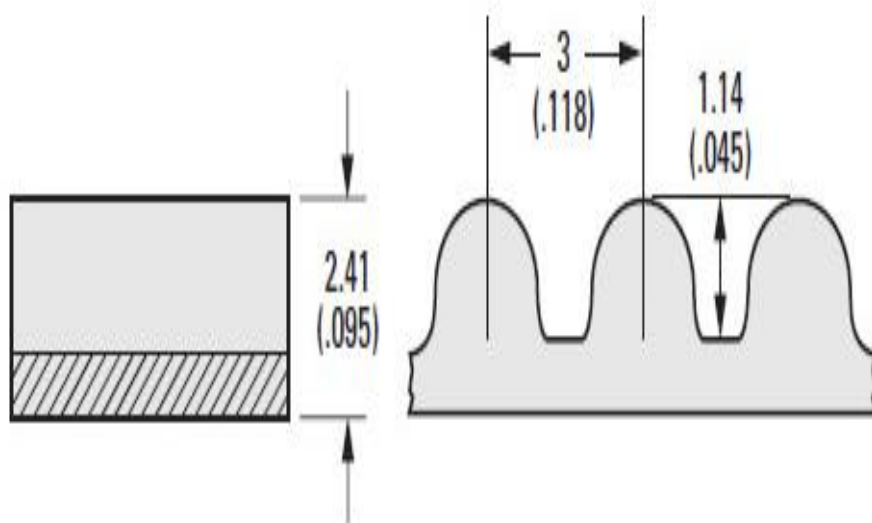


C.1 Description :

Cette GT3 ou GT2 (3mm) courroie de distribution est composé de néoprène et a en fibre de verre cordons pour la force .il est idéal pour vos projets d'automatisation.

Les dents de cette ceinture sont plus comme un système de rach. La ceinture est plus épais que MXL standard ou GT2 (2mm) et est idéal pour une utilisation avec Nema 23 moteurs de taille ou l'engagement de la dent profonde est une nécessité.

Le prix : 800,00 DA



Annexe-D- : Accouplement

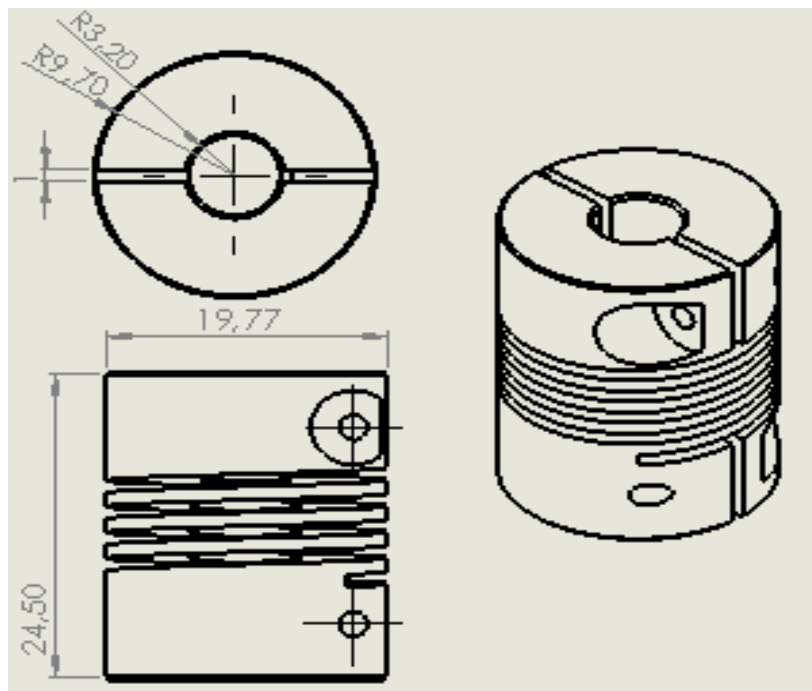


D.1 Description :

Connectez-le à cela avec un coupleur à vis sans fin. Ces coupleurs sont en aluminium usiné et présentent une coupe en spirale qui les rend légèrement flexibles, ce qui permet de les adapter à deux arbres, même s'ils ne sont pas parfaitement colinéaires, et de réduire les effets de liaison. La façon dont ils sont coupés, ils sont un peu élastiques dans l'axe linéaire X Y et Z mais pas dans l'axe de rotation. Cela signifie que vous n'obtiendrez pas de jeu excessif - ils sont donc adaptés au travail CNC de précision.

Masse = 13.78g

Le prix : 700,00 DA



Annexe-E- : Les profils d'aluminium

E.1 Rail de guidage linéaire v-slot 40*40 :

E.1.1 Description :

V-Slot 40x40 est un profil basé sur le populaire système de guidage linéaire V-Slot. Un profil carré donne plus de force et de fonctionnalité.

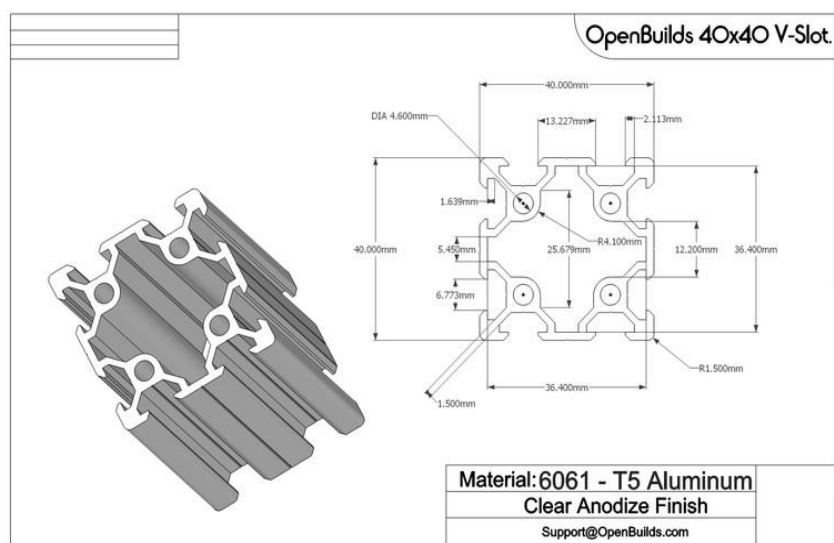
Depuis 40x40 est un produit de la ligne V-Slot, toutes les pièces standard V-Slot et accessoires sont compatibles ! Bien sûr, comme V-Slot, chaque côté de V-Slot 40x40 peut être utilisé un guide linéaire.

Des supports pour des machines ainsi que des meubles fonctionnels aux possibilités illimitées V-Slot 40x40 est extrêmement modulaire ce qui permet des possibilités de montage pratiquement illimitées et des configurations de construction.

V-Slot 40x40 est fait avec 6061 T-5 Aluminium et il a une belle, brillante, super lisse, finition claire.

La finition est beaucoup plus brillante que les profils standard, Le rail linéaire V-Slot 40x40 est considéré comme un profil de 40 mm x 40 mm compatible avec toutes les pièces et accessoires à rainures en V.

Le prix : 1 800,00 DA (par mètre)



E.2 Rail de guidage linéaire v-slot C-Beam :

E.2.1 Description :

*C-Beam est un profil basé sur le système de guidage linéaire populaire V-Slot. Il incorpore un profil de forme de C qui donne la force et la fonctionnalité supplémentaires.

*Comme C-Beam est un produit de la gamme V-Slot, toutes les pièces et accessoires V-Slot standard sont compatibles ! Bien sûr, comme V-Slot, chaque côté de C-Beam peut être utilisé un guide linéaire.

*Vous pouvez ajouter plusieurs plaques pour plus de précision et de force.

*Vous pouvez utiliser l'une des plaques à portique V-Slot avec C-Beam.

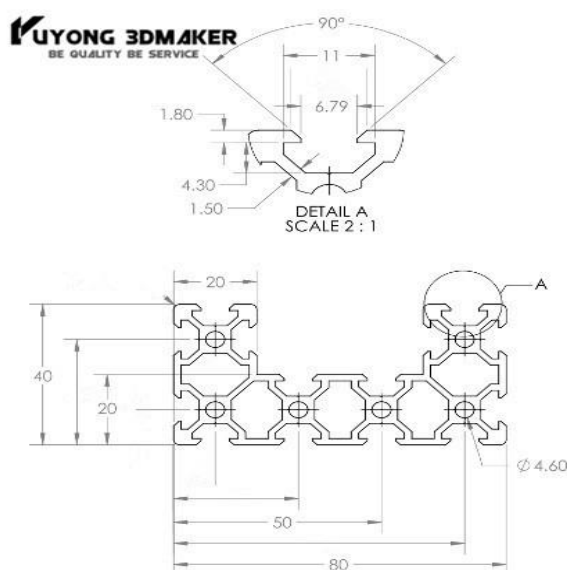
* Vous pouvez même imprimer en 3D vos propres pièces pour produire des créations personnalisées.

* C-Beam est extrêmement modulaire ce qui permet des possibilités de montage pratiquement illimitées et des configurations de construction.

Le C-Beam est fait d'aluminium 6063 T-5 et il a une belle, brillante, super lisse, finition claire. La finition est beaucoup plus brillante que les profils standard,

Le rail linéaire C-Beam est considéré comme un profil de 40 mm x 80 mm compatible avec toutes les pièces et accessoires à rainures en V.

Le prix : 3 200,00 DA



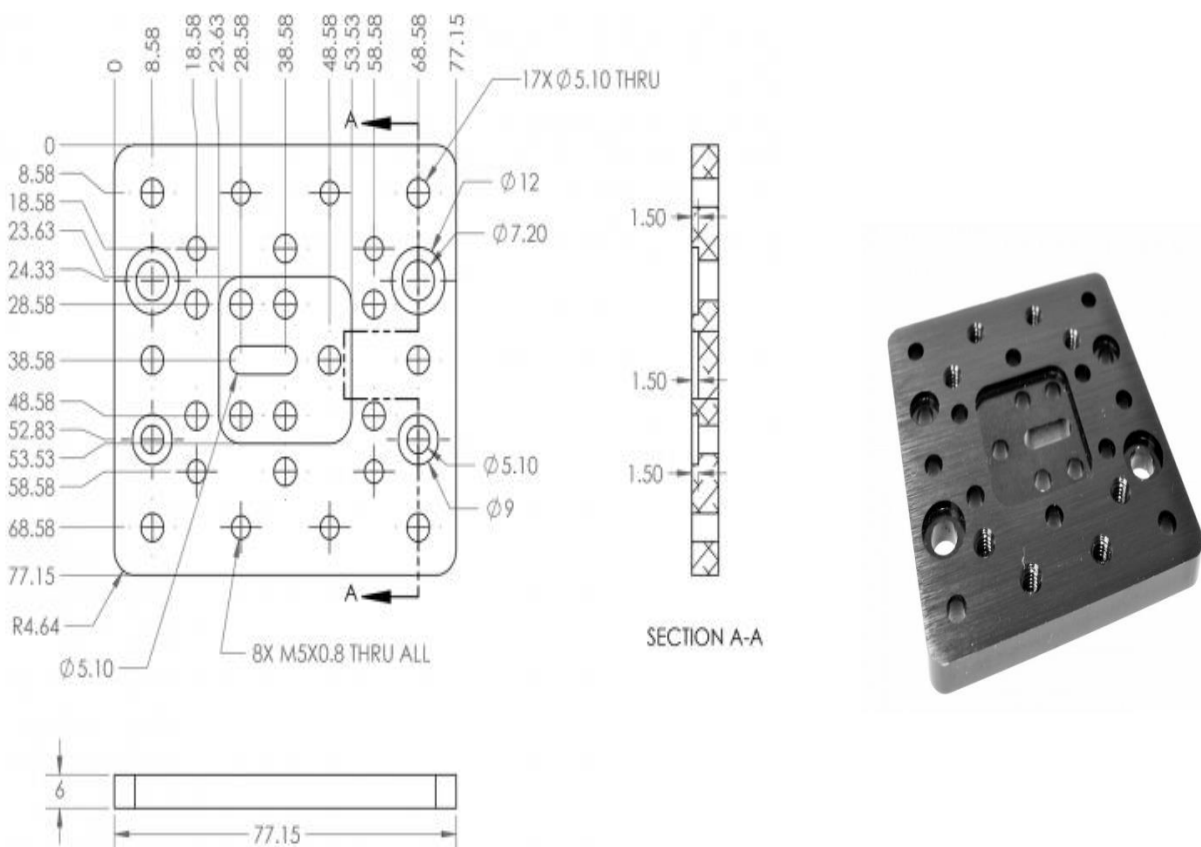
Annexe-F- : Les Plaques

F.1 c-beam plaque de portique :

F.1.1 Description :

Une plaque de portique conçu spécifiquement pour donner un aspect propre et compact tout en mesure de rouler à l'intérieur du Linéaire Rail System C-Beam

- Une forte aluminium épais 6061 plaque T5 6mm
- Brillant anodisé noir pour un aspect fini
- Poches vis encastrées assurent un montage affleurant
- Comprend des trous pré-taraudés de montage pour C-Beam Riser Plaques
- Montage au trou central réglable permet des configurations d'actionneurs de ceinture
- La masse = 81.87 g
- Le prix : 2 000,00 DA

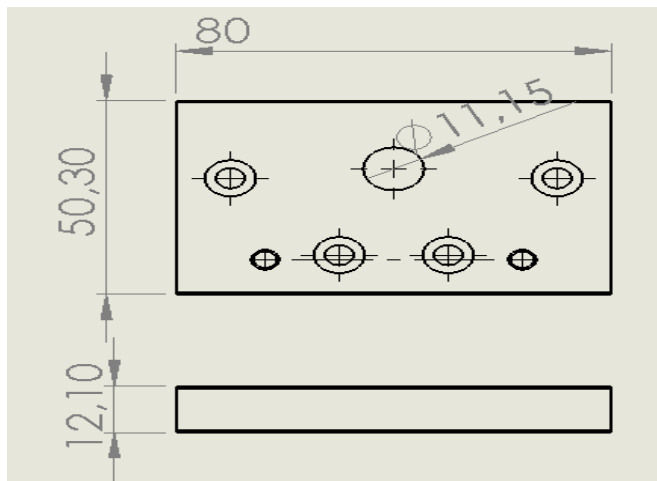


F.2 C-Beam Plaque de montage :

F.2.1 Description :

Les plaques de montage de C-Beam sont des plaques d'aluminium de haute qualité avec de multiples robinets et encastrement pour assurer un montage facile de l'actionneur linéaire C-Beam.

- A 12mm aluminium épais 6061 plaque T5 forte
- Brillant anodisé noir pour un aspect fini
- Poches vis encastrées assurent un montage affleurant
- Comprend pré-trous taraudés de montage pour facilement monter un Nema 23
- Poche de palier encastré assure un ajustement stable vis sans roulement
- Utilisation en conjonction avec Low Profile Vis M5 * 20mm (vendu séparément)
- La masse : 121.19 g
- Le prix : 1 400 ,00 DA



F.3 V-slot plaques universelle :

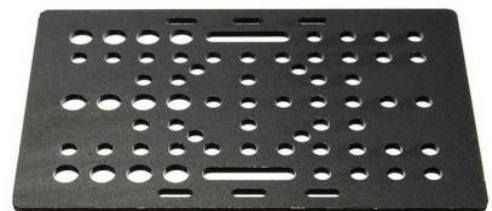
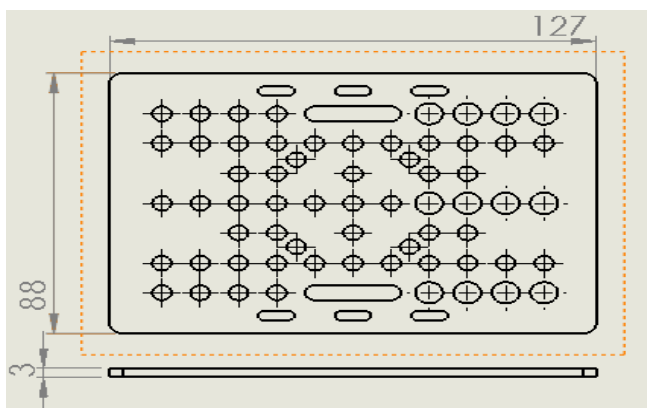
F.3.1 Description :

- Universal (20mm - 80mm) - Cette plaque a été conçue pour s'adapter sur toutes les tailles V-Slot standard. Il est une grande plaque à avoir et à utiliser sur vos constructions!
- 20mm - Cette plaque a été conçue pour être utilisée quand, une plaque plus légère plus petite est souhaitée sur le côté 20mm de V-Slot. Cette plaque est grande lorsque les roues complètes de taille sont préférés avec une empreinte plus petite nécessaire.

Nous voulons nous assurer que nous simplifions serrage de ceinture de sorte que nous avons incorporated Slots 'Fold-Through »pour vous permettre de plier facilement les dents de la courroie de distribution sur eux-mêmes et zip cravate ou les serrer en place.

La masse : 75.14 g

Le prix : 2 200.00 DA



Annexe-G- : Vis trapézoïdale avec écrou en laiton



G.1 Description :

- Matériau : Vis mère en acier inoxydable 304 / Écrou en laiton
- Diamètre de vis : 8mm
- Pas : 2mm
- Longueur : 500 mm
- Masse : 155.22 g
- Le prix : 1 900,00 DA

Annexe-H- : Roulement rigides à billes

Code du produit : 6252RSSKF

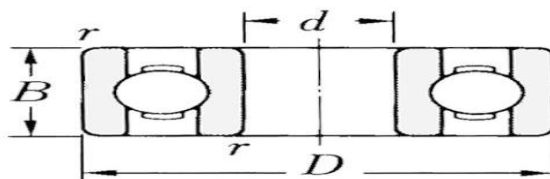
Domaine d'application : environnements encrassés

Caractéristiques : roulements à billes à une rangée

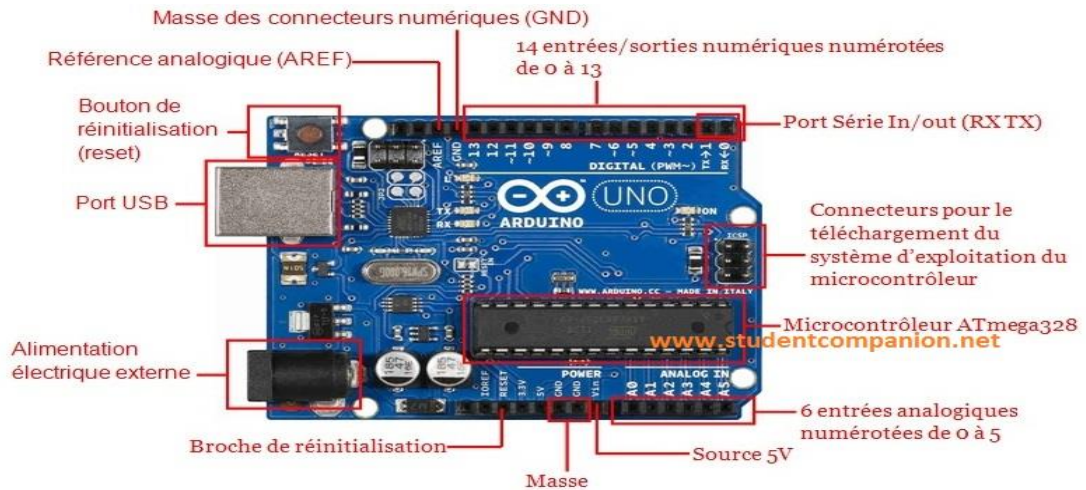
$d = 5 \text{ mm}$

$D = 16 \text{ mm}$

$B = 5$



Annexe-I- : Arduino



alimentation: via port USB ou 7 à 12 V sur connecteur alim (Tension d'alimentation mini et maxi 6-20V)

- microprocesseur: ATmega328
- mémoire flash: 32 kB
- mémoire SRAM: 2 kB
- mémoire EEPROM: 1 kB
- 14 broches d'E/S dont 6 PWM
- 6 entrées analogiques 10 bits
- intensité par E/S: 40 mA
- cadencement: 16 MHz
- bus série, I2C et SPI
- gestion des interruptions
- fiche USB B
- dimensions: 74 x 53 x 15 mm

Module prêt à l'emploi.

Version d'origine fabriquée en Italie.

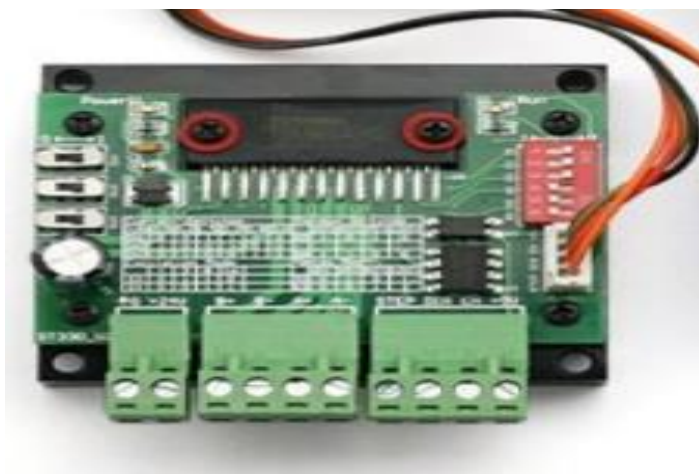
Le prix : 3 500,00 DA

Annexe-J- : Driver moteur pas à pas

J.1 Description :

Isolation pour protéger l'ordinateur et l'équipement de l'utilisateur Quatre entrées de commande (divisées en paires de couteaux) - Permet le réglage de la limite et l'arrêt d'urgence.

Architecture universelle - Prend en charge la plupart des logiciels parallèles MACH3, KCAM4, EMC2, etc.



J.2 Notes Importantes :

S'il vous plaît connecter l'alimentation à l'interrupteur d'alimentation de DC 12-36 V,

Sélection de tension :

Alimentation 12-16V DC pour moteurs pas à pas Nema 17

La puissance de sortie de 12V doit être appliquée au ventilateur du radiateur de 12V

Sortie pilote compatible avec moteurs pas à pas à 2 ou 4 phases, 4,6 ou 8 conducteurs, 3A max.

Convient aux moteurs pas à pas unipolaires ou bipolaires.

Vitesse de broche régulée par tension contrôlée par une interface parallèle en fonction de la tension d'alimentation.



Le prix : 3 500,00 DA

Annexe-K- : Alimentation électrique 12V 30A 250W

K.1 Description :

L'alimentation électrique est un élément clé de la construction d'une imprimante, et il n'y a plus de problème. C'est pourquoi nous sommes allés avec ces unités de haute qualité.



K.2 Caractéristiques :

- Tension d'entrée : 85-265VAC
- Fréquence de ligne d'entrée : 50/60 Hz
- Tension de sortie : 12V DC (réglable à +/- 10%)
- Courant de sortie maxi : 20A
- Puissance de sortie maximale : 250W
- Refroidissement : ventilateur à température contrôlée de 60 mm
- Dimensions : 200 x 110 x 50 mm
- Poids : 730g
- Le prix : 5 500,00 DA

Annexe-L- : Moteur électrique électro-aimant

L.1 Description :

Electro-aimant Puissant et compact Surface lisse et plane Faible consommation et fiable



L.2 Applications :

- Convoyeur, trieuse, bras mécanique, installation expérimentale, etc.
- Tension d'entrée: 12V DC Consommation: 0.33A
- Consommation: 4W
- Matériau: métal
- Couleur: argent

L.3 Spécifications :

Modèle : Fil ZYE1-P25 / 20

Taille: M4

Force de retenue : 11 lbs / 5 kg

Diamètre: env. 25 mm

Diamètre du centre: env. 10 mm

Hauteur: 20 mm

Longueur du câble: env. 23 cm

Le prix : 2 000,00 DA

Annexe-M- : Propriétés de l'étude

Nom d'étude	Static 1
Type d'analyse	Static
Type de maillage	Maillage volumique
Effets thermiques:	Activé(e)
Option thermique	Inclure des chargements thermiques
Température de déformation nulle	298 Kelvin
Inclure la pression du fluide calculée par SOLIDWORKS Flow Simulation	Désactivé(e)
Type de solveur	FFEPlus
Stress Stiffening:	Désactivé(e)
Faible raideur:	Désactivé(e)
Relaxation inertielle:	Désactivé(e)
Options de contact solidaire incompatible	Automatique
Grand déplacement	Désactivé(e)
Vérifier les forces externes	Activé(e)
Friction	Désactivé(e)
Méthode adaptative:	Désactivé(e)

Annexe-N- : G code

G00	Déplacement rapide
G01	Interpolation linéaire
G02	Interpolation circulaire (sens horaire, anti-trigo)
G03	Interpolation circulaire (sens anti-horaire, trigo)
G04	Arrêt programme et ouverture carter (pour nettoyer) (temporisation - suivi de l'argument F ou X en secondes)
G10/G11	Écriture de données / Effacement de données (suivi de l'argument L suivant le type de données à écrire)
G17	Sélection du plan X-Y
G18	Sélection du plan X-Z
G19	Sélection du plan Y-Z
G20	Programmation en pouces
G21	Programmation en mm
G28	Retour à la position d'origine
G31	Saute la fonction (mode <i>Interrupt</i> utilisé pour les capteurs et les mesures pièces et de longueur d'outil)
G33	Filetage à pas constant
G34	Filetage à pas variable
G40	Pas de compensation de rayon d'outil
G41	Compensation de rayon d'outil à gauche
G42	Compensation de rayon d'outil à droite
G54 à G59	Activation du décalage d'origine pièce (<i>Offset</i>)
G68 / G68.1	Activation du mode "Plan incliné" (<i>Tilted plane working</i>) pour les centres d'usinage 5 axes
G71 / G71.7	Cycle d'ébauche suivant l'axe Z (appel de profil balisé entre les arguments P et Q)
G76 / G76.7	Cycle de filetage
G69	Annulation du mode <i>Tilted plane working</i> (Plan incliné)
G84	Cycle de taraudage rigide
G90	Déplacements en coordonnées absolues
G91	Déplacements en coordonnées relatives
G94/G95	Déplacement en pouces par minute/pouce par tour
G96 ; G97	Vitesse de coupe constante (vitesse de surface constante) ; Vitesse de rotation constante ou annulation de G96

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]https://ifr.org/img/office/Industrial_Robots_2016_Chapter_1_2.pdf
- [2]ISO 8373:2012 - Robots et composants robotiques -- Vocabulaire
- [3]H. Marchat, La gestion de projet par étapes : analyse des besoins, Eyrolles (2006).
- [4]P. Boisseau, La conception mécanique _ Méthodologie et optimisation, Dunod (2016).
- [5] Association francophone de management de projet AFITEP Estimation des coûts d'un projet industriel Editeur(s) : AFNOR Date de parution : 15/06/1995 EAN13 : 9782124750191
- [6]R. Tassinari, Pratique de l'analyse fonctionnelle, Dunod (1988).
- [7]H. Chen, Design of a controlled environment agricultural plant inspection robot, Master of Science in Industrial Engineering, Graduate College of The University of Iowa, May 2012.
- [8] M. Fayolle, Aspects mécaniques en robotique, Techniques de l'ingénieur (1988).
- [9]A. Perrat et D. Bazin, Le motion control : intelligence et performance au cœur des machines, GIMELEC (2012) <http://www.gimelec.fr/Publications-Outils/GUIDE-Motion-Control>
- [10]<http://fr.jb-3dprinterparts.com/linear-rail/>
- [11] F. Binet, Le dimensionnement d'une motorisation d'axe, Revue de Technologie, 151 et 152 (2007).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[12] J. E. Shigley et C. R. Mischke, Standard handbook of machine design, McGraw-Hill (1996).

[13] P. R. N. Childs, Mechanical Design, Elsevier Butterworth-Heinemann (2004).

Résumé

Ce projet est une étude et réalisation d'un robot cartésien .il permet à l'étudiant d'approfondir ses connaissances dans le domaine robotique.

Ce projet est contient deux partie la première partie c'est l'étude et la deuxième partie la réalisation

La partie étude englobe l'étude de marché (cahier des charges) et l'étude statique et cinématique avec la partie commande du système

La partie réalisation englobe l'assemblage des éléments du robot cartésien

Abstract

This project is a study and realization of a Cartesian robot. It allows the student to deepen his knowledge in the robotics field.

This project is containing two part the first part is the study and the second part the realization

The study part includes the market study (specifications) and the static and kinematic study with the control part of the system

The realization part includes the assembly of the Cartesian robot elements

ملخص

هذا المشروع هو دراسة وإدراك للروبوت الديكارتي، وهو يسمح للطالب بتعميق معرفته في مجال الروبوتات
يحتوي هذا المشروع على قسمين الجزء الأول هو الدراسة والجزء الثاني من التحقيق
يتضمن جزء الدراسة دراسة السوق (المواصفات) والدراسة الساكنة والحركية مع جزء التحكم في النظام
يتضمن الجزء المتعلق بالتحقق تجميع عناصر الروبوت الديكارتي