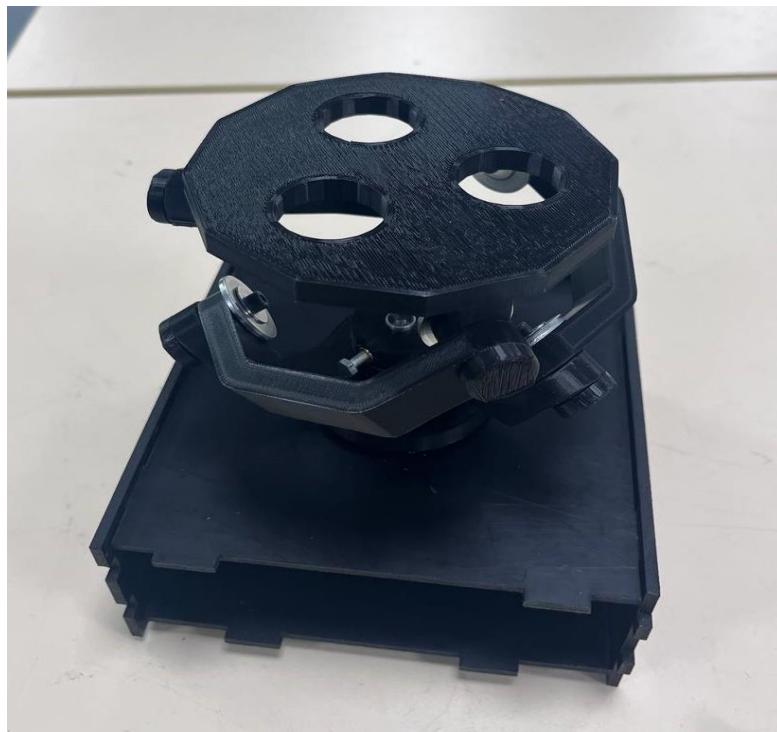


# Rotule pilote



---

GROUPE : TD A

NOM : CEZARD Elouan

BIN MOHAMAD NIZAM Muhammad Hakimi Farhan

## Contents

Introduction .....	3
Etat de l'art .....	4
Analyse Fonctionnelle .....	6
Solution retenue .....	7
Analyse cinématique .....	8
Notice de calcul.....	10
Squelette pilotant.....	10
Loi entrée-sortie.....	11
Conception .....	13
Arbre du pignon haut .....	13
Arbre du pignon milieu.....	14
Arbre du pignon bas.....	15
Bielle .....	16
Bielle basse .....	17
Bielle milieu.....	18
Bielle haute .....	19
Palier lisses .....	19
Connecteur .....	20
Roue vis sans fin .....	20
Bâti .....	21
Fabrication.....	21
Arbre du pignon haut .....	21
Arbre du pignon milieu.....	22
Arbre du pignon bas.....	22
Bielle .....	23
Bielle basse .....	23
Bielle milieu.....	23
Bielle haute .....	24
Palier lisses .....	24
Connecteur .....	25
Bilan et perspective .....	25
Annexe .....	26

## Introduction

L'épaule humaine est un système mécanique remarquable, capable d'effectuer des rotations complexes le long de plusieurs axes. Cette fonctionnalité intrigante en fait un sujet fascinant pour la recherche biomécanique et l'innovation en ingénierie. Dans notre projet, nous visons à développer un système mécanique qui imite la précision de l'épaule humaine.

Notre objectif principal est de concevoir et de mettre en œuvre un appareil mécanique capable de reproduire l'amplitude de mouvement de l'épaule en utilisant trois actionneurs. Le défi central que nous abordons est d'atteindre des mouvements précis et coordonnés qui imitent la fluidité naturelle de l'épaule humaine.

Cette recherche revêt une importance particulière dans diverses applications, notamment la robotique, les prothèses et les dispositifs de rééducation. En comprenant et en reproduisant la mécanique de l'épaule humaine, nous pouvons améliorer la fonctionnalité et l'utilisabilité de ces technologies, contribuant ainsi à améliorer la qualité de vie des personnes qui en dépendent.

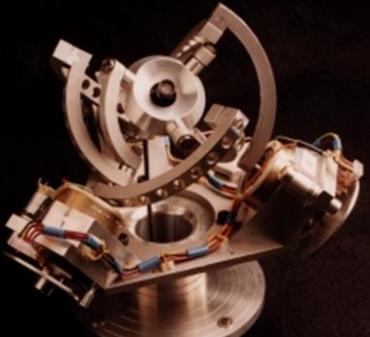
Dans les chapitres suivants, nous commencerons par définir le cahier des charges et les fonctions du système que nous développons, en expliquant les besoins et les objectifs spécifiques de notre projet. Nous présenterons ensuite le schéma cinématique, qui décrit les mécanismes et les mouvements impliqués. Après cela, nous aborderons la modélisation du système, détaillant les étapes de conception et de fabrication. Enfin, nous décrirons la réalisation du prototype, en mettant en évidence les défis rencontrés et les solutions mises en œuvre pour aboutir à un modèle fonctionnel.

## Etat de l'art

Lors de nos recherches, nous avons exploré différents systèmes capables d'assurer l'orientation sur chaque axe. À la suite de cette analyse, nous avons identifié plusieurs solutions répondant à nos critères. Nous avons ensuite comparé les solutions existantes et les avons optimisées afin de parvenir à la solution la plus adaptée.

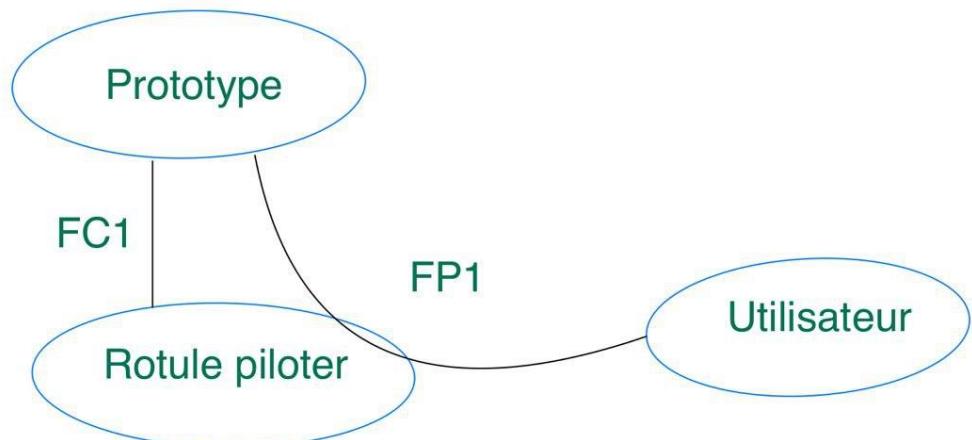
**Mot clés :** (Ball joint OR Shoulder OR Support OR mechanism) AND (Rotation OR Twist OR Spin OR Turn OR parallel) AND (Control OR Conduct OR sphérique) AND (Mecanique OR Robotic OR Mechanism)

Solution	Description	Observation
----------	-------------	-------------

	<p>Laboratoire de robotique : L'œil agile (mécanismes sphériques à 2 et 3 ddl)</p>	<p>Ce système ne permet pas de réaliser les trois rotations nécessaires autour des trois axes, ce qui le rend moins fonctionnel.</p>
	<p>Mécanisme parallèle sphérique piloté grâce à de l'air sous pression</p>	<p>Cette solution est trop complexe et peu pratique pour une utilisation quotidienne car elle utilise l'énergie pneumatique.</p>
	<p>Designing and controlling a self-balancing platform mechanism based on 3-RCC spherical parallel manipulator</p>	<p>Cette solution sera en mesure de répondre à nos besoins spécifiques, notamment en permettant des rotations autour de trois axes.</p>

## Analyse Fonctionnelle

Tableaux des fonctions :



Nb	Fonction	Critère	Valeur
FP1	Reproduire le mouvement	Mouvement de rotation	0-360°
FC1	Être compact	Respecter le fonction du modèle réel	200mm x200mm x 200mm

FP1 :

Dans le repère mondial, nous visons à permettre à cette table de réaliser une rotation maximale de 90 degrés autour des axes X et Y, tout en offrant une rotation complète de 360 degrés autour de l'axe Z. Cette flexibilité de mouvement permettra une adaptabilité optimale dans diverses configurations et utilisations, assurant ainsi une performance maximale tout en répondant aux besoins spécifiques du projet

FC1 : Le dispositif doit être compact, avec une taille générale d'environ 200 mm x 200 mm x 200 mm, afin de faciliter sa manipulation et son transport. Cette taille correspond à une réduction à l'échelle 1:2 du modèle réel, choisie pour permettre une validation fonctionnelle du prototype tout en optimisant le temps et les ressources de fabrication.

### Solution retenue



Figure 4 RCC spherical parallel manipulator

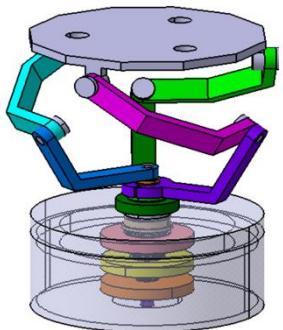


Figure 5 le premier modèle

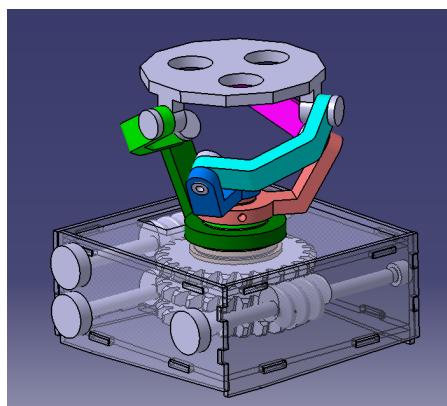


Figure 6 Le modèle final

Après analyse, les deux modèles présentés peuvent répondre à nos critères en modifiant leurs dimensions et leur forme selon nos spécifications. Ces ajustements ont été réalisés en tenant compte de notre niveau d'expertise. De plus, la solution retenue a été adaptée à nos capacités techniques tout en prenant en considération la complexité de conception. Nous avons volontairement limité le nombre de pièces afin de faciliter l'assemblage et de nous assurer que tous les composants soient réalisables avec les équipements disponibles dans notre atelier. Cette approche s'inscrit également dans le respect du critère de "facilité d'installation" mentionné dans notre cahier des charges.

Dans le cadre de ce projet, notre intention initiale pour la version réelle était d'utiliser trois moteurs en tant qu'actionneurs ainsi qu'un carter de forme cylindrique. Cependant, pour la version prototype, nous avons opté pour une solution plus accessible et plus simple à fabriquer, en remplaçant les moteurs par des systèmes à vis sans fin et en concevant un carter de forme cubique. Ce choix a permis de simplifier la fabrication tout en conservant les fonctionnalités principales du système.

## Analyse cinématique

À partir de la solution que nous avons choisie, nous avons élaboré le schéma cinématique. Ce schéma cinématique représente uniquement une vue latérale avec un seul bras.

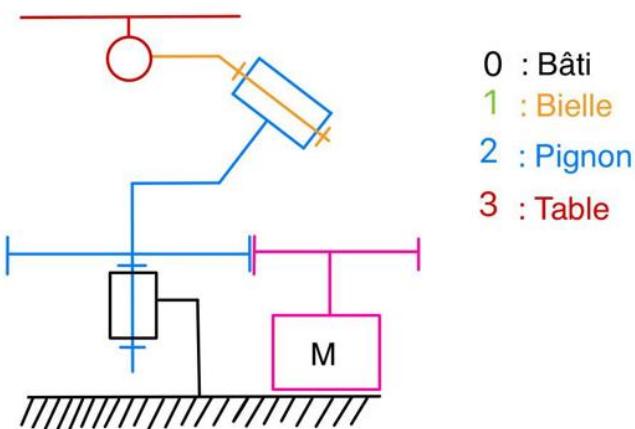


Figure 7 Le scéma cinématique

Pour garantir le bon fonctionnement du système, il est essentiel que les trois arbres soient alignés sur le même axe (en coïncidence), afin d'éviter toute contrainte ou désalignement dans le mouvement.

Vous pouvez observer un zoom sur l'image ci-dessous qui illustre clairement cette coïncidence des axes.

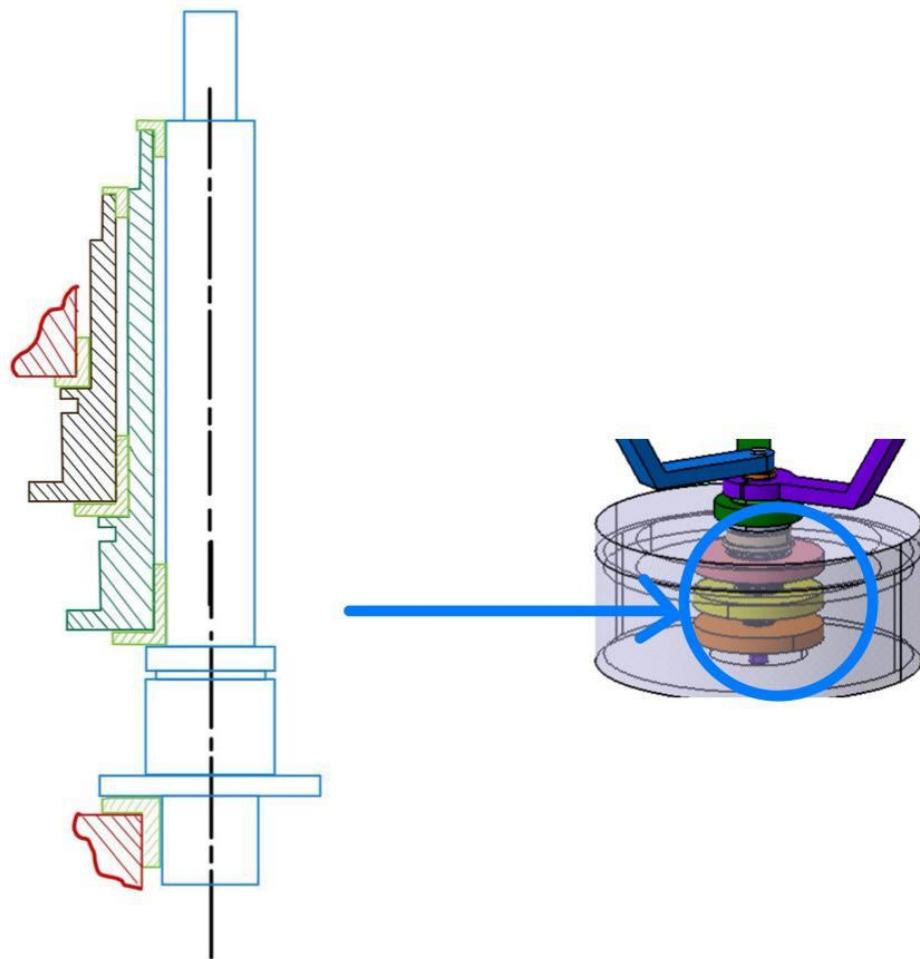


Figure 8 L'axe des arbres

# Notice de calcul

## Squelette pilotant

Le squelette pilotant présenté ci-dessus constitue la base de notre modélisation. Avant de réaliser le modèle 3D complet, nous avons défini cette structure afin de visualiser et valider la cinématique du système. Ce squelette nous a permis d'identifier les paramètres fonctionnels essentiels tels que les longueurs des biellettes, la position des pivots, ou encore les hauteurs des différents niveaux. Ces paramètres ont ensuite été intégrés dans un fichier Excel. Grâce à ce lien dynamique entre Excel et notre logiciel de CAO, toute modification apportée aux paramètres dans Excel se répercute automatiquement sur le modèle 3D. Cela nous offre une flexibilité importante et facilite grandement les ajustements en phase de conception.

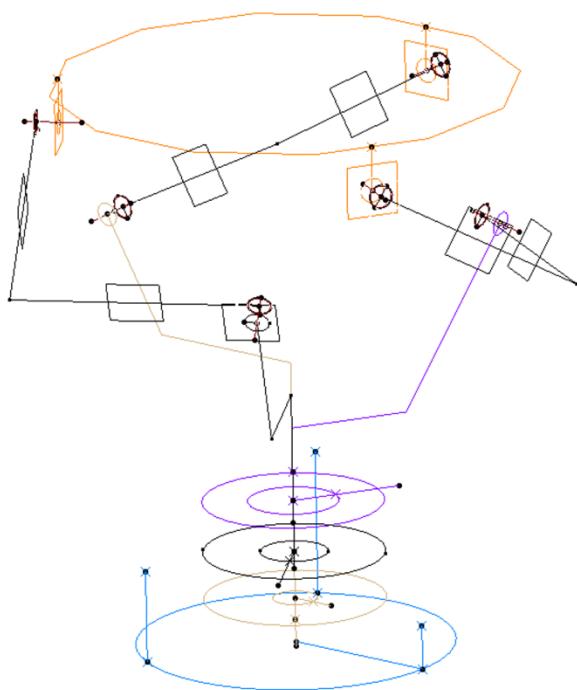


Figure 9 Squelette pilotant

Le modèle 3D final ci-dessous a été réalisé après l'intégration du squelette de pilotage final.

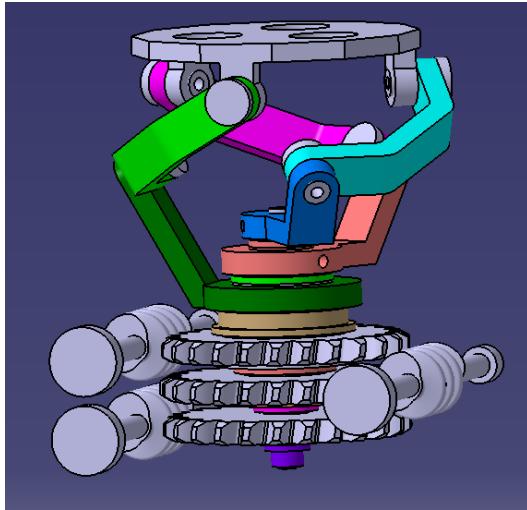


Figure 10 Le modèle sans carter

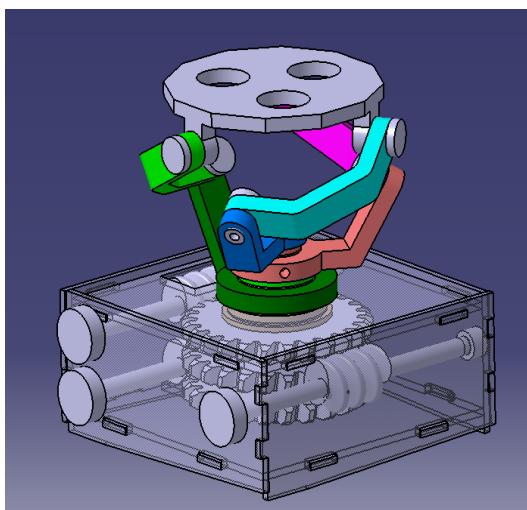


Figure 11 Le modèle avec carter

### Loi entrée-sortie

Dans cette partie, nous cherchons à déterminer la position du point B' par rapport à la référence bâti lorsque les trois moteurs tournent selon un certain angle. Le point B est situé sur l'axe du connecteur, lui-même fixé à la table. Il représente donc la position du point de liaison entre la table et la bielle

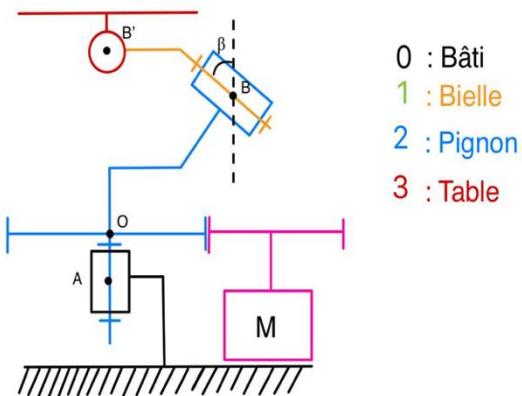


Figure 12 Schéma avec les données

Pour déterminer le vecteur OB dans le repère 0, il est nécessaire de connaître les vecteurs OA et AB.

Afin d'obtenir le vecteur AB dans le même repère, un changement de base est requis, car AB est initialement exprimé dans un repère différent.

$$\vec{OB}_0 = \begin{pmatrix} \cos(\alpha(t)) (L_1 \cos(\beta) \cos(\gamma(t)) + L_2 \sin(\beta)) + \sin(\alpha(t)) \sin(\gamma(t)) \\ -\sin(\alpha(t)) (L_1 \cos(\beta) \cos(\gamma(t)) + L_2 \sin(\beta)) + \cos(\alpha(t)) \sin(\gamma(t)) \\ L_1 \sin(\beta) \cos(\gamma(t)) + L_2 \cos(\beta) + L_3 \end{pmatrix}$$

Avec:

L1= Distance entre le point A et le centre de la table

L2= Distance entre le point B et le centre de la table

L3= le rayon du connecteur

$\alpha$ = L'angle de rotation de l'actionneur

$\beta$ = L'angle de rotation du pignon et du connecteur

$\gamma$ = L'angle de rotation du connecteur et de la bielle

Une fois le point B<sub>1</sub> déterminé, les positions des autres points B<sub>2</sub> et B<sub>3</sub> situés sur les deux autres parties de la table peuvent être calculées sans avoir recours à un changement de base, car la distance entre ces points (B<sub>1</sub>B<sub>2</sub>, B<sub>1</sub>B<sub>3</sub>) est connue.

Cependant, pour vérifier si notre équation est correcte, nous avons des paramètres inconnus tels que gamma, qui varie avec le temps et doit être mesuré ou déterminé périodiquement avant de pouvoir l'utiliser dans nos calculs.

## Conception

### Arbre du pignon haut

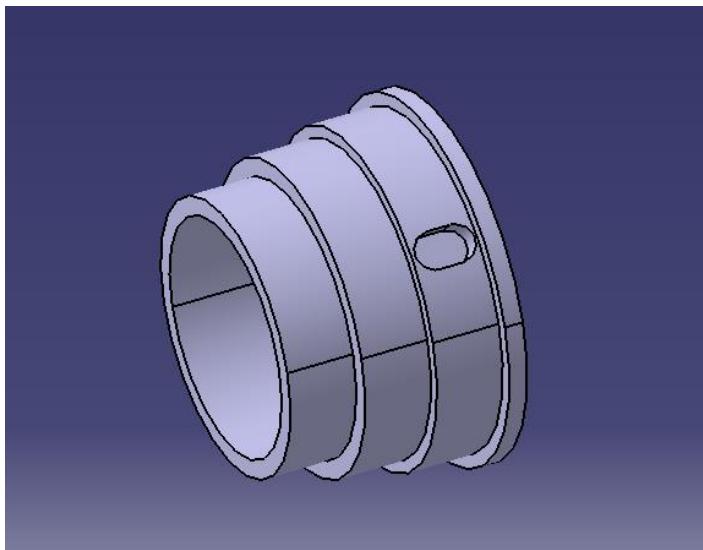


Figure 13 Arbre du pignon haut

L'arbre du pignon haut joue un rôle essentiel dans la transmission du mouvement au sein du système. Il est conçu pour assurer une liaison de type pivot, permettant une rotation fluide et précise.

#### Surfaces fonctionnelles :

Palier lisses / Arbre : La surface est optimisée pour accueillir un roulement, assurant un mouvement avec un minimum de frottement.

#### Choix des ajustements :

- Prototypage : Un ajustement avec un jeu de  $\pm 0,2$  mm est utilisé pour faciliter l'assemblage et les tests.
- Version réelle : Un ajustement H7k6 est privilégié afin d'assurer une précision dimensionnelle et un maintien optimal du roulement.

Roue / Arbre : Une rainure pour clavette est intégrée afin de garantir une liaison rigide entre l'arbre et le pignon, évitant tout glissement.

Bielle haut / Arbre : L'ajustement varie selon la version :

- Version réelle : Ajustement H7h6, assurant un assemblage précis et un bon maintien mécanique.
- Prototypage : Un jeu de  $\pm 0,5$  mm est appliqué, car la bielle est fabriquée par impression 3D, ce qui permet une tolérance plus large pour l'assemblage.

### Arbre du pignon milieu

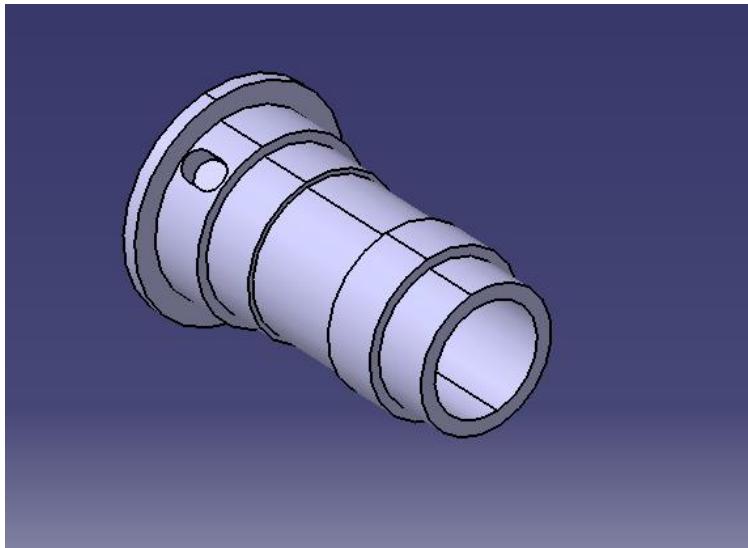


Figure 14 Arbre du pignon milieu

Surfaces fonctionnelles :

- Roulement / Arbre : La surface est dimensionnée pour accueillir un roulement, minimisant les frottements et garantissant un mouvement fluide.
- Clavette / Arbre : Une rainure pour clavette est intégrée afin d'assurer une transmission de couple efficace entre l'arbre et le pignon.
- Bielle milieu / Arbre :
  - Version réelle : Ajustement H7h6, offrant un bon maintien mécanique.
  - Prototypage : Jeu de  $\pm 0,5$  mm, adapté à l'impression 3D de la bielle.

Choix des ajustements :

- Prototypage : Un jeu de  $\pm 0,2$  mm est appliqué pour simplifier l'assemblage et permettre des ajustements.
- Version réelle : Un ajustement H7k6 est utilisé pour assurer la précision et la fiabilité du montage du roulement.

### Arbre du pignon bas

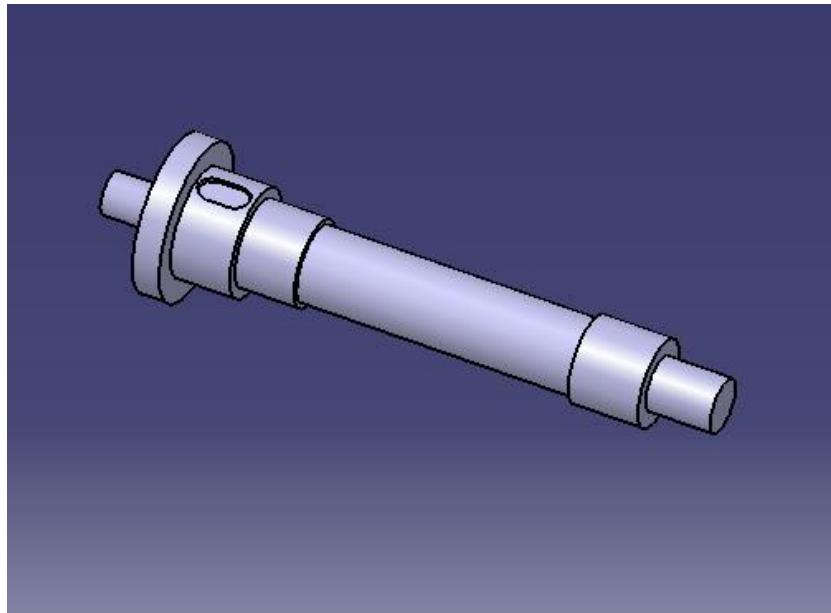


Figure 15 Arbre du pignon bas

L'arbre du pignon bas constitue le dernier axe de transmission dans le mécanisme, avec une liaison pivot permettant la rotation autour de son axe.

Surfaces fonctionnelles :

- Roulement / Arbre : Optimisé pour intégrer un roulement et réduire les pertes par frottement.
- Clavette / Arbre : Intégration d'une rainure pour clavette, garantissant une liaison rigide entre l'arbre et le pignon.
- Bielle bas / Arbre :
  - Version réelle : Ajustement H7h6 pour un assemblage précis.
  - Prototypage : Jeu de  $\pm 0,5$  mm, compatible avec la fabrication par impression 3D.

Choix des ajustements :

- Prototypage : Un jeu de  $\pm 0,2$  mm est appliqué pour faciliter l'assemblage et permettre des corrections.
- Version réelle : Ajustement H7k6, garantissant une fixation fiable du roulement.

## Bielle

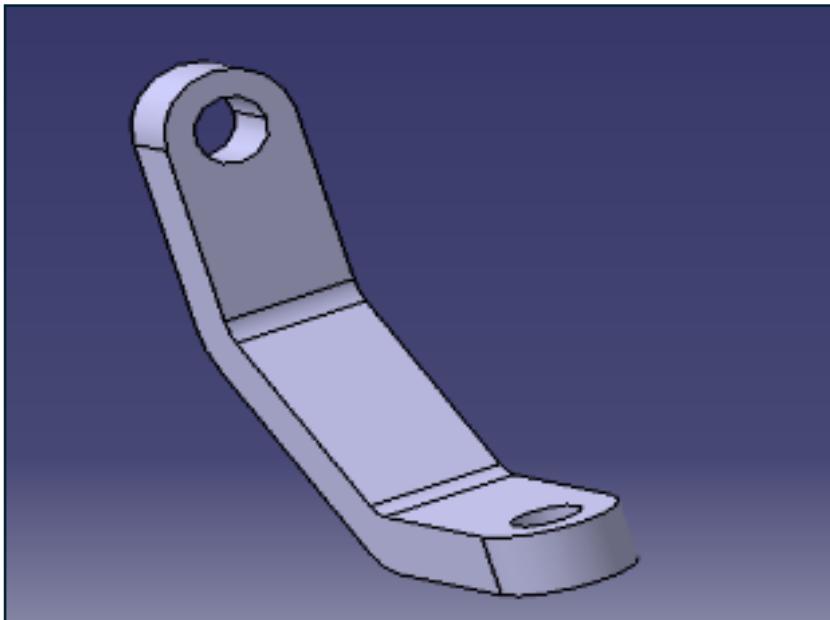


Figure 16 Bielle

La bielle joue un rôle essentiel dans le système en assurant une liaison pivot entre la table et l'arbre du pignon correspondant. Elle permet la transmission du mouvement tout en maintenant une certaine flexibilité dans l'orientation du mécanisme.

### Structure et choix du design

La bielle est conçue avec une structure en forme de L, avec un angle de 90°. Ce choix géométrique facilite le dimensionnement et assure une bonne stabilité mécanique tout en simplifiant la fabrication et l'assemblage.

### Liaisons mécaniques :

- Connecteur de la table / Bielle : Liaison pivot, permettant la rotation et facilitant l'orientation de la table.
- Bielle / Connecteur de la bielle arbre : Liaison pivot, assurant la transmission du mouvement entre l'arbre du pignon et la bielle.

### Bielle basse

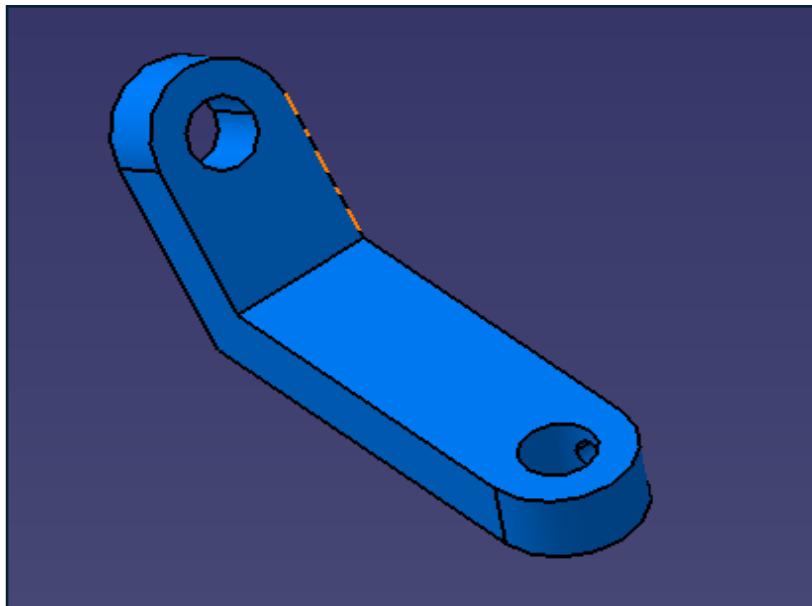


Figure 17 Bielle Bas

La bielle basse est un élément essentiel du système, assurant la transmission du mouvement entre l'arbre du pignon bas et la bielle identique.

Liaisons mécaniques :

- Bielle bas / Arbre du pignon bas : Liaison fixe, garantissant une connexion rigide pour transmettre le mouvement
- Bielle bas / Bielle identique : Liaison pivot, permettant une rotation contrôlée

Structure et positionnement

La structure de la bielle basse dépend directement de sa position sur l'arbre du pignon bas.

## Bielle milieu

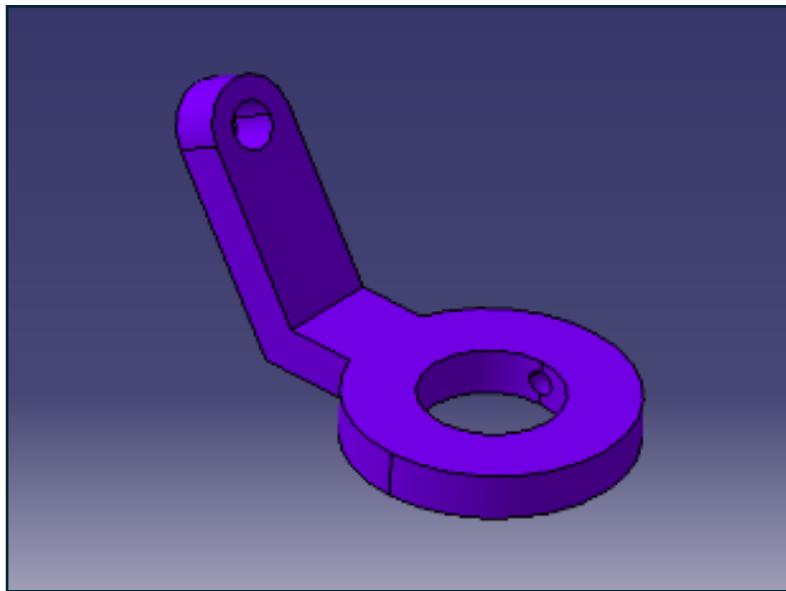


Figure 18 Bielle milieu

La bielle milieu assure la transmission du mouvement entre l'arbre du pignon milieu et la bielle identique, tout en maintenant une liaison stable avec le système.

Liaisons mécaniques :

- Bielle milieu / Arbre du pignon milieu : Liaison fixe, garantissant une connexion rigide pour assurer un bon transfert de mouvement.
- Bielle milieu / Bielle identique : Liaison pivot, permettant une certaine flexibilité dans l'orientation et facilitant le mouvement.

Structure et positionnement

La structure de la bielle milieu dépend de son positionnement sur l'arbre du pignon milieu.

## Bielle haute

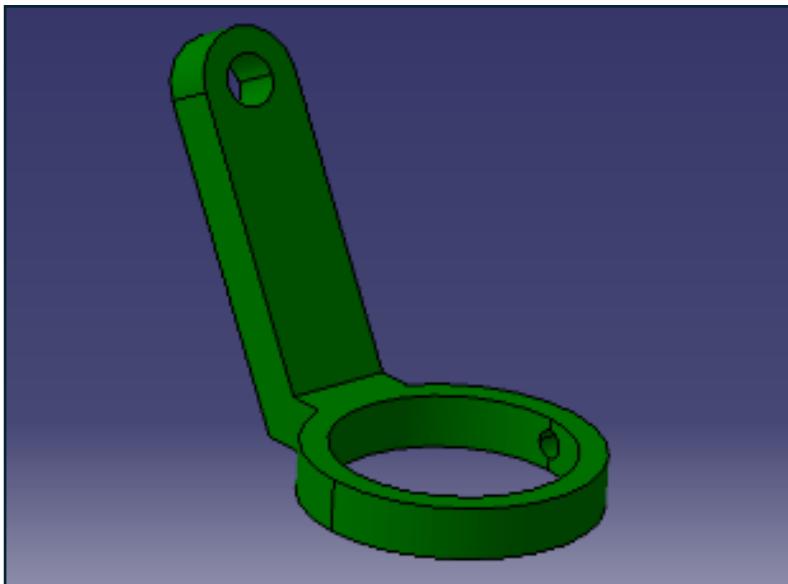


Figure 19 Bielle haut

La bielle haute est un élément clé du système, reliant l'arbre du pignon haut à la bielle identique, tout en jouant un rôle essentiel dans la transmission des mouvements.

### Liaisons mécaniques :

- Bielle haute / Arbre du pignon haut : Liaison fixe, permettant une transmission directe et efficace du mouvement.
- Bielle haute / Bielle identique : Liaison pivot, assurant la flexibilité du système et facilitant l'orientation.

### Structure et positionnement

La structure de la bielle haut est déterminée par sa position sur l'arbre du pignon haut.

### Palier lisses

Les paliers lisses jouent un rôle essentiel dans la réduction des frottements et l'amélioration de la durabilité du système.

### Usinage et Matériau

Nous avons usiné six paliers lisses différents, chacun adapté à une surface fonctionnelle spécifique. Pour assurer une bonne résistance à l'usure et une faible friction, nous avons choisi d'utiliser le POM (Polyoxyméthylène) comme matériau

principal. Ce choix a également été motivé par les problèmes de grippage lié au frottement métal-métal.

## Connecteur

Les connecteurs sont les éléments de liaison qui permettent le bon fonctionnement du système ils sont présents entre les Bielles des arbres et les bielles identiques. La fonction principale du connecteur est de réaliser un pivot entre les différents éléments qu'il traverse. Afin d'optimiser cette dimension, nous avons réalisé une notice de calcul pour la section cisaillement de la connecteur, détaillée ci-dessous.

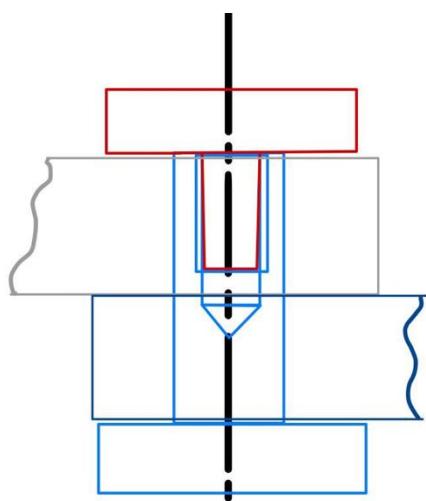


Figure 20 Schéma du connecteur

$$d_{min} \geq \sqrt{\frac{4 \cdot k_s \cdot T}{\pi \cdot R_e}}$$

Avec:

$K_s = 1.5$

$T$ = Effort tangentiel

$R_e=300 \text{ N/mm}^2$

## Roue vis sans fin

Les roues permettent de transmettre l'effort fourni Par la vis sans fin à l'arbre. La vis sans fin est actionnée par l'utilisateur.

Les éléments principaux de dimensionnement l'irréversibilité ainsi que le diamètre des arbres sur lesquels ils seront montés. Pour ce faire, nous avons donc choisi un angle d'hélice de 10° ainsi qu'un diamètre nominal de 100 mm Pour les roues. Les vis ont un diamètre nominal de 11 mm ainsi qu'un angle d'hélice de 10° pour assurer L'entraînement de la roue.

Au cours du projet la partie commande a été plusieurs fois modifiée C'est pourquoi l'espacement entre les roues est trop faible pour l'utilisation de vis sans fin car à l'origine il était prévu pour l'utilisation d'un système pignon Roue. Pour résoudre ce problème nous avons donc décidé de chanfreiner les roues ce qui évite les interférences

## Bâti

Le bâti est un élément important du mécanisme qui retient l'ensemble de la structure il est lié aux arbres par 2 paliers le palier numéro 6 appartenant à l'arbre haut et le palier numéro 1 appartenant à l'arbre bas

Le bâti a été adapté pour résoudre les problèmes d'interférence lié à la modification du système de commande en effet les vis sans fin interférée avec la partie supérieure est inférieure du bâti une poche a été réalisée dans ces éléments pour permettre le passage des vis sans fin.

# Fabrication

## Arbre du pignon haut

### 1. Choix du Matériau

- Matériau : Aluminium
- Critères de sélection : faible frottement avec les roulements

### 2. Procédés de Fabrication

- Tournage conventionnel : Utilisé pour le prototypage afin de valider la conception.
- Tournage CN : Peut être utilisé pour la version réelle, garantissant une meilleure précision et répétabilité.
- Fraisage CN : Utilisé pour l'usinage de la rainure de clavette, assurant un ajustement précis avec l'arbre.

### 3. Ajustements et Tolérances

- Roulement / Arbre :  $\pm 0.2\text{mm}$  (prototypage) et H7k6 (réel).
- Bielle Haut / Arbre : H7h6 (réel) et  $\pm 0.5\text{mm}$  (prototypage, impression 3D).

Le document de fabrication peut être consulté dans l'annexe.

## Arbre du pignon milieu

### 1. Choix du Matériaux

- Matériaux : Aluminium
- Critères de sélection : faible frottement avec les roulements

### 2. Procédés de Fabrication

- Tournage conventionnel : Utilisé pour le prototypage afin de valider la conception.
- Tournage CN : Peut être utilisé pour la version réelle, garantissant une meilleure précision et répétabilité.
- Fraisage CN : Utilisé pour l'usinage de la rainure de clavette, assurant un ajustement précis avec l'arbre.

### 3. Ajustements et Tolérances

- Roulement / Arbre :  $\pm 0.2\text{mm}$  (prototypage) et H7k6 (réel).
- Bielle Milieu / Arbre : H7h6 (réel) et  $\pm 0.5\text{mm}$  (prototypage, impression 3D).

## Arbre du pignon bas

### 1. Choix du Matériaux

- Matériaux : Aluminium
- Critères de sélection : faible frottement avec les roulements

### 2. Procédés de Fabrication

- Tournage conventionnel : Utilisé pour le prototypage afin de valider la conception.
- Tournage CN : Peut être utilisé pour la version réelle, garantissant une meilleure précision et répétabilité.
- Fraisage CN : Utilisé pour l'usinage de la rainure de clavette, assurant un ajustement précis avec l'arbre.

### 3. Ajustements et Tolérances

- Roulement / Arbre :  $\pm 0.2\text{mm}$  (prototypage) et H7k6 (réel).
- Bielle Bas / Arbre : H7h6 (réel) et  $\pm 0.5\text{mm}$  (prototypage, impression 3D).

## Bielle

### 1. Procédés de Fabrication

- Prototypage : Réalisé par impression 3D, permettant une fabrication rapide
- Version réelle : La bielle sera obtenue par pliage de tôle,

### 2. Ajustements et Tolérances

- En raison des limites de précision de l'impression 3D, nous avons choisi un ajustement toléré à  $\pm 0.5 \text{ mm}$  pour les liaisons de la bielle avec l'arbre.

## Bielle basse

### 1. Procédés de Fabrication

- Prototypage : Réalisé par impression 3D, ce qui permet une fabrication rapide e.
- Version réelle : La pièce sera tout d'abord découpée au laser, puis un perçage du diamètre correspondant à l'arbre sera effectué avant le pliage. Cette séquence garantit un bon alignement des trous après la déformation de la pièce. Le pliage final permet d'obtenir la géométrie en L souhaitée

### 2. Ajustements et Tolérances

- En raison de la fabrication par impression 3D lors du prototypage, un ajustement toléré à  $\pm 0.5 \text{ mm}$  est appliqué pour les liaisons avec les autres pièces.

## Bielle milieu

### 1. Procédés de Fabrication

- Prototypage : Réalisé par impression 3D, ce qui permet une fabrication rapide e.
- Version réelle :La pièce sera tout d'abord découpée au laser, puis un perçage du diamètre correspondant à l'arbre sera effectué avant le pliage. Cette séquence

garantit un bon alignement des trous après la déformation de la pièce. Le pliage final permet d'obtenir la géométrie en L souhaitée

## 2. Ajustements et Tolérances

- En raison de la fabrication par impression 3D lors du prototypage, un ajustement toléré à  $\pm 0.5$  mm est appliqué pour les liaisons avec les autres pièces.

## Bielle haute

### 1. Procédés de Fabrication

- Prototypage : Réalisé par impression 3D, ce qui permet une fabrication rapide e.
- Version réelle : La pièce sera tout d'abord découpée au laser, puis un perçage du diamètre correspondant à l'arbre sera effectué avant le pliage. Cette séquence garantit un bon alignement des trous après la déformation de la pièce. Le pliage final permet d'obtenir la géométrie en L souhaitée

### 2. Ajustements et Tolérances

- En raison de la fabrication par impression 3D lors du prototypage, un ajustement toléré à  $\pm 0.5$  mm est appliqué pour les liaisons avec les autres pièces.

## Palier lisses

### 1. Matériau

Les paliers lisses sont usinés en POM (polyoxyméthylène), un matériau plastique technique reconnu pour sa bonne résistance à l'usure, sa faible friction et sa facilité d'usinage.

### 2. Procédé de Fabrication

Les 6 paliers lisses différents sont usinés par tournage, chaque modèle étant adapté à une surface spécifique en fonction de la pièce associée.

### 3. Ajustements et Tolérances

Un ajustement de  $\pm 0.1$  mm est appliqué sur les zones de contact avec les arbres, permettant un bon guidage tout en conservant un montage manuel possible.

Voir annexe pour les dessins de définition.

## Connecteur

Dans le cadre du projet ils ont été réalisés en impression 3D et on par la suite reçu une insère pour permettre le montage d'une vis M 4 et d'une rondelle plate pour bloquer les éléments traverser en translation.

## Bilan et perspective

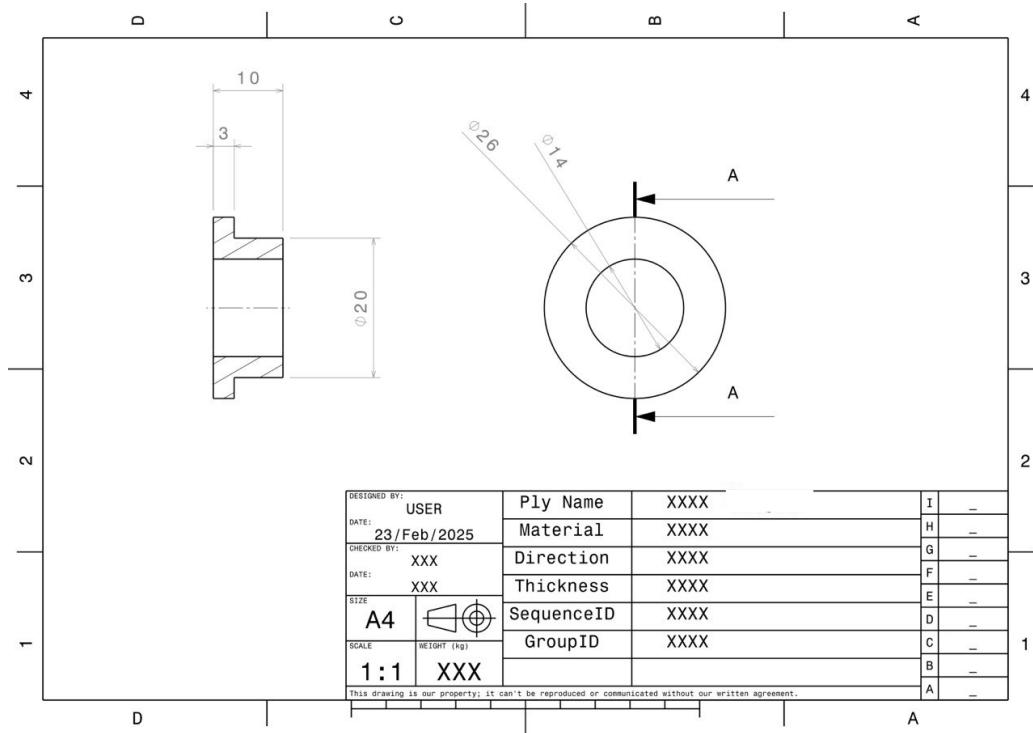
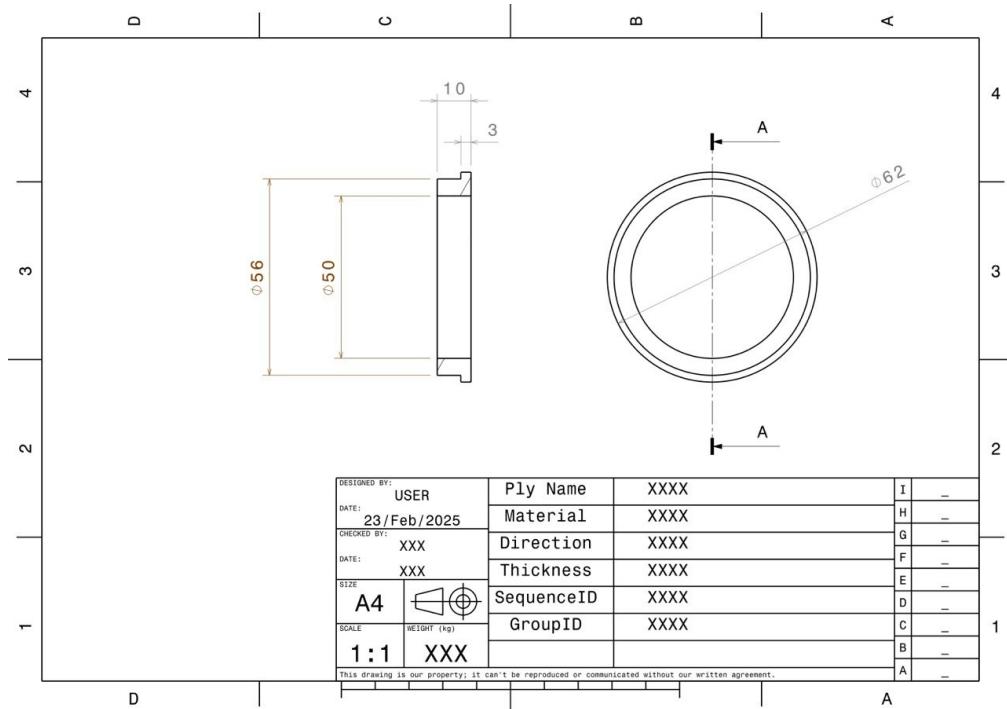
Le projet nous a permis de concevoir et de modéliser un système capable de réaliser une orientation selon trois axes en utilisant des composants simples et accessibles. À travers cette démarche, nous avons pu produire un prototype fonctionnel, en tenant compte des contraintes de fabrication disponibles dans notre atelier. Les pièces ont été pensées pour répondre aux exigences du cahier des charges, notamment en termes de simplicité d'assemblage, de coût et de faisabilité technique.

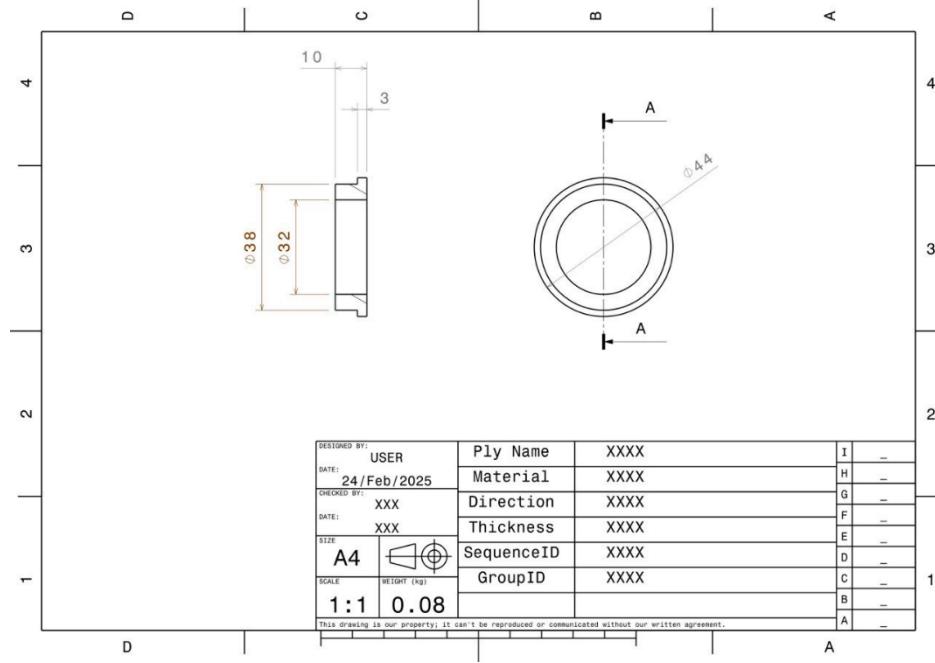
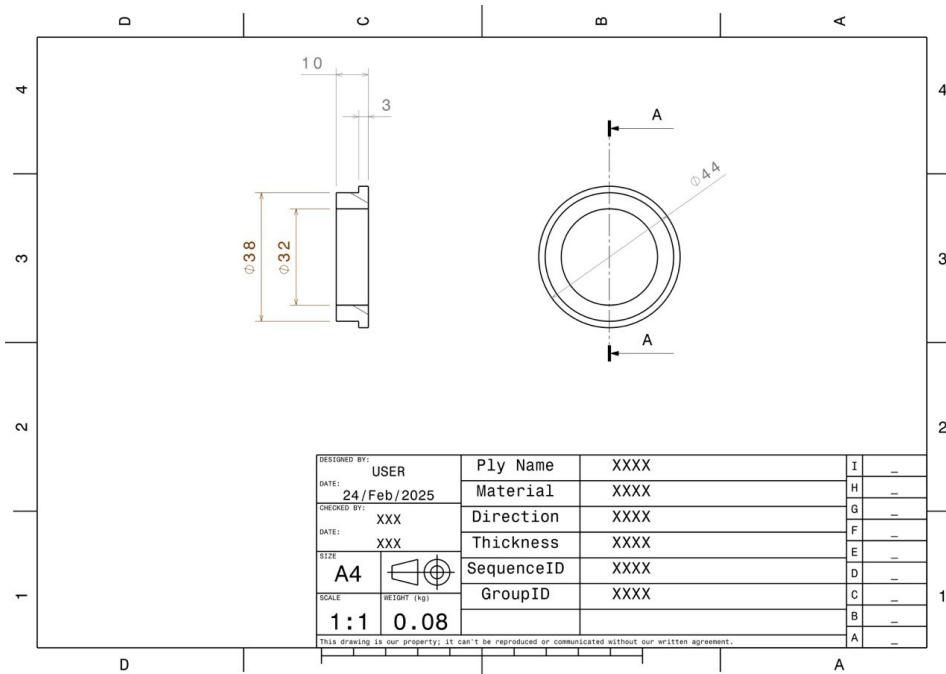
Cependant, comme on peut le constater, la table ne parvient pas à effectuer une rotation complète respectant l'angle de 90° mentionné dans le cahier des charges. Cela est principalement dû à un manque d'informations sur la loi entre la sortie et l'entrée, ce qui nous a empêchés de dimensionner correctement la bielle en fonction de cette relation. Par ailleurs, lors de la rotation manuelle du système, certains points durs ont été observés, probablement causés par des jeux excessifs. Ces jeux peuvent notamment résulter de l'utilisation de pièces imprimées en 3D, dont la précision est limitée.

Pour la suite, il serait pertinent d'envisager une amélioration du système en optimisant certaines pièces afin de limiter le nombre d'éléments à assembler. De plus, une version plus robuste et adaptée à un usage réel pourrait être développée, notamment en remplaçant les pièces imprimées en 3D par des éléments métalliques usinés avec précision. Enfin, une étude complémentaire pourrait être menée pour analyser le comportement dynamique du système sous différentes charges et conditions réelles d'utilisation.

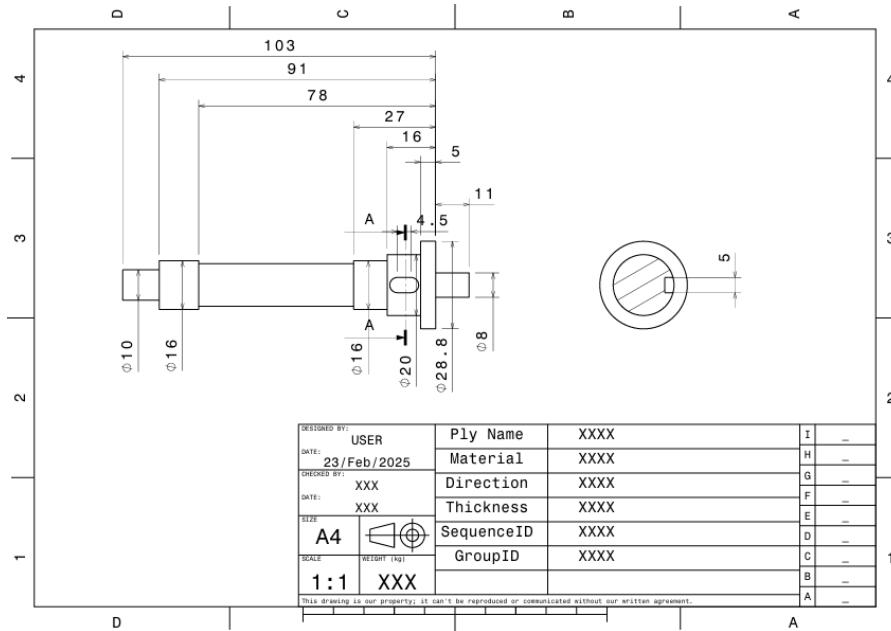
## Annexe

### Plan d'ensemble des palier lisses

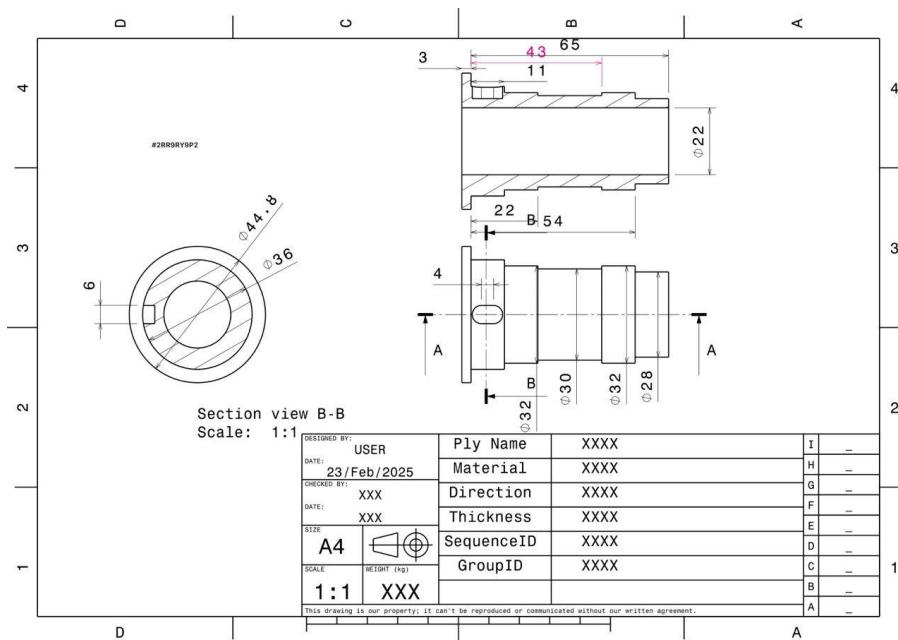




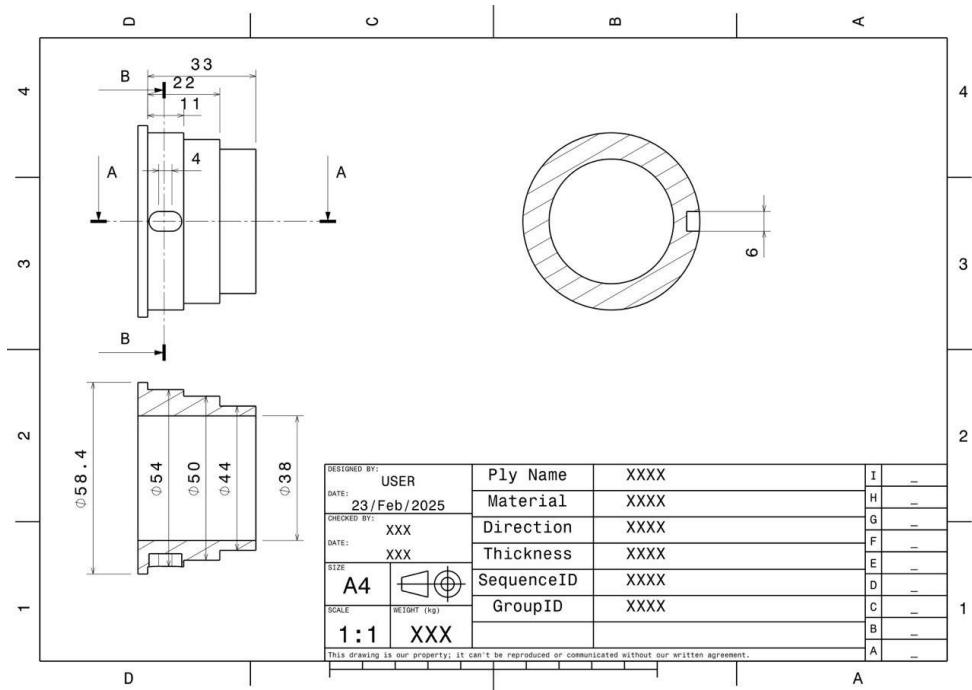
### Plan d'ensemble arbre du pignon bas



### Plan d'ensemble arbre du pignon milieu



### Plan d'ensemble arbre du pignon haut



## Reference

[1]

IEEE Transactions on Robotics, ABENICS: Active Ball Joint Mechanism With Three-DoF Based on Spherical Gear Meshings, (6 mars 2023). Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne Vidéo]. Disponible sur: <https://www.youtube.com/watch?v=Z92dAnhv3JY>

[2]

Y. J. Chen et al., « Designing and controlling a self-balancing platform mechanism based on 3-RCC spherical parallel manipulator », *Robotic Systems and Applications*, vol. 3, n° 1, Art. n° 1, juin 2023, doi: [10.21595/rsa.2023.23015](https://doi.org/10.21595/rsa.2023.23015).

[3]

« Laboratoire de robotique: L'oeil agile (mécanismes sphériques à 2 et 3 ddl) ». Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur:  
<https://robot.gmc.ulaval.ca/recherche/theme-de-recherche/mecanismes-paralleles/loeil-agile-mecanismes-spheriques-a-2-et-3-ddl/>

[4]

K. C. Wu et R. Melgoza, « Spherical robotic shoulder joint », US5533418A, 9 juillet 1996 Consulté le: 16 octobre 2024. [En ligne]. Disponible sur:  
<https://patents.google.com/patent/US5533418A/en>

[5]

Y. Tung, W. Chieng, et S. Ho, « The Controllable Ball Joint Mechanism », *Jsme International Journal Series C-mechanical Systems Machine Elements and Manufacturing - JSME INT J C*, vol. 49, p. 1151-1158, déc. 2006, doi: [10.1299/jsmec.49.1151](https://doi.org/10.1299/jsmec.49.1151).

[6]

J. Guo, J.-H. Low, J. Liu, Y. Li, Z. Liu, et C.-H. Yeow, « Three-Dimensional Printable Ball Joints with Variable Stiffness for Robotic Applications Based on Soft Pneumatic Elastomer Actuators », *Polymers (Basel)*, vol. 14, n° 17, p. 3542, août 2022, doi: [10.3390/polym14173542](https://doi.org/10.3390/polym14173542).