

Compte Rendu de Projet S4

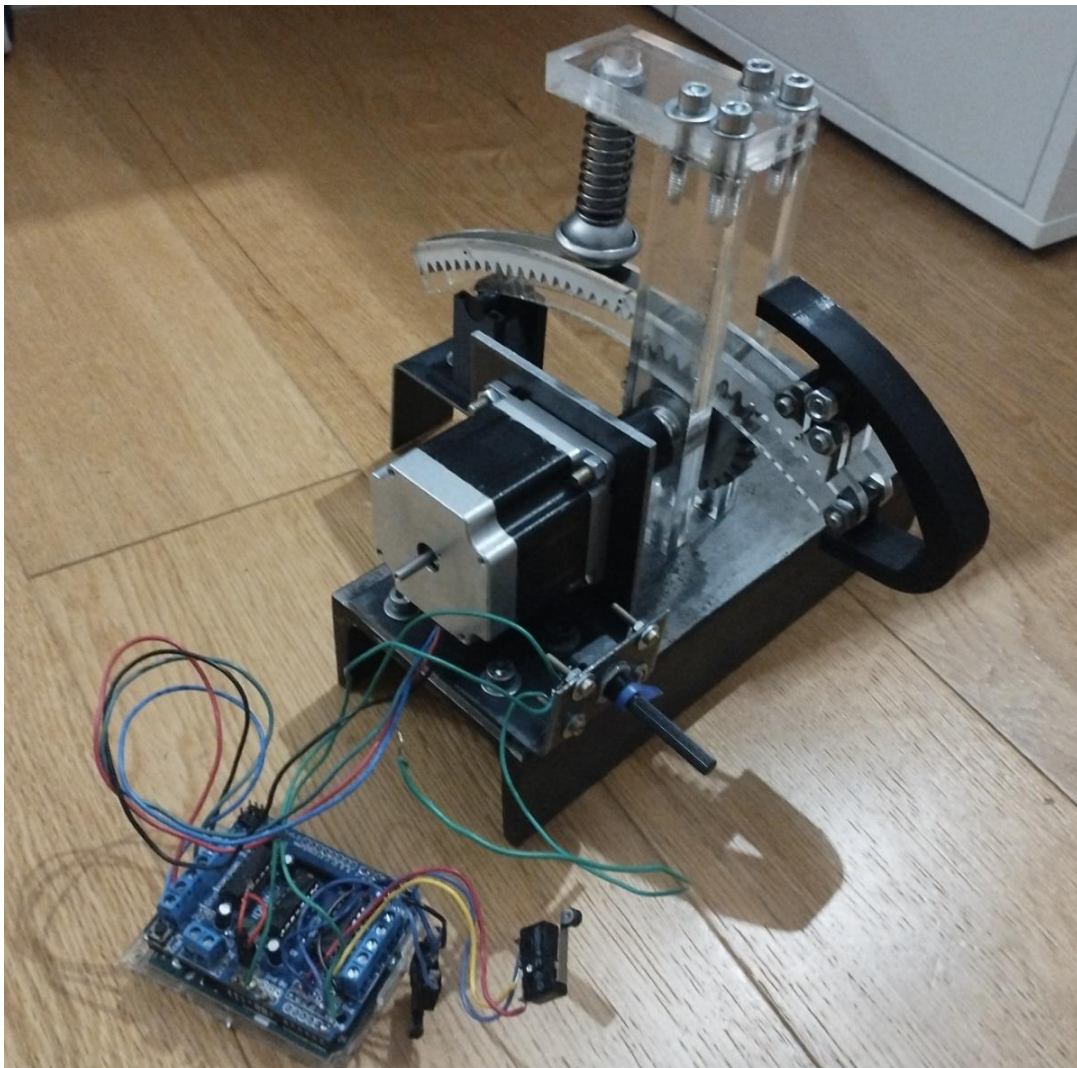


Table des matières

Partie I : Cahier des charges.....	3
Introduction et Mise en situation.....	3
Identification des cycles de vie du système	6
Diagramme des milieux extérieurs	7
Fonctions de service	8
État de l'art.....	9
Proposition de solutions techniques	9
1er schéma de principe propre	9
2ème schéma de principe propre	10
3ème schéma de principe propre	11
Classement des solutions techniques	12
Conclusion : Solution choisie	12
Partie II : Réalisation.....	13
Avant-projet de la fabrication.....	13
Conception	15
Loi entrée-sortie	16
Dimensionnement.....	16
Étapes de réalisation	18
Planning global de projet : Gantt Annuel.....	18
Choix du moteur	19
Explications CAO.....	19
Obtention des pièces.....	20
Composant électroniques.....	23
Code Arduino	24
Bilan de projet	24
Perspectives	25
Annexes	26

Partie I : Cahier des charges

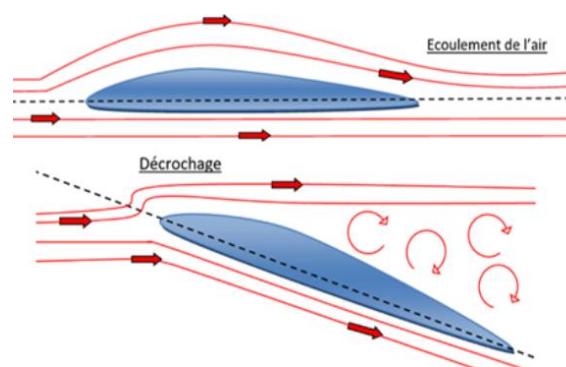
Introduction et Mise en situation

Dans le cadre de notre projet de deuxième année de BUT Génie Mécanique et Productive, parcours Innovation pour l'Industrie, nous avons pour objectif de mobiliser tous les moyens à notre disposition pour concevoir un prototype de mécanisme de bec de bord d'attaque en format maquette. Ce système se situe à l'avant des ailes d'avions et sert à augmenter la portance des ailes à basses vitesses lors des phases de décollage et d'atterrissage. Ce mécanisme a pour objectif final d'être intégré sur avion commercial de grande envergure, type Boeing 747.

- **Présentation de l'utilité du bec de bord d'attaque dans le monde réel :**

Les bords de bord d'attaque, ou "slats", sont des dispositifs hypersustentateurs situés à l'avant des ailes des avions. Ils augmentent la portance maximale en retardant le décollement de la couche limite d'air sur la surface de l'aile, permettant ainsi à l'avion de voler à des angles d'attaque plus élevés sans décrocher. Cela réduit la vitesse de décrochage, permettant à l'avion de voler plus lentement sans perdre de portance, ce qui est particulièrement utile lors des phases de décollage et d'atterrissage.

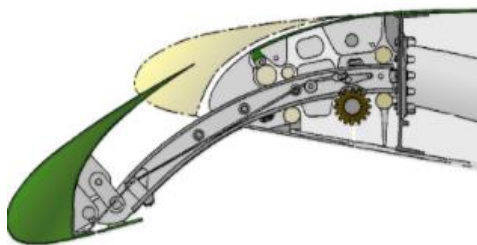
Comportement d'une aile d'avion dans l'air :



<https://aerodynamismetpe-15.websself.net/les-differentes-ameliorations>

Les bords de bord d'attaque améliorent également les performances de décollage et d'atterrissage, permettant aux avions de décoller et d'atterrir sur des pistes plus courtes. Ils contribuent à la stabilité et au contrôle de l'avion en vol, améliorant la maniabilité à basse vitesse et réduisant les risques de décrochage asymétrique. En augmentant le rapport portance/traînée, ils améliorent l'efficacité aérodynamique de l'avion, ce qui se traduit par une meilleure performance en vol, notamment en termes de consommation de carburant et de portée.

Il existe plusieurs types de bords de bord d'attaque, chacun ayant des caractéristiques spécifiques, tels que les bords à fente fixe, rétractables, commandés, les bords Krueger et les bords basculants.



<https://aerodynamismerafaletpe2018.files.wordpress.com/2018/03/attaque.png>



<https://accrodavion.be/Accrodavions/images/slats%20rafale.gif>

Importance du bord de bord d'attaque dans l'aviation militaire :

Sur les avions de chasse les bords de bord d'attaque améliorent la maniabilité en augmentant la portance à faible vitesse et en retardant le décrochage. Ils dirigent l'air vers l'aile pour éviter la séparation du flux d'air, offrant ainsi une meilleure stabilité et réactivité. Cela permet à l'avion de réaliser des manœuvres plus serrées et de réagir rapidement, notamment lors de combats aériens ou de manœuvres d'évasion. Ils sont davantage nécessaires sur les ailes en configuration dite "delta".

Cas d'exemple - ailes delta sur avions de chasse de fabrication française :

En effet, les bords de bord d'attaque sont particulièrement essentiels sur les ailes delta pour optimiser la portance à basse vitesse. En raison de la conservation de l'énergie, ils permettent de mieux contrôler le flux d'air en augmentant la courbure du profil aérodynamique, évitant ainsi une traînée excessive due à un angle d'attaque trop élevé.

Sur un avion comme le Mirage III, conçu dans les années cinquante, qui ne dispose pas de bords d'attaque, l'angle d'attaque doit être fortement augmenté à basse vitesse pour générer suffisamment de portance, ce qui entraîne une vitesse d'atterrissage plus élevée et une maniabilité réduite. À l'inverse, le Rafale, principalement conçu dans les années quatre-vingt-dix, équipé de bords d'attaque et de plans canards, bénéficie d'une meilleure portance et peut réduire sa vitesse d'atterrissage, offrant ainsi un contrôle accru.

Cette caractéristique est d'autant plus cruciale pour l'appontage sur porte-avions, où une faible vitesse est nécessaire pour un atterrissage en sécurité. Le Mirage III, sans ces dispositifs, rencontrerait des difficultés à se poser sur un porte-avions, tandis que le Rafale M, grâce à ses bords et ses canards, est parfaitement adapté aux opérations navales.

- **Étapes réalisées pour le développement du prototype :**

Pour réaliser un prototype fonctionnel, l'idée était de s'inspirer d'un système réel de bord d'attaque et de se focaliser uniquement sur le mécanisme permettant son déploiement et sa rétractation en prenant en compte les moyens disponibles en atelier BUT Génie Mécanique et Productique.

Le processus de réalisation de prototype a commencé au bureau d'études avec une pré-étude, comprenant des recherches sur des systèmes équivalents, une mise en situation dans des environnements extérieurs et l'identification des fonctions de service. Ensuite, nous sommes passés à la conception concrète du mécanisme à l'aide de logiciels de modélisation 3D et de calculs de dimensionnement, jusqu'à la fabrication du prototype en atelier. Nous sommes intervenus donc dans les premières phases du cycle de vie du produit.

En prenant en compte les défis qui pouvaient se présenter, nos compétences ainsi que les outils mis à notre disposition et ce sur quoi nous pouvions agir, nous sommes arrivés à la problématique suivante :

Comment déployer un volet d'avion afin de modifier la portance d'un avion ?

La problématique montre que notre objectif est de trouver, d'étudier et de produire de manière rigoureuse un mécanisme de déploiement de bord d'attaque afin d'améliorer, en théorie, la portance d'un avion.

Identification des cycles de vie du système

Le bec de bord d'attaque d'un avion suit plusieurs cycles de vie, liés aux différentes phases de son développement, de son utilisation et son retrait.

Premièrement, la phase de conception et de développement comprend plusieurs étapes. Elle commence par l'analyse des besoins, avec la définition des performances requises sous la forme d'un cahier des charges.

Vient ensuite la conception préliminaire, qui repose sur la modélisation et la simulation sur un logiciel de conception 3D afin d'optimiser le mécanisme de déploiement. Cette étape inclut également l'étude cinématique et dimensionnelle, le choix des composants et leur préparation à l'intégration sur le système.

Enfin, la phase se termine par la fabrication de prototypes et les tests du mécanisme.

Dans un deuxième temps, la phase de fabrication commence par la production, qui consiste à fabriquer les becs de bord d'attaque et leurs mécanismes.

Vient ensuite l'intégration, où les becs sont montés sur l'aile de l'avion et reliés aux systèmes de commande. Selon la conception, ces commandes peuvent être hydrauliques ou électromécaniques, permettant ainsi un déploiement et un repliement précis du dispositif en fonction des besoins de vol.

Dans un troisième temps, lors de l'utilisation normale du système en vol, le bec de bord d'attaque se déploie ou se rétracte selon le régime de vol.

La maintenance préventive assure son bon fonctionnement grâce à des inspections régulières pour détecter usure, corrosion ou dysfonctionnements mécaniques, garantissant sécurité et durabilité. En cas d'anomalie, des réparations et mises à jour peuvent être nécessaires.

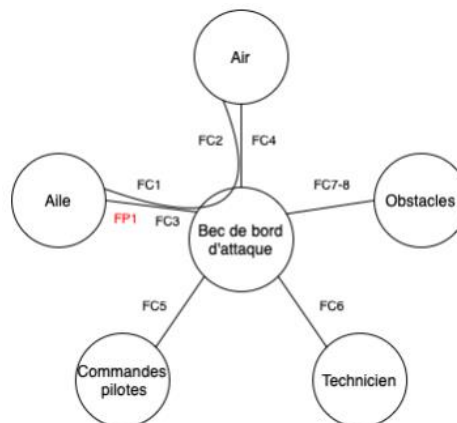
Pour finir, lorsque l'avion arrive en fin de service, un désassemblage est réalisé pour retirer le bec de bord d'attaque et ses composants associés. Enfin, le recyclage ou la mise au rebut est effectué selon les normes environnementales en vigueur.

Dans le cadre de notre formation et du projet, nous intervenons seulement dans la première phase de vie du bec de bord d'attaque et nous nous limitons à la conception du mécanisme de déploiement/rétractation, et non la forme du bec de bord d'attaque.

Diagramme des milieux extérieurs

Description des milieux extérieurs lors de l'utilisation normale :

- Aile : Le bec est fixé à l'aile et en dépend mécaniquement. Elle soutient le bec et influence son déploiement.
- Air : L'air exerce des forces aérodynamiques sur le bec lors du vol. Il interagit directement avec l'air pour modifier la portance de l'aile.
- Obstacles : Le bec peut entrer en contact avec des objets extérieurs et des débris.
- Technicien : Les techniciens interviennent pour la maintenance, les réglages ou les réparations.
- Pilotes : Les pilotes contrôlent le déploiement ou la rétractation via le cockpit.



À partir de la définition des milieux extérieurs et de leur représentation dans un diagramme des milieux extérieurs, il est possible d'identifier les fonctions de service associées au bec de bord d'attaque.

Fonctions de service

Cahier des Charges pour système réel :

Le cahier des charges s'applique à un système à l'échelle réelle, conçu pour être intégré sur des avions de grande envergure, tels que les gros porteurs comme le Boeing 747.

Pour notre prototype, nous avons opté pour une échelle réduite de 1:10.

FP : Fonction principale

FC : Fonction de contrainte

Fonctions	Description des environnements concernés	Critères	Niveaux	Limites d'acceptation
FP1 : Déployer le bec de bord d'attaque	FP1.1 Rapidité FP1.2 Mouvement FP1.3 Réactivité	FP1.1-1 Temps de déploiement position max FP1.1-2 Temps de rétractation FP1.2-1 Inclinaison FP1.2-2 Distance de déplacement linéaire FP1.3-1 Temps de latence	<5s <5s +30° 1m <1s	+1s +1s ±5° ±5cm
FC1 : Avoir de bonnes caractéristiques aérodynamiques	FC1.1 Profil biconvexe de l'aile	FC1.1-1 Forme du bec adapté au vol et à l'aile		
FC2 : Résister et compenser les efforts internes et externes	FC2.1 Charge admissible FC2.2 Résistance de l'air FC2.3 Vent relatif	FC2.1-1 Poids du bec de bord d'attaque FC2.2-1 Couple suffisant FC2.2-2 Rigidité du bec FC2.3-1 Maintien du bec de bord d'attaque en place quand déployé	<1000N/m	+100N/m
FC3 : Assurer la MIP et la MAP sur l'aile	FC3.1 Eléments de fixation et éléments structurels FC3.2 Connexion au système de transmission de puissance	FC3.1-1 Eléments simples et peu coûteux FC3.2-1 Connexion à un arbre motorisé		
FC4 : Automatiser le déploiement du bec de bord d'attaque	FC4.1 Changements de caractéristiques de vol	FC4.1-1 Intégration de capteurs d'angle d'attaque et de vitesse FC4.1-2 Automatisation garanti par l'ordinateur de contrôle de vol		
FC5 : Pouvoir être actionné par les pilotes	FC5.1 Contrôle direct des bords de bord d'attaque	FC5.1-1 Commandes de vol électriques FC5.1-2 Connexion électrique-mécanique au poste de pilotage		
FC6 : Faciliter le montage et le démontage	FC6.1 Accessibilité FC6.2 Encombrement des pièces	FC6.1-1 Temps de montage/démontage FC6.2-1 Longueur du système	<1h <3m	+15min
FC7 : Résister aux mauvaises conditions météorologiques	FC7.1 Intempéries et givre	FC7.1-1 Bon revêtement sur les éléments extérieurs		
FC8 : Pouvoir négliger les effets de l'intrusion de corps étrangers (FOD)	FC8.1 Particules solides et volatiles, fluides, débris, corps biologiques	FC8.1-1 Matériaux robustes FC8.1-2 Étanchéité suffisante		

Pour les valeurs des niveaux de la fonction principale, nous nous sommes basés sur les caractéristiques de fonctionnement de systèmes réels.

Le cahier des charges définit l'ensemble des fonctions de service à respecter sur système réel. Dans le cadre de notre projet, nous nous sommes seulement intéressés à la fonction principale, qui est de déployer le bec de bord d'attaque. Les critères de cette fonction ont constitué la base de notre étude et ont dicté la conception de notre prototype.

Il est important de noter que dans une aile, les mécanismes de déploiement et de rétractation de bec de bord d'attaque se répètent et peuvent varier selon les sections de l'aile. En effet, la géométrie de l'aile évolue le long de son envergure, avec une diminution progressive de la corde. Nous avons fait le choix de prendre un mécanisme au plus proche du fuselage, déplaçant donc des becs plus volumineux.



<https://www.techno-science.net/glossaire-definition/Dispositif-hypersustentateur.html>

État de l'art

Proposition de solutions techniques

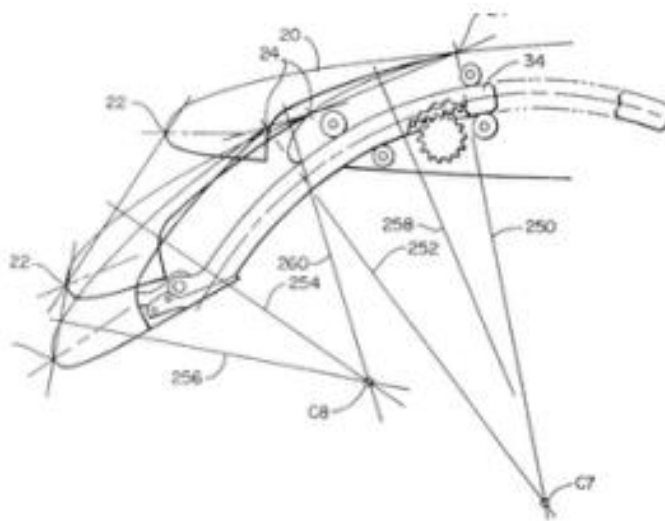
1er schéma de principe propre

Ce système, développé dans les années 1940-1950, est encore largement utilisé aujourd'hui. Celui-ci fonctionne avec un système de bielle entraîné par un moteur, qui permet de déplacer le bec de bord d'attaque vers l'avant. Il est maintenu par un guide courbe reposant sur 4 galets afin de le stabiliser en position. Ce système est surtout utilisé sur des avions commerciaux comme l'Airbus A330 ou l'A340.

Celui-ci présente de nombreux avantages, comme un meilleur écoulement de l'air sur l'extrados, ainsi qu'un report du point de décollage vers l'arrière, augmentant l'angle de

décrochage. Il permet également d'augmenter la portance du mécanisme. De plus, son système mécanique est plus fiable du fait de l'absence d'hydraulique ou de systèmes électriques seuls.

En revanche, il présente plusieurs inconvénients : un ajout de poids important dû au mécanisme et à la bielle, une certaine complexité qui demande une maintenance et des inspections plus fréquentes. Il a aussi des problèmes liés à la poussière ou au gel lorsque le mécanisme est mal conçu ou déployé. Il peut également créer du bruit aérodynamique, surtout pendant les phases d'approche.



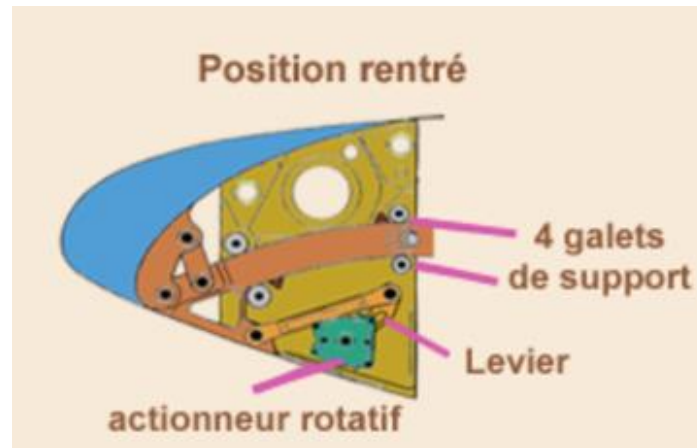
**Schéma brevet déposés par:
T, Bliesner Wayne. Leading Edge
Slat/wing Combination. US 5839699
A, 12 août 1996**

2ème schéma de principe propre

Ce système ressemble beaucoup au premier, actionné par une bielle. Sur celui-ci, seul l'actionnement change : on remplace la bielle par un pignon, et le guide devient une crémaillère courbe, qui devient à la fois le guidage et le mécanisme permettant de sortir le système. Il est apparu dans les années 1950-1970 pour des raisons de fiabilité et de précision. Celui-ci, lorsqu'il est actionné par un moteur, va entraîner le pignon et ainsi faire sortir la crémaillère. Ce système a pour avantage une meilleure précision grâce à sa transmission mécanique. Il est plus simple et compact que le système actionné par bielle. Pas d'hydraulique, donc pas de risque de panne, et plus fiable. Il a une bonne synchronisation entre les différents bords du fait de sa crémaillère, et une maintenance facilitée.

Mais il a également des inconvénients : l'engrenage ajoute un certain poids, du bruit lors de l'actionnement, une usure plus importante si les dents sont mal lubrifiées, une

sensibilité au gel et à la saleté plus marquée si mal protégé, et c'est moins rapide qu'avec le système à bielle.



<https://www.lavionnaire.fr/CelluleHyperBecs.php>

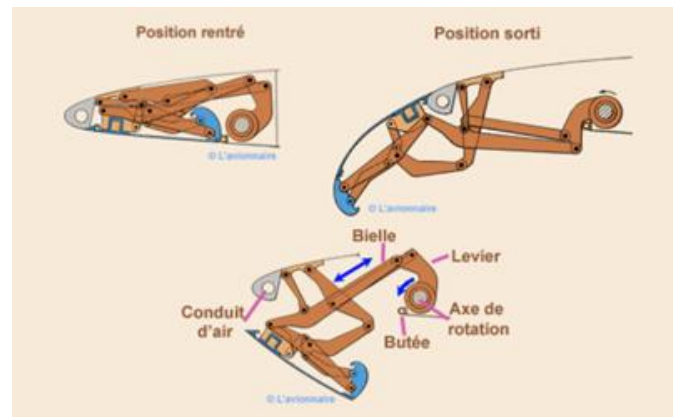
3ème schéma de principe propre

Le volet Krüger est un système de déploiement de bord d'attaque inventé par Werner Krüger en 1943, en Allemagne. Ce système sera notamment utilisé sur les Boeing 707 et 747 dans les années 1960. Celui-ci se déploie vers l'avant et vers le bas depuis le dessous du bord d'attaque de l'aile. Il permet donc, comme tous les autres becs de bord d'attaque, de modifier la portance et de faire varier l'angle d'attaque afin de retarder le décrochage lors des phases critiques de décollage et d'atterrissage.

Celui-ci a pour avantage d'être moins complexe que d'autres systèmes. Il est moins sensible aux contaminants extérieurs tels que le gel ou les saletés contenues dans l'air, qui pourraient détériorer le mécanisme. Il a également une bonne intégration structurelle, ce qui permet de l'installer sur des ailes très effilées ou comportant d'autres mécanismes internes, tels que des réservoirs.

En revanche, il présente aussi certains inconvénients, comme un poids plus important dû à son mécanisme reposant sur de nombreuses barres. Il offre une efficacité moindre par rapport à d'autres mécanismes et son utilisation est limitée du fait de la présence d'autres dispositifs.

De plus, le volet Krüger ne possède que deux positions possibles : soit rentré, soit sorti.



<https://www.lavionnaire.fr/CelluleHyperBeccs.php>

Classement des solutions techniques

En classement des solutions, en premier on peut mettre le système pignon-crémaillère, car il a de nombreux avantages : il est précis, irréversible, compact, et la maintenance est facile.

En second, on peut choisir celui avec la bielle, plus complexe et nécessitant plus de maintenance, mais ayant une meilleure durée de vie.

Et en troisième, le volet Krüger : malgré sa forte résistance, il n'a que deux positions possibles et n'est pas souvent utilisé seul. Il a souvent besoin d'un autre dispositif en complément.

Conclusion : Solution choisie

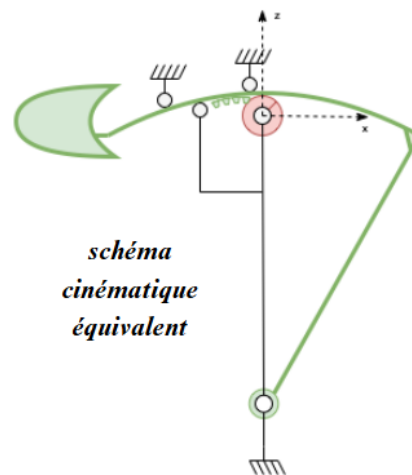
La solution choisie pour notre projet est le système à pignon-crémaillère, car c'est le plus compact, le plus précis et le plus résistant. Il permet à la fois le déploiement longitudinal du bec de bord d'attaque et l'ajustement de son inclinaison. Cela nous a permis de réaliser par la suite une partie puissance avec un moteur, mais également une partie commande en contrôlant le moteur à l'aide d'une carte Arduino. Ce système nous permet de contrôler avec précision le déploiement de notre système. En effet, il réalise l'objectif de déploiement progressif, où, pour un angle d'attaque donné, une distance spécifique de déploiement est obtenue. De plus il est irréversible à moins que l'on ne décide de le rentrer avec le moteur.

Partie II : Réalisation

Avant-projet de la fabrication

Étude cinématique

La solution technique étant choisie, nous avons pu produire un schéma cinématique équivalent au système étudié :



Le système principal est constitué de trois pièces distinctes, le pignon (représenté en rouge) engrené dans la crémaillère courbée (représentée en vert) fixée, à l'avant, au bec de bord d'attaque et le bâti (en noir).

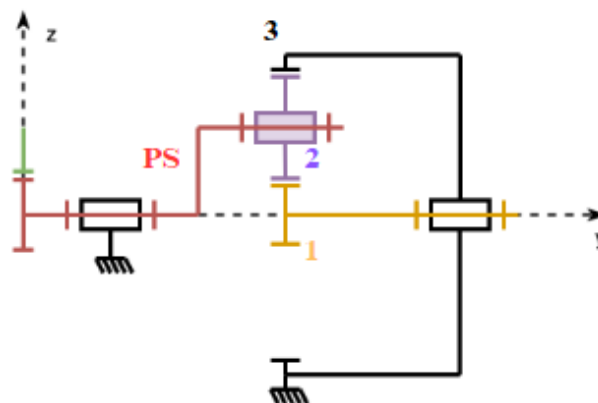
La crémaillère courbée pivote autour de son axe central, exprimé selon l'axe y , qui définit le cercle dans lequel elle s'inscrit. Ce mouvement justifie le choix d'une modélisation par pivot. Le pignon, quant à lui, tourne également autour d'un axe parallèle à y . Ensemble, le pignon et la crémaillère forment une liaison d'engrenage de type pignon-crémaillère. Enfin, la crémaillère est guidée dans son mouvement courbé par au moins deux liaisons ponctuelles fixes, ce qui lui confère un déplacement similaire à celui permis par une glissière.

Solution abandonnée dans la suite de notre projet :

Initialement, nous n'étions pas certains du choix de la motorisation. Or, il nous fallait une grande réduction de vitesse de rotation puisque l'on souhaitait à la fois un couple suffisant pour déplacer la crémaillère ainsi qu'un pignon pouvant placer le bec à sa position maximale en un tour de pignon. Cette contrainte visait à simplifier le dimensionnement du système, en facilitant notamment le calcul de la course.

Pour répondre à ces exigences, nous avons opté pour l'intégration d'un réducteur de type train épicycloïdal, positionné entre le moteur et le mécanisme pignon-crémaillère. Ce type de réducteur offre un rapport de réduction élevé dans un encombrement réduit, tout en assurant une bonne transmission du couple. Ce choix permet également d'obtenir un meilleur rendement énergétique comparé à un réducteur de type roue et vis sans fin, souvent pénalisé par des pertes par frottement importantes et une nécessité de lubrification fréquente pour maintenir ses performances.

Dans notre configuration, la couronne était rendue fixe, et deux pignons satellites assuraient la transmission entre le planétaire (solidaire du moteur) et le pignon du porte satellite menant la crémaillère.



*vue partielle du mécanisme :
réducteur train épicycloïdal*

Calcul de réduction :

$$\frac{N_{ps}}{N_1} = \frac{\omega_{ps}}{\omega_1} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} = \frac{-C_1}{C_{ps}}$$

$$\alpha_{ps} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_3} \times \alpha_1$$

- Z_i : Nombre de dents par pignon i
- N, ω : Vitesse de rotation (tr/min et rad/s)
- C : Couple (N.m)
- Angle α_1 : Angle de rotation en entrée (moteur)
- Angle α_{ps} : Angle de rotation en sortie (porte-satellite)

Dans une configuration réelle, le réducteur serait positionné dans le fuselage de l'avion afin de réduire l'encombrement et de simplifier l'intégration dans une structure déjà densément équipée. La transmission du mouvement jusqu'aux becs de bord d'attaque se ferait alors via un arbre longitudinal traversant l'aile, permettant d'alimenter en mouvement plusieurs mécanismes de becs de bord d'attaque répartis le long de l'aile.

Avec les contraintes dimensionnelles prises en compte, la réduction maximale réalisée par le train épicycloïdal était de **1:10**.

Dimensionnement train épicycloïdal (utilisation du calcul de réduction) :

- Couronne : 90 dents, diamètre = 180 mm
- Pignon satellites : 40 dents, diamètre = 80mm
- Pignon planétaire : 10 dents, diamètre = 20mm

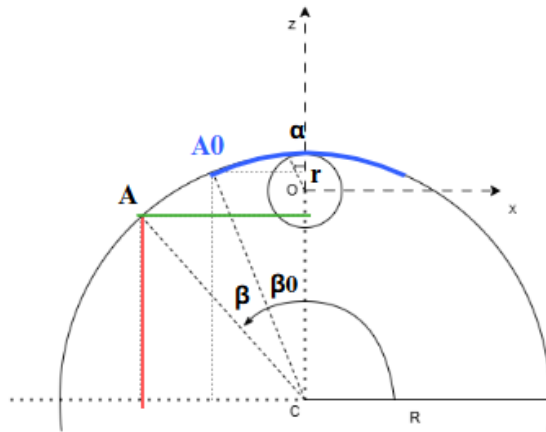
Conception

De l'étude cinématique, il était nécessaire de retrouver la loi entrée-sortie du système afin de réaliser, par la suite, les dimensionnements importants du mécanisme qui respecteraient les niveaux du cahier des charges. Nous avons choisi une approche théorique calculatoire en appliquant la formule de l'équation de cercle.

Nous avons cherché à trouver les positions linéaires longitudinales (x) et verticales (z) en fonction de l'angle de rotation effectué par le pignon. Il est possible de représenter le système étudié de la manière suivante :

Loi entrée-sortie

Coordonnées du bec en fonction de l'angle de rotation du pignon.



À partir de l'équation de cercle :

$$(x - x_c)^2 + (z - z_c)^2 = R^2$$

$$x(\alpha) = x_c + \cos(\beta + \beta_0)R$$

$$z(\alpha) = z_c + \sin(\beta + \beta_0)R$$

$$\text{avec } \beta = \frac{\alpha \times r}{R}$$

$$x_c = 0$$

$$z_c = -R + r$$

$$\beta_0 = 2\pi/3 = 120^\circ$$

- Angle α : Angle de rotation effectué par le pignon
- Angle β : Angle de rotation effectué par la crémaillère
- R : Rayon de la crémaillère courbée
- r : Rayon du pignon

La partie du cercle surlignée en bleu représente la crémaillère courbée tandis que le pignon est représenté par le cercle de rayon r. Le repère choisi a pour origine le centre de ce cercle (O,x,z).

La position initiale du bec de bord d'attaque est représentée par le point A0 et la position décrivant son déploiement maximal est représentée par le point A.

Pour déterminer l'angle de rotation β , on pose $\beta \cdot R = \alpha \cdot r$. Les termes de cette équation donnent la valeur de déplacement réellement parcouru (courbe) par la crémaillère.

Graphes de position du bec de bord d'attaque : Voir Annexe

Dimensionnement

A partir de la loi entrée-sortie, nous avons pu déterminer les dimensions des composants :

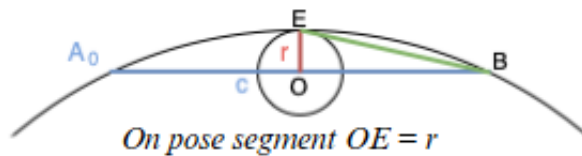
On pose deux conditions de départ pour simplifier le dimensionnement :

- La rotation à effectuer par le pignon de la crémaillère.
- La longueur linéaire de la crémaillère courbée c = Rayon R de la crémaillère.

Nous avons ensuite deux critères à respecter du Cahier Des Charges :

- La longueur de déploiement maximale du bec selon l'axe x ($100 \pm 5\text{mm}$).
- L'inclinaison du bec ($30 \pm 5^\circ$).

1. Rotation de $360^\circ \Rightarrow$ 1 tour de pignon \Rightarrow
déploiement linéaire du bec maximal = 100mm.



Après étude géométrique et algébrique, on en déduit un **coefficient k** qui valide la condition n°2.

En reprenant la loi E/S avec les critères posés (sur x) :

$$-\frac{c}{2} - \underbrace{100}_{\text{déploiement linéaire max}} = \cos\left(\underbrace{\frac{360 \cdot c \cdot k}{c}}_{\text{angle choisi}} + 120\right) \cdot c$$

On trouve $c = 209\text{mm}$ et $r = 28\text{mm}$

Vérification du critère d'inclinaison

$30 \pm 5^\circ$:

$$\theta = \arctan\left(\frac{138,366}{204,5}\right) = 34^\circ$$

($209/2 + 100 = 204,5\text{mm}$)

Voir Annexe : Excel

Finalement, la longueur longitudinale de la crémaillère et le rayon du pignon calculés par dimensionnement étaient donc de 209mm et 28mm respectivement.

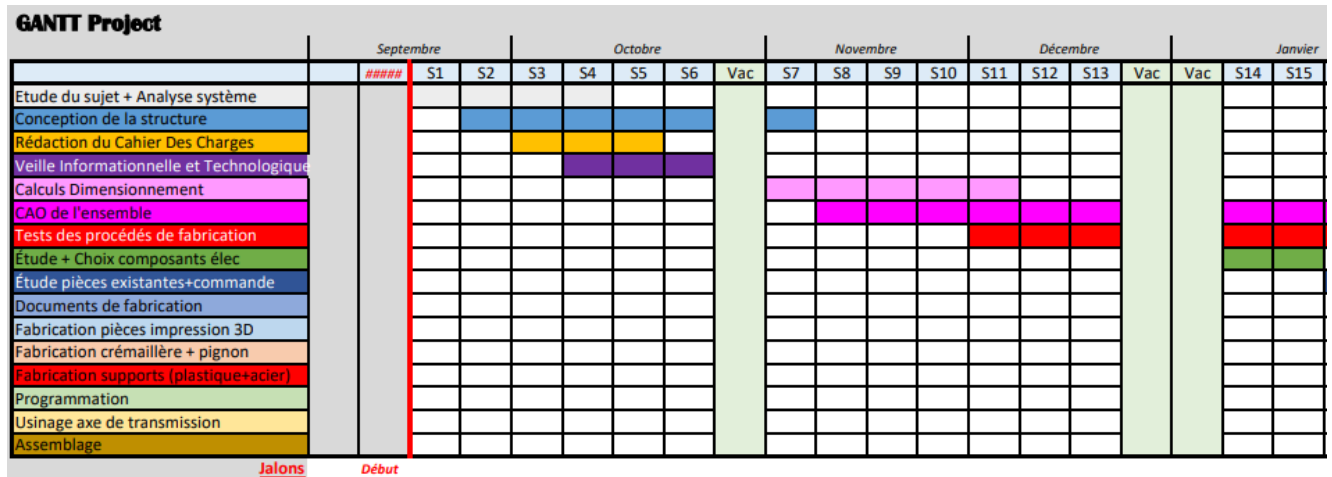
Notice de calcul : Voir Annexe

Étapes de réalisation

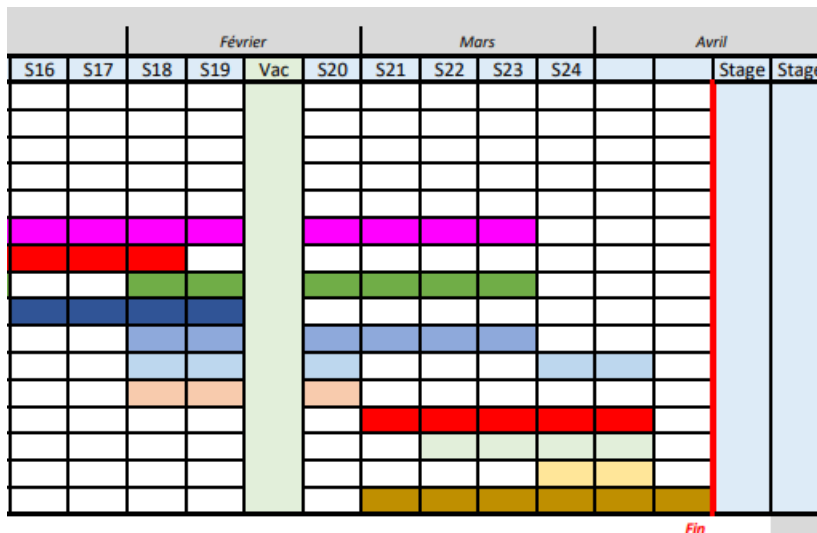
Planning global de projet : Gantt Annuel

Approximation du planning suivi pendant l'année :

Semestre 1



Semestre 2



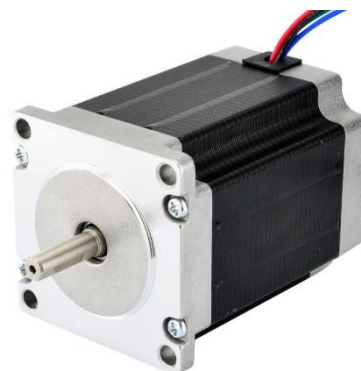
On remarque que la conception numérique 3D réalisée sur le logiciel CATIA V5 a eu une place centrale dans le projet. Elle regroupe la majorité des éléments indispensables à la fabrication des pièces, tels que les dimensions précises, les détails géométriques, et la mise en plan technique. Le temps consacré à cette phase s'explique par la nécessité

d'effectuer des ajustements réguliers, liés aux évolutions du projet et aux modifications des solutions techniques en cours de développement.

Choix du moteur

Au départ, nous avons envisagé l'utilisation d'un moteur asynchrone à faible vitesse, couplé à un réducteur, afin d'obtenir un fort couple et une vitesse de rotation réduite. Cependant, nous avons finalement opté pour un moteur pas à pas, que nous avons trouvé adapté à notre besoin. Ce choix nous a permis de nous passer du réducteur, car ce moteur offre déjà un couple important. De plus, il est facilement contrôlable via une carte Arduino, ce qui nous permet de définir précisément sa vitesse de rotation. Grâce à un calcul, nous avons pu déterminer le nombre de pas nécessaires pour obtenir le déplacement linéaire souhaité.

Le moteur pas à pas choisi peut fournir une puissance de 7 W générant un couple de 5.61 N.m, largement suffisant pour entraîner le mouvement du système avec l'axe, le pignon et la crémaillère en acier.



https://www.steppermotor.fr/goods-74-Moteur-pas-%C3%A0-pas-bipolaire-nema-23-126Nm-23HS22-2804S1-28A-25V-4-fils-Arbre-de-%CE%A66mm-.html?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwzMi_BhACEiwAX4YZUP2HTHWEQSOy8STrLsDI7y324ZtQZztIJKP3Me1x3EI6Wj7o1jXzxBoCTJUQAvD_BwE

Explications CAO

Corentin Jamet

Pour la CAO, nous avons réalisé la forme de nos différentes pièces, que nous avons mises aux bonnes dimensions afin de vérifier que le mécanisme fonctionne correctement.

Pour le bâti, j'ai utilisé **Sheet Metal Design** afin de modéliser les pièces en tôlerie et représenter nos plaques. Celles-ci sont assemblées par des vis M6, sauf pour le moteur, où le diamètre de vis maximal que nous pouvions utiliser était du M5. Nous avons choisi d'utiliser des tôles car elles sont plus rigides que le plastique et permettent de supporter le poids du système tout en minimisant le fléchissement.

Pour le joint Oldham (voir annexe joint Oldham), afin de le modéliser sur CATIA, je suis parti des dimensions normalisées d'un joint Oldham classique, que nous avons adaptées en ajustant les diamètres pour qu'il soit monté serré sur les deux axes.

Pour le montage du pignon-crémaillère (voir annexe montage pignon-crémaillère), nous avons décidé d'utiliser un **triangle** pour transmettre l'effort, plutôt qu'une clavette. Cela permet une meilleure transmission de l'effort, et pour un prototype, cela nous évite de devoir réfléchir aux arrêts de clavette, de la dimensionner, et d'attendre sa réception si elle devait être achetée.

Pour la production de la crémaillère (voir annexe crémaillère), nous l'avons séparée en trois parties :

- La crémaillère elle-même, réalisée par électro-érosion ;
- Deux guides en plastique, assemblés à la crémaillère à l'aide de trois goupilles.

Les guides en plastique permettent de monter le bec de bord d'attaque à l'aide de vis et d'un triangle, qui sert à fixer le bec de manière stable.

Obtention des pièces

Pour les éléments fabriqués, je les ai séparés en catégories selon leur groupe cinématique :

Tout d'abord, le bâti, qui supporte l'ensemble de notre système. Celui-ci est composé de trois tôles : deux tôles de 2 mm, qui ne supportent pas de grands efforts et qui servent uniquement à maintenir le potentiomètre ainsi que le support du galet — ce dernier soutient la crémaillère lorsqu'elle est complètement rentrée. La troisième tôle, de 4 mm,

devait être plus résistante car elle soutient le moteur, qui est en porte-à-faux sur cette plaque uniquement.

Nous avons commencé par découper les plaques aux bonnes dimensions à l'aide de la scie *Spiertz* (voir tôlerie). Ensuite, nous avons pointé toutes les plaques et tracé les traits de pliage à l'aide du trusquin. Nous sommes ensuite passés au perçage, où nous avons appliqué la formule :

$$1000 \times V_c / (\pi \times D)$$

en fonction du diamètre du foret (voir diamètre des trous en annexe tôlerie). Seule la plaque de 4 mm est passée en fraisage, car le trou central était trop large et nous ne disposions pas du foret de diamètre adapté. Nous sommes donc allés sur une machine à commande numérique, la **VX10 5 axes**, pour usiner une poche aux bonnes dimensions. Nous avons également poinçonné certains trous quand nous avons des diamètres de trous similaires à ceux des poinçons et matrices disponibles. Ce procédé présente deux avantages assez mineurs : il ne requiert pas de déterminer une vitesse de rotation de broche, et il évite l'opération d'ébavurage, ce qui peut simplifier le processus de fabrication.

Les tôles ont ensuite été pliées sur la plieuse universelle. Nous avons réglé la machine pour qu'elle réalise un rayon de 2° pour les tôles de 2 mm, et un rayon de 5° pour celle de 4 mm.

Nous avons également pour le support du système récupéré un profilé en U aux bonnes dimensions que nous avons percé pour avoir fixé nos différents éléments dessus.

Pour le bâti, nous avons également deux pièces imprimées en 3D en PLA noir : le support du galet (voir annexe support galet) et le galet lui-même. Étant donné que les efforts sur ces deux pièces sont minimes et qu'elles ne subissent que le poids de la crémaillère et d'elles-mêmes, nous avons décidé de ne remplir les pièces qu'à 30 %, afin de gagner du temps d'impression et de réduire les coûts, puisqu'il s'agit d'un prototype.

Pour finir, nous avons également trois pièces découpées au laser dans du plastique de 11 mm d'épaisseur (voir annexe soutien crémaillère). Ces pièces servent à soutenir l'axe de la crémaillère et à éviter qu'il soit en porte-à-faux. La complexité ici résidait dans le choix des bons paramètres de découpe, car le plastique, à cause de son épaisseur, avait tendance à fondre lors des dernières passes. Après plusieurs essais, nous avons trouvé

les bons réglages sur la machine Hexa : une avance de 3 mm/s et une puissance laser à 84 %.

Les deux plaques du support de l'axe ont ensuite été taraudées. Lors du taraudage, le plastique chauffait beaucoup, ce qui faisait fondre les filets. Pour éviter cela, j'ai utilisé de l'huile, ce qui a permis de refroidir et de protéger les filetages.

Ensuite, pour la transmission de puissance, nous avons réalisé des joints *Oldham* en impression 3D. Pour assurer leur résistance, j'ai augmenté le taux de remplissage à 60 % et utilisé le paramètre *gyroides*, afin qu'ils résistent aux efforts de torsion sans casser.

Pour l'axe qui entraîne le pignon (voir annexe dessin de définition de l'axe), nous l'avons réalisé en fraisage et tournage. Tout d'abord, nous avons effectué le chariotage et le dressage de la face avant sans couper le brut, afin de conserver un maximum de matière entre les mors pour un bon maintien en position (voir annexe contrat de phase 10). Ensuite, nous avons usiné le triangle en commande numérique (voir annexe contrat de phase 20), appairé avec celui du pignon, pour les emmancher de force à la presse. Enfin, nous avons terminé par le chariotage et le dressage de la face arrière (voir annexe contrat de phase 30).

Concernant le pignon (voir annexe pignon), nous l'avons obtenu par électro-érosion. Pour cela, nous avons utilisé le logiciel **3DEXPERIENCE**, dans l'onglet électro-érosion, pour créer le programme, puis nous sommes allés sur la machine pour la paramétrer, prendre les origines, et découper le pignon.

Pour finir, concernant la partie crémaillère :

Le bec de bord d'attaque (voir annexe bec de bord d'attaque) a été imprimé en 3D. Il est uniquement décoratif et représente notre système. Sa forme est inspirée de l'avant d'une aile d'avion. Un taux de remplissage de seulement 20 % a été utilisé, car aucune contrainte mécanique ne s'exerce dessus.

La crémaillère (voir annexe crémaillère) a été réalisée par électro-érosion, comme le pignon, afin d'éviter toute usure prématurée entre les dents.

Les deux guides latéraux de la crémaillère (voir annexe guide crémaillère) ont été réalisés par découpe laser dans des plaques d'acrylique de 4 mm d'épaisseur, avec les paramètres standards de découpe.

Toutes ces méthodes d'obtention ne correspondent pas à ce qui serait fait en situation réelle. Elles ne concernent que le prototype. En réalité, le support serait intégré dans le fuselage de l'aile et conçu différemment. Le joint *Oldham* et le pignon pourraient être commandés, car ce sont des pièces standard. Quant à la crémaillère et au pignon, ils pourraient être réalisés par l'entreprise, soit par fraisage, soit à l'aide de machines spécifiques.

Composant électroniques

Pour les composants électroniques permettant de contrôler notre système, nous avons une carte Arduino sur laquelle nous avons monté une carte de puissance adaptée à notre moteur pas à pas. Nous n'avons pas besoin d'alimentation externe, car le moteur ne consomme pas beaucoup d'énergie, ce qui nous a permis de mettre un cavalier sur la carte de puissance pour l'alimenter via un port USB.

Le dernier composant électronique que nous avons récupéré est un potentiomètre, qui va nous permettre, à l'aide d'un code en langage Arduino, de programmer avec précision la sortie du moteur. Le potentiomètre va donc simuler l'angle d'attaque de l'avion : en le tournant plus ou moins, une plaque placée à l'arrière indiquera les degrés d'inclinaison, jusqu'à une valeur de 30°, car c'est l'angle d'attaque maximal typique pour un avion commercial, qui est notre cas d'étude. En comparaison, les avions de chasse peuvent atteindre des angles d'attaque bien plus élevés.

Pour brancher le moteur pas à pas, nous avons besoin d'une carte spéciale, car celui-ci doit être branché avec quatre fils répartis sur deux bornes moteur différentes pour pouvoir fonctionner (voir annexe montage électrique).

Quant au potentiomètre, nous l'avons soudé sur une borne analogique, une borne ground (terre), et une borne délivrant du 3,3 V. Nous nous sommes cependant rendu compte qu'en récupérant les données du capteur, certaines valeurs étaient manquantes par rapport aux données du fabricant. Nous l'avons donc resoudé sur du 5 V, ce qui nous a permis d'obtenir toutes les valeurs prévues par le fabricant. Pour le code réalisé en langage Arduino (voir annexe code Arduino), nous avons tout d'abord importé les

librairies nécessaires pour le moteur pas à pas, car celui-ci nécessite une librairie spécifique afin de pouvoir le contrôler pas à pas.

Code Arduino

Nous avons ensuite déclaré la valeur du potentiomètre comme une variable, puis nous avons défini les informations du moteur, tel que son nombre de pas ou encore sa vitesse en tours par minute. (Voir annexe code Arduino)

Ensuite, nous avons indiqué dans une boucle que, selon les données du capteur, un calcul devait être effectué entre l'angle de rotation pour un pas et l'avance de la crémaillère, afin de déterminer de combien celle-ci devait avancer à chaque pas. Le moteur devait effectuer un certain nombre de pas pour finalement permettre une sortie de 100 mm, correspondant à une inclinaison simulée de 30° par le potentiomètre. (Fin du code inachevée)

Bilan de projet

Le projet de notre deuxième année de Génie Mécanique et Productique a mobilisé une grande partie de nos compétences acquises tout au long de notre formation, du bureau d'étude jusqu'à la fabrication en atelier du prototype, et ce, sur une période de deux semestres.

Nous sommes partis d'un simple concept, une idée de mécanisme et nous avons réussi à le concrétiser sous la forme d'un prototype fonctionnel. Ce processus reflète bien les pratiques professionnelles dans la conception de prototypes, où l'on passe de l'idée à un produit tangible après une phase d'itérations et d'ajustements.

L'objet d'étude dans notre cas était le mécanisme permettant le déploiement et la rétractation d'un bec de bord d'attaque d'une aile d'avion. Nous avons choisi une solution existante : un système pignon-crémaillère courbée, reconnu pour sa robustesse et son efficacité dans ce type d'application.

Au-delà de la conception mécanique, qui a mobilisé nos connaissances en construction mécanique et en mathématiques appliquées, nous avons également pris en charge la fabrication du prototype, en exploitant une grande variété de machines-outils de l'atelier

GMP. Cette étape a impliqué une gestion des ressources de production et un travail pratique essentiel à la réussite du projet.

En outre, nous avons cherché à automatiser le mécanisme par l'utilisation d'une carte Arduino, permettant de programmer et de piloter les commandes électroniques pour un contrôle plus précis du système. Cette intégration de l'automatisation a ajouté une dimension technique supplémentaire à notre projet, en lien direct avec les technologies modernes utilisées dans l'industrie.

Au cours de ce projet, nous avons rencontré quelques petites difficultés qui ont exigé des ajustements comme un problème d'usinage du triangle sur l'axe de transmission. Cela nous a conduit à changer de machine, et de passer la de fraiseuse conventionnelle avec mandrin sur plateau indexé à une fraiseuse à commande numérique, plus fiable et précise, utilisant un code issu de FAO (G-code). Un autre problème fut des difficultés d'assemblage causées par des ajustements effectués pour accommoder le support système (pièce en U). La solution fut de recalculer les dimensions, réduire la taille de certaines vis pour pouvoir déplacer le bloc moteur et l'aligner à l'axe de transmission sur le plan horizontal ainsi que d'imprimer une pièce plastique et la placer entre le support système et les supports de l'axe pour corriger l'alignement sur le plan vertical.

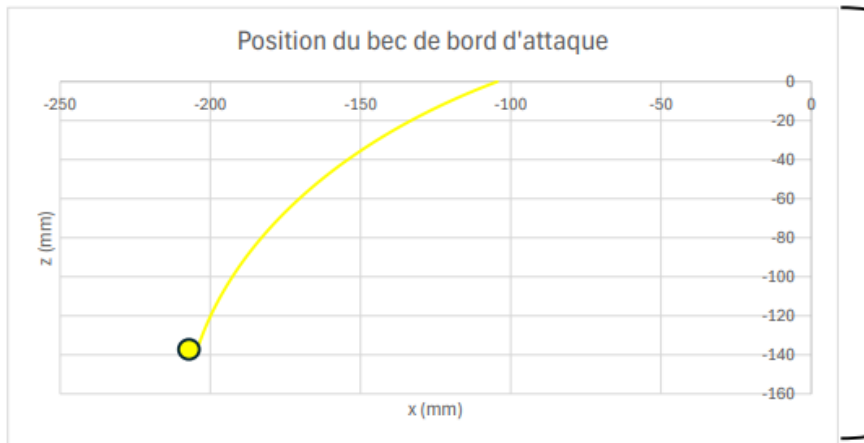
Bien que notre prototype soit de la taille d'une maquette, à l'échelle 1:10, il démontre le bon fonctionnement du mécanisme conçu. Il pourrait donc, en théorie, être adapté à une échelle réelle en vue d'une intégration sur des avions commerciaux.

Perspectives

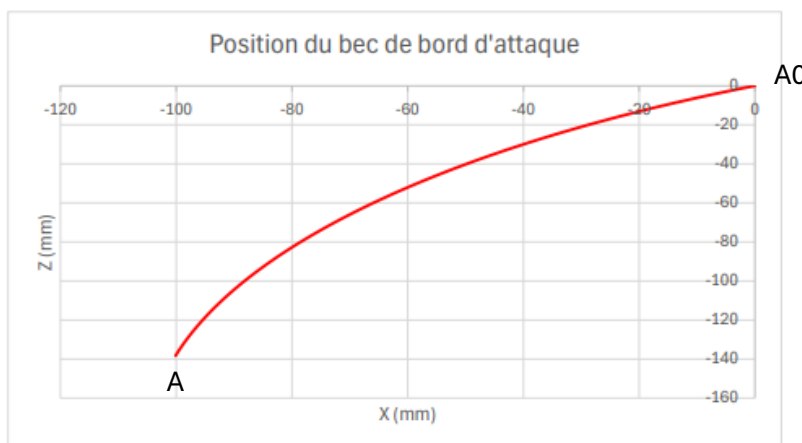
La prochaine étape serait de réaliser l'intégration du système dans une aile, toujours à échelle réduite, et d'effectuer des essais en soufflerie, où le système serait contraint à des forces simulant les efforts aérodynamiques générés par les flux d'air et le vent relatif. La résistance mécanique du dispositif à ces variables serait mise à l'épreuve et pourrait donc être évaluée. Afin de reproduire plus fidèlement les conditions de vol, l'aile pourrait être montée sur un dispositif pivotant, permettant d'ajuster l'angle d'attaque, à l'image de celui d'un avion en vol.

Annexes

Graphes de position du bec de bord d'attaque :



Parcours du bec de bord d'attaque entre A0 et A (pour un tour de pignon de 360°) par rapport au repère centre de pignon soit (O,x,z).



Parcours du bec de bord d'attaque entre A0 et A (pour un tour de pignon de 360°) avec A0 comme point d'origine.

Excel :

265	4,625123	-190,1855	-94,33705	-85,68552	-94,33636
270	4,712389	-191,1857	-96,56642	-86,6857	-96,56573
275	4,799655	-192,1597	-98,80733	-87,65974	-98,80664
280	4,886922	-193,1075	-101,0595	-88,60752	-101,0588
285	4,974188	-194,0289	-103,3225	-89,5289	-103,3219
290	5,061455	-194,9238	-105,5962	-90,42376	-105,5955
295	5,148721	-195,792	-107,8802	-91,29198	-107,8795
300	5,235988	-196,6334	-110,1742	-92,13344	-110,1735
305	5,323254	-197,448	-112,4779	-92,94802	-112,4772
310	5,410521	-198,2356	-114,7909	-93,73561	-114,7902
315	5,497787	-198,9961	-117,113	-94,49611	-117,1123
320	5,585054	-199,7294	-119,4438	-95,22941	-119,4431
325	5,67232	-200,4354	-121,7831	-95,93541	-121,7824
330	5,759587	-201,114	-124,1304	-96,61401	-124,1297
335	5,846853	-201,7651	-126,4855	-97,26513	-126,4848
340	5,934119	-202,3887	-128,848	-97,88866	-128,8473
345	6,021386	-202,9845	-131,2177	-98,48454	-131,217
350	6,108652	-203,5527	-133,5942	-99,05267	-133,5935
355	6,195919	-204,093	-135,9771	-99,59297	-135,9764
360	6,283185	-204,6054	-138,3663	-100,1054	-138,3656
365	6,370452	-205,0898	-140,7612		
370	6,457718	-205,5462	-143,1616		
375	6,544985	-205,9746	-145,5673		
380	6,632251	-206,3747	-147,9777		
385	6,719518	-206,7467	-150,3927		
390	6,806784	-207,0904	-152,8118		
395	6,894051	-207,4058	-155,2348		
400	6,981317	-207,6928	-157,6614		
405	7,068583	-207,9515	-160,0911		
410	7,15585	-208,1817	-162,5237		
415	7,243116	-208,3835	-164,9588		
420	7,330383	-208,5568	-167,3961		
425	7,417649	-208,7016	-169,8352		
430	7,504916	-208,8178	-172,2759		
435	7,592182	-208,9056	-174,7178		
440	7,679449	-208,9647	-177,1605		
445	7,766715	-208,9953	-179,6037		
450	7,853982	-208,9974	-182,0472	<==	Limite à 209 mm sur x soir le Rayon de la crémaillère courbée (R)

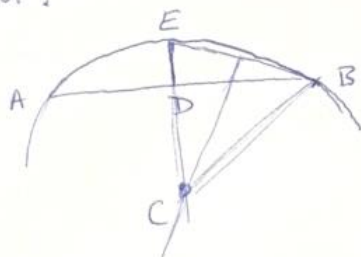
angle d'inclinaison du bec à position max = 34,08245 °

Déploiement linéaire de bec de 100mm
on trouve qu'il faut bien un angle alpha de 360° pour
obtenir cette valeur.

Cela respecte également le critère d'inclinaison du
cahier des charges qui est de 30°+/-5°, dans les
marges (34°)

Notice de calcul :

Relation
longueur d'un arc de cercle à partir de la longueur de sa corde et de sa flèche / hauteur.



$$\begin{aligned} AB &= c \\ DE &= r \\ BC &= R \\ R^2 &= \left(\frac{c}{2}\right)^2 + (R-r)^2 \\ \Downarrow \\ R &= \frac{c^2}{8r} + \frac{r}{2} \end{aligned}$$

- Si l'on veut respecter la condition n°2
On prend une valeur quelconque pour c, $c = 250$ et on pose: $X = r$
 $250 = \frac{250^2}{8X} + \frac{X}{2} \Rightarrow 8X^2 - 4000X + 12500 = 0$
On trouve un rayon de piston de 33,5 mm. ($X_1 = 33,5$)
- On a donc un rapport de dimension piston/cremaillère $k = \frac{33,5}{250}$
qui garantit $c = R \Rightarrow r = c \cdot k$

• En reprenant la bi E/S :

$$-\frac{c}{2} - \underbrace{100}_{\text{déplacement max}} = \cos\left(\underbrace{\frac{360 \cdot c \cdot k}{c}}_{\text{angle de cr}} + 120\right) \cdot c$$

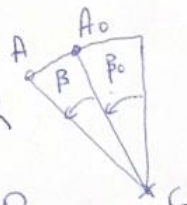
$$\Rightarrow c = \frac{-200}{2 \times \cos(360 \times k + 120) + 1} \approx 209 \text{ mm}$$

$$\Rightarrow r = 28 \text{ mm}$$

Relations graphes : (courbe rouge)

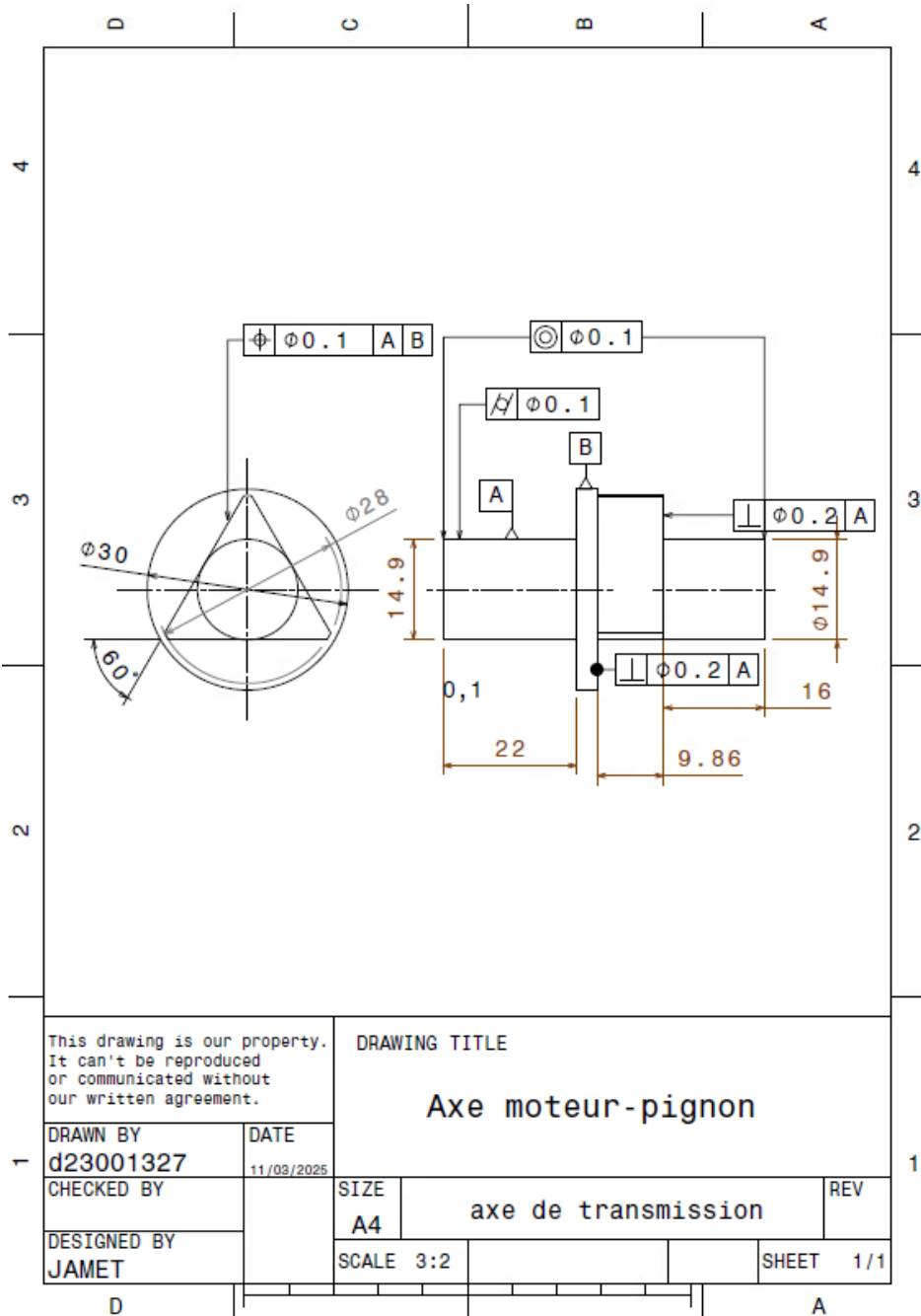
$$x(\alpha) = -\sin\left(\frac{\alpha r}{R} + \beta_0\right) R + \sin(\beta_0) R$$

$$z(\alpha) = \cos\left(\frac{\alpha r}{R} + \beta_0\right) R - \cos(\beta_0) R$$




Documents de fabrication axe de transmission :

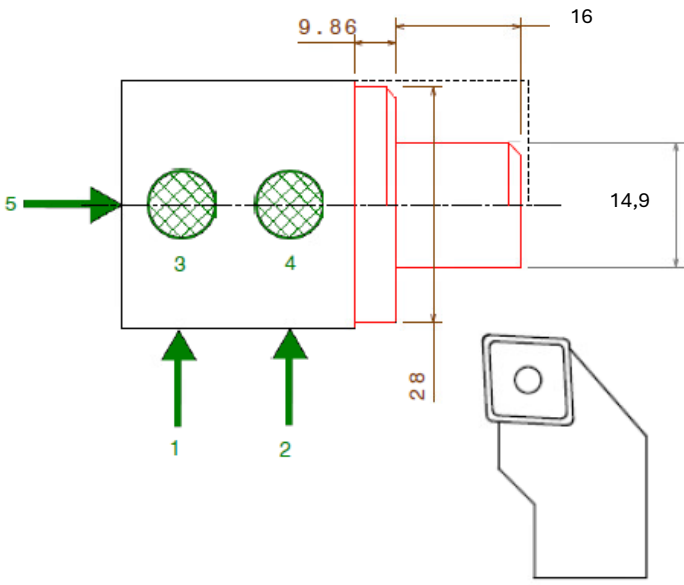
Dessin de définition



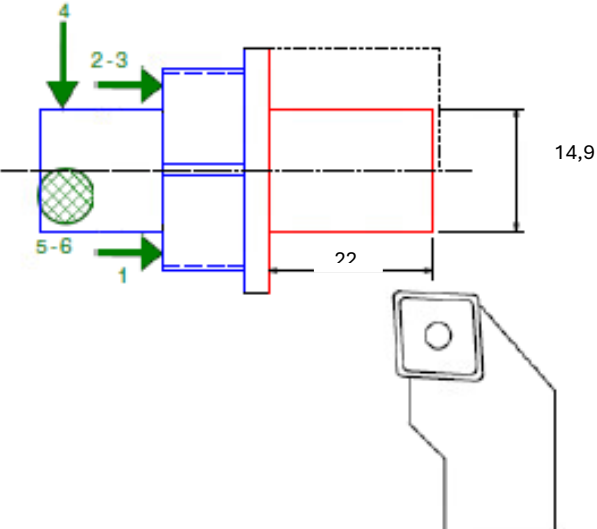
Nomenclature des phases

		NOMENCLATURE DES PHASES		BUREAU DES METHODES
Etabli par: DESCHANEL		ELEMENT: Axe moteur-pignon		N°:
Le: 19/03/25		S/Ensemble: Transmission		Matière: Acier
Programme:		Ensemble: Mécanisme bord d'attaque		Brut: L=54 Ø30
N° de phase	Désignation des opérations	Machine-outils	Observations	
00	Sciage	Scie KASTO	L=54mm	
10	Tournage	RAMO	Centrage long, Mors durs	
	Dressage 1mm			
	Chariotage 16mm Ø14,9mm			
	Chariotage 9,85mm Ø28mm			
20	Fraisage	Fraiseuse CNC	Appui linéaire rectiligne (prise dans l'étau) et appui plan	
	Contournage ébauche triangle			
	Contournage finition triangle			
30	Tournage	RAMO	Centrage court + Appui plan sur l'épaulement du triangle, Mors doux	
	Dressage 3mm			
	Chariotage 22mm Ø14,9			

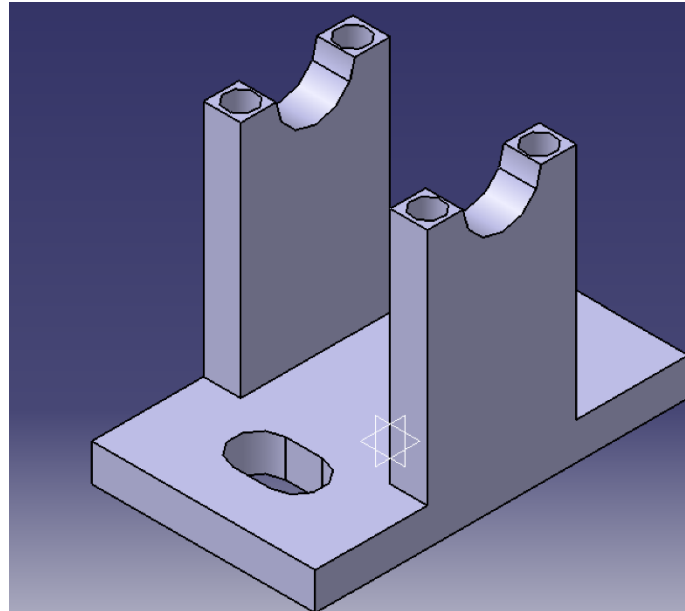
Contrats de phase

		PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10	BUREAU DES METHODES		
Etabli par: DESCHANEL	ELEMENT: Axe moteur-pignon	N°:			
Le: 26/02/2025	S/Ensemble: Transmission	Matière: Acier			
Programme:	Ensemble: Mécanisme bord d'attaque	Brut: L=50 ø30			
Désignation: TOURNAGE CONV					
Machine outil: TOUR RAMO					
					
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Ae	f(z)
a	Dressage	PCLNR	100	0.5	0.1
b	Chariotage	PCLNR	150	2	2
c					
d	Chanfreinage	PSSNR	150		

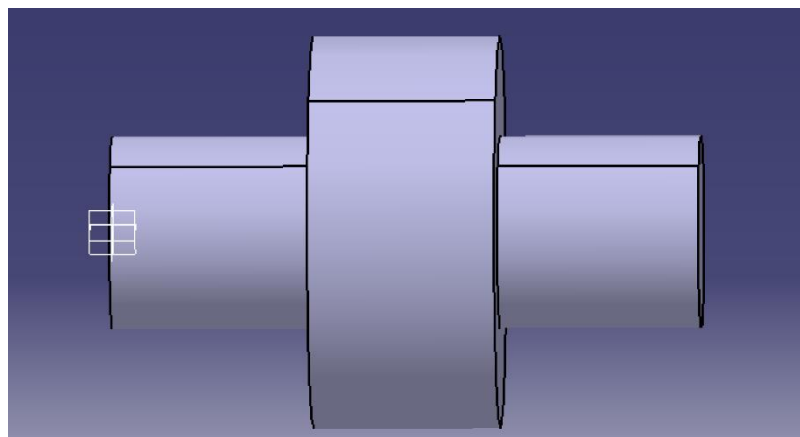
PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 20		BUREAU DES METHODES			
Etabli par: DESCHANEL	ELEMENT: Axe moteur-pignon	N°:			
Le: 05/03/2025	S/Ensemble: Transmission	Matière: Acier			
Programme:	Ensemble: Mécanisme bord d'attaque	Brut: L=50 Ø30			
Désignation: FRAISAGE CN					
Machine outil: FRAISEUSE CNC					
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Ae	f(z)
a	Contournage	FRAISE Carbure D8	70	1	0.45

PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 30		BUREAU DES METHODES			
Etabli par: DESCHANEL	ELEMENT: Axe moteur-pignon	N°:			
Le: 05/08/2025	S/Ensemble: Transmission	Matière: Acier			
Programme:	Ensemble: Mécanisme bord d'attaque	Brut: L=50 Ø30			
Désignation: TOURNAGE CONV					
Machine outil: TOUR RAMO					
					
Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Aa	f(z)
a Dressage	PCLN	100	0.5		0.1
b Chariotage	PCLN	150	2	2	0.1

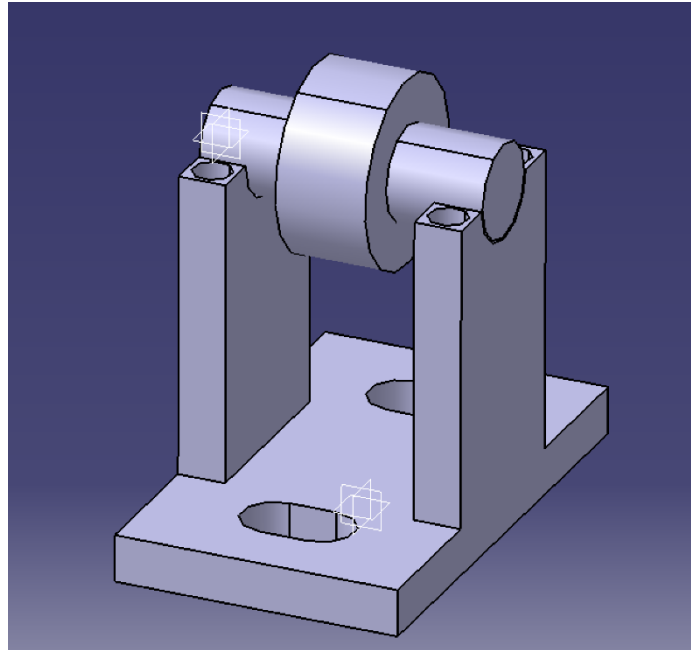
Support galet



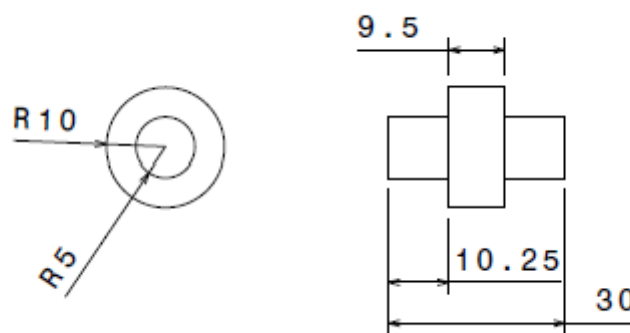
Galet



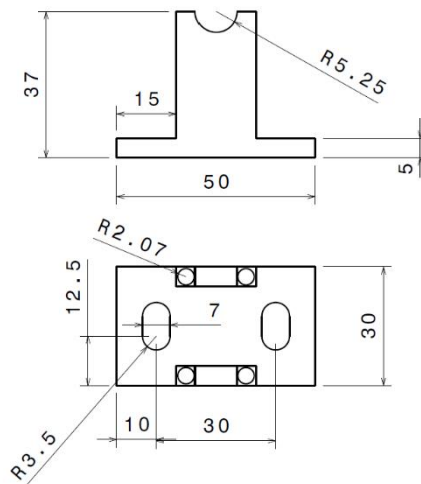
Assemblage galet et support galet



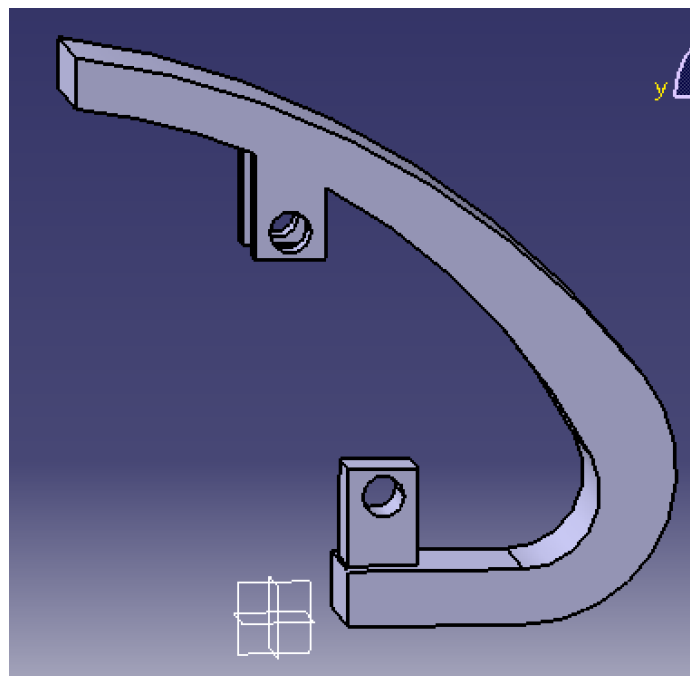
Dessin de définition galet



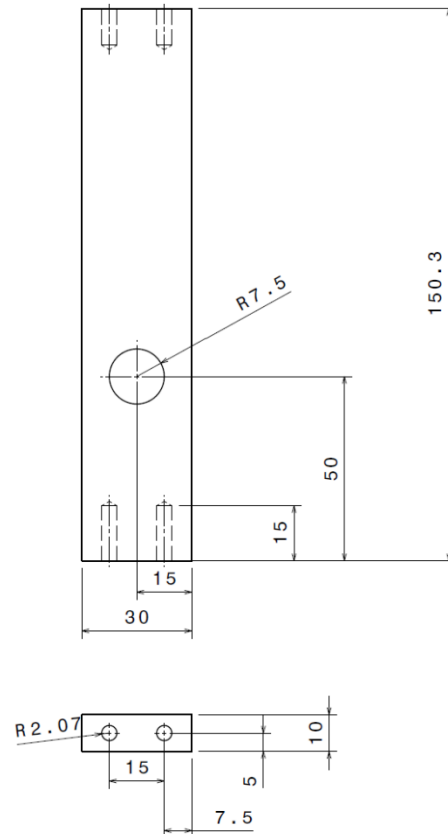
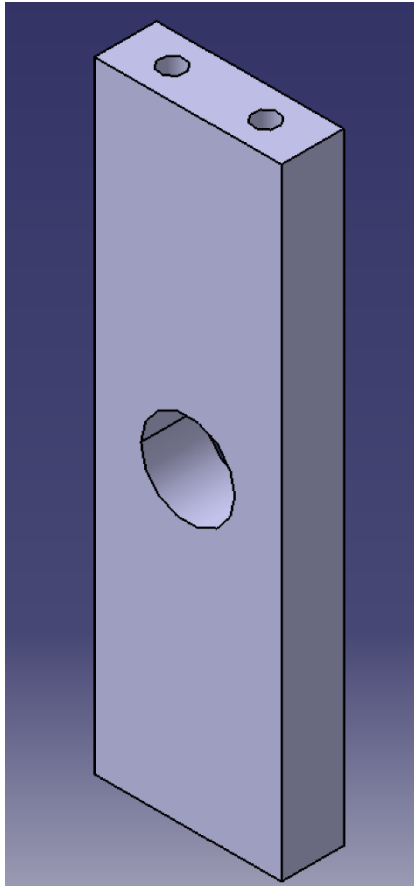
Dessin de définition support galet



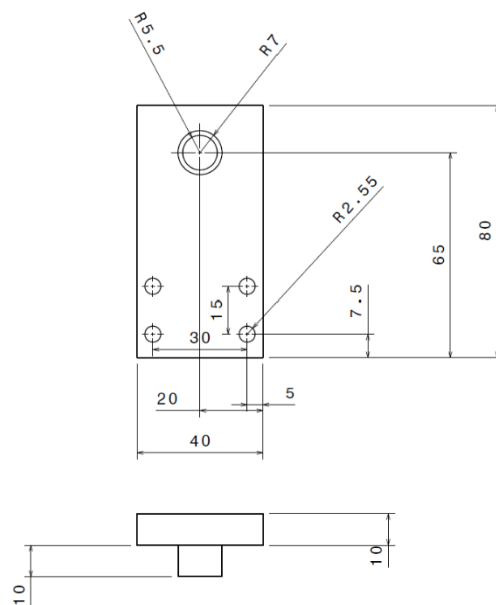
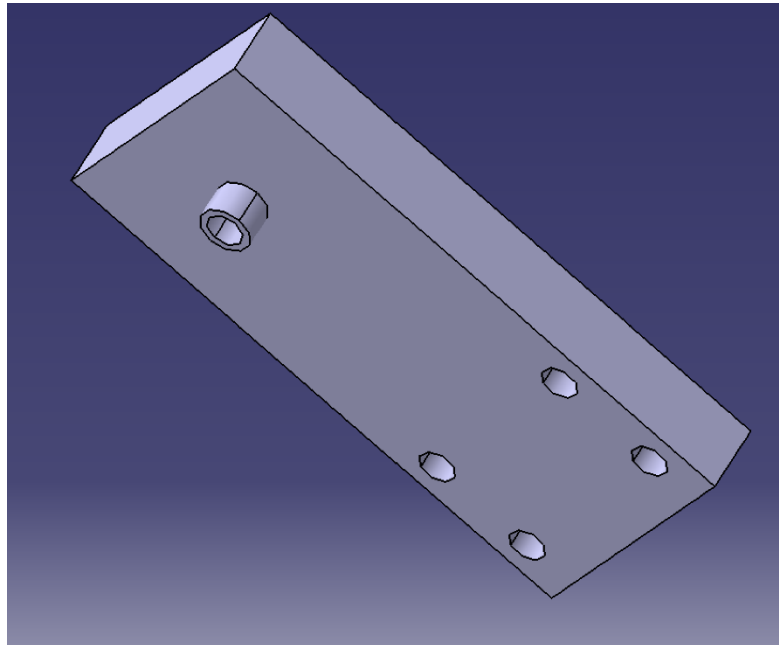
Profil du bec de bord d'attaque



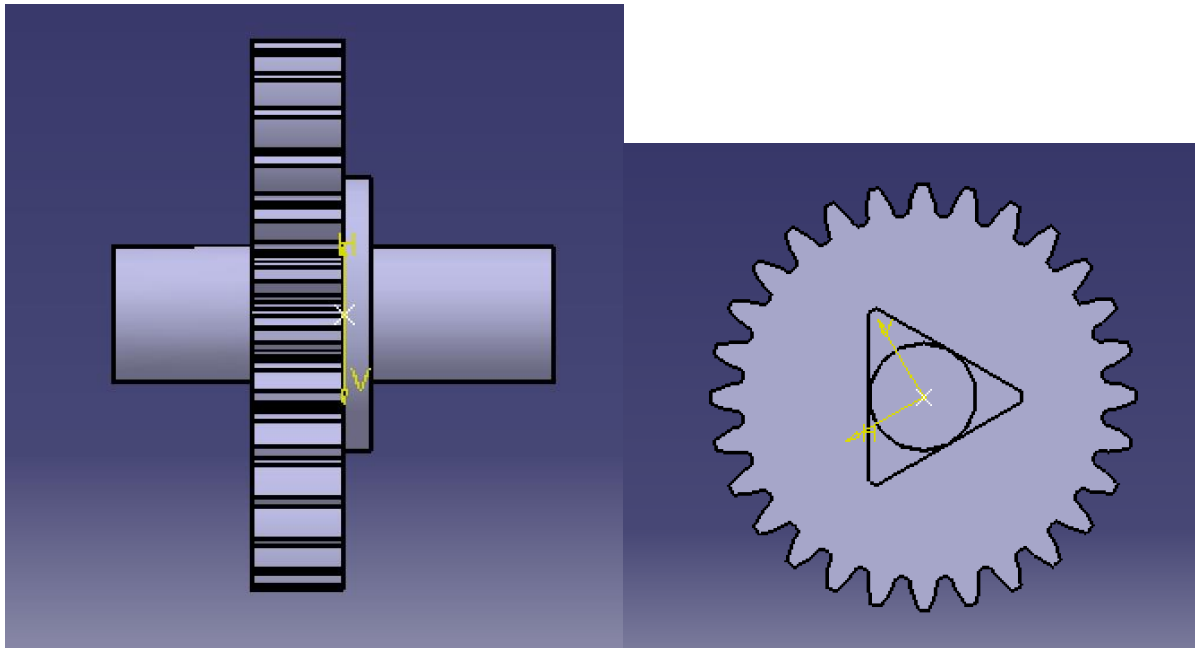
Soutien crémaillère



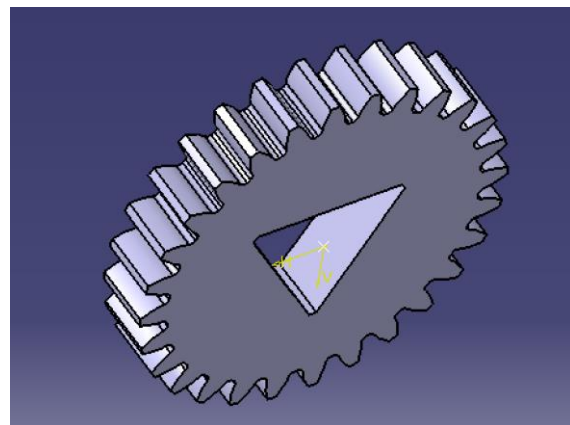
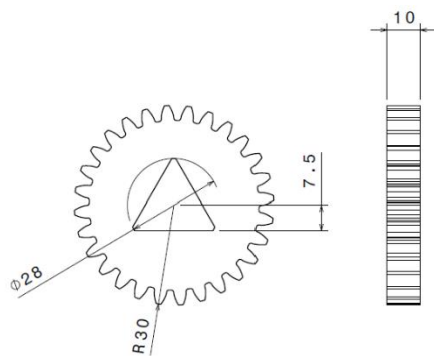
Soutien crémaillère supérieure



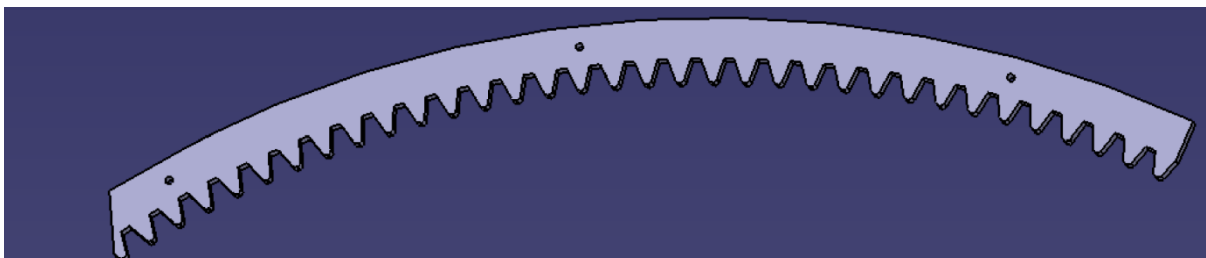
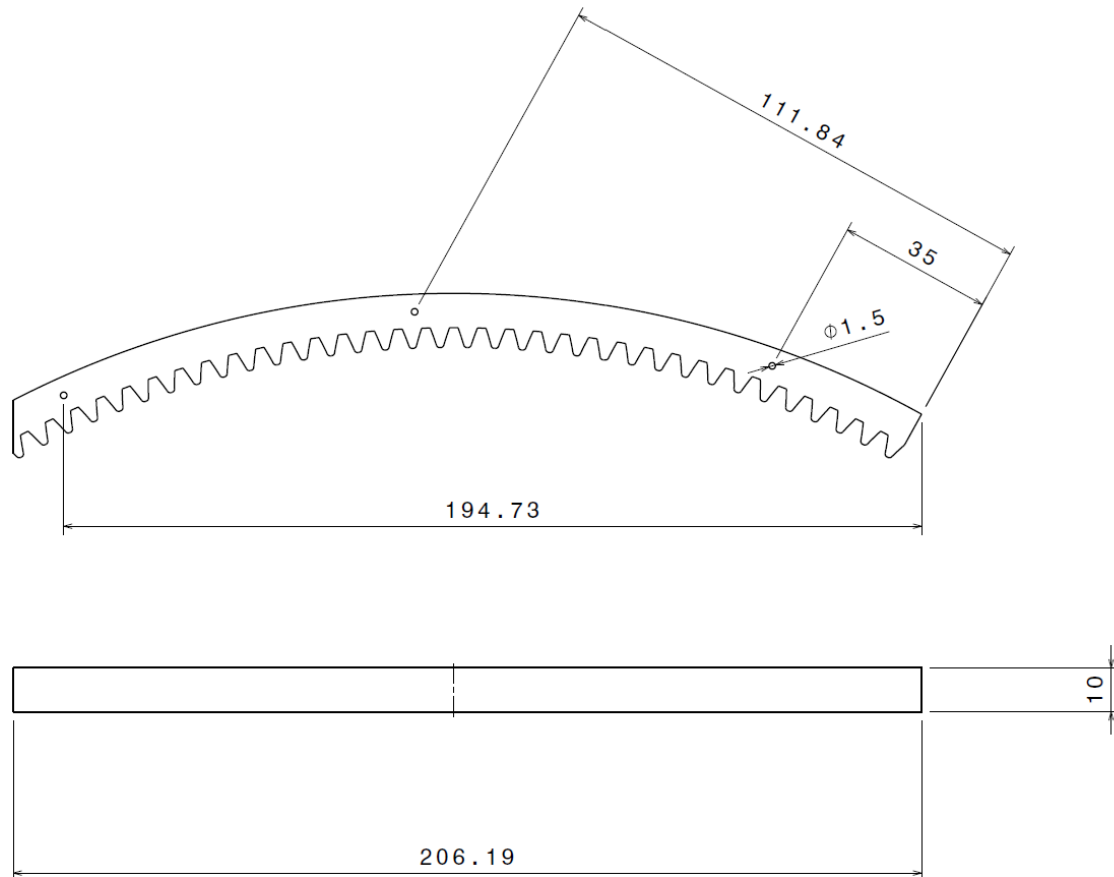
Montage pignon-crémaillère



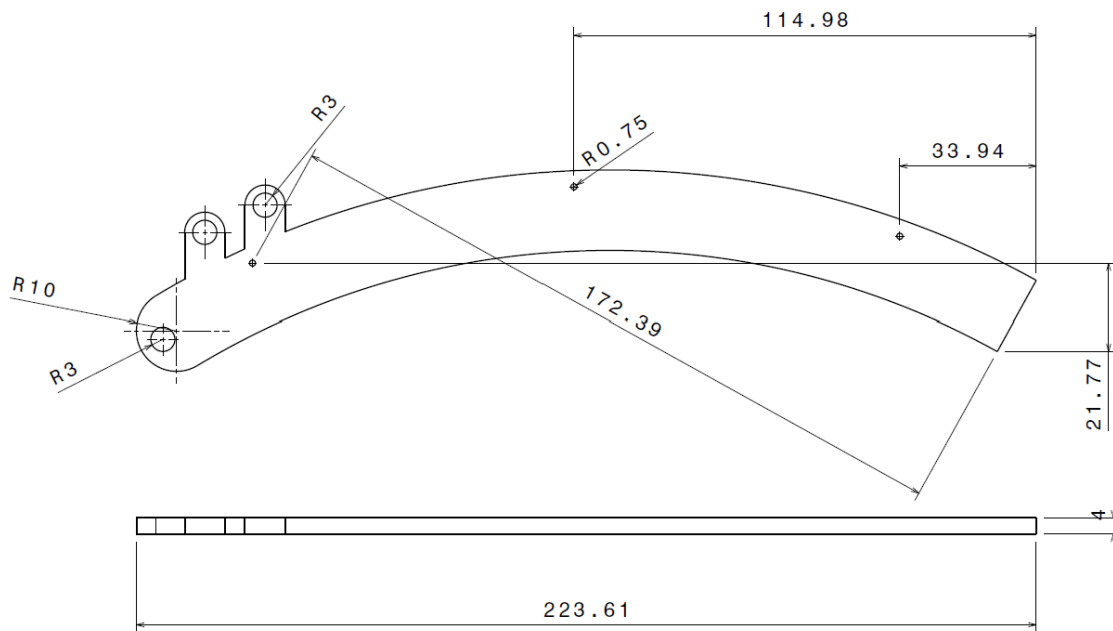
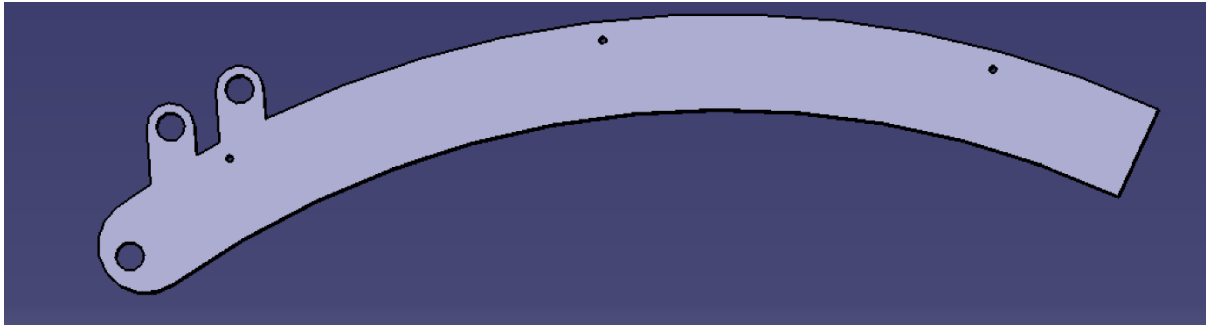
Pignon



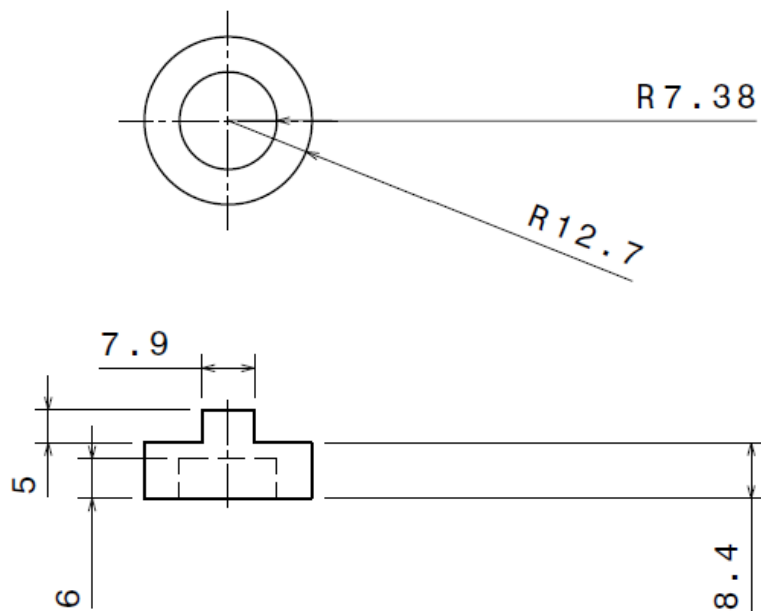
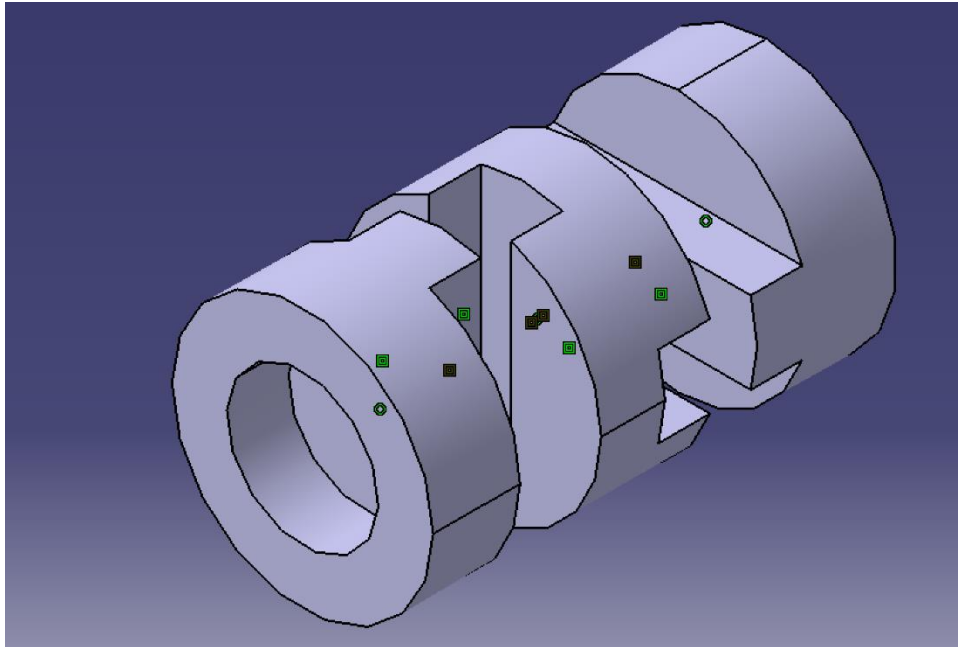
Crémaillère

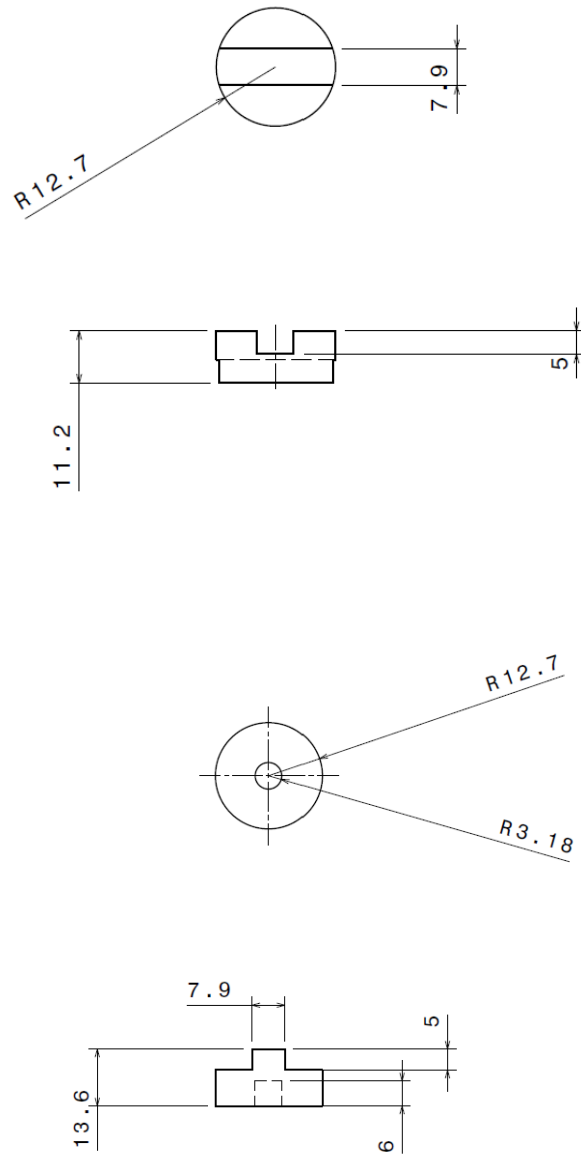


Guide crémaillère

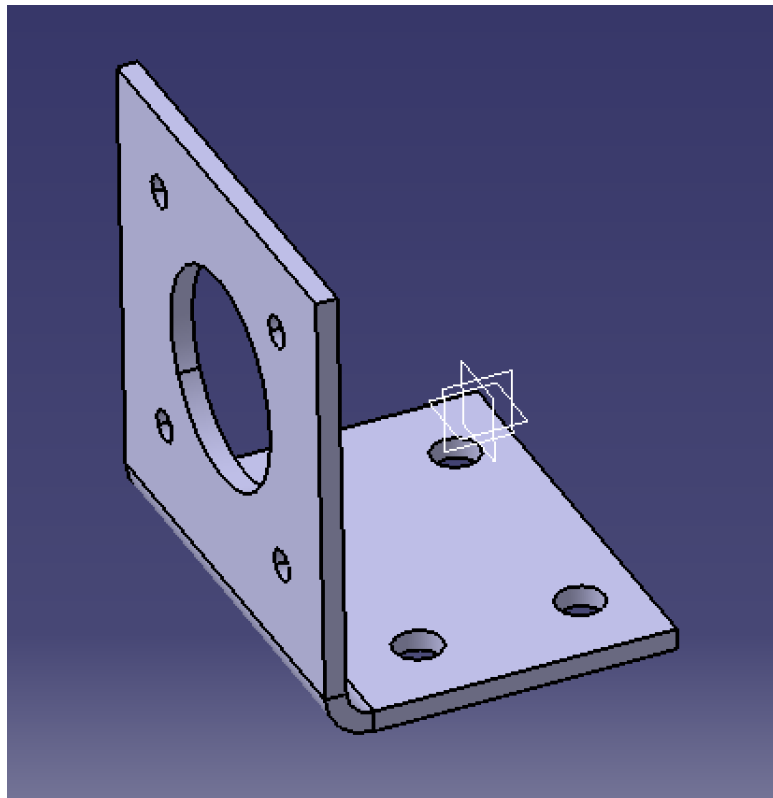
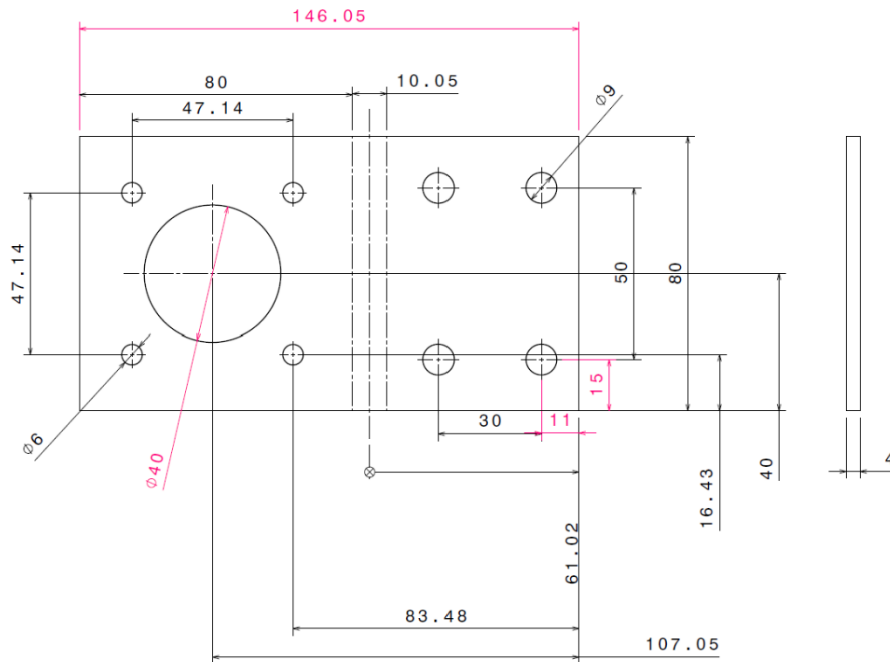


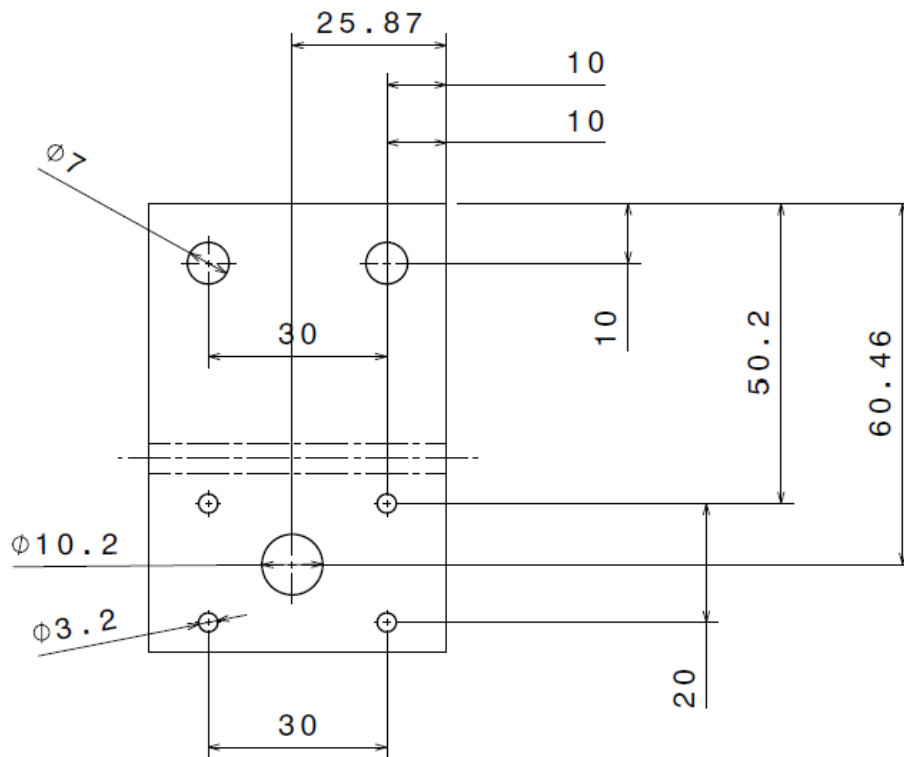
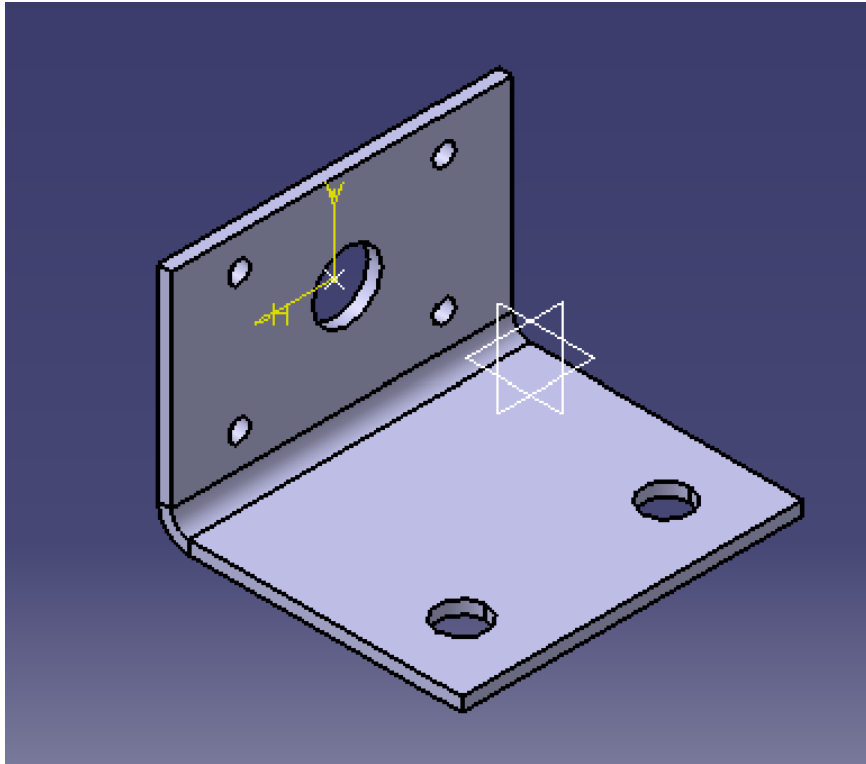
Joint Oldham

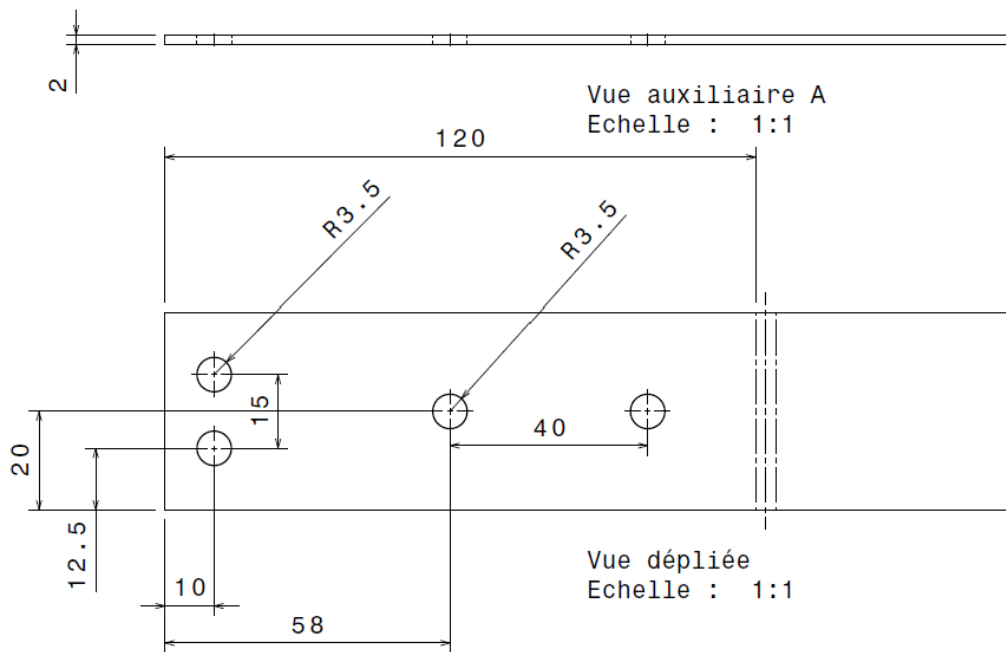
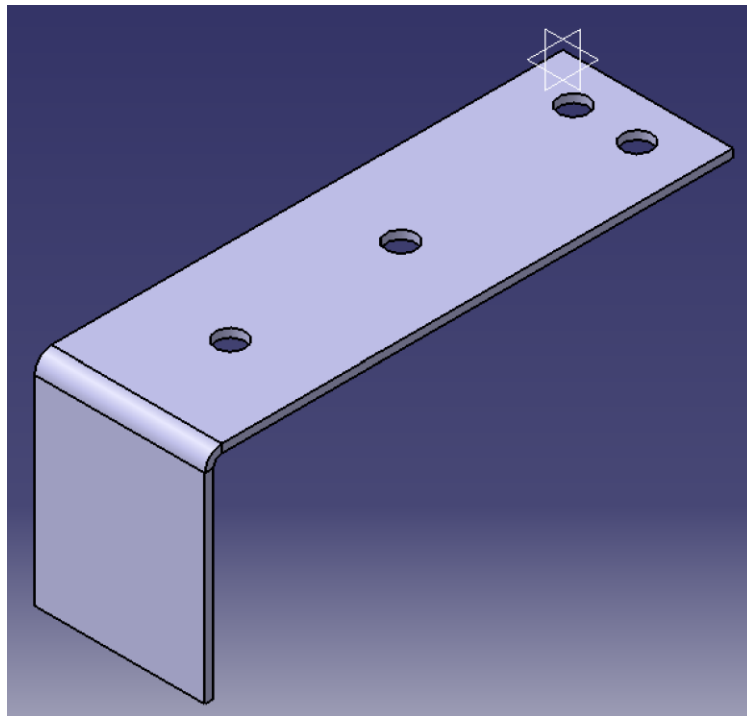




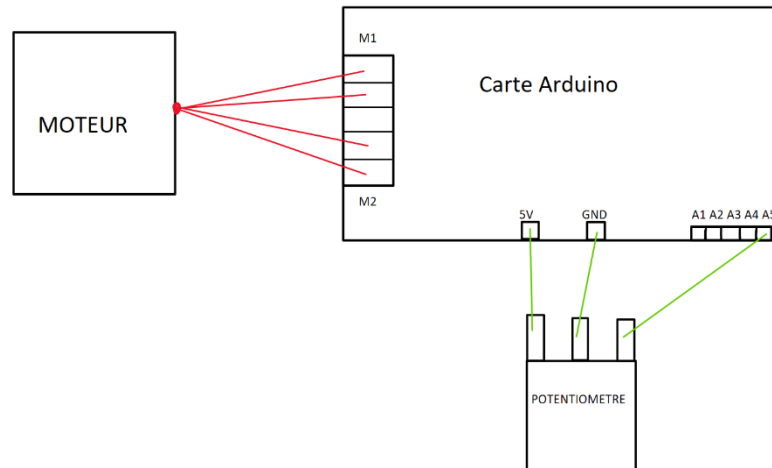
Documents tôlerie







Montage électrique



Code Arduino

```
1  #include <Wire.h>
2  #include <Adafruit_MotorShield.h>
3  #include "utility/Adafruit_MS_PWM_ServoDriver.h"
4
5  Adafruit_MotorShield AFMS = Adafruit_MotorShield();
6  Adafruit_StepperMotor *myMotor = AFMS.getStepper(400, 1);
7
8
9  const int potPin = A0;
10
11  // Configuration système
12  const int maxAngle = 30;           // Angle d'attaque maximal simulé
13  const int courseMM = 100;         // Longueur totale du déplacement linéaire
14  const int pasParTour = 400;      // Nombre de pas par tour moteur
15  const float avanceParPas = 0.5;  // mm par pas (ex. si 1 tour = 100 mm)
16
17  int positionActuelle = 0;
18
19  void setup() {
20    Serial.begin(9600);
21    AFMS.begin();
22    myMotor->setSpeed(60);           // Vitesse en RPM
23  }
24
25  void loop() {
26    // Lecture du potentiomètre (0 à 1023)
27    int potValue = analogRead(potPin);
28
```