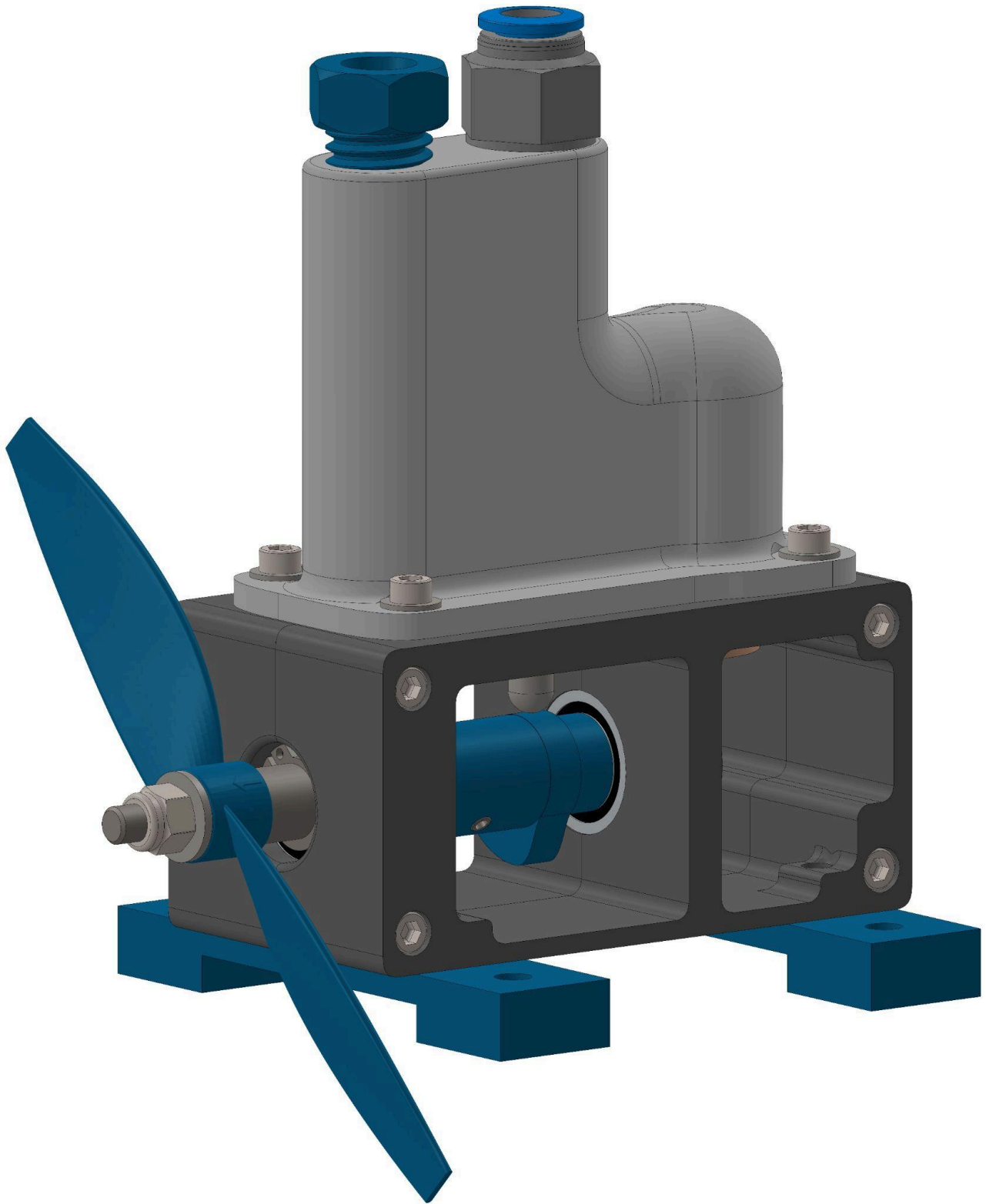


# Rapport de projet 3A : Prototypage d'un moteur pneumatique

LARROSA Adrien



## Sommaire :

<b>I/ Introduction.....</b>	<b>3</b>
Mise en contexte.....	3
Problématique.....	3
<b>II/ Analyse, méthodes et gestion de projet.....</b>	<b>4</b>
Planification projet.....	4
Cahier des charges.....	4
Diagramme pieuvre.....	5
Veille informationnelle.....	5
Schéma technologique.....	8
Dimensionnement.....	9
1 - Définition des premières dimensions.....	9
2 - Loi entrée-sortie.....	10
3 - Tracé du profil de la came.....	11
4 - Dimensionnement global, avec l'hélice.....	11
5 - Section minimale.....	13
1. Calcul du besoin : Débit volumique de la chambre (Qv).....	13
2. Évaluation de l'apport : Débit d'entrée pneumatique (Qentree).....	13
3. Validation par le coefficient de débit.....	14
<b>III/ Conception, réalisation et résultat.....</b>	<b>15</b>
Piston.....	15
Bielle.....	16
Tiges de soupapes.....	17
Etanchéification du haut moteur.....	18
Arbre moteur (avec came et excentrique).....	19
Carters (haut et bas).....	21
Assemblage.....	24
Banc d'essai.....	25
1. Conception mécanique du freinage.....	25
2. Acquisition et traitement des données (Arduino).....	26
3. Exploitation des mesures.....	27
<b>IV/ Conclusion et retour critique sur le projet.....</b>	<b>27</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>28</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>44</b>

## I/ Introduction

### Mise en contexte

La motorisation de nos véhicules est un enjeu actuel, écologique et technique. On observe aujourd'hui qu'en moyenne, la combustion d'1L de carburant émet 2,28kg de CO<sub>2</sub>. Cette pollution induit la recherche d'une alternative énergétique à la combustion du carburant.

Si la transition énergétique est bien engagée pour l'automobile, l'aéronautique fait face à un obstacle physique majeur. Contrairement au carburant, dont la masse diminue à mesure qu'il est consommé, une batterie conserve exactement la même masse du décollage à l'atterrissage. Ce poids constant rend l'électrification totale des avions rédhibitoire pour le moment.

À la valeur de la masse constante de l'engin volant, qui le rend de façon constante, énergivore du début à la fin du déplacement, s'ajoute la problématique de la limite des cycles de charge/décharge des batteries électriques altérant la durée de vol et le temps d'immobilisation au sol..

Une des solutions est le moteur pneumatique : une approche "low-tech".

### Problématique

Pour répondre à ces contraintes et expérimenter le potentiel de cette technologie, j'ai déterminé la problématique suivante :

Motoriser un avion de modélisme avec une énergie pneumatique.

## II/ Analyse, méthodes et gestion de projet

### Planification projet

La résolution de cette problématique a nécessité la mise en œuvre d'une planification et organisation afin de respecter les délais imposés.

J'ai organisé mon travail avec une planification GANTT.

Étant seul dans ce projet, les contraintes notables ont été les dates de rendu, et les délais des commandes de pièces.

Pour limiter les délais et le temps de production, j'ai utilisé des pièces déjà disponibles dans l'atelier, mais, concernant l'usinage, j'ai été contraint par la disponibilité des professeurs encadrants.

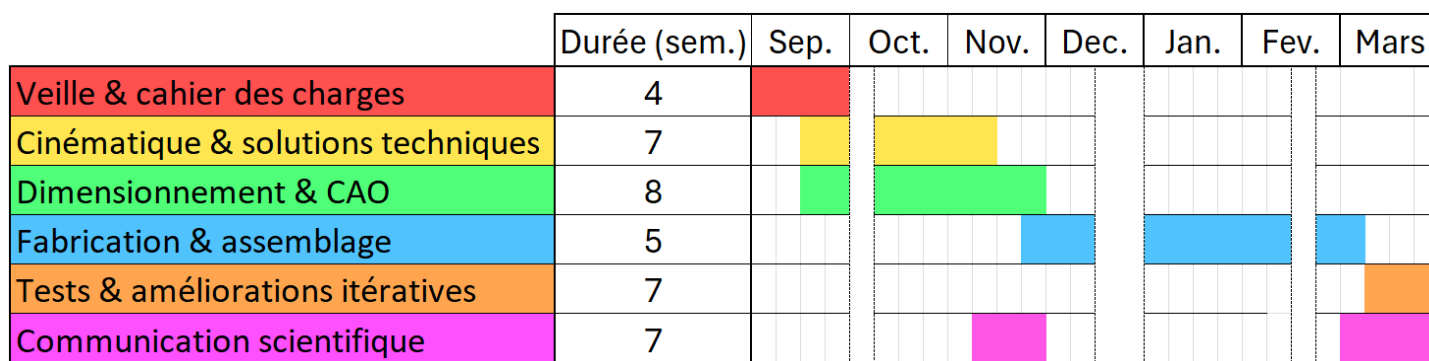


Figure 1: Diagramme de GANTT compressé, planning du projet.

### Cahier des charges

De ces recherches j'ai établi un cahier des charges et un diagramme pieuvre :

N°	Fonction	Valeur	Niveau	Flexibilité	Contrôle
<b>FP1</b>	Propulser l'avion	★★★	50 W à 4 Bar	- 10 W	Frein de Prony
<b>FP2</b>	Contrôle de la vitesse de rotation	★★★	1500 tr/min	± 1000 tr/min	Tachymètre laser
<b>FS1</b>	Remplir et fournir une pression pneumatique	★★★	6 bars	- 2 bars	Manomètre
<b>FC1</b>	S'adapter au châssis d'avion de modélisme (MIP+MAP)	★★	Fixe au châssis	Aucune	Visuel
<b>FC2</b>	Permettre la maintenance avec des outils simples	★	Démontage/remontage du groupe motopropulseur en < 5 min	Aucune	Test de montabilité

Figure 2 : Cahier des charges.

La majorité des niveaux de performance sont définis en fonction des performances des avions de modélisme disponibles sur le marché.

## Diagramme pieuvre

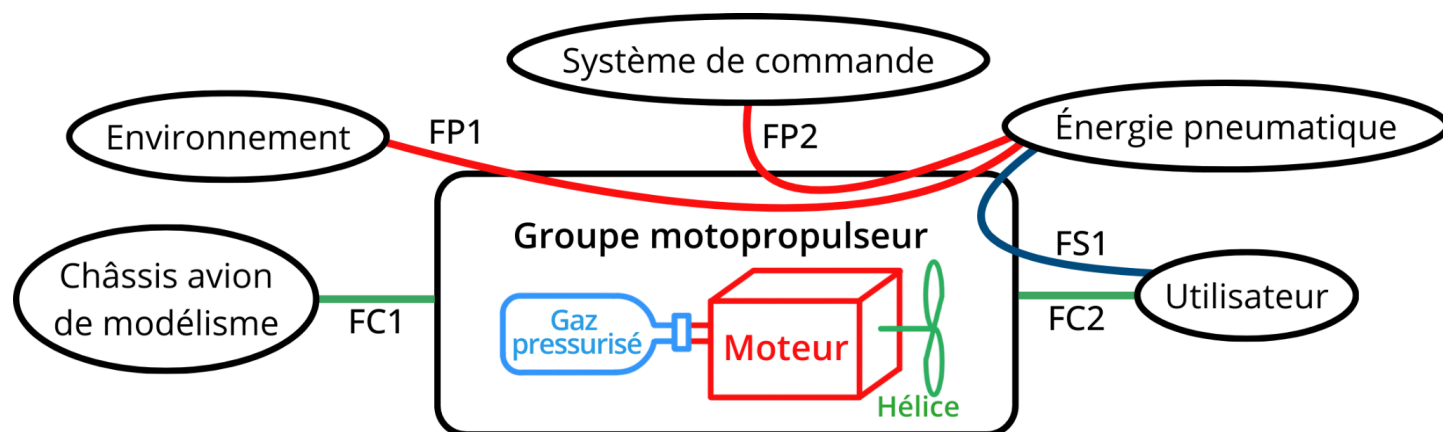


Figure 3 : Diagramme pieuvre du moteur pneumatique de l'avion de modélisme.

## Veille informationnelle

Dès la définition de la problématique, en parallèle du cahier des charges et durant le développement de la solution technique, j'ai réalisé une veille informationnelle.

En science ouverte : Projets de loisirs, modélisme en impression 3D.

Avantages des moteurs pneumatiques :

- + Pas de rejet polluant lors de l'utilisation.
- + Stockage énergétique à très faible déperdition.
- + Pas de combustion.

Inconvénients des moteurs pneumatiques :

- Faible rendement & autonomie.
- Instabilité des performances.
- Besoin de compression air via énergie verte.

Une technologie répandue du moteur pneumatique pour aéromodélisme est l'activation de l'admission par le piston lui-même. Cette solution est techniquement simple mais avec un très mauvais rendement.

Lors de la phase de montée du piston, la tige active la soupape à bille ce qui laisse entrer la pression pneumatique en opposition au mouvement du piston, en addition à la compression de l'air déjà présent dans la chambre (pression atmosphérique).

Ensuite, lors de la phase de descente du piston, la tige relâche la soupape à bille pendant la course, ne permettant pas d'appliquer la force maximale pendant toute la descente du piston, il y a seulement la détente du gaz qui s'applique sur le piston et non plus la pression d'admission complète.

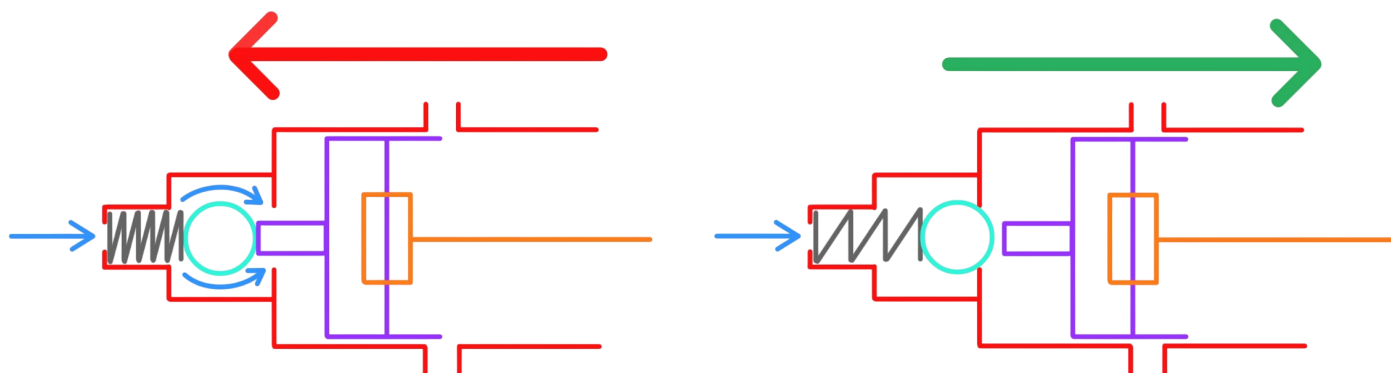


Figure 4 : Schéma explicatif du mauvais rendement du système à activation de la soupape par le piston - à droite en phase de montée, à gauche en phase de descente.

En rouge, le bâti de la soupape à bille et la chemise du piston avec un échappement latéral.  
En gris le ressort et en bleu turquoise la bille de la soupape (clapet anti-retour).  
En violet, le piston et sa tige (en une pièce).  
En orange, la bielle.  
En bleu, le flux de la pression pneumatique d'admission.

En conclusion, il faudrait lors de la phase de montée une tige de longueur nulle, et lors de la phase de descente une longueur activant la soupape sur la totalité de la course du piston.

Ce constat justifie mon choix d'une architecture de moteur à soupape en tête.

Cette architecture demande l'étanchéification non plus seulement du piston/cylindre mais aussi des tiges de soupapes (voir schéma technologique p.8).  
Pour répondre à cette contrainte, j'ai imaginé une activation sans contact des soupapes par répulsion magnétique. Cette solution, très peu documentée, est infaisable dans ce cas d'étude à cause de la pression pneumatique trop importante par rapport à la dimension de la soupape.  
Voir annexe 1 pour explication de l'infaisabilité.

La solution retenue est l'utilisation de membranes flexibles et déroulantes, très présentes sur des systèmes pneumatiques et hydrauliques.

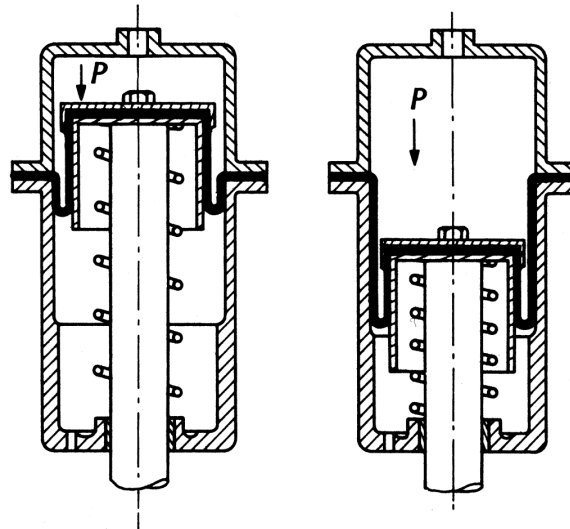


Figure 5 : Membrane à déroulement - [1]

Afin de respecter la fonction de service du cahier des charges (FS1), les tests vont pouvoir être réalisés en alimentant le moteur avec un compresseur pneumatique. Toutefois, à terme, le système doit être autonome. La solution envisagée est l'utilisation de bouteilles en PET offrant un des meilleurs rapports entre la masse du réservoir et la quantité d'air pressurisé qu'elles peuvent contenir, tout en restant particulièrement abordables. Cette recherche est détaillée dans l'annexe 2.

#### Conclusion de veille :

Cette technologie est délaissée à cause de la performance et de l'autonomie limitées des véhicules, elle est préférée dans des systèmes sans contrainte d'autonomie, par exemple l'outillage pneumatique.

## Schéma technologique

Le moteur est un monocylindre à soupapes en tête ("overhead valve" ou OHV) composé :

- d'un système Piston/Bielle/Manivelle,
- de deux cames/tiges sur le vilebrequin, activant en opposition de phase, l'admission et l'échappement du flux d'air,
- de soupapes réalisées par des clapets anti-retour à billes.

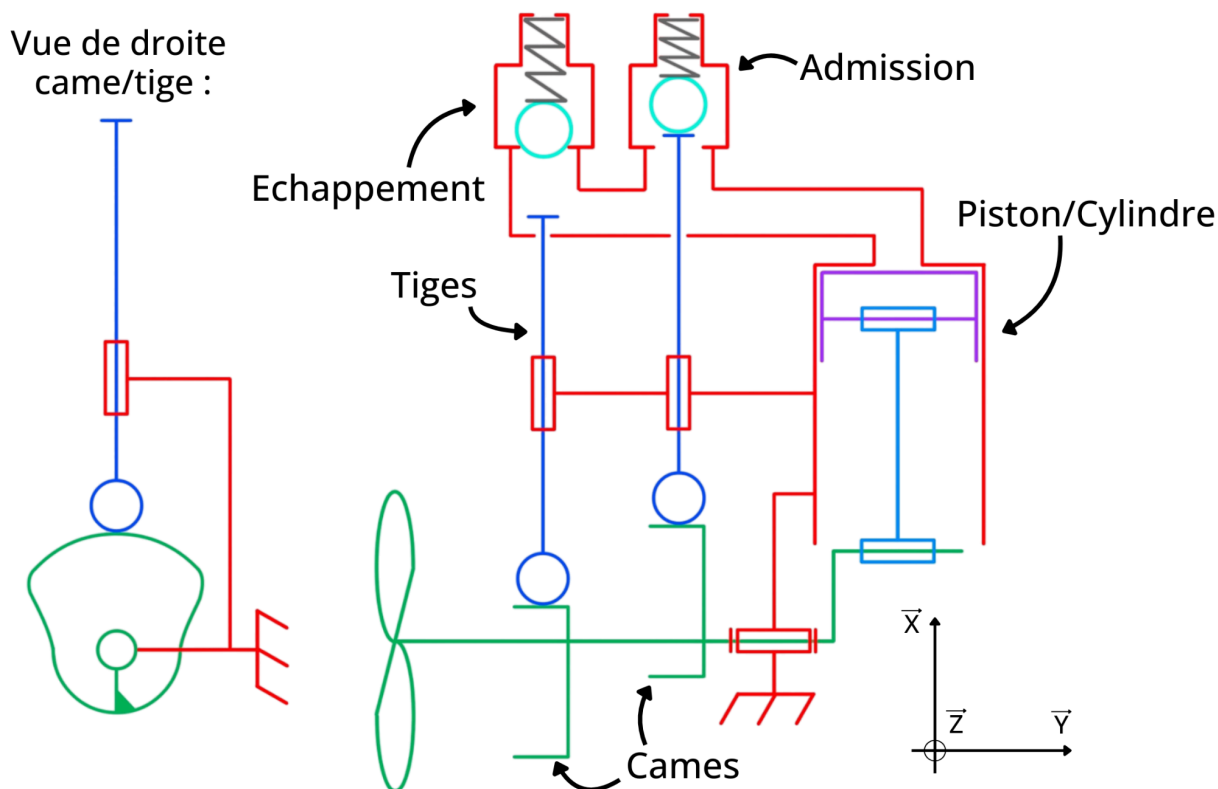


Figure 6 : Schéma cinématique du moteur pneumatique

Démarrage : Inertie du moteur entraînée par l'utilisateur à l'aide de l'hélice.

Cycle de fonctionnement :

- Admission (descente) : Le piston descend par inertie → La came pousse la tige → La bille se soulève → L'air comprimé entre dans la chambre et pousse le piston.
- Échappement (remontée) : Le piston remonte par inertie → La came pousse la tige → La bille se soulève → L'air détendu est expulsé de la chambre.

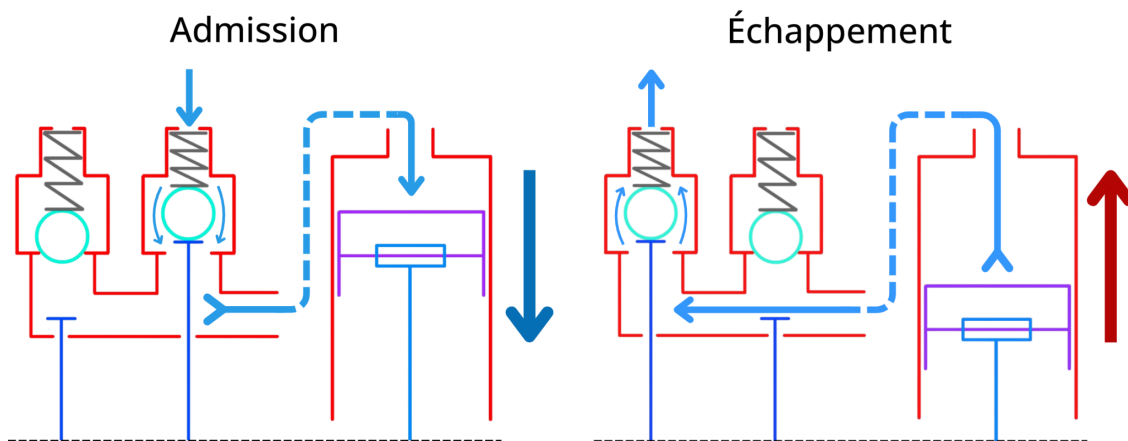


Figure 7 : Schéma du cycle de fonctionnement du système - Flux d'air.

Pour faciliter la compréhension, ce graphique imite le cycle Beau de Rochas.  
 Nota bene : ce cycle est exclusivement utilisé pour décrire les moteurs thermiques.

### Cycle de Beau de Rochas

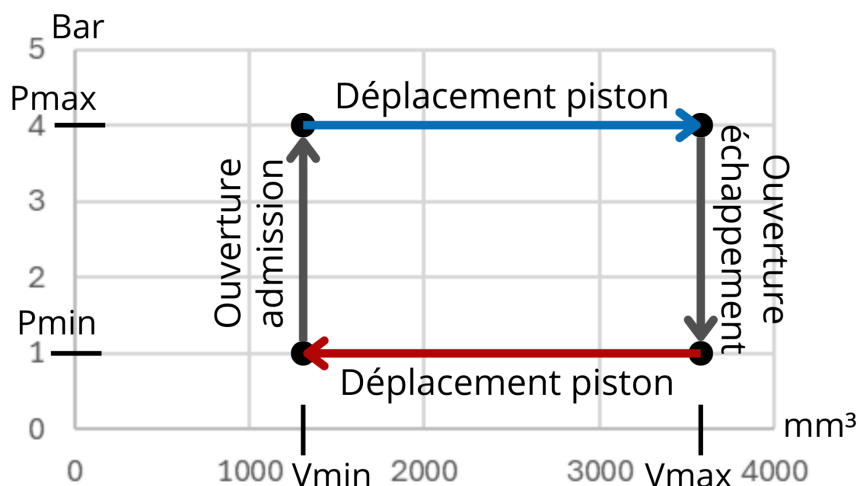


Figure 8 : Imitation simplifiée du cycle Beau de Rochas.

## Dimensionnement

### 1 - Définition des premières dimensions

Grâce à ma veille en science ouverte, aux performances définies dans le cahier des charges et aux conventions de dimensionnement des systèmes bielle-manivelle, j'ai pu déterminer les cotes globales de mon moteur.

- Pression admission minimale de 4 bars, donnée provenant de mon cahier des charges.
- Diamètre d'alésage du cylindre : 16 mm, donnée provenant de ma veille en science ouverte.
- Rapport course/alésage = 1 (moteur carré),

Il existe trois familles de rapport course/alésage :

- Longue course (course > alésage) = couple important à bas régime.

- Super carré (alésage > course) = haut régime (vitesse rotation moteur).
- Carré (alésage = course) = compromis entre le couple et le régime moteur.

Mon choix s'est tourné vers le moteur à rapport carré pour sa polyvalence.

→ Rayon manivelle :

Par convention mécanique le rayon de la manivelle est égal à la moitié de la course du piston.

$$R_{\text{manivelle}} = \frac{\text{course du piston}}{2}$$

→ Rapport longueur de bielle / rayon de manivelle (L/R) :

Une bielle plus longue est préférée car elle réduit l'angle d'inclinaison et donc les efforts latéraux sur les parois du cylindre, mais, elle impose un bloc-moteur plus haut, ce qui augmente l'encombrement global du système.

Mon choix est un compromis entre une bielle courte ( $L=1,5 \times R$ ) et une bielle longue ( $L=8 \times R$ ), avec un rapport moyen ( $L=3,25 \times R$ ).

Les objectifs de performance du cahier des charges sont volontairement élevés afin de prévoir les pertes totales du système.

## 2 - Loi entrée-sortie

Détermination de la loi entrée-sortie  $f(x) = f(\alpha)$ , l'objectif est de connaître la position du piston (en x) par rapport à l'angle du vilebrequin (en  $\alpha$ ).

Dans mon cas, cette loi permet de calculer la vitesse du piston et le couple par rapport à la position du piston.

Mais cela n'est pas suffisant pour le dimensionnement du moteur afin de respecter les valeurs de performances : vitesse de rotation, couple et donc puissance.

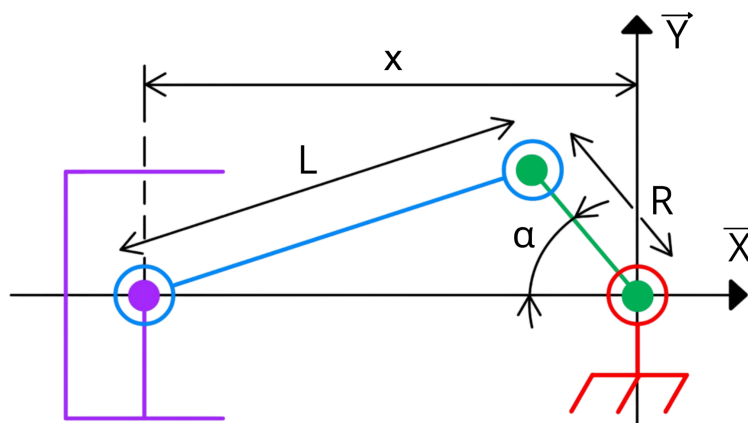


Figure 9 : Schéma cinématique - Loi entrée-sortie.

$\alpha$  = Angle manivelle (entrée)

x = Position piston (sortie)

R = Rayon manivelle (ou rayon vilebrequin)

L = Longueur bielle

$$x(\alpha) = R \cdot \cos(\alpha) + \sqrt{L^2 - R^2 \cdot \sin^2(\alpha)}$$

Voir annexe 3 pour le détail des formules et des courbes.

### 3 - Tracé du profil de la came

La came est divisée en 16 parties, sur l'arbre moteur il y a deux came en opposition de phase : pour l'admission et l'échappement.

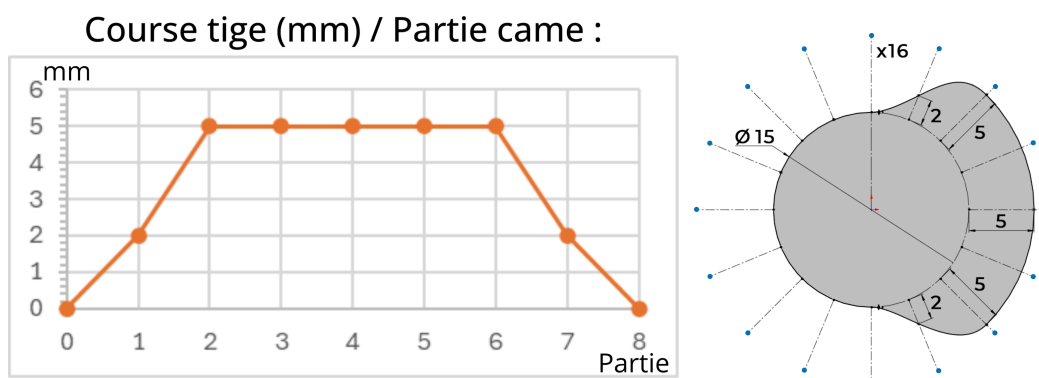


Figure 10 : Courbe et esquisse du profil de came.

### 4 - Dimensionnement global, avec l'hélice

Le moteur doit être dimensionné en fonction de son application : l'aéromodélisme. Pour cela il faut calculer la puissance réelle du système, composée de la puissance générée par le moteur combinée à celle générée par l'hélice.

Après conception du moteur, je détermine quels seront les paramètres modifiables pour ajuster les performances en fonction des critères du cahier des charges :

Importante hypothèse de simplification des calculs :

$$U \equiv V \equiv \frac{R_h}{2} \times \omega$$

Pour réduire le nombre d'inconnues je pars du principe que la vitesse des pales ( $U$ ) est égale à la vitesse du fluide ( $V$ ), elle-même égale à la vitesse de rotation ( $\omega$ ) prise à mi-rayon de l'hélice ( $R_h$ ).

Ces simplifications permettent un dimensionnement plus rapide, l'intérêt du prototype étant de pouvoir régler ce dimensionnement pendant les essais.

- P = Puissance réelle (W)
- P<sub>m</sub> = Puissance générée par le moteur (W)
- P<sub>h</sub> = Puissance générée par l'hélice (W)
- U = Vitesse des pales (m/s)
- V = Vitesse du fluide (m/s)
- $\omega$  = Vitesse de rotation (rad/s)
- R<sub>h</sub> = Rayon de l'hélice (m)
- p = Pression d'admission (Pa)
- p<sub>0</sub> = Pression atmosphérique (Pa)
- S = Surface de l'alésage (m<sup>2</sup>)
- L<sub>c</sub> = Course piston (m)
- $\rho$  = masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>)
- C = Couple du moteur (N.m)

En dimensionnant le moteur dans son ensemble je suppose que la puissance générée par le moteur ( $P_m$ ) est égale à la puissance générée par l'hélice ( $P_h$ ) :

$$P_m = P_h$$

$$C \times \omega = \frac{\pi}{16} \times \rho \times R_h^5 \times \omega^3$$

De cela je détermine la vitesse de rotation ( $\omega$ ):

$$\omega = \sqrt{\frac{16 \times C}{\pi \times \rho \times R_h^5}} \Leftrightarrow \omega = \sqrt{\frac{8}{\pi^2} \times \frac{(p - p_0) \times S \times L_c}{\rho \times R_h^5}}$$

Ainsi que le couple ( $C$ ) :

$$C = \frac{(p - p_0) \times S \times L_c}{2\pi}$$

Pour enfin obtenir la puissance réelle ( $P$ ) générée par le système complet :

$$P = \frac{(p - p_0) \times S \times L_c}{2\pi} \times \sqrt{\frac{8 \times (p - p_0) \times S \times L_c}{\pi^2 \times \rho \times R_h^5}}$$

A présent j'isole les paramètres influant sur la puissance, je réorganise les éléments en deux groupes :

- $G1$  : Les variables qui m'intéressent :  $(p-p_0)$ ,  $S$ ,  $L$ , et  $R$ .
- $G2$  : Le reste, les constantes.

$$P = G1 \times G2$$

$$G1 : [(p - p_0) \times (p - p_0)^{1/2}] \times [(S \times L) \times (S \times L)^{1/2}] \times \left[ \frac{1}{(R^5)^{1/2}} \right]$$

$$G2 : \frac{1}{2\pi} \times \frac{8^{1/2}}{(\pi^2)^{1/2} \times \rho^{1/2}} = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \times \sqrt{\rho}}$$

J'obtiens les paramètres influant la puissance ( $G1$ ) :

$$G1 = \frac{(p - p_0)^{3/2} \times (S \times L_c)^{3/2}}{R_h^{5/2}}$$

De cette formule, après conception du moteur, deux paramètres sont modifiables pour régler les performances en fonction du cahier des charges :

$$P \propto (\Delta p)^{3/2} \times R_h^{-5/2}$$

- La pression d'admission ( $p$ ).
- Le choix de l'hélice, plus particulièrement son rayon ( $R_h$ ).

L'augmentation du rayon de l'hélice réduit la vitesse de rotation et accroît le couple. Une grande hélice implique donc un régime plus faible pour un couple plus élevé, simplification qui sera retenue pour le dimensionnement.

La vitesse de l'avion ( $V$ ) et la vitesse de rotation de l'hélice ( $U$  ou  $\omega$ ) sont généralement indépendantes. Un avion peut mettre plein gaz (haut  $\omega$ ) tout en étant à l'arrêt sur la piste ( $V = 0$ ).

## 5 - Section minimale

L'objectif de cette étape est de définir et de valider la section minimale de la conduite d'air ( $S_{c\ mini}$ ), afin de garantir que le débit d'entrée d'air dans le moteur ( $Q_{entree}$ ) ne soit jamais inférieur au besoin en débit volumique de la chambre du piston ( $Q_v$ ).

Pour éviter tout phénomène d'étranglement qui briderait les performances du moteur, l'alimentation doit être capable de fournir plus d'air que ce que le volume du cylindre réclame à la vitesse de déplacement maximale du piston.

### 1. Calcul du besoin : Débit volumique de la chambre ( $Q_v$ )

La première étape consiste à déterminer le débit volumique maximal aspiré par la chambre du piston. Ce débit est atteint lorsque le piston se déplace à sa vitesse maximale.

Formule littérale :

$$Q_v = S \times v_{max}$$

Où :

- $S$  : Surface de l'alésage du cylindre ( $201,06\ mm^2$ )
- $v_{max}$  : Vitesse maximale atteinte par le piston ( $1767,05\ mm/s$ )

*Application numérique :*

Le calcul nous donne un besoin volumique maximal  $0,000355\ mm^3/s$

### 2. Évaluation de l'apport : Débit d'entrée pneumatique ( $Q_{entree}$ )

Il faut ensuite calculer le débit d'air réel fourni par le réseau pneumatique à travers la restriction la plus forte du circuit (la section minimale).

Ce débit dépend directement de la section de la conduite, de la pression d'alimentation et des caractéristiques de l'air.

Les paramètres de notre système sont les suivants :

- $Sc_{mini}$  : Section conduite mini ( $3,14 \times 10^{-5} m^2$ )
- $P_{adm}$  : Pression d'admission minimale garantie (4 bars)
- $\rho$  : Masse volumique de l'air à 20°C ( $1,204 kg/m^3$ )
- $P_0$  : Pression atmosphérique (101325 Pa)

Avec ces paramètres, le débit d'entrée théorique calculé dans la conduite est de :

$$Q_{entree} \approx 0,0221 mm^3/s.$$

### 3. Validation par le coefficient de débit

Afin de valider le choix de la section, il convient d'établir le ratio entre le débit fourni par la conduite et le débit consommé par la chambre, défini comme le coefficient de débit ( $C$ ).

En considérant les pertes de charge comme négligeables, ce coefficient doit être nettement supérieur à 5 ( $C \gg 5$ ). La valeur de 5 est définie par convention.

Formule littérale :

$$C = \frac{Q_{entree}}{Q_v}$$

Application numérique :

$$C = \frac{0,022128}{0,000355} \approx 62,28$$

Avec un coefficient de débit de 62, la section ( $Sc_{mini}$ ) permet un apport d'air 62 fois supérieur au besoin maximal de la chambre. Ce résultat dépassant largement le minimum recommandé de 5, la dimension choisie garantit une alimentation pneumatique optimale, sans aucune restriction de flux.

### III/ Conception, réalisation et résultat

L'ensemble de la conception est réalisée sur logiciel SolidWorks de Dassault Systèmes.

#### Piston

En translation dans le cylindre, il transforme la force de pression du gaz en mouvement linéaire, qui sera ensuite converti en rotation à la bielle.

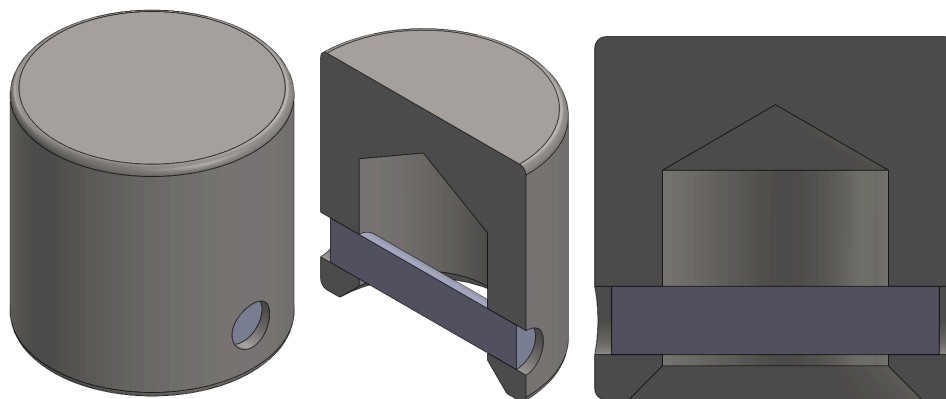
L'étanchéité entre le piston et le cylindre est simplement réalisée par l'ajustement précis entre les deux pièces.

Pour cela, le cylindre a été réalisé avant le piston afin de plus facilement respecter la dimension réelle du cylindre lors de l'usinage.

Ensuite, le cylindre a été pré-rodé avec un outil de polissage cylindrique.

Enfin, le rodage final des pièces se fait lors des premiers fonctionnements du système.

Le piston est en acier standard et l'axe est un foret ARS tronçonné puis collé.



*Figure 11 : Image CAO - Piston et son axe.*

Le piston a été réalisé en tournage CN avec le SOMAB 450 dans le but de réaliser le perçage transversal du piston dans la même phase d'usinage avec un VDI à renvoi d'angle. Cependant, la surface n'étant pas plane, et sans pointage, le foret a glissé durant l'opération ce qui a causé un désalignement de l'axe.

Voir annexe 4 pour la mise en plan et le contrat de phase du piston.

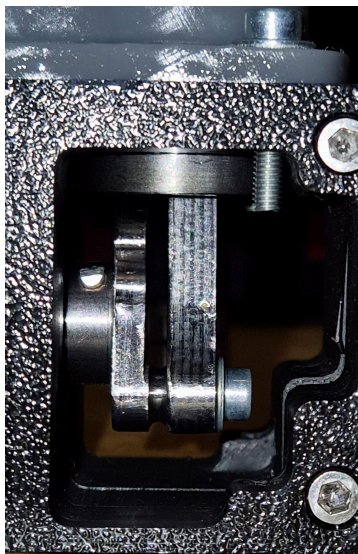


Figure 12 : Image - Défaut angulaire de la bielle, fonctionnement impossible.

Pour corriger cette erreur, le pointage de la pièce étant trop complexe, j'ai réalisé une pièce guide en impression 3D FDM. Cette pièce m'a permis de refaire l'opération avec une perceuse à colonne sans risque que le foret ne glisse, et en positionnant correctement l'alésage.

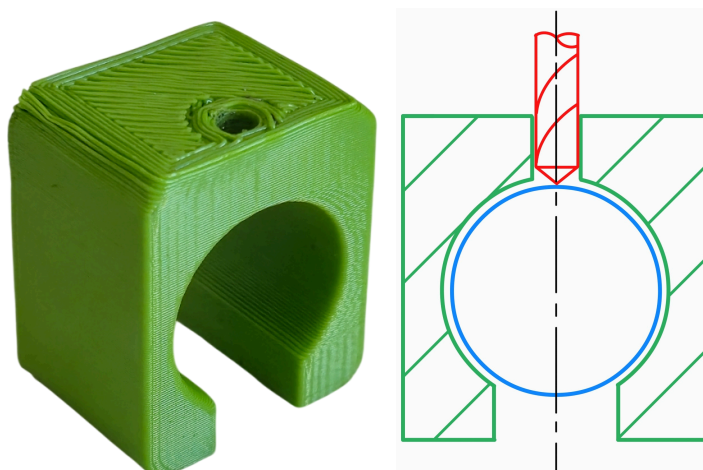


Figure 13 : Image et schéma de la pièce guide pour perçage - Guide, piston, foret.

Grâce à sa forme en U, le guide se déforme de manière contrôlée pour immobiliser parfaitement la pièce lors du serrage de l'étau.

## Bielle

La bielle a pour rôle de convertir le mouvement linéaire du piston en mouvement rotatif au niveau du vilebrequin, la pièce est composée de deux alésages permettant des liaisons pivot, avec le piston et le vilebrequin.

Bien que l'utilisation de paliers lisses (en bronze notamment) soit préférable pour réduire le coefficient de frottement, ils ont été écartés au profit d'un montage direct afin de simplifier la conception du prototype, l'usure étant jugée négligeable dans ce contexte.

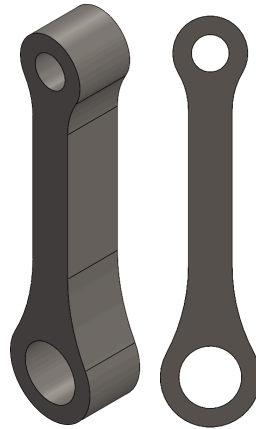


Figure 14 : Image CAO - Bielle.

L'usinage de la bielle a été réalisé en fraisage CN 5-axes sur la DMU Ultrasonic 20 car cette machine disposait déjà de l'outillage miniature adapté à ses faibles dimensions, tout en permettant le contournage extérieur complexe et l'usinage de la semelle en 5-axes positionnés, sans démontage de la pièce.

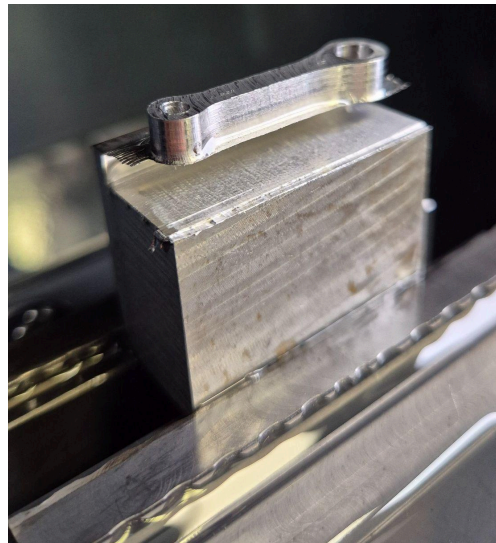


Figure 15 : Image usinage - Opération de fraisage de la semelle.

Voir annexe 5 pour la mise en plan et le contrat de phase de la bielle.

### Tiges de soupapes

Les deux tiges de soupapes en liaison pivot glissant avec le haut moteur suivent le tracé des cames d'admission et d'échappement, activant en opposition de phase les clapets anti-retour.

Le choix d'un contact ponctuel entre la tige et la came privilégie la simplicité de réalisation, bien qu'un contact de roulement avec galet aurait été préférable pour limiter les frottements.

La rainure permet le montage de la membrane d'étanchéification.

La réduction du diamètre permet de pousser la bille du clapet anti-retour sans obstruer le passage de l'air.



Figure 16 : Image CAO - Tige de soupape.

À cause du faible diamètre des tiges, j'ai été contraint d'utiliser un brut déjà au diamètre souhaité, de l'acier stub. La dureté de cette nuance d'acier, corrélée à la petite dimension de la pièce, a rendu l'usinage complexe.

En réalisant la rainure avec un outil trop usé, la matière n'a pas été coupée mais elle a fini par chauffer, trempant ainsi l'acier déjà dur initialement.

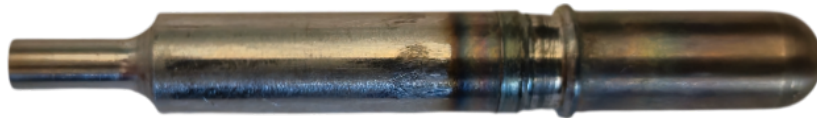


Figure 17 : Image usinage raté - Échauffement de la pièce.

Finalement, le profil supérieur a été fait au tour CN CTX afin de ne pas abîmer la surface fonctionnelle en utilisant un mandrin à pince.

La rainure et la demi-sphère ont été faites en tournage conventionnel RAMO lui aussi équipé d'un mandrin à pince.



Figure 18 : Image usinage - Tige de soupape.

Voir annexe 6 pour la mise en plan des tiges de soupapes.

### Étanchéification du haut moteur

Comme dit précédemment lors de la veille informationnelle, l'architecture moteur choisie requiert l'étanchéification non seulement du piston/cylindre mais aussi des tiges de soupapes.

Pour cela, une membrane par tige est disposée après le guidage de cette dernière.

La membrane élastique est positionnée dans la rainure de la tige et pincée entre les carters haut et bas moteur.

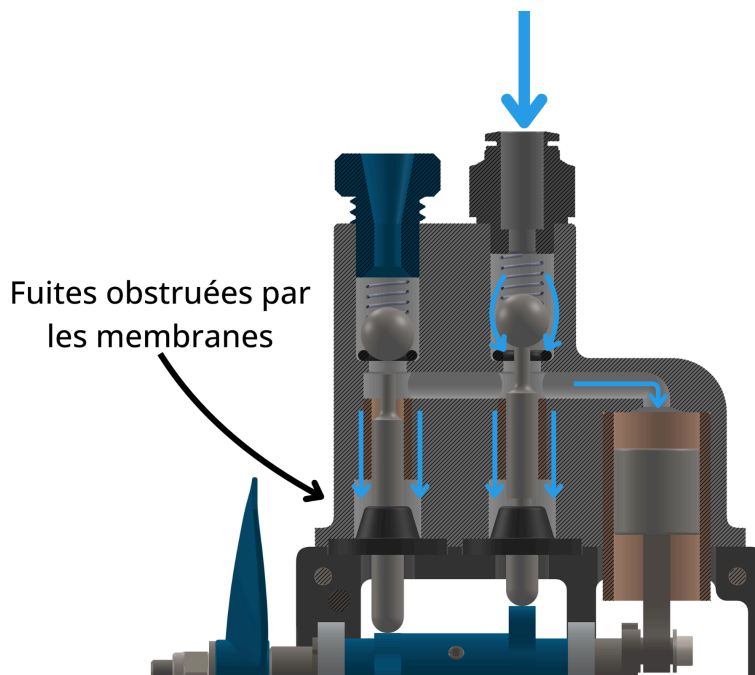


Figure 19 : Image CAO vue en coupe - Représentation de flux d'air bloqué par les membranes.

Les membranes sont en silicone shore 50 permettant une grande élasticité ne limitant pas les mouvements des tiges.

Le moule servant à la réalisation des membranes a été imprimé en 3D FDM, dans les angles quatre vis permettent le maintien en position des deux parties du moule. La partie supérieure est composée d'ouvertures permettant le remplissage du silicone, cependant, cette géométrie est à corriger car elle ne permet pas un remplissage simple.



Figure 20 : Image - Moule impression 3D et membrane silicone.

### Arbre moteur (avec came et excentrique)

L'arbre moteur permet de convertir le mouvement de la bielle en mouvement de rotation entraînant l'hélice. Cette rotation, au moyen des cames, active en opposition de phase les tiges d'admission et d'échappement.

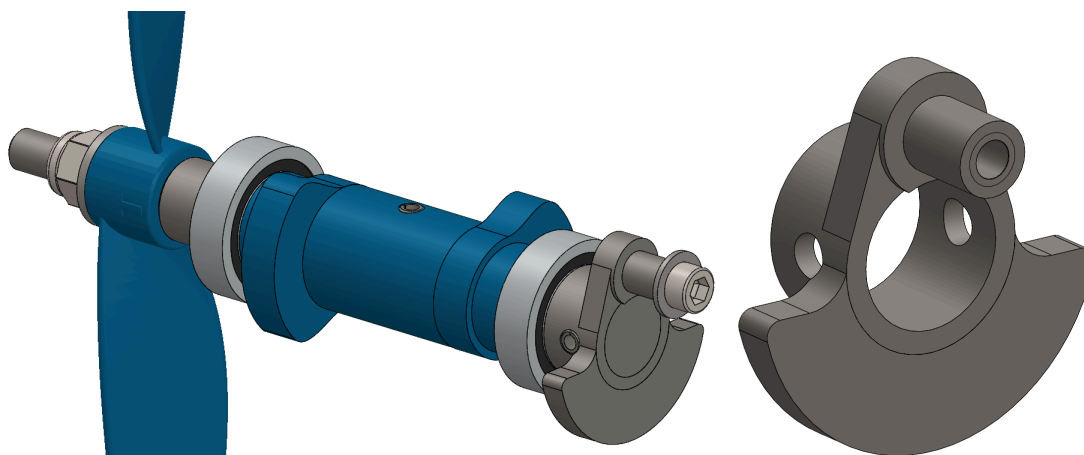


Figure 21 : Image CAO - Arbre moteur.

Composé de plusieurs pièces : l'axe, l'excentrique, la came, les roulements à billes, la tige filetée et l'hélice.

La conception initiale prévoyait un arbre moteur monobloc. Toutefois, cette option a été écartée car la complexité géométrique de la pièce, combinée à ses dimensions réduites, rendait l'usinage trop complexe compte tenu des machines d'usinage à disposition.

L'ensemble est constitué d'un axe principal provenant d'un brut en acier stub déjà au diamètre final et d'un vilebrequin (manivelle). Ce dernier est ajusté sur l'axe, puis immobilisé en rotation et en translation par une goupille. Afin de garantir l'alignement du perçage, le passage de la goupille a été réalisé par un contre-perçage simultané des deux pièces sur une perceuse à colonne.

Ensuite, pour réaliser l'alésage de la goupille permettant d'arrêter la rotation de la came, j'ai dû réaliser un guide de perçage pour assurer le centrage et la position de ce dernier.

De la même manière que le guide pour le piston j'ai pu utiliser une perceuse à colonne sans risque que le foret ne glisse.



Figure 22 : Image - Pièce guide pour le perçage de l'arbre.

Voir annexe 7 pour la mise en plan et le contrat de phases de l'axe.

L'arbre est en pivot grâce à des roulements à bille à contact radial (10x19x5), ce choix s'est fait en fonction du matériel à disposition. Aussi, les roulements en comparaison aux paliers ne nécessitent pas une lubrification continue et sont plus tolérants aux défauts de coaxialité.

Le montage est de type arbre long avec bagues intérieures serrées car l'entraxe entre les deux roulements est supérieur à trois fois le diamètre de l'arbre ( $L > 3 \times d$ ), et que la bague intérieure est tournante par rapport à la charge.

De plus, ce type de montage permet de ne pas contraindre les roulements si la distance entre ces derniers n'est pas précisément respectée.

La détermination de la durée de vie des roulements est négligeable dans le cadre de ce prototypage.

L'usinage du vilebrequin a été réalisé en fraisage CN 5-axes sur la DMU Ultrasonic 20 pour les mêmes raisons techniques que la bielle : la disponibilité d'un outillage miniature adapté et la capacité de la machine à gérer des contournages extérieurs complexes.



Figure 23 : Image - Usinage du vilebrequin.

Voir annexe 8 pour la mise en plan et le contrat de phases du vilebrequin.

La came et l'hélice sont quant à elles réalisées en impression 3D FDM.

### Carters (haut et bas)

Les premières ébauches du carter privilégiaient une version usinable en CN ; cette piste a toutefois été écartée en raison de la trop grande complexité par rapport aux bénéfices attendus.

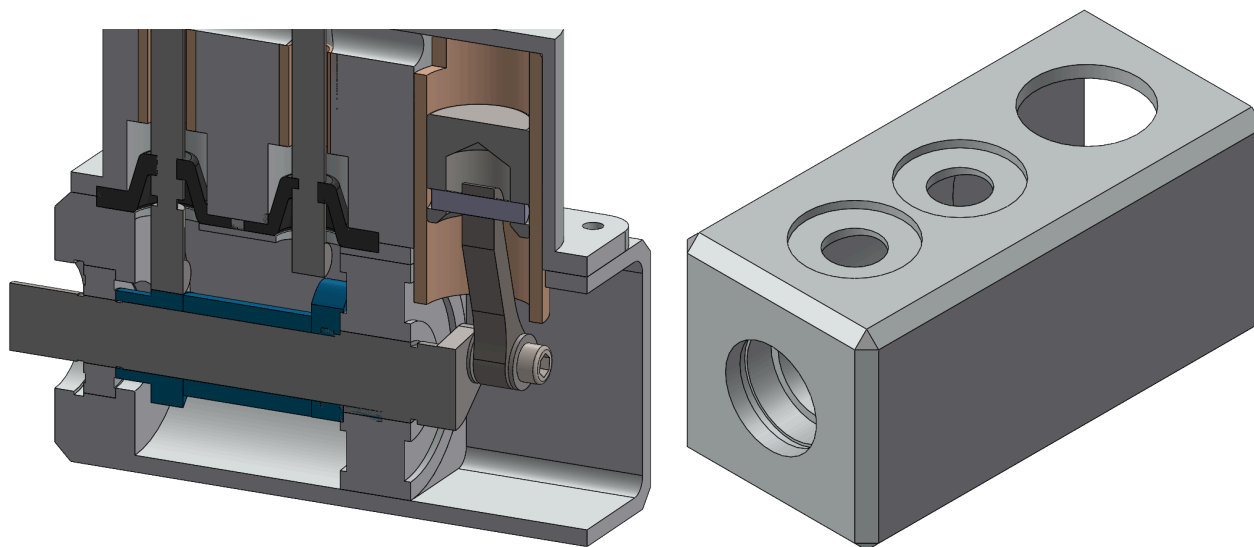


Figure 24 : Image CAO - Carter version usinable.

La version retenue est composée d'un bas moteur en deux coquilles et d'un haut moteur.

Les coquilles du bas moteur sont imprimées en FDM en raison de la vitesse de fabrication, de la liberté géométrique réalisable et de la simplicité d'exécution.

Deux versions de ces carters ont été conçues : une première fermée (en prenant compte la mise à l'air) et une deuxième ouverte permettant d'observer le fonctionnement du système, utile lors des démonstrations.

La mise en position des deux carters est réalisée par deux pions de centrage, le maintien en position est réalisé par quatre vis CHC M3 traversant les carters.

Enfin, des inserts sont installés pour permettre le montage du haut moteur et de la fixation du moteur entier à un support.

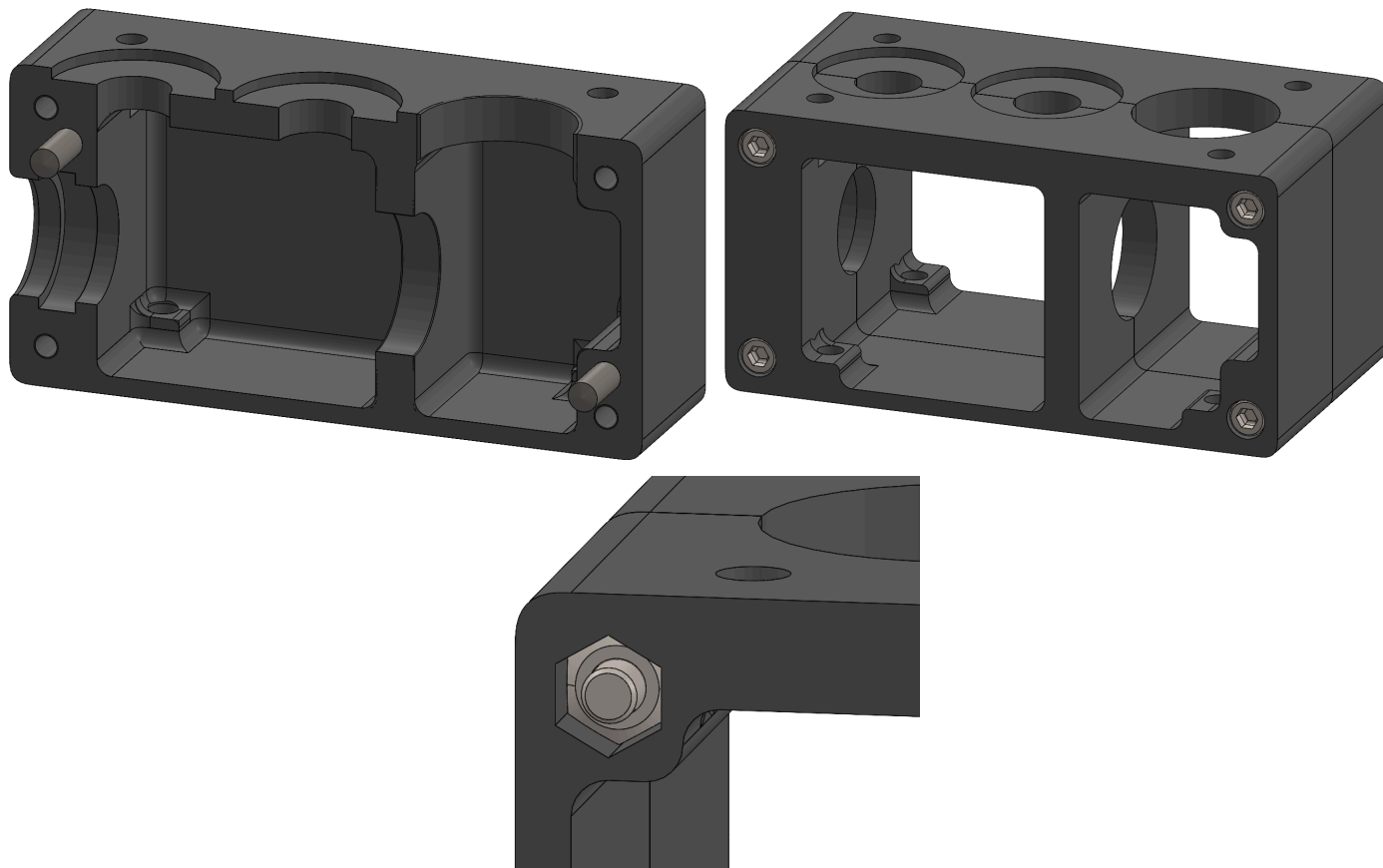


Figure 25 : Image CAO - Carters bas moteur 3D FDM, fermé, ouvert et détail sur un écrou noyé.

Cependant, le haut moteur est imprimé en SLA car ce procédé permet de réaliser des pièces étanches à la pression pneumatique; les impressions FDM étant poreuses. Ce carter est composé de la chemise du piston et des chemises de tige de soupapes montées serrées. Sur la surface supérieure est vissé un raccord pneumatique G1/4" et la vis de réglage de la compression du ressort (imprimée en FDM).

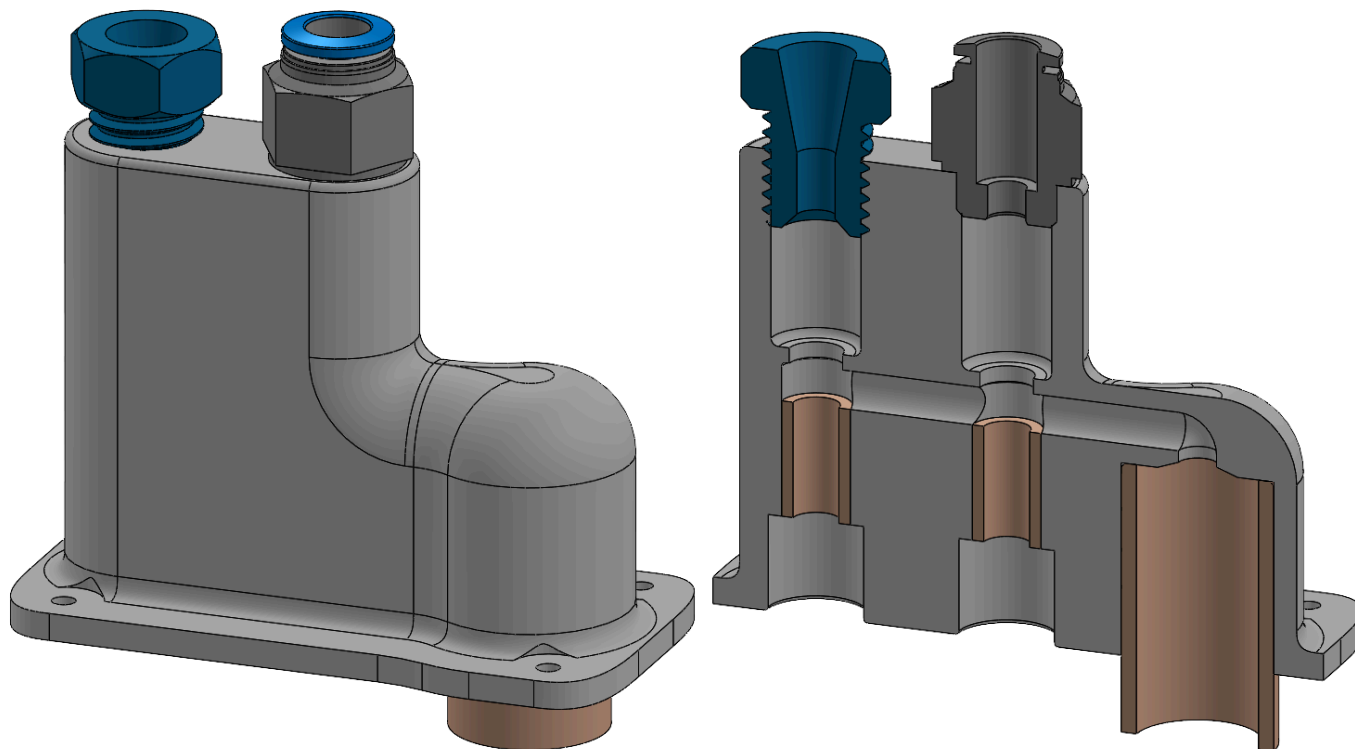


Figure 26 : Image CAO - Carter haut moteur impression 3D SLA.



Figure 27 : Image - Impression 3D SLA carter haut moteur.

Voir annexe 9 pour les contrats de phase des chemises des tiges et du piston.

## Assemblage

Pour se rendre compte des dimensions, le moteur fait 120 mm de hauteur, 110 mm de longueur et 46 mm de largeur.

Des vis CHC ont été utilisées par défaut selon les stocks disponibles, bien qu'elles ne soient pas optimales pour ce montage. En effet, leur conception est initialement prévue pour un logement dans des lamages, ce qui n'est pas le cas ici.

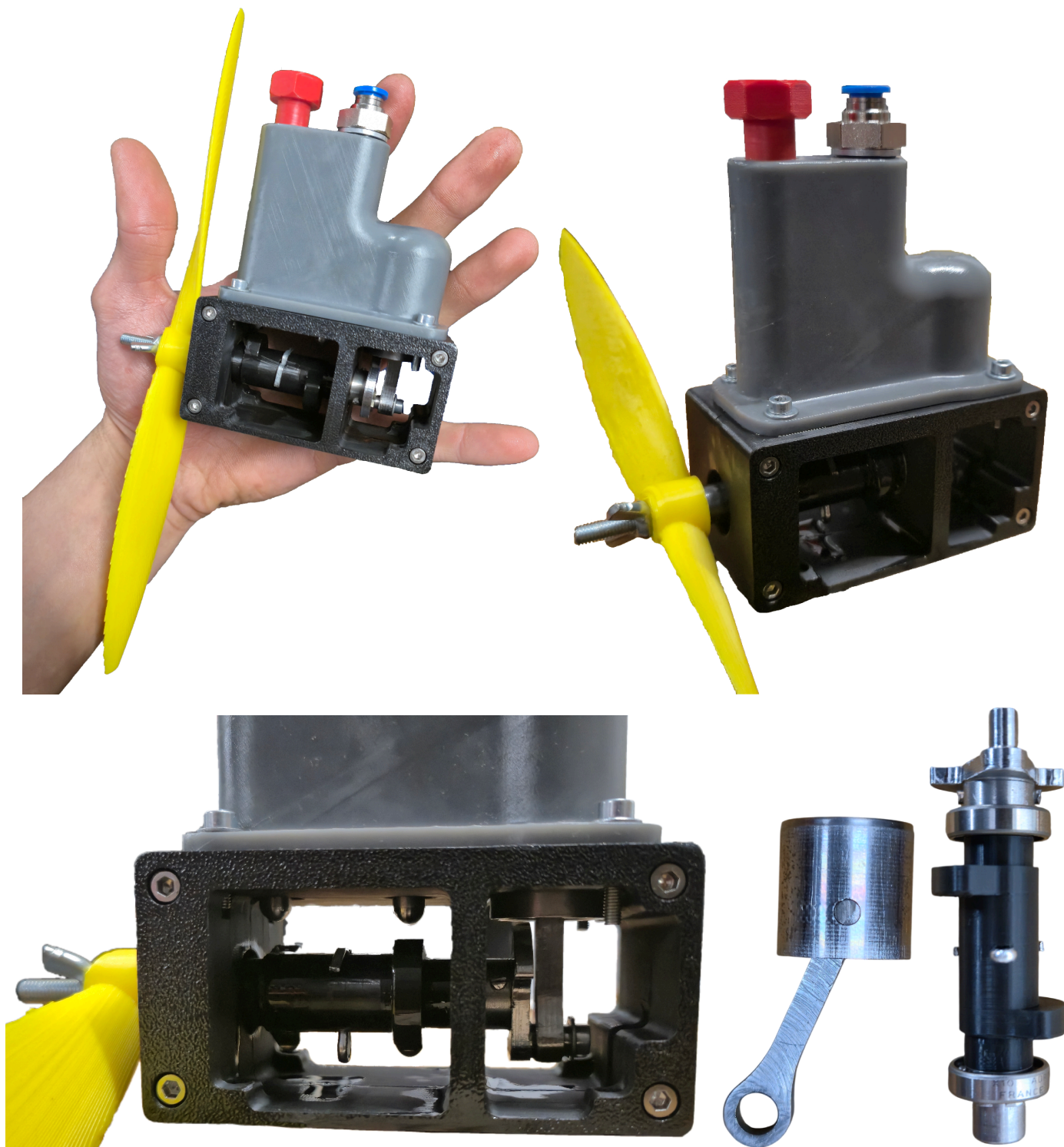


Figure 28 : Image - Assemblage du prototype.

## Banc d'essai

L'objectif de la réalisation de ce prototype est de comparer le dimensionnement théorique aux performances réelles.

Pour cela, il est nécessaire de concevoir un banc d'essai. Il permet de mesurer les performances requises, ce qui permettra ensuite de corriger les paramètres associés et tendre ainsi vers les critères du cahier des charges.

C'est le propre d'une démarche de prototypage : la conception par méthode empirique.

J'effectue des séries de mesures de la vitesse de rotation et du couple en faisant varier la pression d'admission, de son seuil minimal de fonctionnement jusqu'à 6 bars.

Le réglage du ressort d'échappement est ignoré car il dépend directement de cette pression.

La pression d'admission est relevée par un manomètre, le couple utile est évalué en dynamique par un dynamomètre à frein de Prony, et la vitesse de rotation est mesurée par un capteur infrarouge détectant le passage de l'hélice.

### 1. Conception mécanique du freinage

Le frein de Prony est un dynamomètre à absorption qui consiste à enserrer l'arbre moteur (via un montage flottant) pour générer un couple résistant par friction. En ajustant l'intensité de ce serrage, on module la charge appliquée au moteur, ce qui transmet une force de réaction à un bras de levier appuyant sur une cellule de charge.

Ce dispositif permet ainsi d'étudier le comportement du moteur (couple et vitesse) sur l'ensemble de sa plage de fonctionnement.

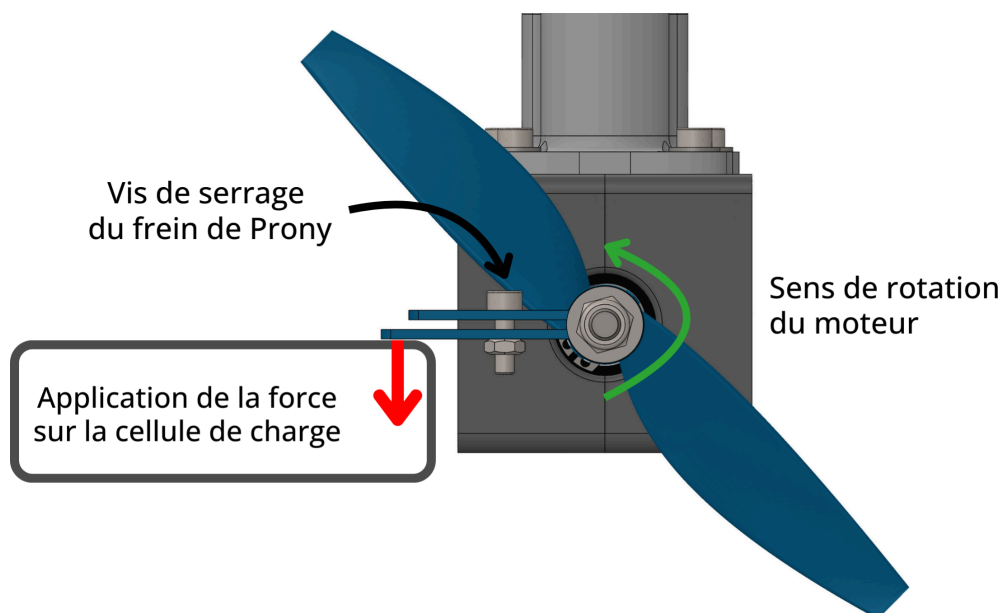


Figure 29 : Image CAO - Schéma explicatif du frein de Prony.

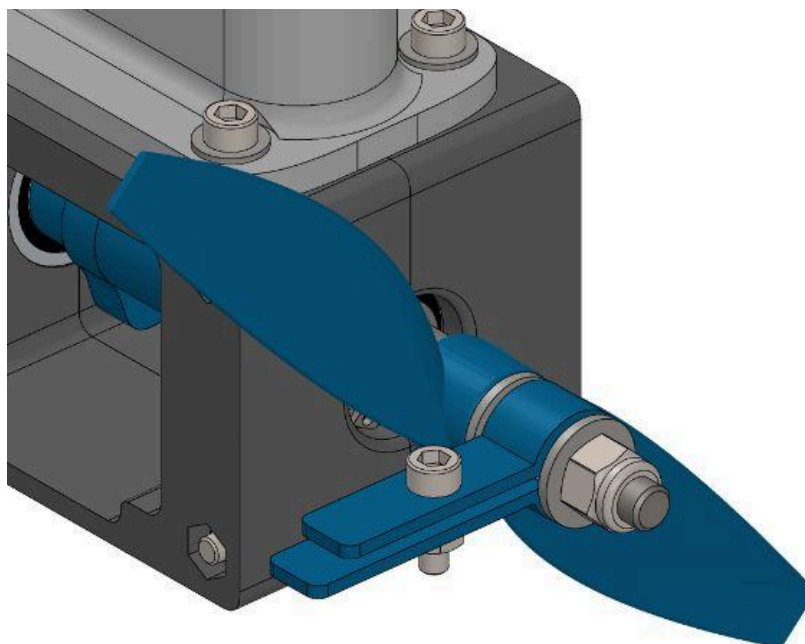


Figure 30 : Image CAO - Pince, frein de Prony.

## 2. Acquisition et traitement des données (Arduino)

La centralisation et le traitement des mesures sont assurés par un microcontrôleur (carte Arduino) :

- Mesure de la force ( $F$ ) : L'extrémité du bras de levier vient s'appuyer sur une cellule de charge. Ce signal de très faible amplitude est amplifié par un module conditionneur HX711, puis lu et converti en Newtons par l'Arduino.
- Calcul du couple ( $C$ ) : Le système déduit le couple instantané en appliquant la formule fondamentale de la mécanique :

$$C = F \times d$$

- Mesure de la vitesse : En parallèle, un capteur à infrarouge détecte le passage régulier d'un repère situé sur le rotor afin d'en déduire la vitesse de rotation.

### Explication du code Arduino :

1. L'initialisation (**setup**) : Le système configure l'écran, fait le "zéro" de la balance (tare) et active le capteur infrarouge. Ce capteur utilise une "interruption", ce qui signifie que l'Arduino met tout en pause une fraction de seconde pour compter chaque tour de moteur sans jamais en rater un.
2. Les mesures physiques (**loop**) : En continu, la carte lit la force mesurée par la cellule de charge et la multiplie par la longueur du bras de levier pour obtenir le couple (en N.mm).
3. Les calculs : Chaque seconde, le programme compte le nombre d'impulsions du capteur infrarouge pour déterminer la vitesse de rotation (RPM). Sachant que l'hélice possède deux pales, le système divise ce nombre d'impulsions par deux (2 détections = 1 tour complet). Il croise ensuite cette vitesse réelle avec le couple pour en déduire la puissance en Watts.

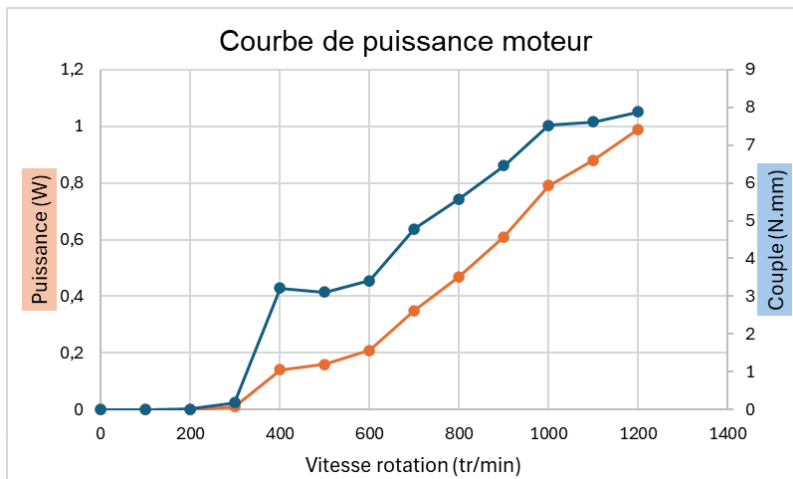
4. L'affichage et l'exportation : Les trois valeurs (vitesse, couple, puissance) s'affichent en direct sur l'écran LCD. Simultanément, elles sont envoyées vers l'ordinateur, permettant de tracer les courbes.

Voir annexe 10 pour les branchements et le code Arduino.

### 3. Exploitation des mesures

Avec les valeurs de vitesse de rotation, de couple et de puissance, je peux à présent tracer la courbe de puissance du moteur avec Excel.

Vitesse rota. (tr/min)	Couple (N.mm)	Puissance (W)
0	0	0
100	0	0
200	0,01	0
300	0,19	0,01
400	3,22	0,14
500	3,11	0,16
600	3,42	0,21
700	4,78	0,35
800	5,57	0,47
900	6,46	0,61
1000	7,52	0,79
1100	7,62	0,88
1200	7,88	0,99



Ces mesures n'étant pas réalisées à ce jour, ces valeurs sont à titre d'exemple.

## IV/ Conclusion et retour critique sur le projet

Être seul dans mon projet a été l'occasion de pouvoir réaliser en intégralité l'ensemble des étapes de la réalisation du prototypage. J'ai été responsable de chaque action, ce qui m'a permis de développer mes connaissances, mon autonomie et ma confiance. Cette situation a aussi été les contraintes de communication, d'organisation et de divergences d'opinions.

La difficulté d'être seul dans ce projet a été le manque d'une vision différente sur mon travail. Toutefois, j'ai pu compter sur la présence de mes professeurs.

La principale complexité a été l'usinage, le système est composé de pièces bien trop petites pour les réaliser facilement avec les machines de notre IUT.

J'ai pu mettre en application mes cours de GMP dans différents domaines comme : l'innovation pour l'industrie, la mécanique, les mathématiques et l'usinage.

Aussi, des problématiques auxquelles j'ai dû faire face, m'ont fait découvrir les notions de physique magnétique et de thermodynamique.

Cette expérience m'a appris que les conseillers ne sont pas les payeurs.

Pour confirmer un savoir, il est indispensable de le mettre en pratique en expérimentant par soi-même.

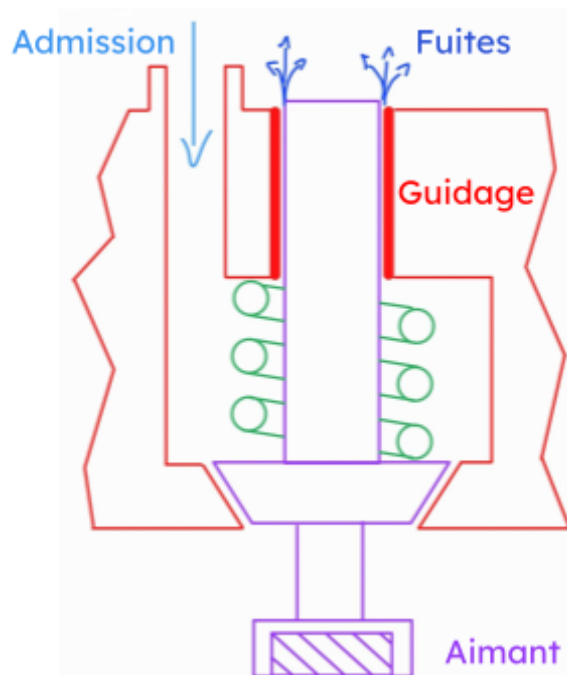
## Annexes

### Annexe 1 : Solution irréalisable de la soupape par répulsion magnétique

→ Si guidage interne à la zone de pression :  
Force appliquée à la soupape > Force  
magnétisation aimant.

→ Si guidage externe :  
Fuites à travers le guidage de la soupape.

→ Solution technique impossible.



### Annexe 2 : FS1, Remplir le réservoir d'une pression suffisante

Concernant la pression, il faut prendre en compte la résistance du réservoir pour une pression maximale.

Étant donné que notre système doit être adapté à un avion de modélisme nous souhaitons diminuer au maximum la masse du système, il n'est donc pas possible d'utiliser des cartouches de CO2 par exemple, ce qui ne respecte pas non plus notre critère de durabilité.

Nous avons donc décidé d'utiliser une bouteille en plastique (PET), car elle offre un des meilleurs rapport entre la masse du réservoir et la quantité d'air pressurisé qu'elle peut contenir, tout en restant particulièrement abordable.

Peu d'informations à ce sujet sont accessibles par le grand public, cependant voici ce que l'on peut savoir et estimer, grâce aux normes imposées aux fabricants en Europe.

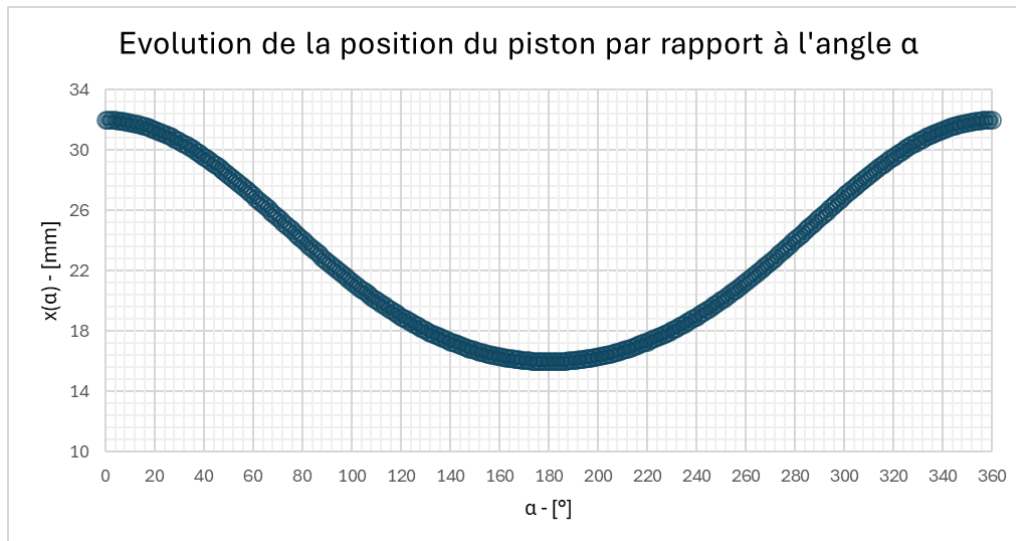
Les bouteilles en plastique PET et rPET (PET recyclé) pour les boissons gazeuses doivent généralement supporter une pression interne de 6 à 8 bars, correspondant à la pression maximale pour une boisson standard comme Coca-Cola. Ces valeurs sont issues des normes industrielles et des spécifications de fabrication standard. Source : [Sesemn, Coca-Cola EP](#)

Des tests destructifs sont réalisés sur ces bouteilles pour garantir une marge de sécurité. Les bouteilles peuvent être testées pour résister à des pressions allant jusqu'à 12-15 bars dans des conditions extrêmes. Source : [Mecmesin](#)

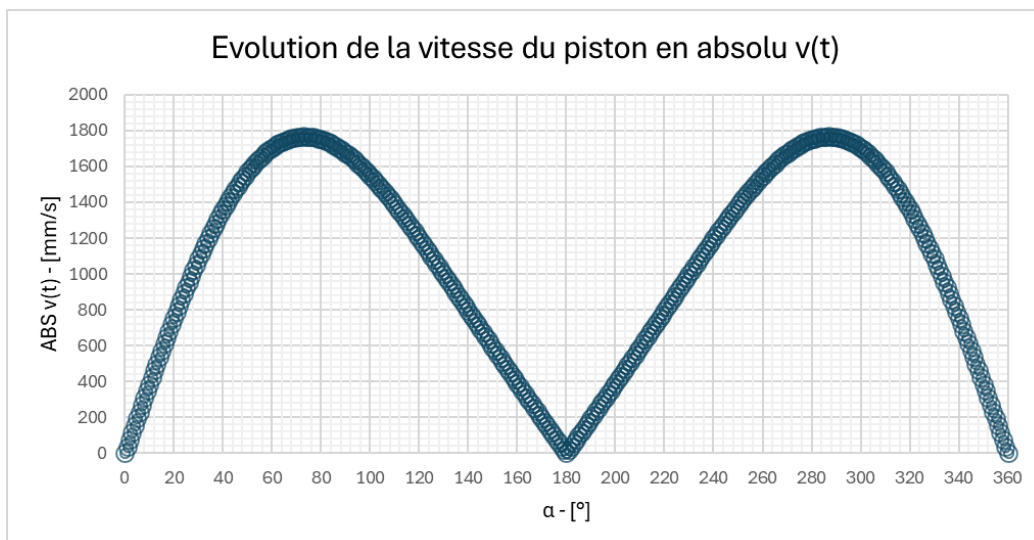
On en conclut que la pression d'entrée maximale disponible est de 6 à 8 bars.

De plus, dans la recherche d'article et de brevet nous avons trouvé un brevet d'avion de modélisme à moteur pneumatique où la pression a été fixée à 100 PSI soit 6,89 bars ([1] D. Kownacki "Toy vehicle having an integral pump assembly"), et dans les sciences ouvertes la pression a été définie à environ 4 bars, c'est donc pour cela que nous avons fixé un intervalle de pression de 4-8 bars.

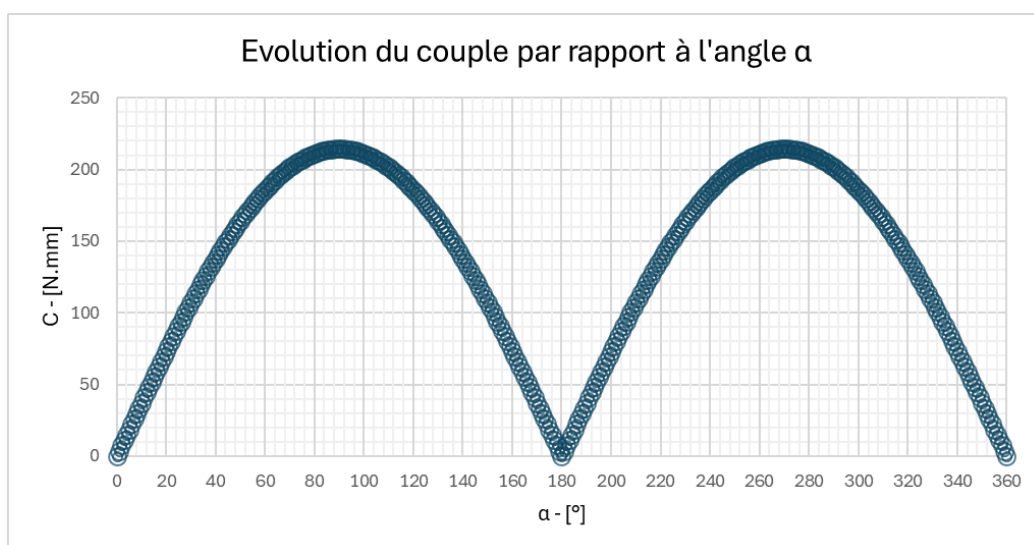
### Annexe 3 : Loi entrée-sortie



$$x(\alpha) = R \cdot \cos(\alpha) + \sqrt{L^2 - R^2} \cdot \sin^2(\alpha)$$



$$v(t) = \dot{x} = \omega \frac{dx}{d\alpha} = -\omega R \sin \alpha \left( 1 + \frac{R \cos \alpha}{\sqrt{L^2 - R^2 \sin^2 \alpha}} \right)$$



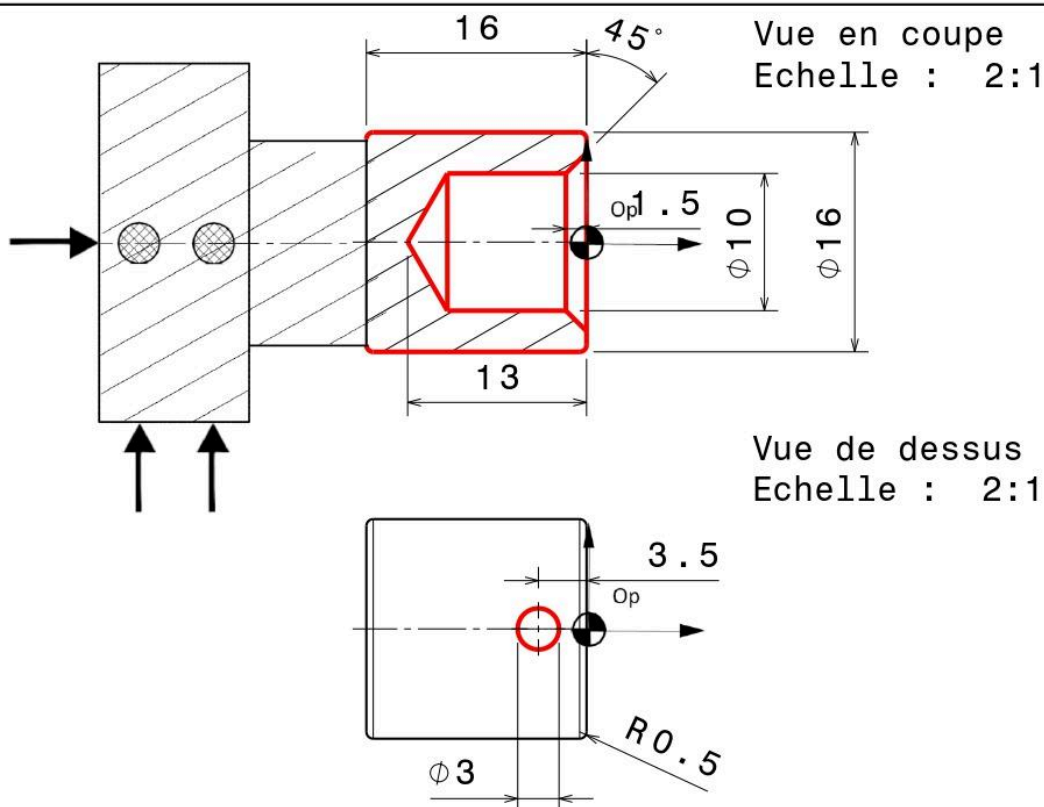
$$C(\alpha) = F_p \cdot R \left( \sin \alpha + \frac{R}{L} \sin 2\alpha \right)$$



	<b>PROJET D'ETUDE DE FABRICATION PHASE 10</b>	<b>BUREAU DES METHODES</b>
Etabli par: LARROSA	ELEMENT: Piston	N°:
Le: 14/01/2026	S/Ensemble: XXX	Matière: Acier
Programme: 1	Ensemble: XXX	Brut: $\phi 30$ mm

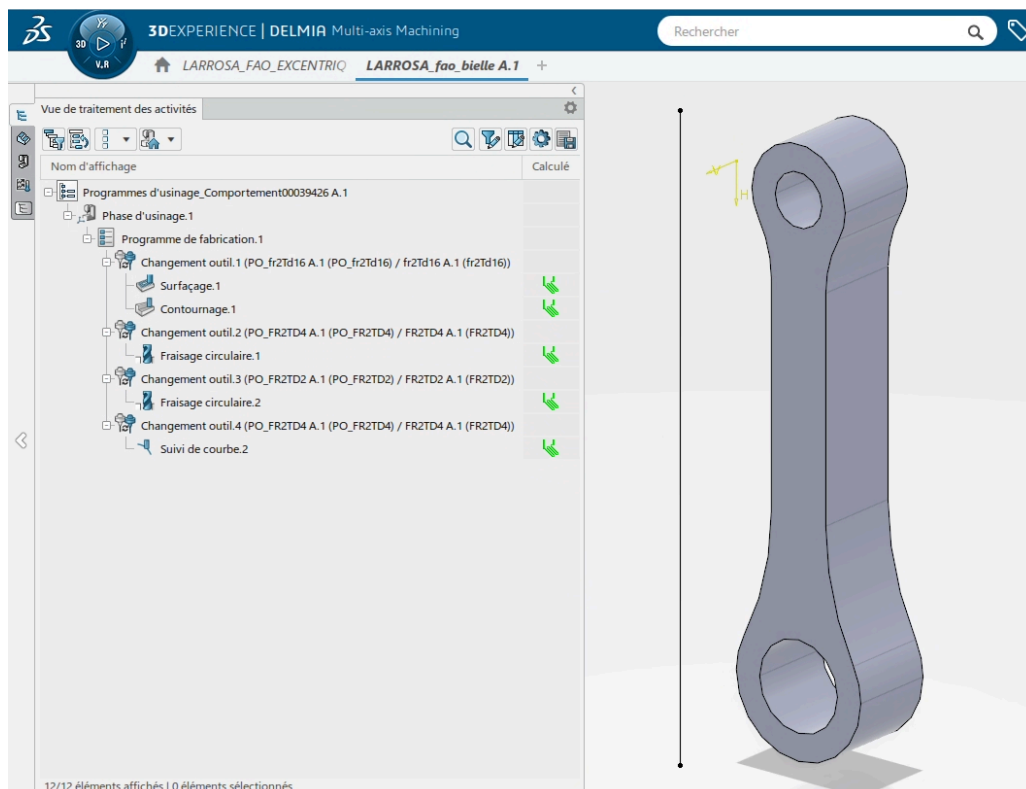
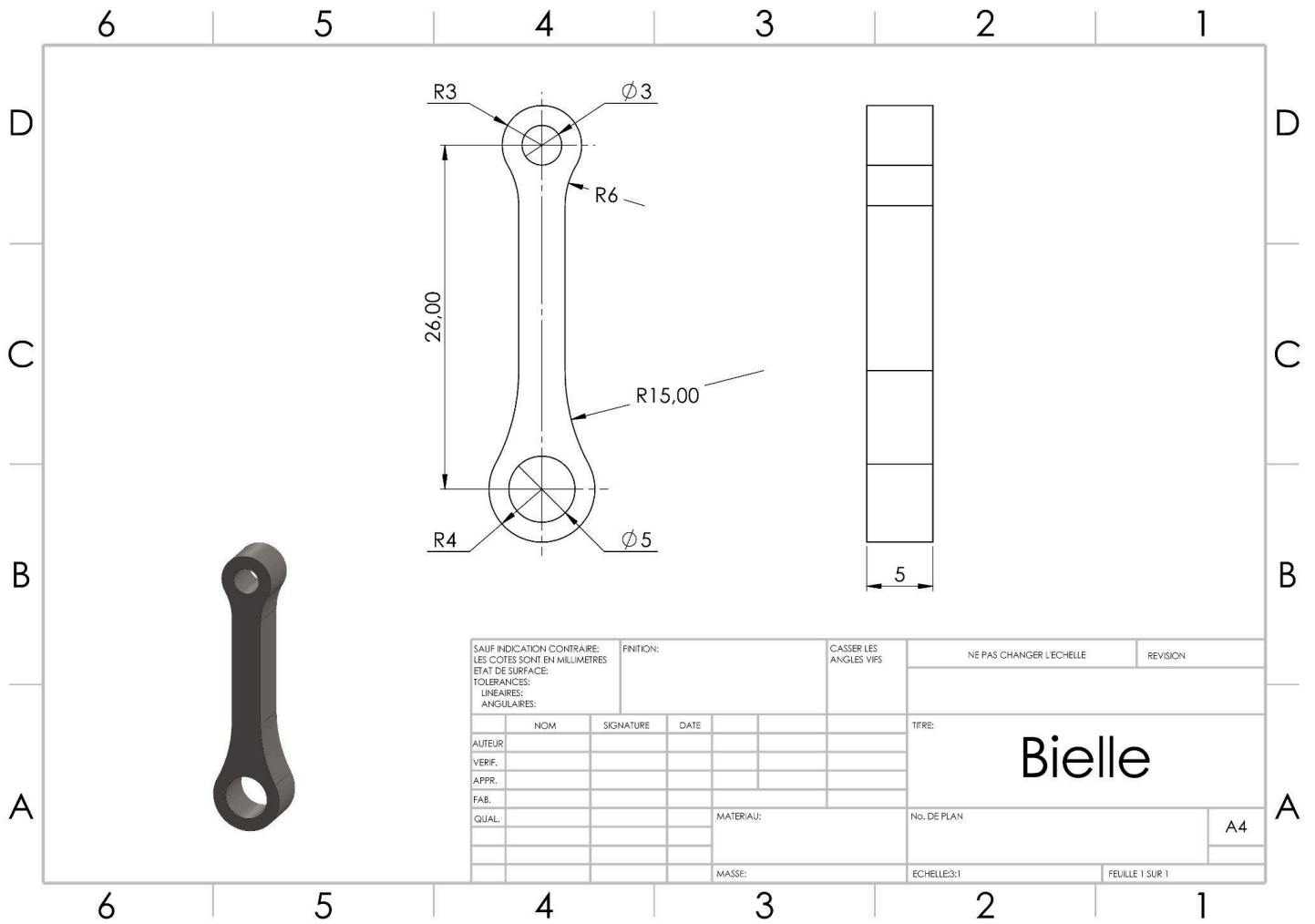
Désignation: Tournage CN

Machine outil: SOMAB 450

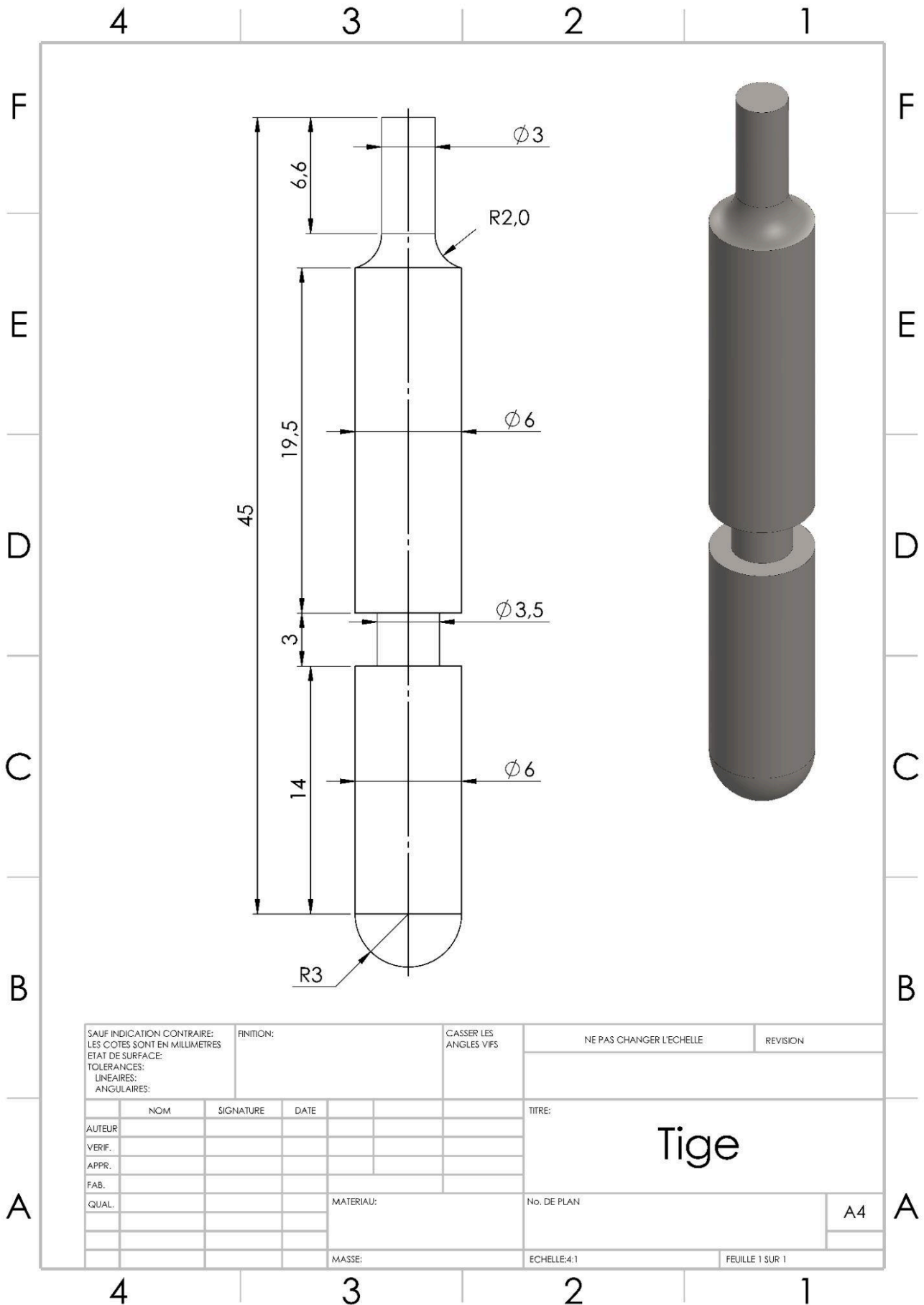


Désignation de opérations		Outils	Paramètres de coupe			
			Vc	Ap	Ae	f(z)
				mm	mm	mm/tr (/dt)
A	Dressage		100	0.5		0.1
B	Contournage ébauche		100	0.4		0.15
C	Pointage + Perçage lat.	Foret D2.				
	Alésage	Alésoir D2.5				
D	Pointage	Foret à pointer D8	1000tr/min	1		0.1
	Perçage longitudinal	Foret D10	10			0.13
E	Chanfrein intérieur		100			0.1
F	Contournage finition		150			0.1
G	Tronçonnage		60			0.08

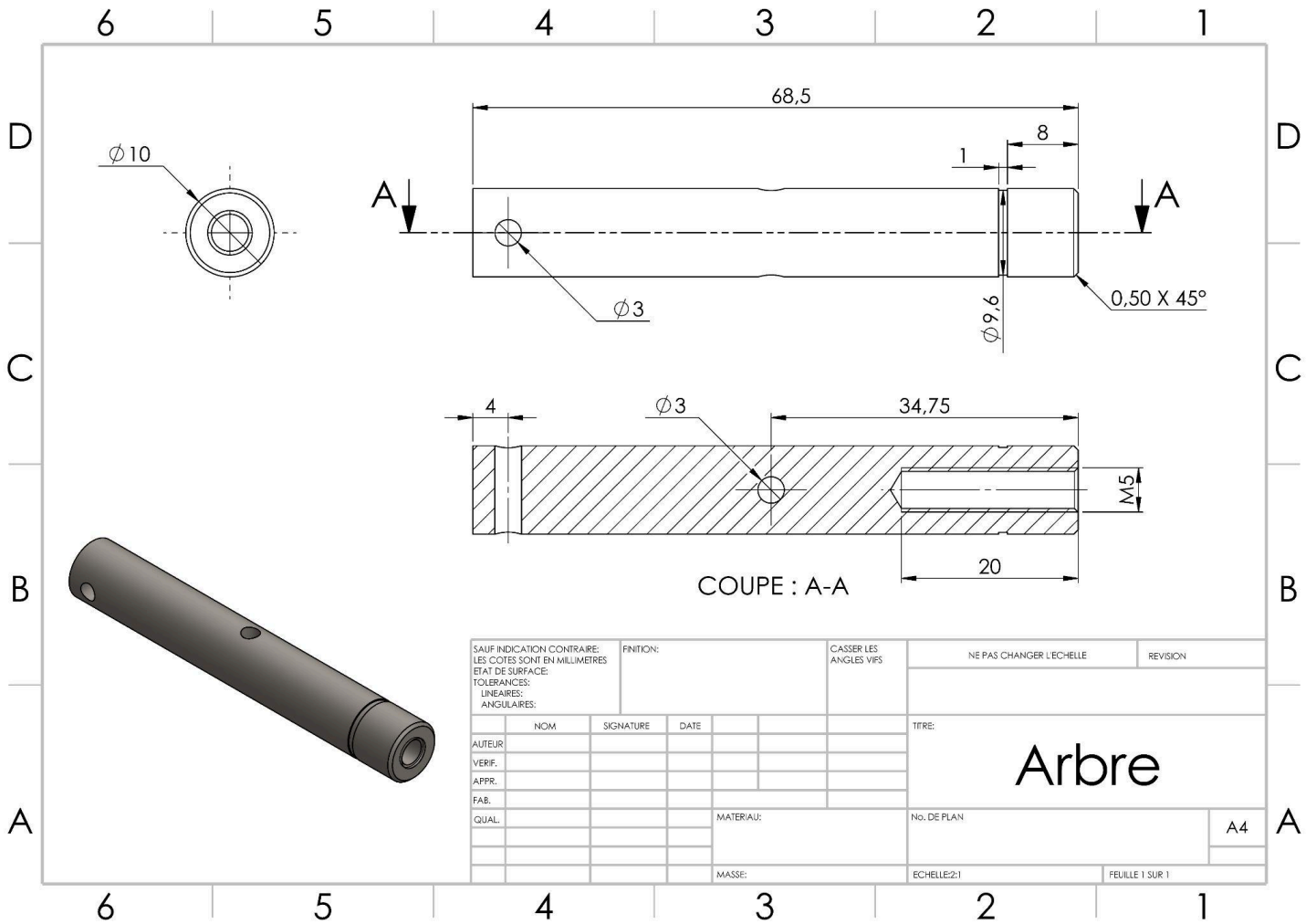
**Annexe 5 : Mise en plan et contrat de phase de la bielle**



Annexe 6 : Mise en plan et contrat de phase des tiges de soupapes



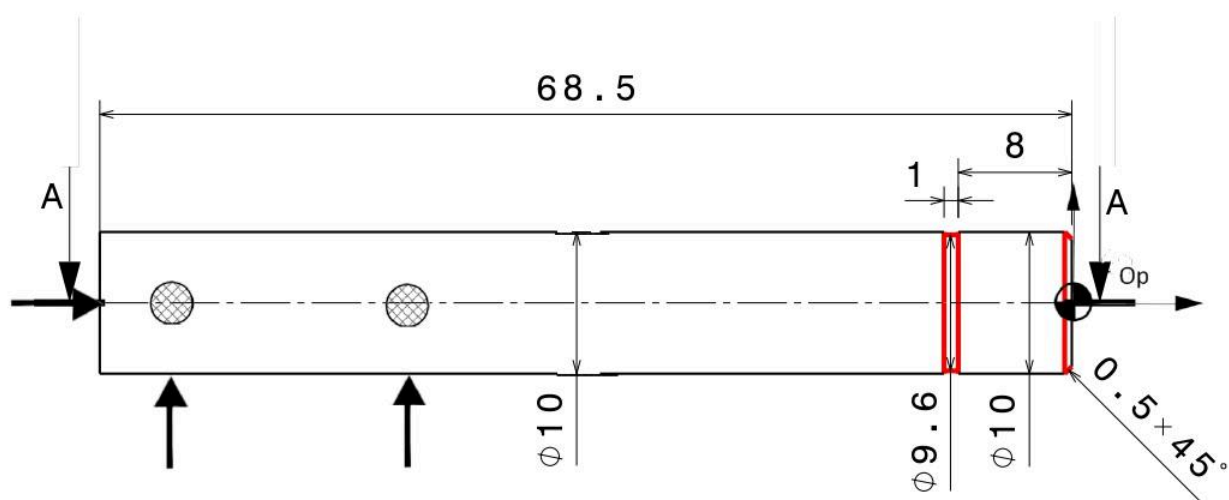
**Annexe 7 : Mise en plan et contrat de phase de l'axe (arbre)**



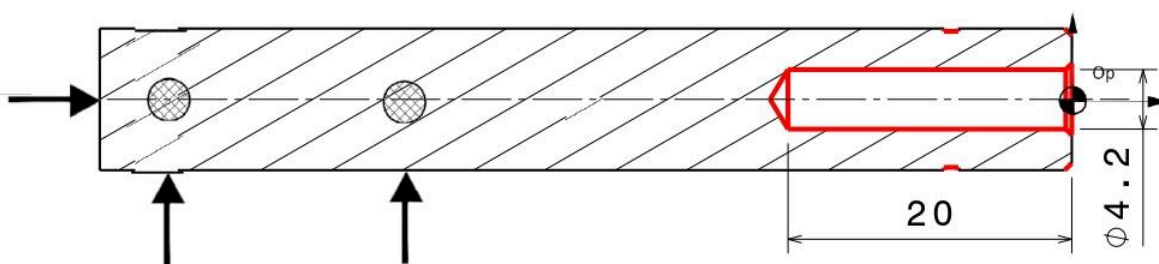
	PROJET D'ETUDE DE FABRICATION <b>PHASE 10</b>	BUREAU DES METHODES
Etabli par: LARROSA	ELEMENT: Arbre	N°:
Le: 20/01/2026	S/Ensemble:	Matière: Acier stub
Programme: 1	Ensemble:	Brut: Cylindre D10

Désignation: Tournage

Machine outil: RAMO



Vue de face  
Echelle : 2:1



Coupe A-A  
Echelle : 2:1

Désignation de opérations	Outils	Paramètres de coupe			
		Vc	Ap	Ae	f(z)
		m/min	mm	mm	mm/tr(/dt)
A	Chanfreinage ext.	PSSNL			
B	Pointage	Foret à pointer			
C	Perçage	Foret D4,2			
D	Rainurage	Outil à rainurer ep=1mm			

**Annexe 8 : Mise en plan et contrat de phase du vilebrequin (excentrique)**

Technical drawing showing the manufacturing plan and contract of phase for an eccentric crankshaft. The drawing includes a 3D model, a side view with dimensions, and a top view with radii and hole specifications.

**Dimensions (Side View):**  
 - Total length: 6  
 - Distance from left end to center of hole: 5  
 - Hole diameter:  $\phi 3$   
 - Distance from hole center to end of crank: 3.5  
 - Crank length: 6  
 - End diameter:  $\phi 5$   
 - Distance from left end to start of crank: 4  
 - Crank thickness: 3

**Dimensions (Top View):**  
 - Main hole diameter:  $\phi 10$   
 - Radii: R1, R4, R3, R13  
 - Distance from main hole center to crank center: 8  
 - Crank thickness: 2

**Contract of Phase Table:**

SAUF INDICATION CONTRAIRE: LES COTES SONT EN MILLIMETRES ET A1 DE SURFACE:			FINITION:	CASSER LES ANGLES VIFS	NE PAS CHANGER L'ECHELLE	REVISION
TOLERANCES: LINEAIRES: ANGULAIRES:					TITRE: <b>Vilebrequin (excentrique)</b>	
AUTEUR	NOM	SIGNATURE	DATE		No. DE PLAN	A4
VERIF.						
APPR.						
FAB.				MATERIAU:		
QUAL.				MASSE:	ECHELLE:3:1	FEUILLE 1 SUR 1

Screenshot of the 3DEXPERIENCE software interface showing the manufacturing program tree and a 3D model of the eccentric crankshaft.

**Manufacturing Program Tree:**

- Programmes d'usinage\_Comportement00043618 A.1
  - Phase d'usinage.1
    - Programme de fabrication.1
      - Changement outil.9 (PO\_fr2Td16 A.1 / fr2Td16 A.1) (fr2Td16)
      - Ebauche de pièces prismatiques.5
      - Contournage.1
        - Changement outil.2 (PO\_FR2TD4 A.1 / FR2TD4 A.1) (FR2TD4)
        - Contournage.9
        - Contournage.10
        - Changement outil.8 (PO\_FR2TD2 A.1 / FR2TD2 A.1) (FR2TD2)
        - Fraisage circulaire.1

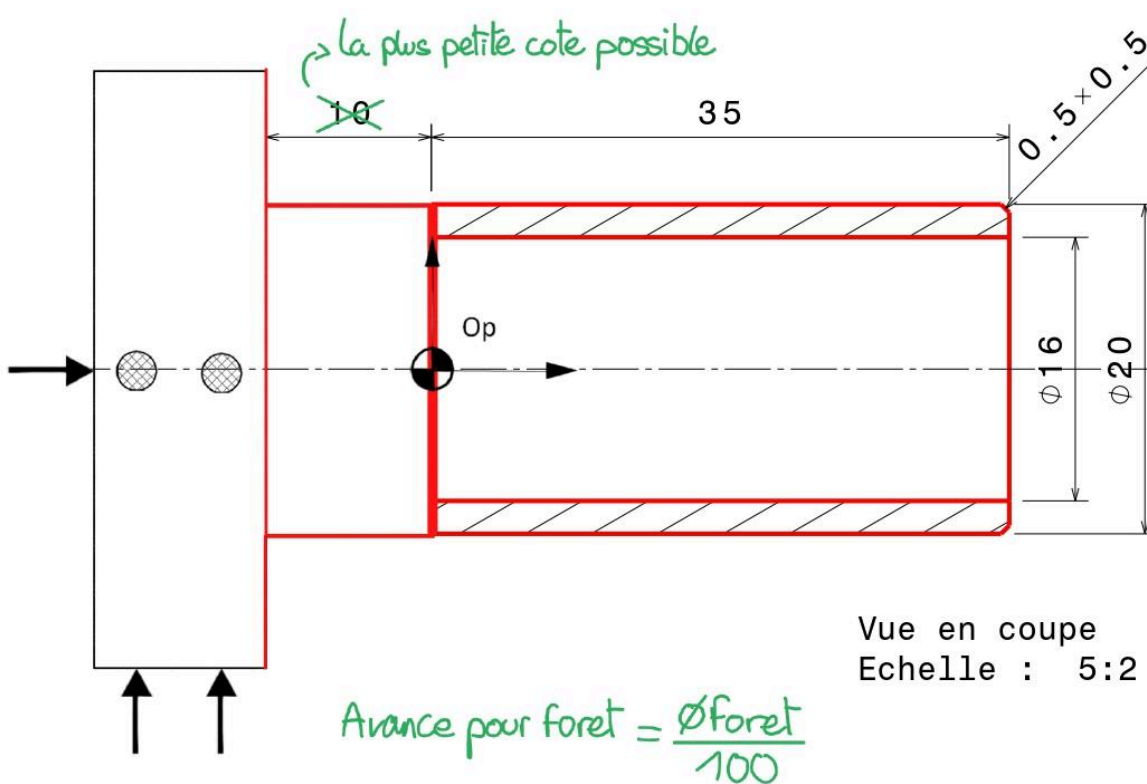
The 3D model shows the crankshaft with a coordinate system (X, Y, Z) and a reference point for the phase of use.

**Annexe 9 : Mise en plan et contrat de phase des chemises de tiges et du piston**

	PROJET D'ETUDE DE FABRICATION <b>PHASE 10</b>	BUREAU DES METHODES
Etabli par: LARROSA	ELEMENT: Chemise piston	N°:
Le: 12/01/2026	S/Ensemble: XXX	Matière: Acier
Programme: 1	Ensemble: XXX	Brut: XXX

Désignation: TOURNAGE CN

Machine outil: SOMAB 250

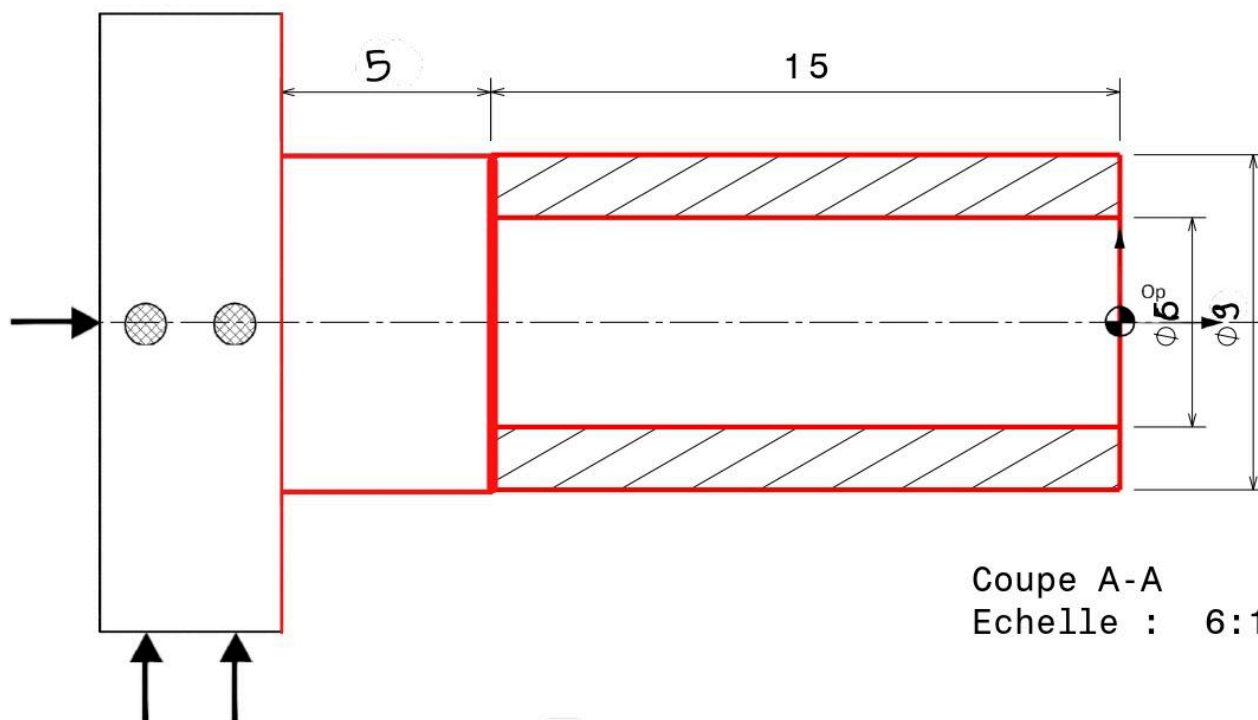


Désignation de opérations		Outils	Paramètres de coupe			
			Vc	Ap	Ae	f(z)
				mm	mm	mm/tr (/dt)
A	Dressage	PCLNL	150	1	-	0,1
-	Contournage	PCLNL	150	-	1	0,2
-		PCLNL	150	-	1	0,2
-	Finition chariotage	PCLNL	165	0,1	0,4	0,15
B	Pointage	Foret à pointer D8	1000 tr/min	1	-	0,1
-	Perçage	Foret D 14,8	10	-	-	0,13
-	Alésage	SCLCL	80	-	-	0,08
C	Tronçonnage	XXX	60	-	-	0,08

	PROJET D'ETUDE DE FABRICATION <b>PHASE 10</b>	BUREAU DES METHODES
Etabli par: LARROSA	ELEMENT: Chemise tige	N°:
Le: 12/01/2026	S/Ensemble: XXX	Matière: Acier
Programme: 1	Ensemble: XXX	Brut: $\phi 10$ mm

Désignation: TOURNAGE CN

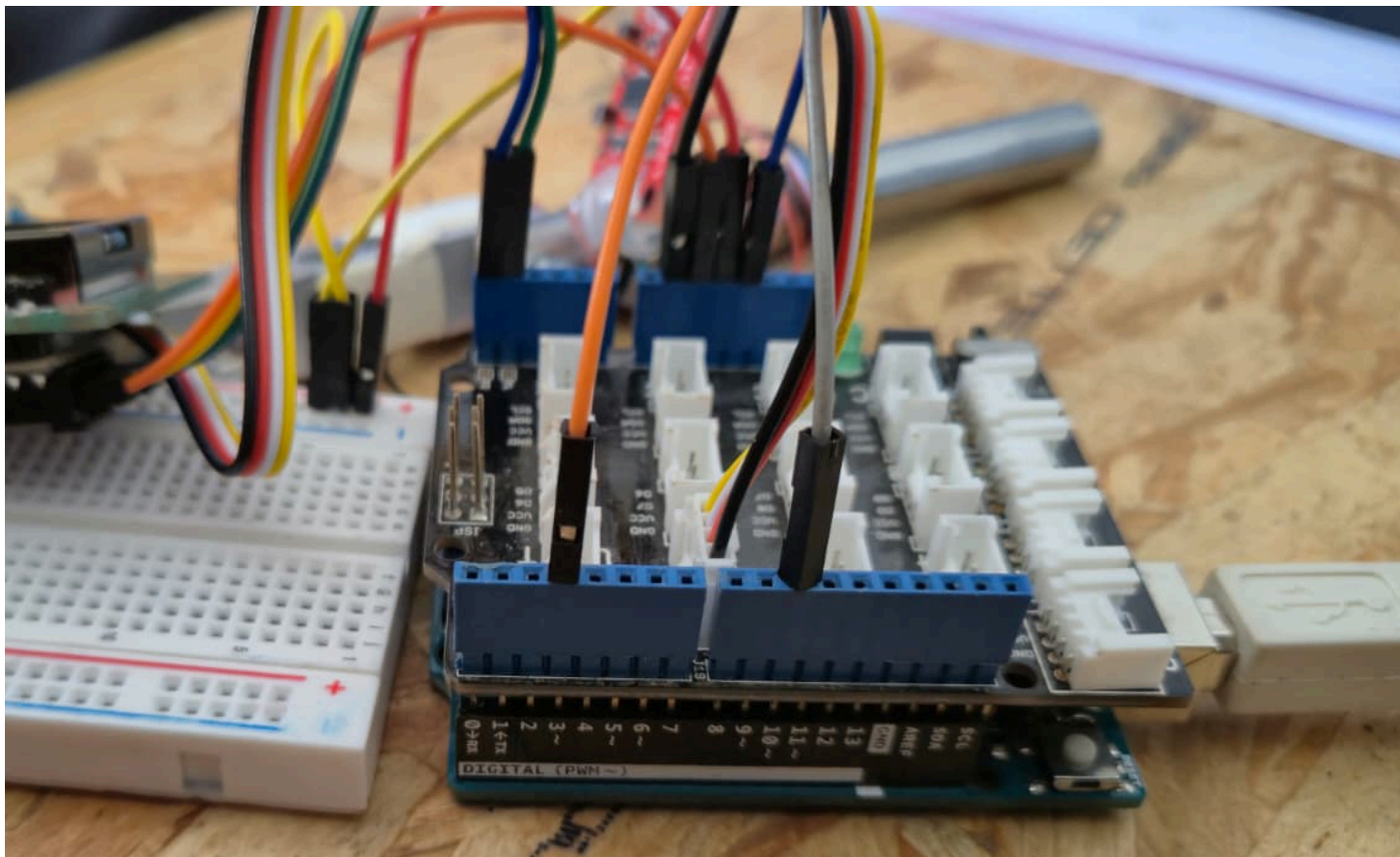
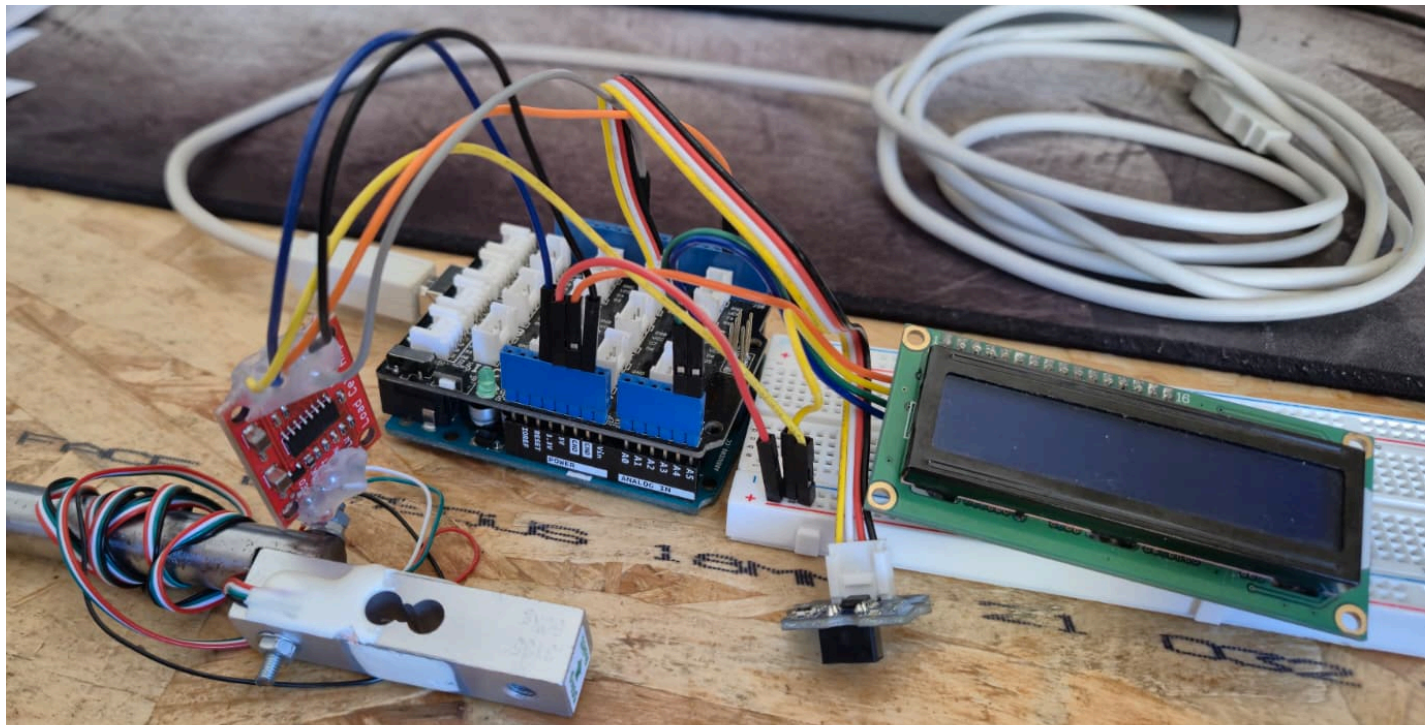
Machine outil: SOMAB 250



Coupe A-A  
 Echelle : 6:1

Désignation de opérations		Outils	Paramètres de coupe			
			Vc	Ap	Ae	f (z)
		m/min mm mm mm/tr.(/dt)				
A	Dressage	PCLNL	100	1	-	0,1
-	Contournage	PSSNR	100	-	-	0,1
-		PCLNL	100	-	0,4	0,1
-	Finition chariotage	PCLNL	150	0,1	0,4	0,15
B	Pointage	Foret à pointer D8	1000 tr/min	1	-	0,1
-	Perçage	Foret D6	10	-	-	0,13
-	Alésage	Alésoir D6	0	-	-	0,08
C	Tronçonnage	Outil à tronçonner	60	-	-	0,08

## Annexe 10 : Branchements et code Arduino pour banc d'essai



```
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
#include "HX711.h"

// Mes branchements sur l'Arduino UNO
// Ecran I2C : SDA sur A4, SCL sur A5
// Capteur IR : Pin 2 (obligatoire car j'ai besoin d'une interruption)
// Jauge de contrainte (HX711) : Pin 3 (DOUT) et Pin 10 (CLK)

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 20, 4);

#define DOUT_PIN 3
#define CLK_PIN 10
#define CALIBRATION_FACTOR 2150.0

HX711 scale;

const int irPin = 2;

// Variables de mesures
volatile int triggers = 0;
int currentRPM = 0;
float currentTorque = 0.0;
float currentPower = 0.0;

// Gestion du temps
unsigned long previousRpmMillis = 0;
const long rpmInterval = 1000;

void setup() {
    Serial.begin(9600);

    // Préparation des colonnes pour l'export sur Excel
    Serial.println("RPM;Couple (Nmm);Puissance (W)");

    lcd.init();
    lcd.backlight();

    lcd.setCursor(0, 0);
    lcd.print("Systeme Pret");
    delay(1000);
    lcd.clear();

    scale.begin(DOUT_PIN, CLK_PIN);
    scale.set_scale(CALIBRATION_FACTOR);
    scale.tare();
```

```
pinMode(irPin, INPUT);

// Activation de l'interruption pour compter les impulsions de l'IR
attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(irPin), countPulse, FALLING);
}

void loop() {
    unsigned long currentMillis = millis();

    // Lecture de la valeur du couple en continu
    if (scale.is_ready()) {
        float rawUnits = scale.get_units();
        float force = rawUnits / 100.0;
        float armLength = 28.0;

        currentTorque = force * armLength;
    }

    // Traitement principal (déclenché toutes les secondes)
    if (currentMillis - previousRpmMillis >= rpmInterval) {
        previousRpmMillis = currentMillis;

        // 1. Je récupère les impulsions comptées en fond
        noInterrupts();
        int pulses = triggers;
        triggers = 0;
        interrupts();

        // Calcul de mes RPM (j'ai 2 impulsions par tour sur mon montage)
        currentRPM = int(60000.0 / float(rpmInterval)) * (pulses / 2);

        // 2. J'en déduis la puissance
        currentPower = (currentTorque * currentRPM) / 9550.0;

        // 3. Mise à jour de l'écran
        updateLCD();

        // 4. Envoi des données pour tracer la courbe
        printDataForCurve();
    }
}

// Ma fonction appelée à chaque front descendant de l'IR
void countPulse() {
    triggers++;
}
```

```
}  
  
void updateLCD() {  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print("    "); // J'efface l'ancienne valeur des RPM pour éviter les bugs d'affichage  
    lcd.setCursor(0, 0);  
    lcd.print(currentRPM);  
    lcd.print("rpm");  
  
    lcd.setCursor(9, 0);  
    // Remplacement du point par une virgule pour l'affichage  
    lcd.print(formatFrenchFloat(currentTorque));  
    lcd.print("Nmm ");  
  
    lcd.setCursor(0, 1);  
    lcd.print("Pwr: ");  
    // Pareil ici, affichage avec virgule  
    lcd.print(formatFrenchFloat(currentPower));  
    lcd.print(" W    ");  
}  
  
// Formatage CSV adapté pour mon Excel (avec des points-virgules)  
void printDataForCurve() {  
    Serial.print(currentRPM);  
    Serial.print(";");  
  
    // J'envoie la donnée avec la virgule à la française  
    Serial.print(formatFrenchFloat(currentTorque));  
    Serial.print(";");  
  
    Serial.println(formatFrenchFloat(currentPower));  
}  
  
// Petite fonction maison pour convertir les points en virgules  
String formatFrenchFloat(float val) {  
    String str = String(val, 2); // Je passe en texte avec 2 décimales  
    str.replace('.', ',');      // Je remplace le point par la virgule pour que mon Excel  
    // comprenne  
    return str;  
}
```

## Bibliographie

### Moteurs :

- V. G. Truglia, "High-efficiency engine driven by pressurized air or other compressible gases", WO2011104606A3, 1 nov. 2012.
- K. Fukuzawa, T. Ishikawa, "OHV engine". EP0233384A2, juin 2003.
- <https://www.lens.org/lens/patent/138-611-888-020-247/frontpage?l=en>

### Veille réservoir en bouteille PET :

- <https://www.sesemn.fr/reglementation-et-technique/bouteille/>
- <https://www.cocacolaep.com/fr/news-and-stories/100-de-plastique-recycle-pour-toutes-les-bouteilles-petits-formats-vendues-en-france-coca-cola-continue-de-reduire-son-empreinte-carbone/>
- <https://www.mecmesin.com/fr/publications/essais-sur-bouteilles-pet>

### Moteur carré :

- [https://en.wikipedia.org/wiki/Stroke\\_ratio](https://en.wikipedia.org/wiki/Stroke_ratio)
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur\\_carr%C3%A9](https://fr.wikipedia.org/wiki/Moteur_carr%C3%A9)

### Système bielle-manivelle :

- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me\\_bielle-manivelle](https://fr.wikipedia.org/wiki/Syst%C3%A8me_bielle-manivelle)

### Étanchéité :

- [1] J. Martin, "Étanchéité en mécanique", Techniques de l'Ingénieur, vol. 10 oct. 2004.

### Solution de soupape par répulsion magnétique :

- CTPE, "Force entre deux aimants".