

Turbine Popular Science / Savannah Boat

Le **NS Savannah**, qui doit son nom au **SS Savannah**, premier « vapeur » à traverser l'océan Atlantique, est le second navire civil de transport de cargo et de passagers à utiliser l'énergie nucléaire après le *Lénine*, un navire soviétique mis en service en 1957.

En 1955, le président américain Eisenhower proposa la construction d'un navire marchand à propulsion nucléaire navale dans le cadre du programme Atoms for Peace. L'année suivante, le Congrès autorisa le **NS Savannah**, projet conjoint du Département du Commerce, de la Maritime Administration, et de la Commission de l'énergie atomique des États-Unis. La conception fut assurée par un cabinet d'architecture navale de New York, Georges Sharp, Incorporated. Le navire fut construit au chantier naval de Camden, tandis que le réacteur nucléaire était fourni par Babcock and Wilcox. Le lancement eut lieu le 23 mars 1962.

Le *NS Savannah* était une démonstration de la faisabilité technique de la propulsion nucléaire pour les navires marchands et n'était pas supposé être commercialement compétitif. C'était aussi une réponse coup pour coup au grand ennemi soviétique.



Le design du *NS Savannah* se voulait visuellement impressionnant, ressemblant plus à un yacht de luxe qu'au cargo qu'il était. Le navire possédait trente quartiers d'équipages avec salle de bains individuelle, un réfectoire pour 100 passagers, un salon convertible en cinéma, une véranda, une piscine et une bibliothèque. Par de nombreux aspects, le navire fut un succès. Son comportement à la mer ne posa pas de problème, son bilan en matière de sécurité était excellent, son autonomie était bien sûr imbattable, et la peinture blanche ne fut jamais entachée de fumée.

Même le matériel de manutention des charges cargo était dessiné dans un sens esthétique. De 1965 à 1971, l'administration maritime louait le *Savannah* à une compagnie maritime, Isbrandtsen, qui l'utilisa en service cargo régulier.

La revue américaine *Popular Science* prompte à déployer une vision utopiste (et patriotique) de la technologie ne manqua pas d'articles sur l'énergie nucléaire en général. Une série de quatre numéros fut consacrée à la réalisation d'un modèle réduit du *NS Savannah*. Dans cette série elle propose un modèle de turbine à action, turbine dont on peut émettre des réserves sur sa capacité réelle à mouvoir l'imposante coque, la chaudière et la très massive radiocommande.

Mais le propos n'est pas là. Cette réalisation est intéressante surtout pour la méthode d'usinage du rotor de turbine et la conception simple de l'ensemble.

Popular Science

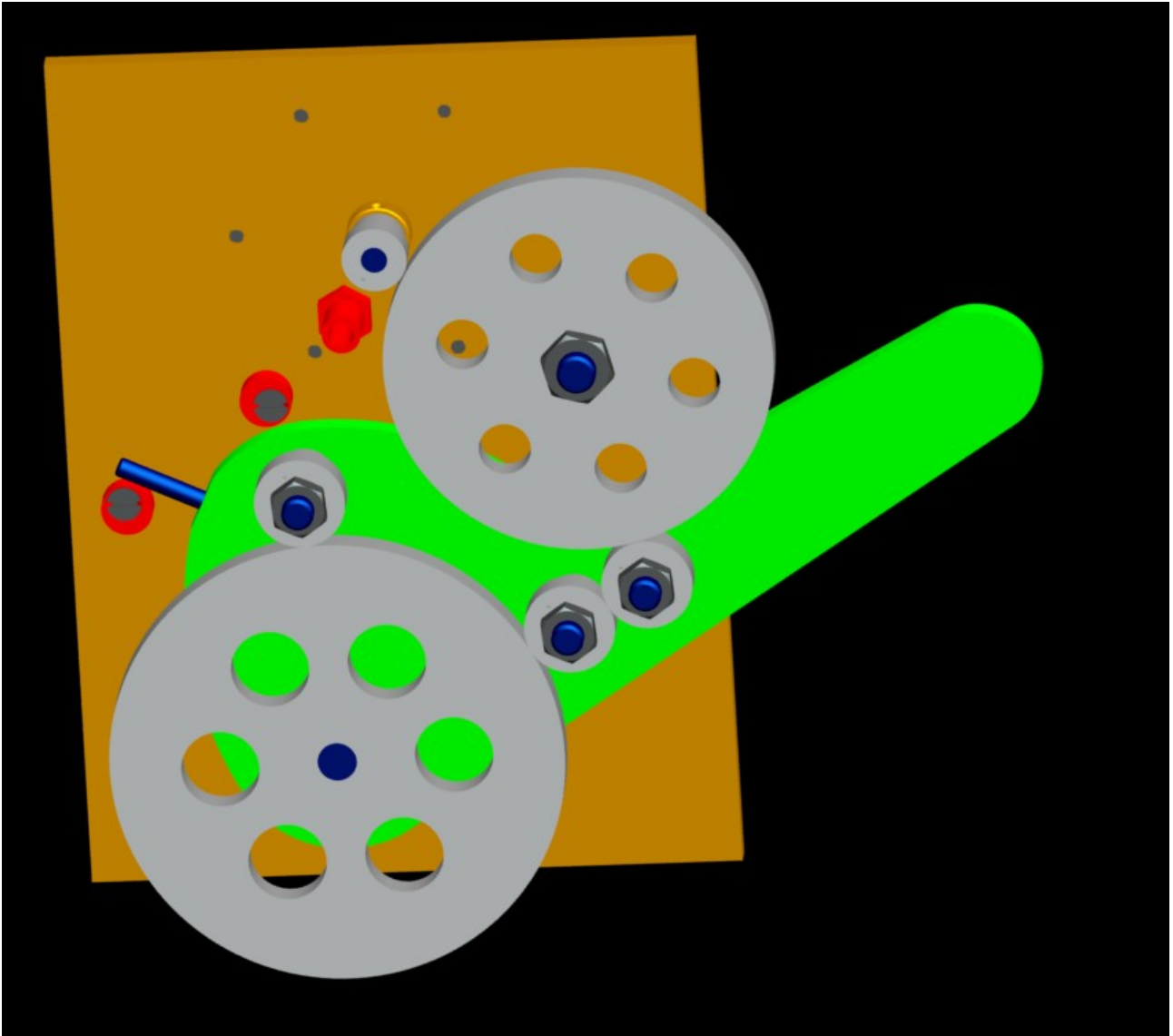
Décembre 1960 p202 et suivantes ; Janvier 1961 p150 et suivantes ; Février 1961 p142 et suivantes (turbine) ; Mars 1961 p186 et suivante

Le lecteur trouvera en fin de document les plans originaux.

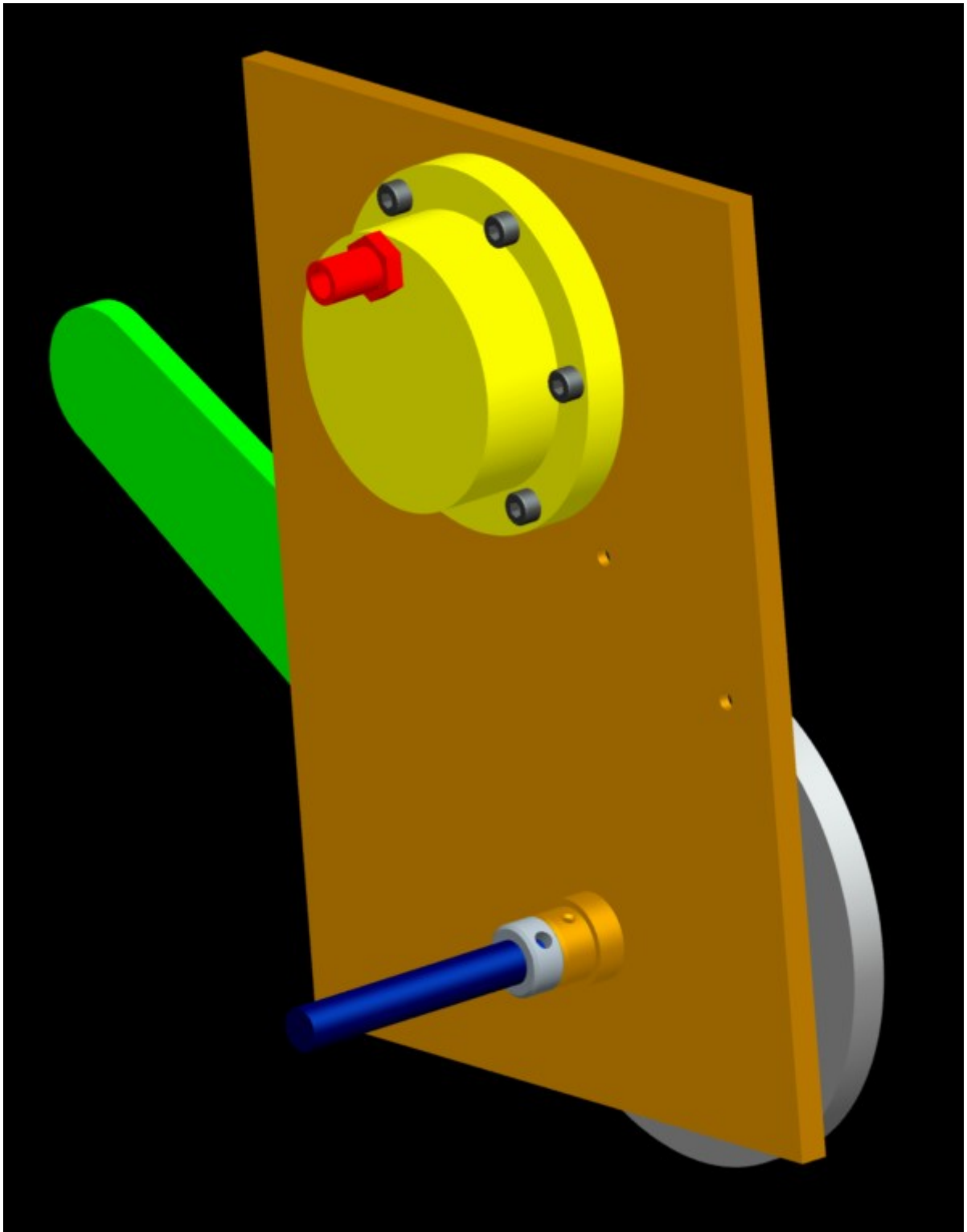
Le document est organisé en 4 parties :

- Vues générales 3D
- Turbine
- Engrenages
- Plans métriques d'après ceux de *Popular Science*

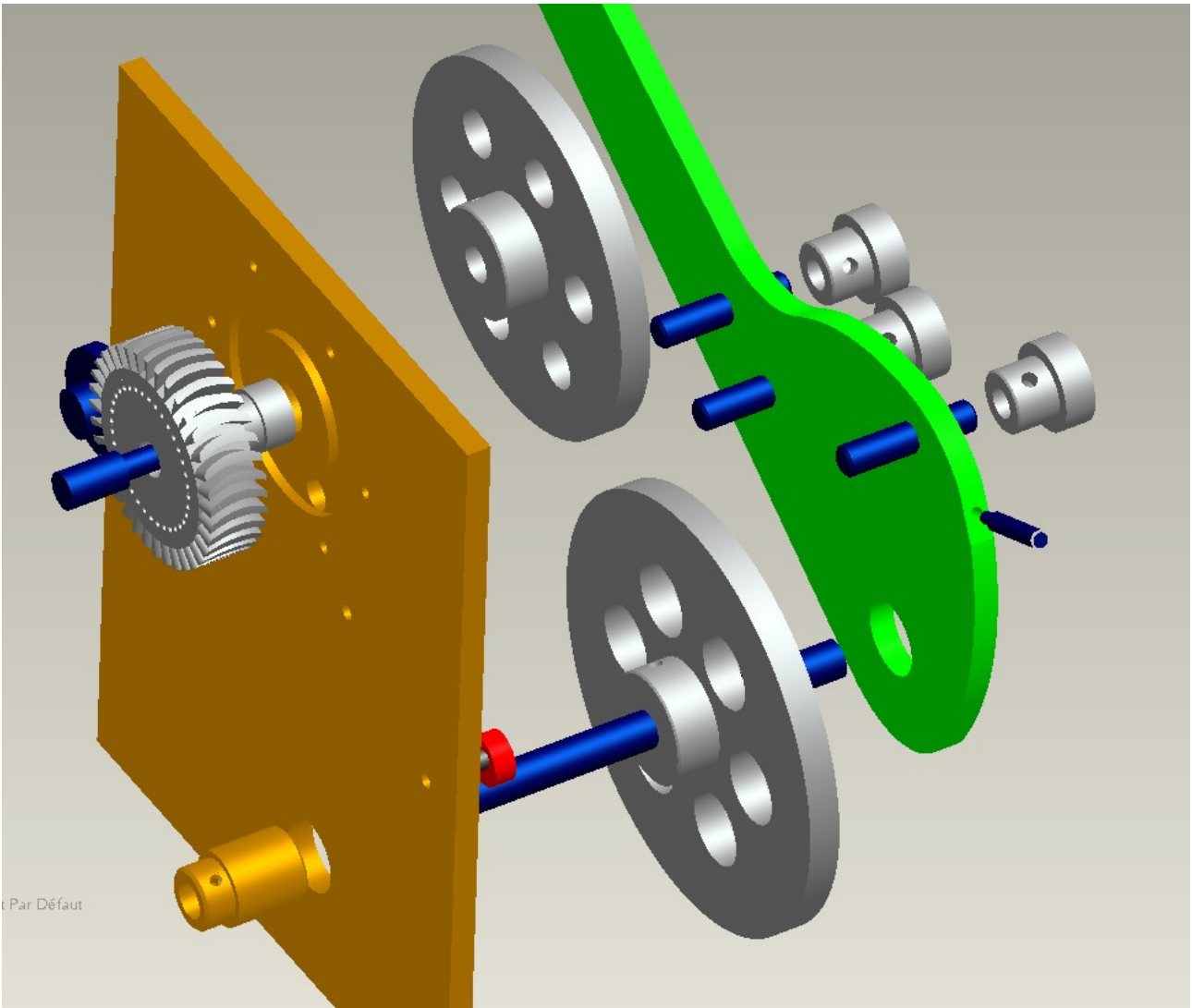
1/ Vues générales du modèle



*Vue avant avec le train d'engrenages et l'inverseur avec ses butées
(sous le pignon primaire de l'arbre turbine se trouve l'échappement)*



Vue arrière (la buse d'admission est en rouge)



2/ Turbine

Généralités

Avant de se lancer il convient de connaître quelques principes sur ce type de turbine de la famille des turbines à action.

Une turbine à action comprend deux sous-ensembles :

- un stator ou bien des injecteurs fixes. Ce sous-ensemble a pour rôle de transformer « l'énergie de pression » en « énergie de vitesse » et d'injecter à très grande vitesse le fluide (vapeur) sur les aubages du rotor avec un angle optimal
- un rotor mobile autour de son axe. Le fluide rentre sur le bord d'attaque de l'aubage et en ressort symétriquement en sens opposé. Pour un usage amateur on peut se satisfaire de deux portions d'arc de cercle.

On notera que les deux faces du rotor sont à la même pression, qui est celle de l'échappement. Les problèmes d'étanchéité sont ainsi considérablement simplifiés.

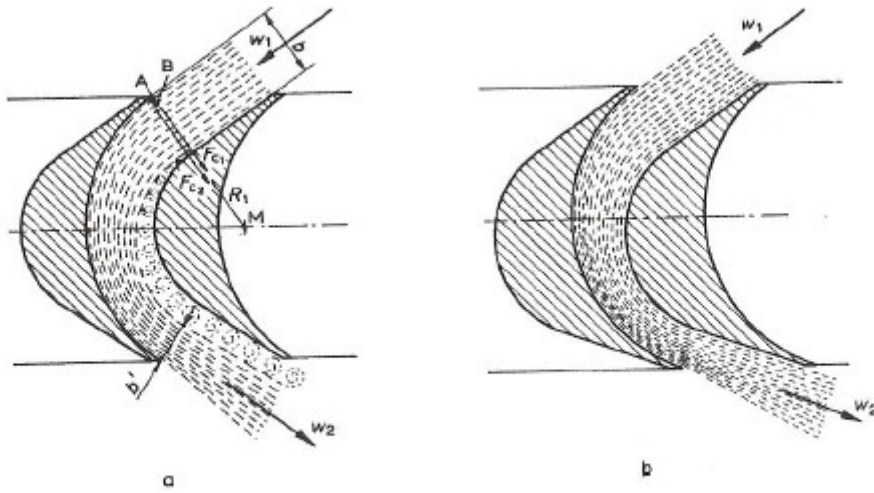
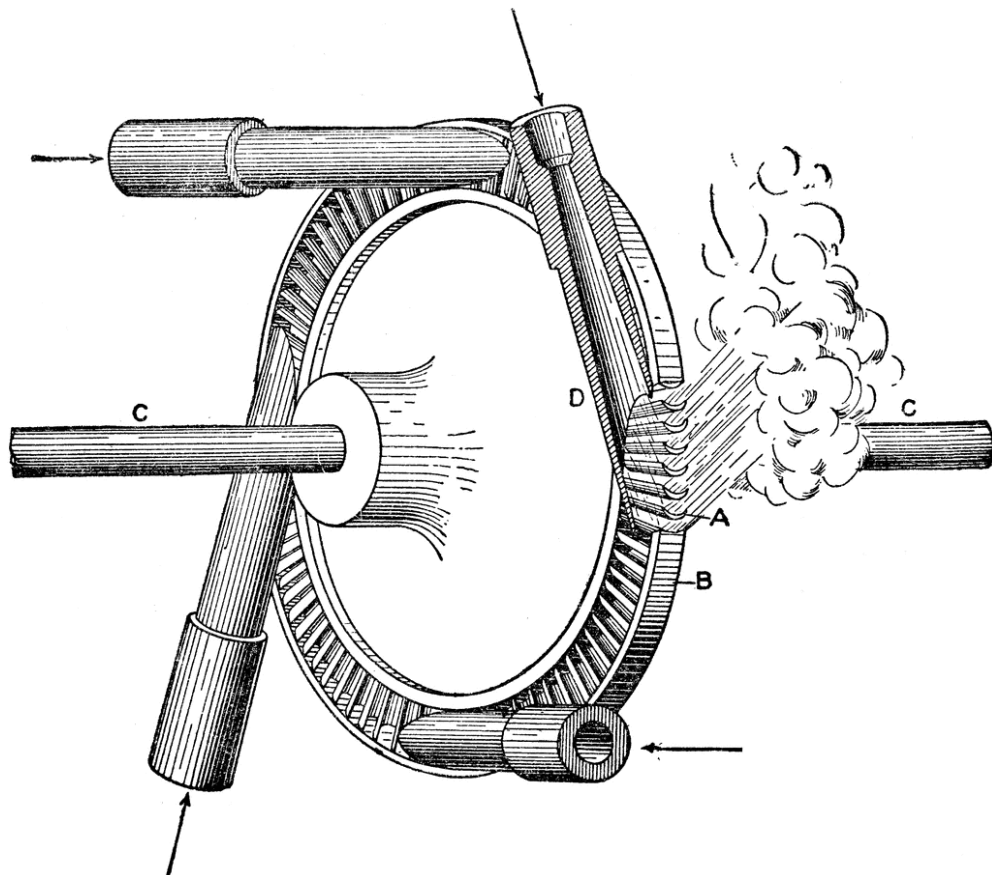


FIGURE 6.4 – principe turbine d'action

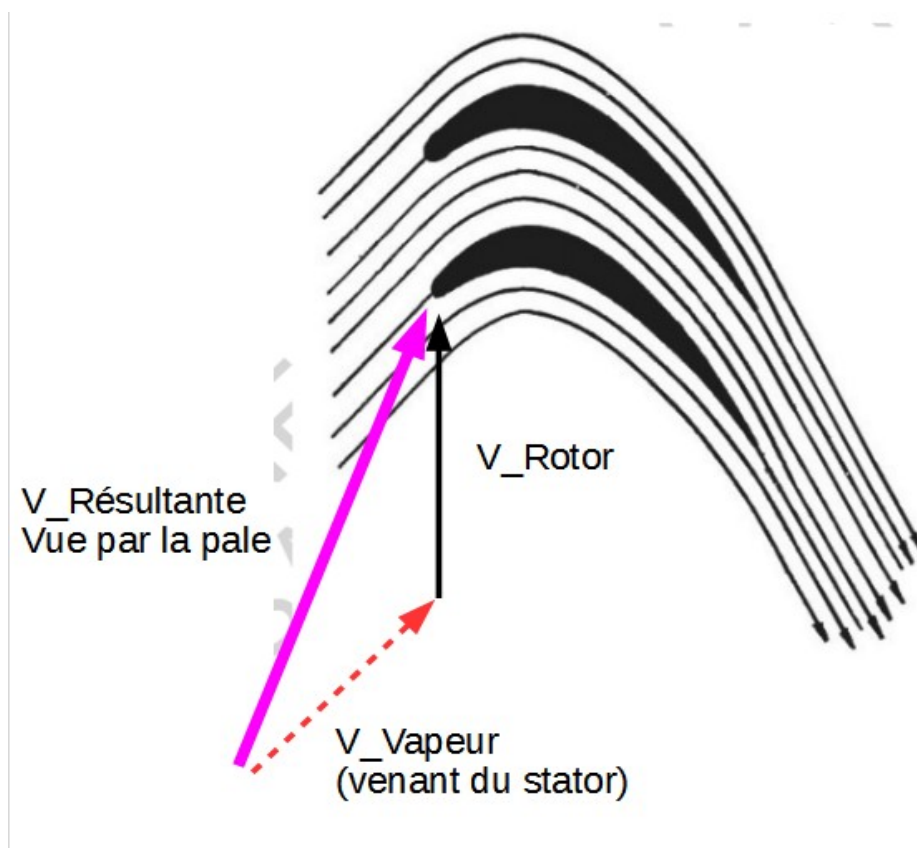


Turbine à injecteurs De Laval

Commentaire

- La turbine de Popular Science est critiquable sur deux points fondamentaux : l'écoulement naturel du fluide n'est pas respecté, la transformation Pression \rightarrow Vitesse n'a pas lieu en amont du rotor.
- La turbine est de petit diamètre et va donc tourner à très grande vitesse. On peut être réservé sur le choix mécanique de simple palier bronze fritté type « oilite » ou laiton.

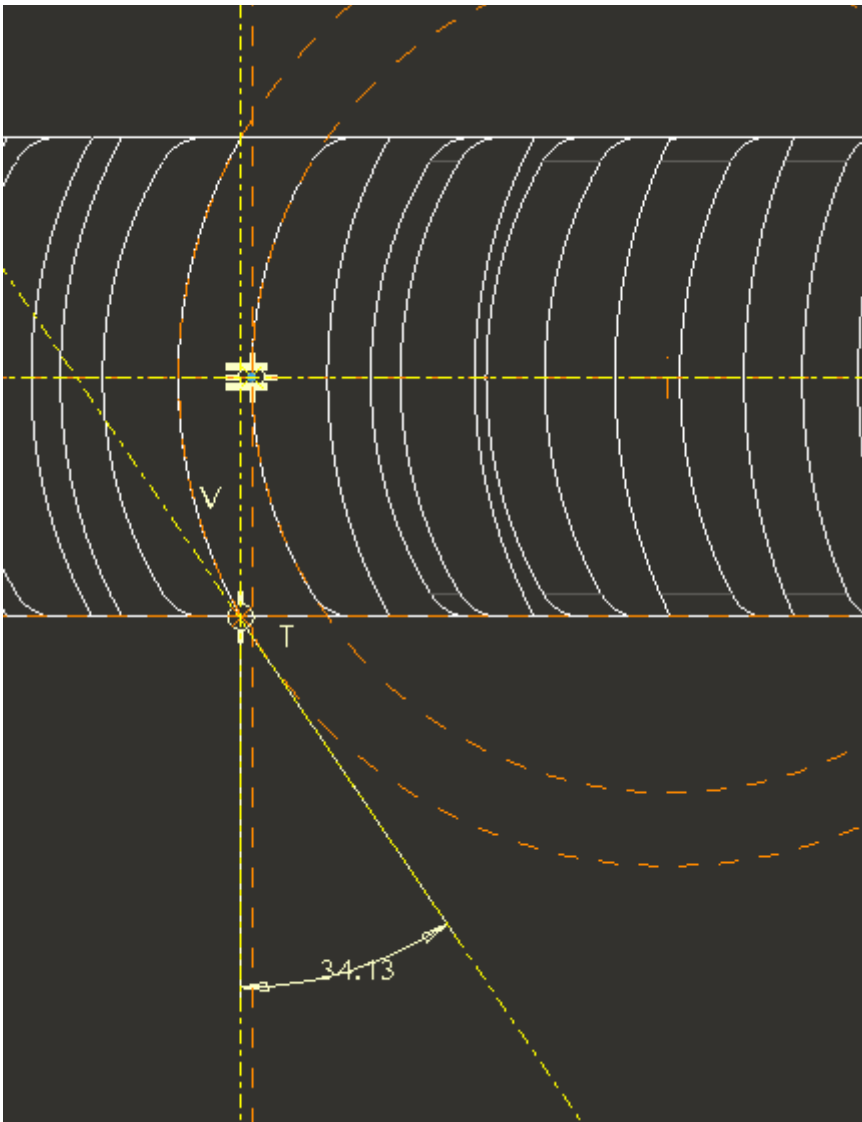
Angle d'incidence d'injection



Chaque aube du rotor se comporte à la manière d'une aile d'avion et l'angle d'incidence vu par la pale aura un effet sur le rendement de ce profil. Mais il faut être conscient que la pale se déplace à grande vitesse et donc que la vitesse résultante est la composition de sa vitesse de déplacement et de la vitesse de la vapeur.

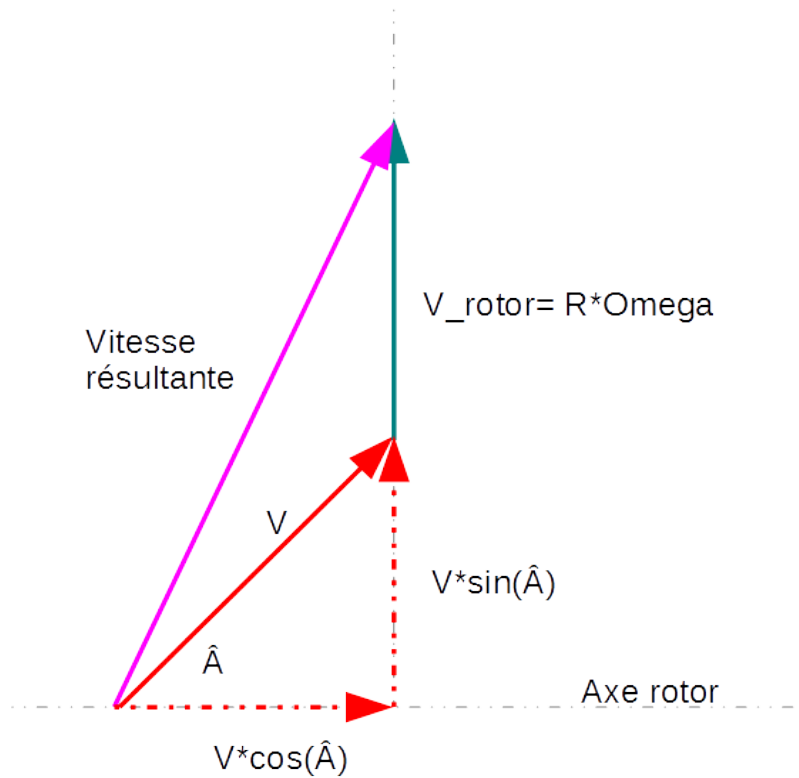
Sur l'épure ci dessous il faudra s'arranger pour que l'angle d'injection vu par la pale soit compris entre 0 et 30°. Le mieux sera de procéder par tâtonnements car s'il assez facile de calculer la vitesse

périphérique du rotor, par contre la grande énigme demeure la vitesse de la vapeur.



L'incidence de la vitesse résultante par rapport à l'axe du rotor peut s'écrire

$$\tan(\beta) = (R \cdot \omega + V \cdot \sin(\alpha)) / (V \cdot \cos(\alpha))$$



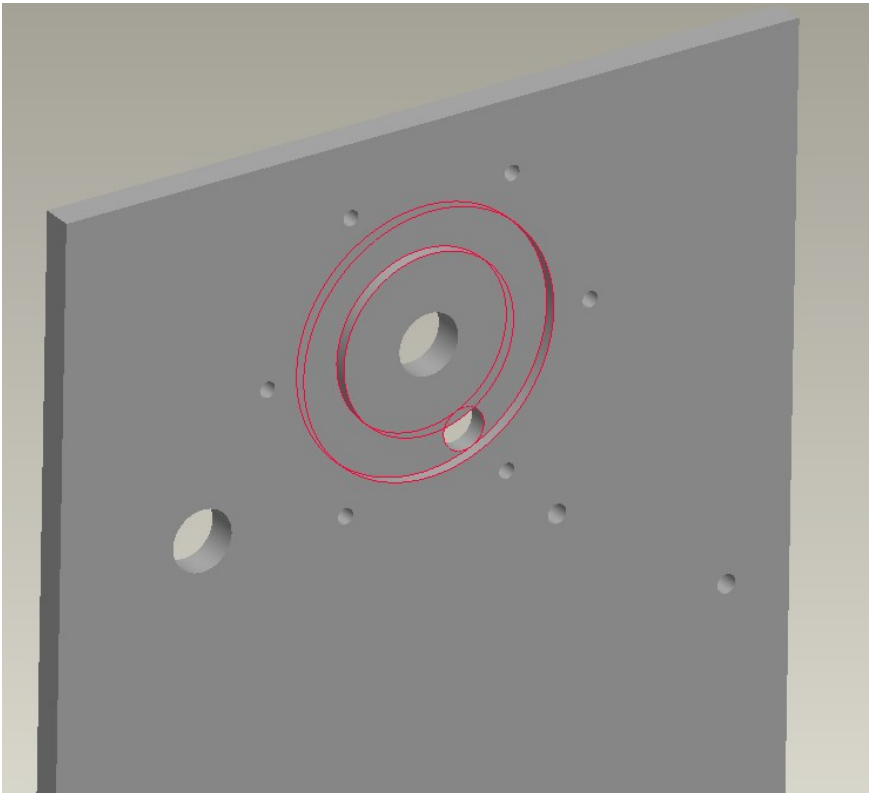
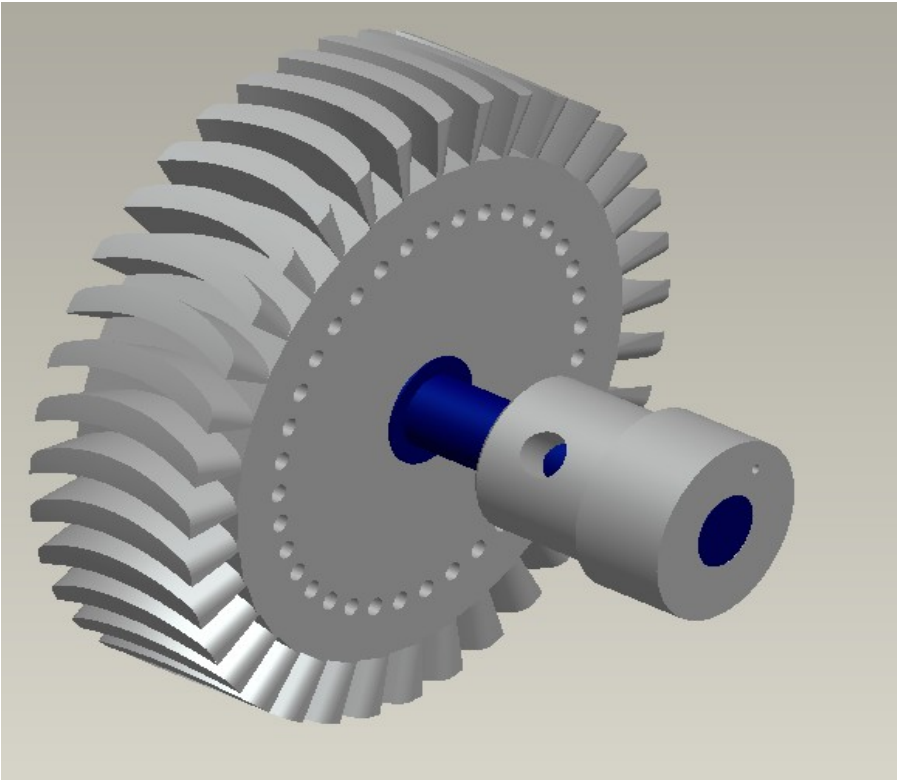
\hat{I} = angle(axe rotor ; vitesse résultante)

\hat{A} = angle (axe rotor ; Vitesse vapeur)

| | | |
|---|---------|-----------|
| V vapeur | 100 | m/s |
| Incidence vapeur $\langle \hat{A} \rangle$ | 0 | degrés |
| | 0,000 | radians |
| Rayon rotor | 17,5 | mm |
| | 0,00875 | m |
| Omega rotor | 25000 | trs/mn |
| | 2617,99 | radians/s |
| $R \cdot \Omega$ | 22,91 | m/s |
| Angle vitesse vue $\langle \hat{I} \rangle$ | 0,23 | radians |
| | 12,9 | degrés |

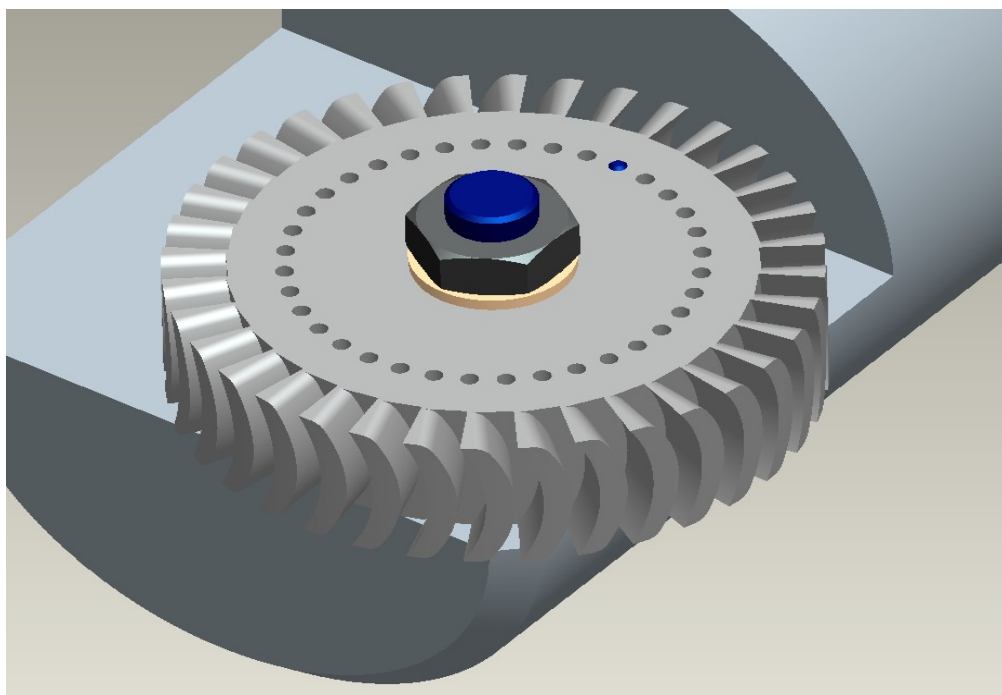
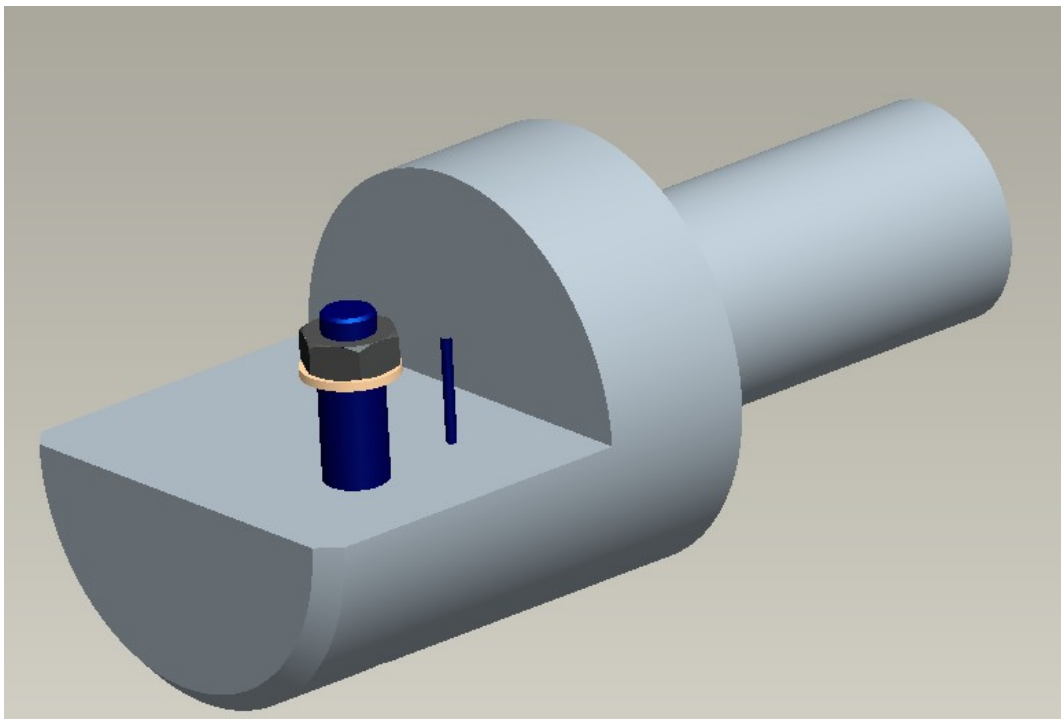
Avec un angle d'incidence nul (injection parallèle à l'axe) et compte tenu des autres données, l'angle vu par la pale est de 13° ce qui n'est probablement pas trop mauvais.

Rotor et collecteur d'échappement

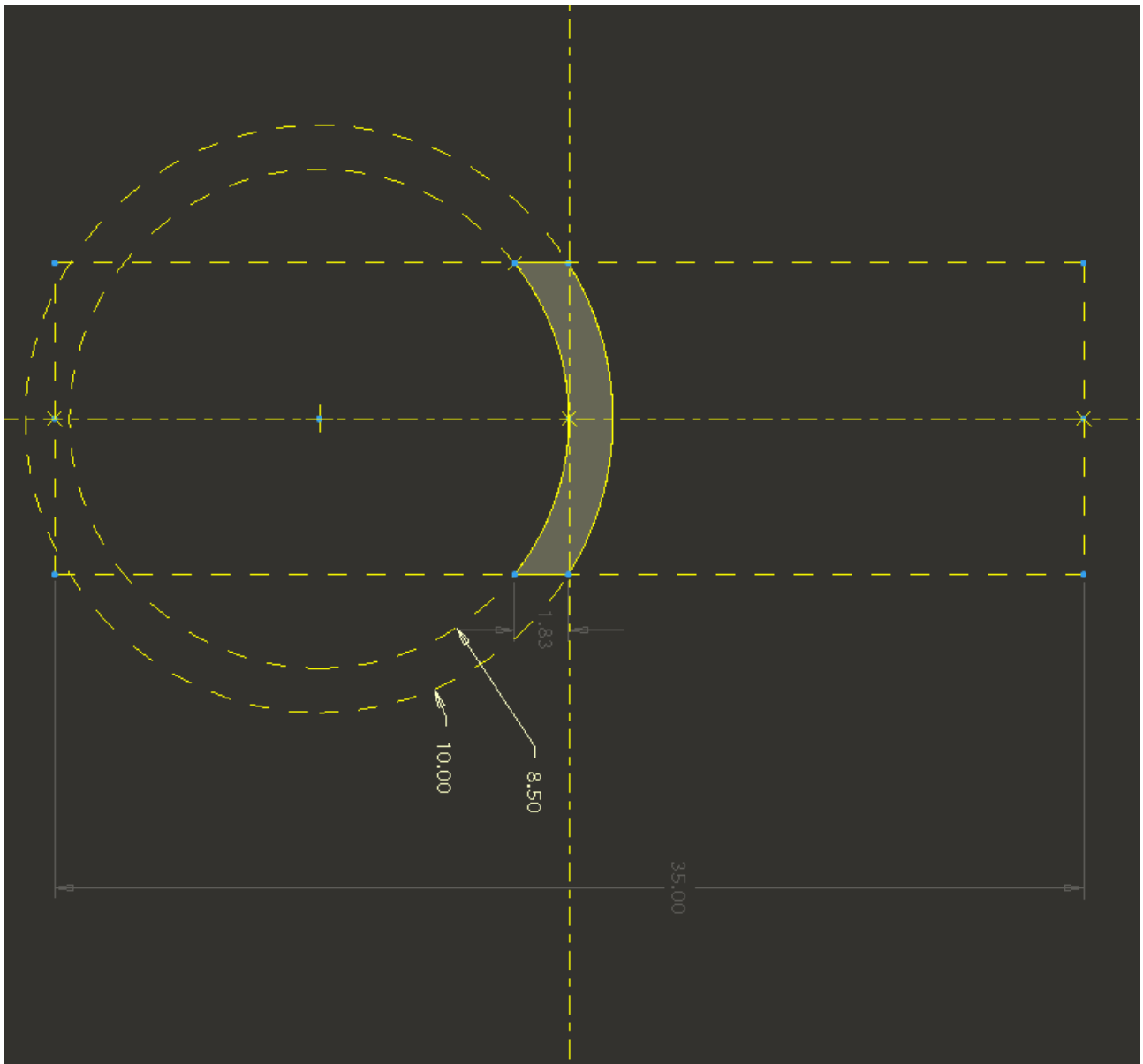


Génération des profils au tour

Les vues qui précèdent montrent l'usinage du rotor et son montage sur le porte rotor. L'ensemble est pris sur mandrin et tourne. L'outil à trépaner est pris sur la poupée mobile. Pour chaque aubage on démonte la roue et on la décale d'un trou sur l'index de positionnement.



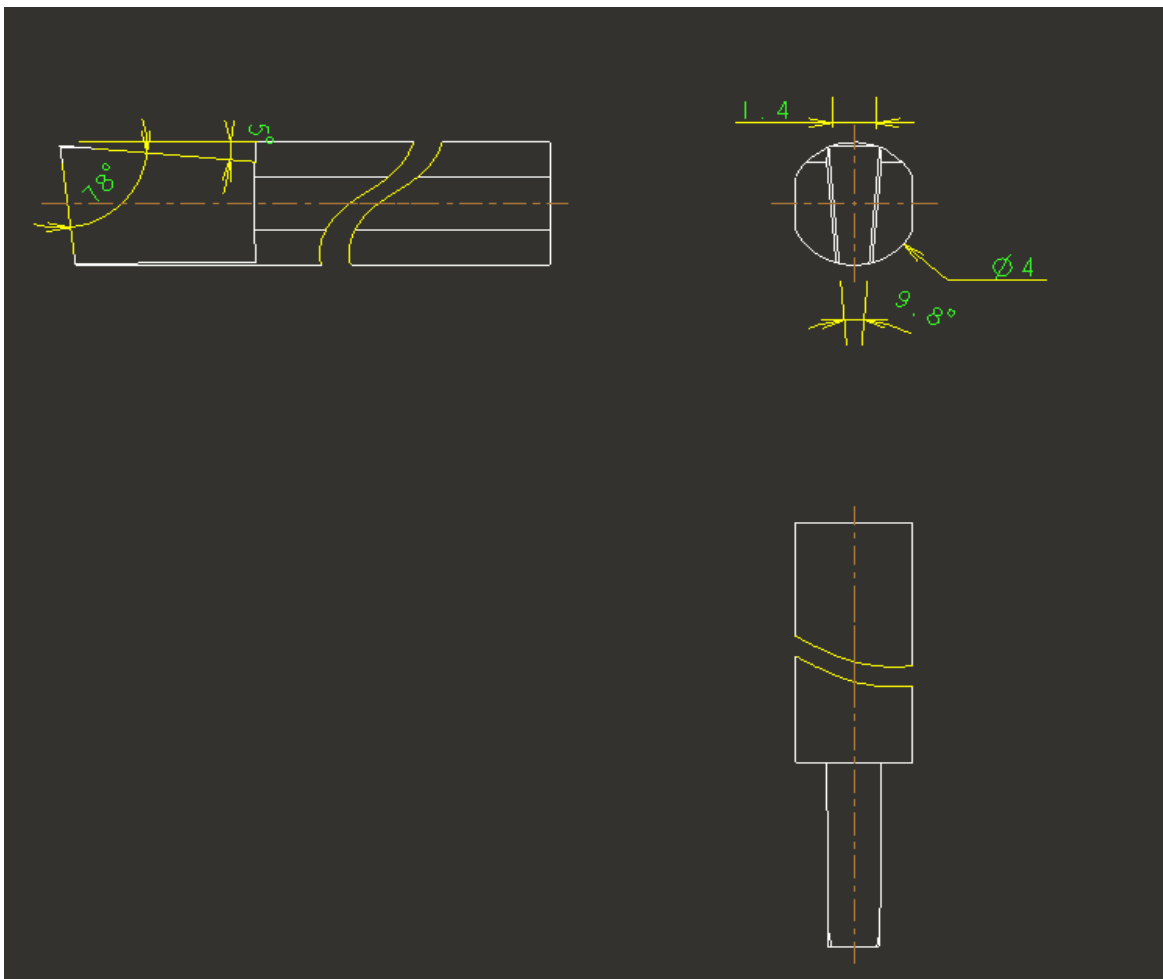
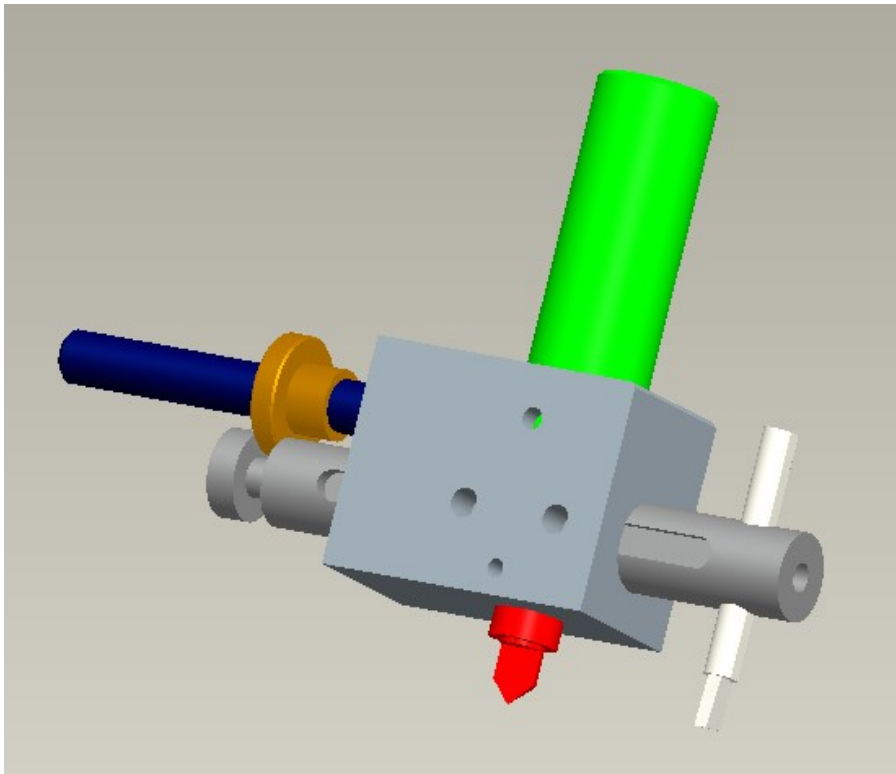
Porte rotor



Vue de la trace de l'outil sur le rotor

On voit sur l'image suivante l'exemple d'outil trépan utilisable avec un montage dans la poupée mobile, par exemple avec des pinces ER25

L'outil par lui-même est du type outil à gorge, mais avec une géométrie de dépouille un peu exagérée afin qu'il ne se coince pas dans la rainure.



4/ Implantation du train d'engrenages

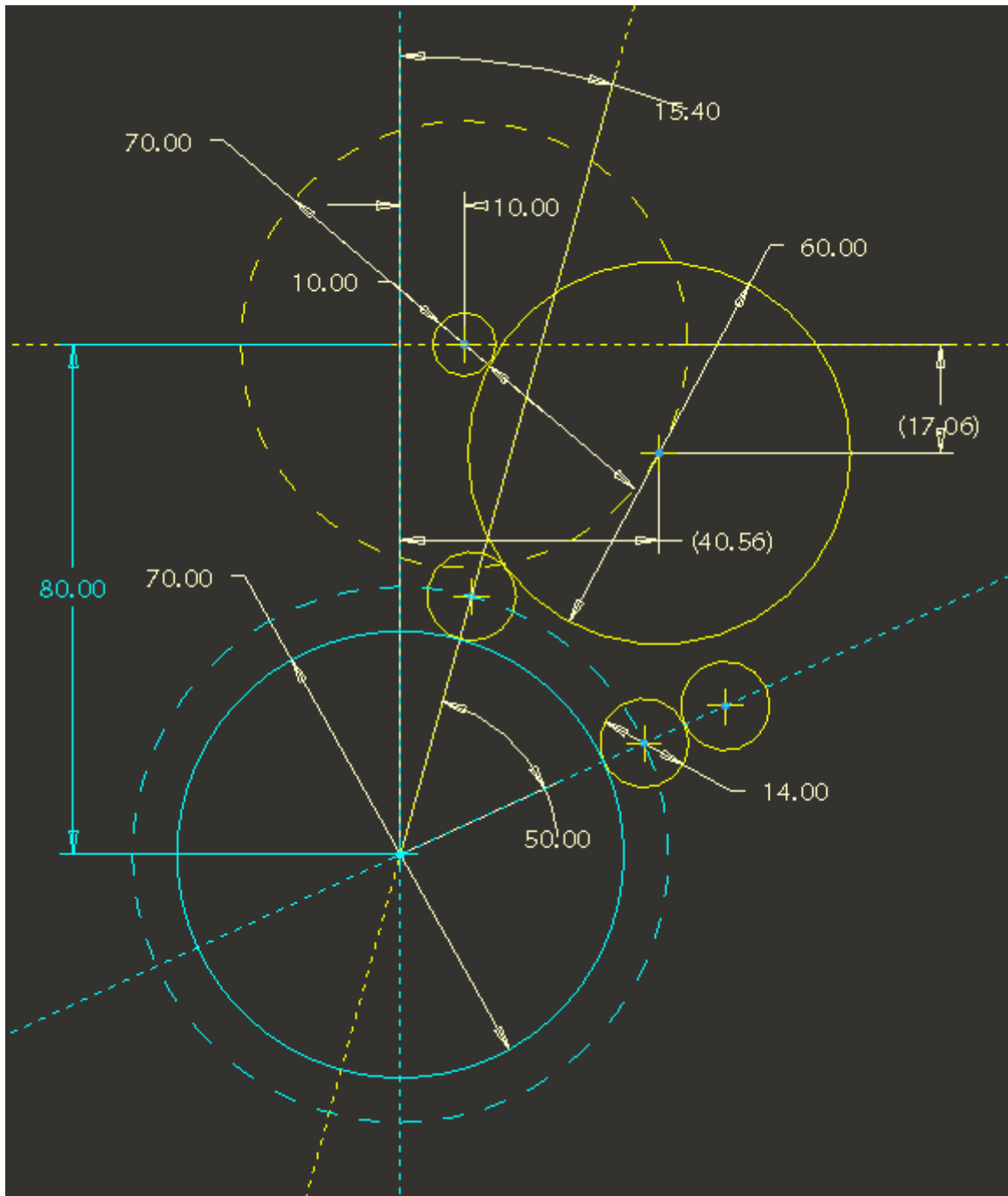
Les turbines ont un couple moteur faible et tirent leur puissance d'une très grande vitesse de rotation. Pour actionner une hélice il donc faut intercaler un dispositif de réduction de vitesse qui est présent sur ce moteur.

Construire le réducteur est un exercice intéressant mais quelque peu coûteux si on achète les engrenages, d'autant qu'aujourd'hui on trouve des moto-réducteurs à trains planétaires pour un coût modéré. L'ensemble proposé par Popular Science est compact, léger et bien pensé. Le lecteur trouvera en Annexe un pense-bête sur les engrenages.

Les engrenages utilisés dans les plans originaux ont des références de chez Boston Gear qui correspondent à un *Diametral Pitch* de $DP=64$ soit un module $m=0,4$. Lorsqu'on consulte les catalogues fournisseurs européens on constate qu'il vaut mieux prendre $m=0,5$ car l'offre est plus étendue et les prix des engrenages standards acier moindres.

On va avoir $Z=20 \rightarrow Z=120 \rightarrow Z=28 \rightarrow Z=140$; le rapport de démultiplication d'une cascade dépend seulement de l'entrée et de la sortie : $20/140 = 1/7$.

Pour implanter les engrenages on commence par faire une épure à l'échelle 1:1 voire 2:1. Il suffit de se souvenir que les roues sont tangentes par leur diamètre primitif $D_p=m*Z$, Z étant le nombre de dents et m le module.



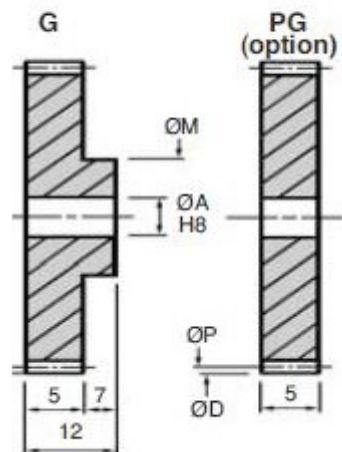
En général la position du pignon de sortie est imposée par celle de l'arbre d'hélice. Ensuite on procède de proche en proche. Par exemple le centre de rotation du pignon Z=28 dents de l'inverseur se trouvera sur un cercle de rayon $R=35+7=42$ mm. La position de l'axe de turbine est moins critique mais en général elle ne peut évoluer que dans des limites restreintes. Un fois cet axe fixé le reste en découle par construction.

On voit ci-après les caractéristiques des engrenages.

Source HPC-europe

<http://shop.hpceurope.com/fr/produit.asp?prid=179&produit=Engrenage+droit&famille=Engrenages+%C3%A0+denture+droite>

| | |
|--------------|----------|
| Matière : | Module : |
| Acier 20NCD2 | 0,50 |



| Réf | Z dents | Dprimitif | Dext | Dmoyeu | Dalésage | Masse | Prix HT |
|----------|---------|-----------|------|--------|----------|--------|---------|
| G0.5-20 | 20 | 10 | 11 | 8,5 | 4 | 0,049 | 16,49 |
| G0.5-28 | 28 | 14 | 15 | 10 | 5 | 0,083 | 20,02 |
| G0.5-120 | 120 | 60 | 61 | 18 | 6 | 0,1116 | 36,87 |
| G0.5-140 | 140 | 70 | 71 | 18 | 6 | 0,1507 | 44,06 |

Remarques :

- On pourrait certainement utiliser un pignon moins encombrant et moins coûteux que le 120 dents qui est imposé par l'emprise de la turbine et la volonté de simplicité extrême de réalisation.
- On notera que les pignons de l'inverseur tournent presque à la vitesse de l'arbre de turbine ; en effet, on va avoir $z=20 \rightarrow 120 \rightarrow 28$; pour des pignons en cascade le rapport de démultiplication dépend seulement de l'entrée et de la sortie : $20/28 = 0,71$ autrement dit les pignons de l'inverseur tourneront à 71 % de la vitesse d'entrée. Il vaudra mieux inverser à vitesse nulle sous peine de ravager les dents des roues.
- On peut aussi s'orienter vers les réducteurs fournis avec les moteurs électriques à courant continu comme celui de l'image qui suit. Pour les ensembles d'entrée de gamme, les prix s'échelonnent entre 25 et 35 € TTC. Ces petits moteurs tournent, à la manière de la turbine à des vitesses élevées avec des couples faibles.



RATIOS NOW AVAILABLE AS EX-STOCK ITEMS.

| | | |
|-----------|--------------|---------------------------------|
| 950D2.51 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 2.5:1 |
| 950D61 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 6:1 |
| 950D111 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 11:1 |
| 950D501 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 50:1 |
| 950D1001 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 100:1 |
| 950D1481 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 148:1 |
| 950D5001 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 500:1 |
| 950D8101 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 810:1 |
| 950D30001 | (4.5v - 15v) | WITH RE 385 MOTOR. RATIO 3000:1 |

Compléments techniques

Engrenages notions de base

Les dents d'un engrenage ont un profil particulier qui leur permettent de rouler l'une sur l'autre (et surtout pas de glisser). On utilise presque toujours le profil en développante de cercle défini par un angle (angle de pente appelé aussi angle de pression en mécanique), en général 20°. Ce type de profil n'est pas trop sensible à de petites erreurs d'entraxe.

Deux roues ne s'engrènent que si elles ont le même module « m » .

Le module est homogène, en terme d'unité, à des millimètres.

Les anglo-saxons utilisent le Diametral Pitch ; (DP)= $m*25,4$

Commentaire

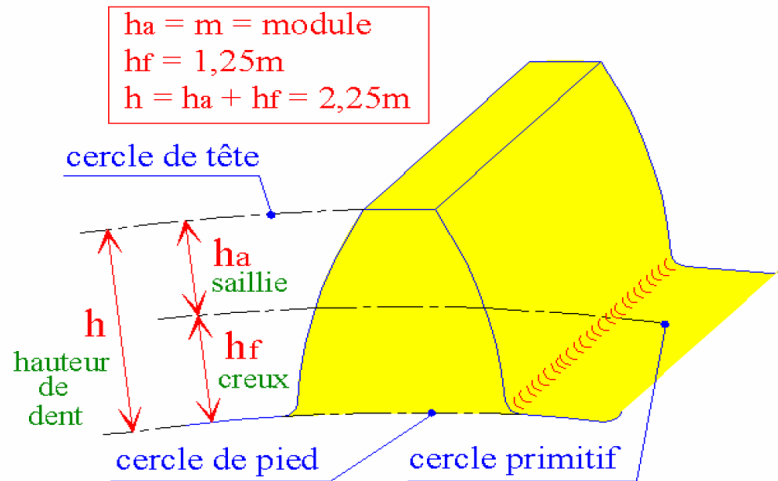
On notera qu'il existe un nombre minimal de dents pour que 2 pignons s'engrènent sans se coincer. Cela est dû à la géométrie des dents. On parle d'interférence des dents.

Nombre minimal de dents (pour éviter l'interférence) avec une denture à

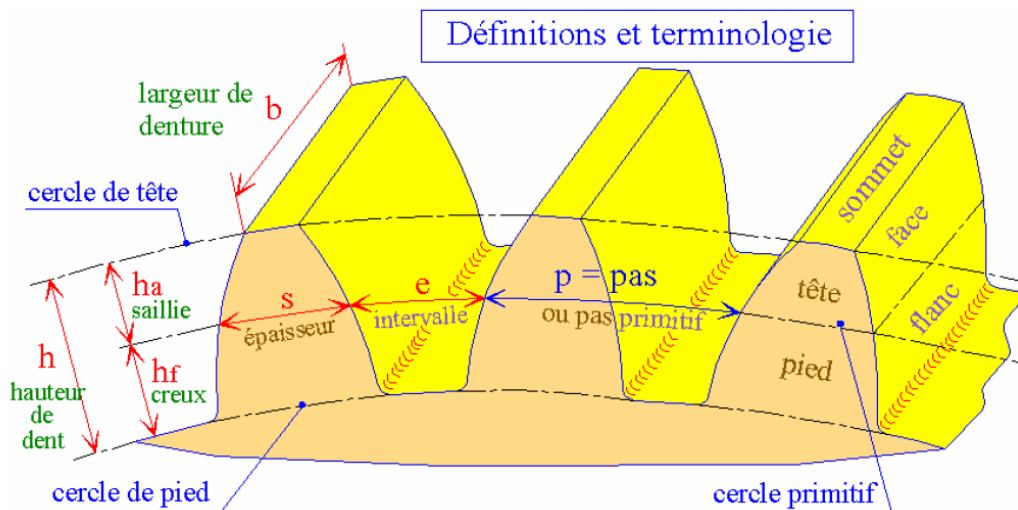
développante de cercle entre deux pignons

| | | | | | |
|-------|------------|------------|------------|-------------|------------------|
| Z_A | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 |
| Z_B | de 13 à 16 | de 13 à 26 | de 13 à 45 | de 13 à 101 | de 14 à ∞ |

<http://perso.orange.fr/herve.jardin-nicolas/>



Les valeurs ci-dessous sont établies pour des engrenages courants sachant que certains paramètres géométriques peuvent varier.



- a) **Le pas** : noté « p ».
 Le pas de la denture définit la distance entre deux dents.
 Il est mesuré sur le diamètre primitif et il correspond à la longueur de l'arc situé entre deux profils de dents consécutif.
 « p » est donné par la relation : $p = \pi.m$
- b) **La largeur de denture** : notée « b ».
 La largeur de denture correspond à la longueur de la dent.
 « b » est donné par la relation : $b = k.m$ avec $(7 \leq k \leq 12)$.
- c) **Le diamètre de tête** : notée « da ».
 C'est le diamètre extérieur du pignon et de la roue avec $da = d + 2.m$
 Soit pour l'élément « 1 » $da1 = d1 + 2.m$
 Soit pour l'élément « 2 » $da2 = d2 + 2.m$
- d) **Le diamètre de pied** : notée « df ».
 C'est le diamètre intérieur du pignon et de la roue mesuré entre les dents avec $df = d - 2,5.m$
 Soit pour l'élément « 1 » $df1 = d1 - 2,5.m$
 Soit pour l'élément « 2 » $df2 = d2 - 2,5.m$
- e) **L'entraxe** : noté « a ».
 C'est la distance entre les deux axes de rotation de « 1 » et « 2 », c'est aussi la distance $[O1, O2]$.

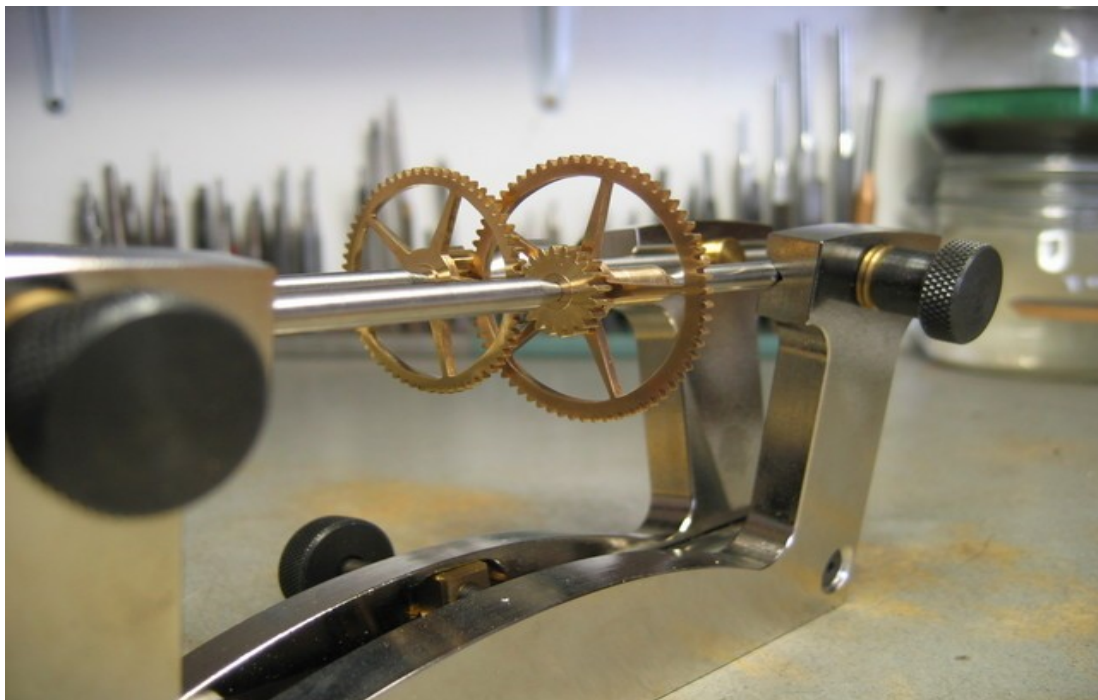
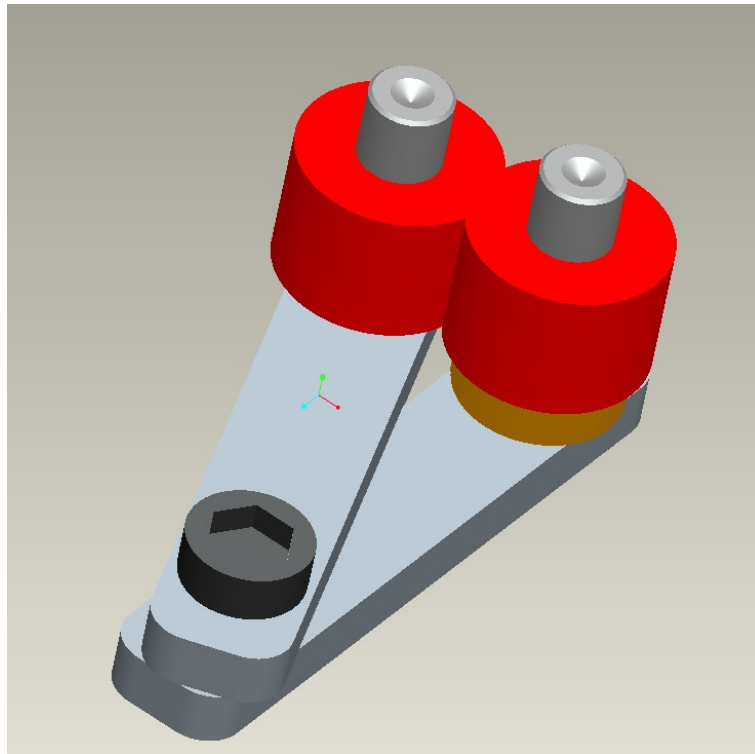
L'entraxe de l'engrenage est
$$a = \frac{d1 + d2}{2} = \frac{m(Z1 + Z2)}{2}$$

Pour le réglage d'entraxe d'engrenage, le plus simple est d'utiliser un petit gabarit de mesure parfois appelé compas d'engrenage.

Ce petit gadget a un lointain cousinage avec l'outil d'horloger du nom de « compas aux engrenages ».

Le schéma ci-dessous se suffit à lui même. Simplement percer et aléser proprement les logements des axes d'engrenages pour qu'il n'y ait pas de jeu.

Pour connaître l'entraxe on rapproche les branches du compas jusqu'à ce que l'engrènement soit exact et fluide. On mesure la distance extérieure des deux axes, et on lui soustrait le demi-diamètre du premier axe et le demi-diamètre du second axe. On a la valeur de l'entraxe.

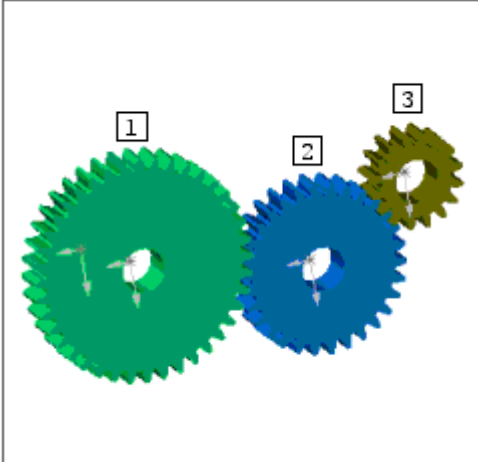


<http://forum.horlogerie-suisse.com/viewtopic.php?t=4659>

Démultiplication

<http://mathenjeans.free.fr/amej/edition/0101engr/01daeng1.html>

Cascade



D'après la formule précédente on a: $W_2 = \frac{Z_1}{Z_2} W_1$
 (pour le premier couple d'engrenages {1+2})

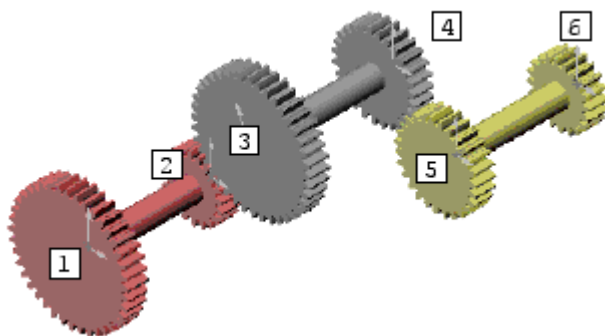
on a aussi: $W_3 = \frac{Z_2}{Z_3} W_2$
 (pour le deuxième couple d'engrenages {2+3})

Si on remplace Z_2 par sa valeur on a: $W_3 = W_1 \frac{Z_1}{Z_2} \cdot \frac{Z_2}{Z_3}$

En simplifiant on obtient $W_3 = W_1 \frac{Z_1}{Z_3}$.

Le rapport de démultiplication ne dépend que du rapport entre la roue d'entrée et la roue de sortie

Arbre multiples

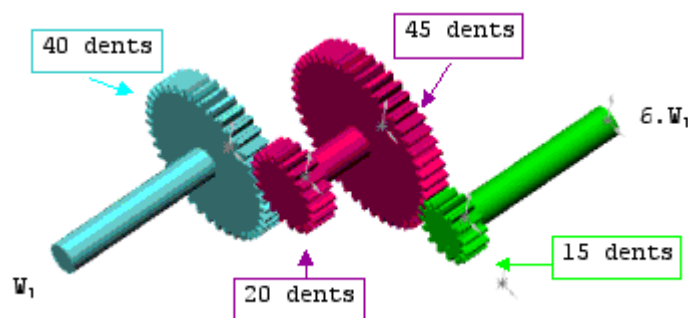


On a les relations

$$W_4 = W_1 \frac{Z_2}{Z_3} \quad W_6 = W_4 \frac{Z_4}{Z_5}$$

donc $W_6 = \frac{Z_2}{Z_3} \cdot \frac{Z_4}{Z_5} W_1$

Exemple de rapport 6:1



Les engrenages (usinage amateur)

Il n'est pas toujours facile de trouver les engrenages qui conviennent et ils sont finalement assez coûteux. Il existe des traités entiers sur la théorie, la conception et la fabrication des engrenages, preuve que le sujet n'est pas trivial. Pour les engrenages courant (développante de cercle) de types

droit, oblique ou à vis sans fin, leur usinage n'est pas très difficile mais demande de la minutie. En gros deux types¹ d'usinages intéressent l'amateur :

A/ par fraise module :



L'outil a la forme de la dent à tailler. Ils sont largement utilisés en horlogerie traditionnelle. Les principales caractéristiques sont :

- une taille lente, dent par dent
- une division précise pour retomber dans le pas
- un jeu (6 à 8 outils) par module, chaque outil ne taillant qu'un nombre de dent donné.
- Outillage coûteux² et difficile à fabriquer pour un amateur

Commentaire

Les 8 fraises normalisées permettent de tailler les pignons suivants:

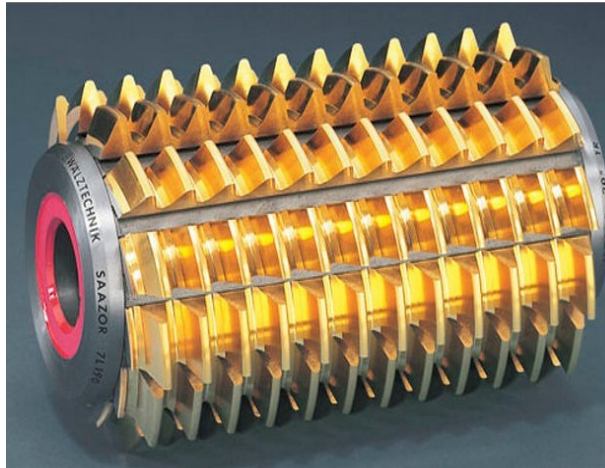
12-13 dents ---> N°1
14-16 dents ---> N°2
17-20 dents ---> N°3
21-25 dents ---> N°4
26-34 dents ---> N°5
35-54 dents ---> N°6
55-134 dents ---> N°7
135 et + ---> N°8

Attention pour les fraises-modules anglo-saxones en Diamétral Pitch c'est le contraire, leur n°1 correspond à la n°8 du système métrique.

La profondeur de passe est égale à la profondeur de dent $h=2,25*m$ pour les engrenages standards. Sur les machines industrielles on procède en deux passes : ébauche $4/5 h$ et finition $1/5h$. Pour une dent de profondeur 1,8mm on ébauchera à $1,8*4/5= 1,44mm$ soit 1,4mm et on finira par une passe de $1,8-1,4=0,4mm$

B/par fraise mère :

-
- 1 Il existe aussi les usinages par brochage, outil crémaillère, électro-érosion, taille directe en machine à commande numérique, frittage, moulage
 - 2 Au moment de la rédaction de ce mémo on trouvait cependant des outils d'origine chinoise ou russe tout à fait abordables



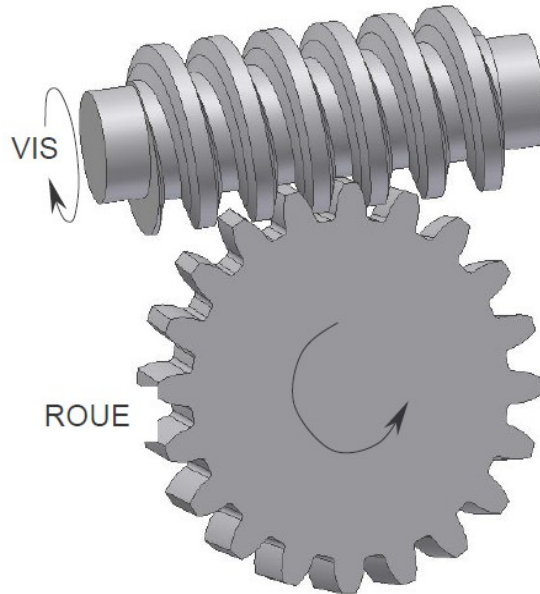
Cet usinage est basé sur le principe de l'engrènement d'une vis sans fin sur une roue dentée.

L'outil se présente comme un taraud dont l'angle de profil de vis³ est égal à deux fois l'angle de pression de l'engrenage (en général $40^\circ = 2 \cdot 20^\circ$). Le pas de cette « vis » est le pas de l'engrenage.

Les principales caractéristiques sont :

- un seul outil par module (taille de 13 dents jusqu'à la crémaillère)
- outil peu coûteux pour les usinages standards. En étant minutieux on peut d'ailleurs se fabriquer l'outil (voir annexe)
- taille rapide
- taille réservée au profil de dent par développante de cercle (le plus courant)
- l'ébauche doit tourner de façon synchronisée avec la fraise mère, exactement comme le ferait un roue dentée engrenée sur un vis sans fin. Pour un amateur qui usine occasionnellement des engrenages, la synchronisation de la roue avec la fraise-mère reste un problème à résoudre. On voit sur Internet des usinages amateurs dans lesquels la roue à tailler tourne libre et est entraînée par la fraise mère elle-même. Personnellement je n'y suis jamais parvenu .

³ Pour les filetages classiques l'angle de profil de vis vaut 60°



Fabrication⁴ des engrenages (usinage amateur)

La séquence est la suivante :

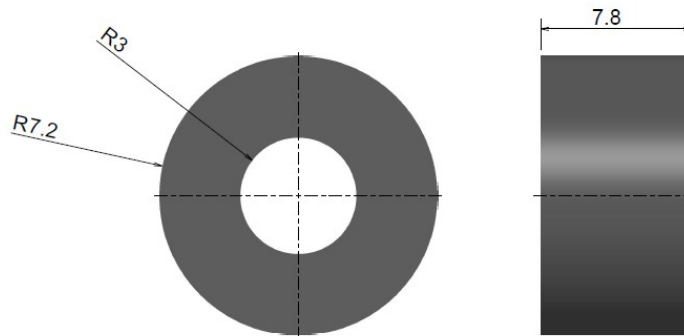
- calcul des caractéristiques géométriques de l'engrenage à tailler
- fabrication des ébauches
- montage sur fraiseuse entre pointes, en général avec sur un système diviseur (il existe des solutions plus simples en usinage amateur par recopie d'engrenage),
- réglage des axes
- taille directe

Calcul des caractéristiques géométriques

- Engrenages $Z=16$ et $m=0,8$.
- Diamètre primitif $d=m*Z=16*0,8 = 12,8$ mm
- Diamètre de tête $Da=d+2*m= m*Z+2m = 14,4$ mm, c'est le diamètre extérieur de l'ébauche
- Diamètre de pied $Df= d- 2,5*m = 12,8-2,5*0,8= 10,8$ mm, ce sera le diamètre maxi de l'arbre d'usinage
- Hauteur de dent $=2,25 *m= 1,8$ mm
- Saillie $ha= m=0,8$ mm
- Épaisseur de dent $= 3,14*m/2=3,14*0,8/2= 1,2$ mm

⁴ Je décris simplement la manière dont je procède, ce n'est probablement pas la manière académique de s'y prendre

- Largeur d'engrenage $7 \cdot m < b < 16 \cdot m$ soit entre 5,5mm et 13mm
- Entre-axes théorique (sans jeu) $a = m \cdot (Z_1 + Z_2) / 2 = 0,8 \cdot (16 + 16) / 2 = 12,8 \text{ mm}$.
- Angle de rotation pour avancer d'une dent $\Delta_{\text{angle}} = 360 / Z = 360 / 16 = 22,5^\circ$
- Diamètre maxi de l'arbre si pignon rapporté sur un arbre:
 $D_f - 2 \cdot \text{épaisseur de la couronne} = 10,8 - 2 \cdot 3 = 4,8 \text{ mm}$ on prendra $D = 5 \text{ mm}$



Engrenage Mod 1 Z=16
laiton ou bronze

Mode d'usinage des engrenages

Première étape : Ebauches

Rond de $D=15 \text{ mm}$; pointage ; perçage à $D-0,1 \text{ mm}$;

Alésage à D ; $D =$ diamètre de l'arbre recevant l'engrenage

Commentaire :

Tronçonnage, reprise au tour pour mise à la cote de largeur du barreau « b »
 Comme nous avons 2 engrenages identiques on usine un barreau que l'on découpera à la demande

Les erreurs étant vites arrivées il vaut mieux préparer deux ébauches.

Deuxième étape : Arbre d'usinage et mise à la cote de l'ébauche

Penser à dimensionner l'arbre d'usinage de manière à disposer des dégagements latéraux pour la fraise et son arbre porte-outil.

Usiner l'arbre outil en premier. Forer un logement de contrepointe au foret à centrer.

Contrôler au comparateur qu'il n'y a pas de faux rond.

Laisser l'arbre en place.

Monter l'ébauche la serrer avec un écrou-frein ou écrou+contre-écrou

Usiner à la cote $D_a = 14,4 \text{ mm}$ en plaçant une contre-pointe tournante ou fixe. Contrôler au micromètre le diamètre

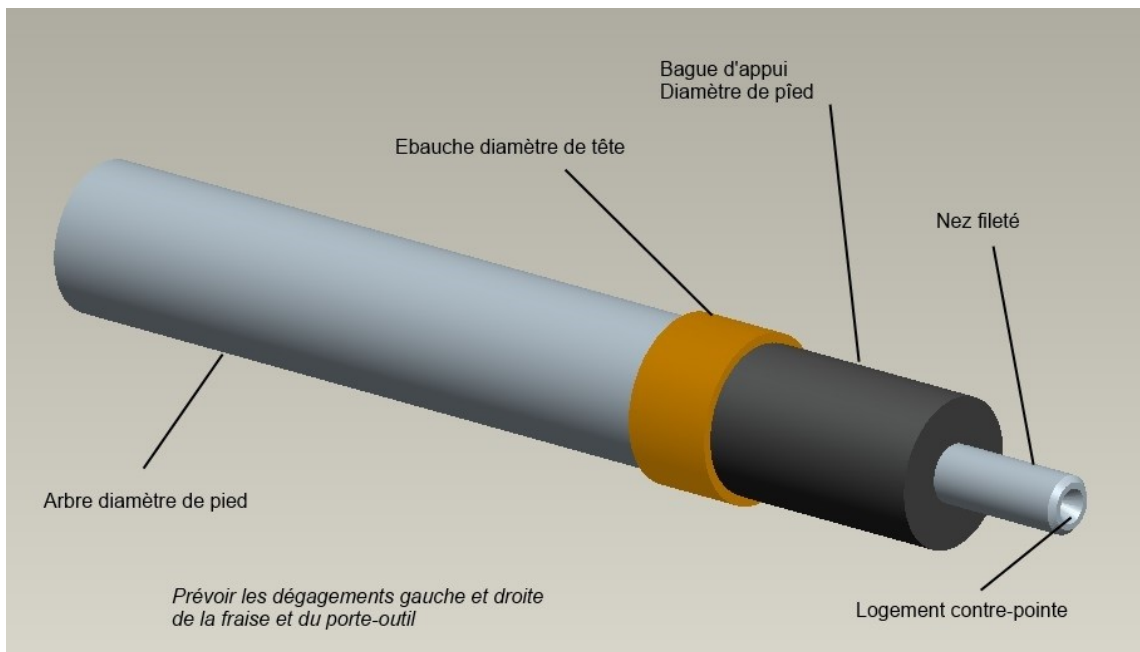
Contrôler au comparateur qu'il n'y a pas de faux-rond

Transférer l'ensemble vers le plateau diviseur

Commentaires

L'idéal serait d'usiner l'arbre directement sur un porte-pince inséré dans la broche fixe du tour. On peut aussi centrer avec une grande précision sur un mandrin à 4 mors indépendants. Encore faut-il en avoir un et le processus est quelque peu fastidieux. On peut cependant avoir un centrage raisonnable avec un mandrin 3 mors en procédant de la façon suivante :

Prendre le rond au 3 mors en serrant modérément jusqu'à ne plus pouvoir faire bouger le rond à la main même en forçant. Avec un comparateur repérer le point le plus haut en faisant tourner le mandrin à la main. Noter au feutre. Continuer de tourner jusqu'à noter le point le plus bas. Retirer le comparateur. Calcul la valeur totale du faux-rond. A l'aide d'un petit marteau taper un coup léger et sec sur le mors le plus proche du point haut. Recommencer le contrôle. En général si le mandrin est de bonne qualité on aura un centrage à +/- quelques centièmes ; 0,07mm total à 40mm du mandrin dans mon cas. C'est largement suffisant pour ce type d'application.



Pour $Z=16$ et $m=0,8$ on a diamètre de pied $D_f=10,8\text{mm}$ et diamètre de tête $D_a=14,4\text{mm}$

Troisième étape : Réglage de l'outillage. Montage



Montage sur la poupée diviseuse d'un alidade de division, si on en possède un bien sûr. Si cet accessoire est de qualité, le processus est accéléré et surtout le risque d'erreur et d'imprécision considérablement diminué. J'ai placé en annexe un méthode décrivant le travail à l'alidade.

Sinon... on se fabrique une table d'angles à suivre, sur une feuille que l'on place sous pochette cristal. C'est assez fastidieux et les risques d'erreur sont très élevés. Cela va bien lorsque le nombre de dents est faible.

Il y a 16 dents donc l'accroissement angulaire est de $\Delta = 360/16 = 22,5^\circ$

| | | | | | | | | | |
|--------------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|-------|-----|
| <i>Etape</i> | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | |
| Angle | 0 | 22,5 | 45 | 67,5 | 90 | 112,5 | 135 | 157,5 | |
| <i>Etape</i> | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 |
| Angle | 180 | 202,5 | 225 | 247,5 | 270 | 292,5 | 315 | 337,5 | 360 |

- Alignement de l'axe de la poupée diviseuse avec le grand axe de la table. (conventionnellement nommé X)
- Après bridage vérifier le parallélisme de cet axe avec la surface du plan de la table
- Réglage de la fraise-module par rapport à l'axe de poupée diviseuse.
- Montage du dispositif d'usinage avec son ébauche
- Montage de la contrepointe fixe qui ne sert qu'à reprendre les efforts de poussée latéraux.
- Réglage d'affleurement de l'outil

Vérification de l'alignement de l'axe du diviseur avec l'axe longitudinal de la table et vérification de son parallélisme avec la surface . On utilise une barre rectifiée et un comparateur.

Une fois ceci effectué on monte l'ébauche sur le plateau diviseur. Ensuite on vérifie au comparateur qu'il n'y a pas de faux-rond sur l'ébauche en faisant tourner la poupée avec sa manivelle. Ces plateaux tournant ne sont pas vraiment conçus d'origine pour travailler dans cette position verticale et il convient de s'assurer que tout est en ordre. Quelques dixièmes de faux rond sur un engrenage de petit module et l'engrenage est bon pour la caisse à rebuts. C'est tout l'intérêt d'une poupée fixe qui va diminuer le faux rond lié aux jeux.

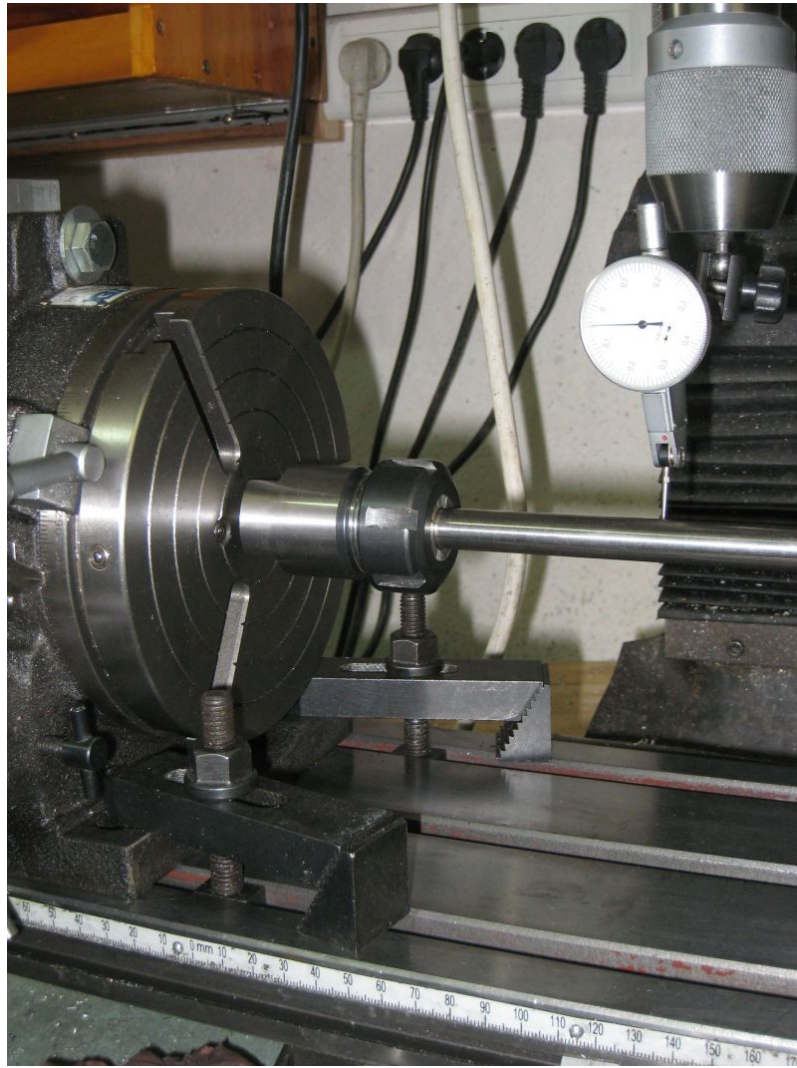
Réglage de la hauteur d'outil

Cette étape est absolument cruciale pour la qualité d'engrènement. Elle ne souffre aucun compromis

On mesure préalablement l'épaisseur de la fraise-module

Ensuite j'utilise un inclinomètre électronique, appareil qui est très peu coûteux. Mise à zéro sur la table de fraiseuse bien nettoyée. Pose sur une cale de fraisage rectifiée. L'équipage est mis en appui sur l'outil et sur l'ébauche. Bien vérifier que la cale repose sur le corps de l'outil dont on a mesuré l'épaisseur. Réglage à zéro de l'inclinomètre par déplacement vertical fin de la broche de fraiseuse. Descente de la broche de $(D_{\text{ébauche}} - \text{Epaisseur}_{\text{fraise}})/2$

On peut aussi utiliser un pige de réglage avec bagues additionnelles. C'est un méthode sûre et précise intéressante surtout pour des équipements régulièrement utilisés comme la poupée diviseuse. Voir en Annexe ce petit accessoire.



Quatrième étape : Usinage

L'ébauche est montée sur l'arbre d'usinage et maintenue avec l'aide de la contrepointe qui va reprendre une partie des efforts.

On procède, pas à pas en bloquant le plateau du diviseur avant chaque taille. La profondeur de passe dépend du matériau, du diamètre du barreau et... de la rigidité de la fraiseuse.



On débite ensuite le barreau usiné selon les besoins.

Ci-dessous tronçonnage au tour.



Point important : les deux engrenages doivent avoir la même épaisseur

La mise à l'épaisseur se fait au tour avec une prise par les moyens classiques : mors doux, bague fendue, pince,....



Commentaires

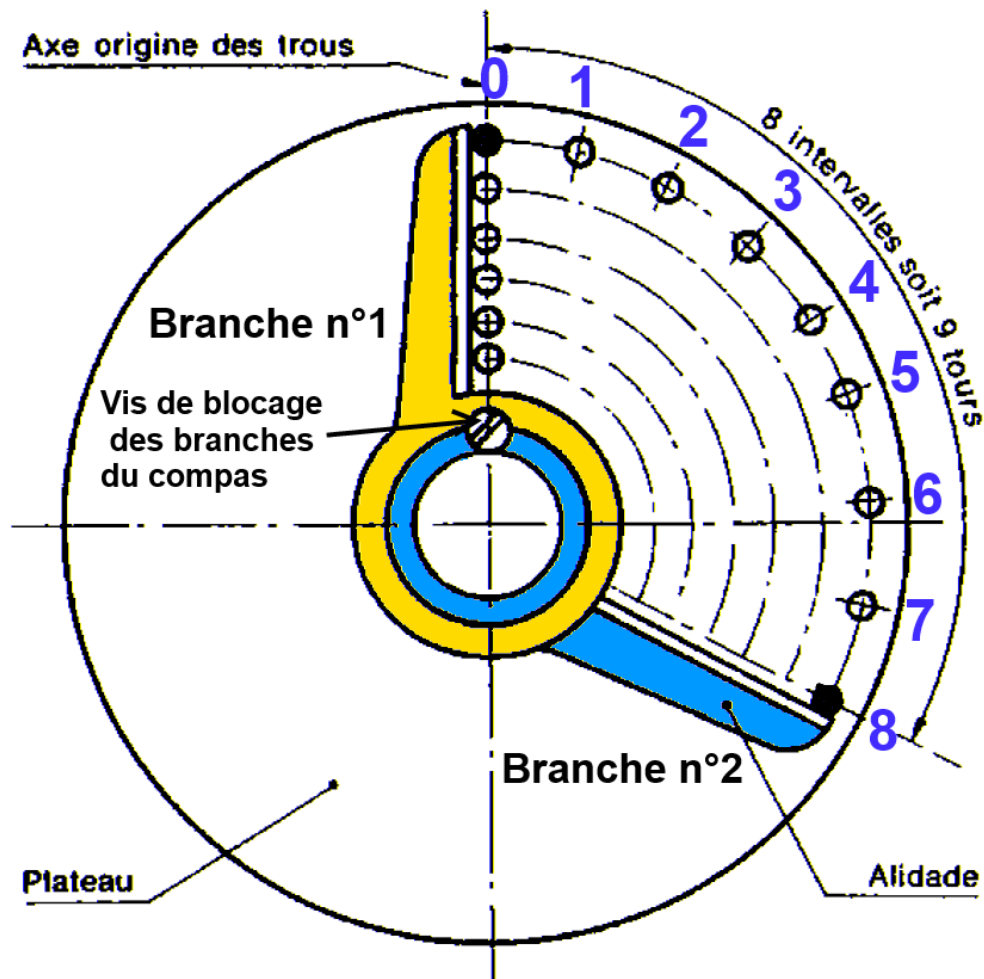


On voit ci-dessus un petit dispositif pour ceux qui, comme moi, ne disposent pas de mors doux.

Le principe est simple. On part d'un rond d'aluminium ou de laiton que l'on alèse pour s'insérer au plus juste sur le mors dur. Ce mors doux ne doit pas dépasser de plus de 1 à 2mm du mors dur car il n'est pas capable de reprendre de porte à faux. On place deux vis THC qui servent uniquement à maintenir le mors en place lorsque l'on desserre. Ces vis ne sont clairement pas destinées à récupérer un

jeu excessif. On commence par insérer les mors doux sur les mors durs et on serre le mandrin jusqu'à ce que les mors soient en appui ferme deux à deux, comme montré sur la photo. On serre alors les vis THC. Ce type de montage ne garantit pas le centrage fin de la pièce, centrage qu'il faudra vérifier. Je me sers de ce montage surtout pour dresser les faces ou mettre à la longueur précise.

Travail à l'alidade



Il faut dans un premier temps calculer la séquence à suivre. Ce sera toujours la même séquence jusqu'à la fin de l'usinage.

| | | |
|--|----------------|---|
| Rapport de démultiplication de la poupée diviseuse | 90 : 1 | 90 tours de manivelle = rotation de 360° 1 tour de manivelle = 4° de rotation de la poupée |
| Nbe de dents à tailler (exemple) | 16 | |
| Diviser | $90/16=5,625$ | 5 tours complets et un résidu de 0,625 |
| Pour la résolution du résidu on multiplie ce résidu par le nombre de trous disponibles sur le jeu de plateaux jusqu'à obtenir un nombre entier ou très très proche | $0,625*16= 10$ | |
| Sur cet exemple, on montera le plateau à 16 trous et on prendra un écart de 10 intervalles soit 11 trous à l'intérieur des bras du compas de l'alidade | | |

Autre exemple

| | |
|-----------------------------|-------|
| Nbe de dents | 44 |
| nbe trous du plateau | |
| 15 | 0,682 |
| 16 | 0,727 |
| 17 | 0,773 |
| 18 | 0,818 |
| 19 | 0,864 |
| 20 | 0,909 |
| 21 | 0,955 |
| 23 | 1,045 |
| 27 | 1,227 |
| 29 | 1,318 |
| 31 | 1,409 |
| 33 | 1,500 |
| 37 | 1,682 |
| 39 | 1,773 |
| 41 | 1,864 |
| 43 | 1,955 |
| 47 | 2,136 |
| 49 | 2,227 |

Si on voulait tailler 44 dents on aurait $360/44 = 2,045$.

Donc 2 tours complets et un résidu de 0,045. La valeur la plus proche d'une valeur entière est obtenue par le plateau de 43 trous et 2 intervalles à l'alidade (donc $2+1 = 3$ trous entre les bras du compas).

Commentaire

L'erreur de division est très faible, bien en deçà de la précision des poupées diviseuses grand public : 2 tours complets de manivelle font tourner la poupée de $2 \times 360/90 = 8^\circ$.

Si on rajoute $2/43$ ème de tour on obtient une rotation de $8^\circ + (4^\circ \times 2/43) = 8,186^\circ$.

Donc on tournera en tout de $8,186^\circ$ pour $360/44 = 8,182^\circ$ théoriques. Une erreur de $0,004^\circ$ par dent est négligeable. Si par malheur toutes les erreurs se cumulaient dans le même sens on arriverait à la 44ème dent avec un décalage de $0,004 \times 44 = 0,176^\circ$ ce qui n'est plus tout à fait négligeable.

Manoeuvre de l'alidade

La manoeuvre est bien plus compliquée à décrire qu'à réaliser et voir une vidéo sur Internet permet de rapidement comprendre.

A/ Monter le dispositif . Bien vérifier que vous prenez le bon plateau. Ensuite régler la manivelle pour que son ergot engrène correctement sur la bonne rangée de trous . Vérifier 2 fois plutôt qu'une que c'est la bonne rangée.

B/ On place l'ergot de la manivelle sur l'origine, en général choisie sur midi. On amène une des branches du compas sur l'ergot, partie amincie contre l'ergot. Ce sera la branche n°1. On compte 0 le trou occupé par l'ergot puis on compte 1, 2, 3, ... le nombre de trous à passer. Placer la deuxième branche de compas légèrement au-delà du dernier trou pour que l'ergot puisse s'y loger. Serrer les branches du compas.

Vérifier que tout est OK : Insertion de l'ergot de manivelle dans les trous, nombre de trous entre les branches du compas d'alidade, ... Le compas doit tourner légèrement freiné autour de son axe.

C/ Mode opératoire

Après le premier usinage (position de départ) on tourne la manivelle du nombre entier de tours puis on va un peu plus loin jusqu'à placer l'ergot de la manivelle dans le trou juste avant la branche n°2 . On fait alors tourner l'ensemble du compas dans le même sens que l'on a fait tourner la manivelle jusqu'à ce que le biseau de la branche n°1 entre en contact avec l'ergot de manivelle. Au moins pour le premier déplacement on s'assure que le compas conserve bien l'écart initial. on tourne la manivelle du nombre entier de tours puis on va un peu plus loin jusqu'à placer l'ergot ... et ainsi de suite

De temps à autre on vérifie que le compas ne se dérègle pas et qu'il ne bouge pas pendant les tours de manivelle.

4/ Plans originaux parus dans Popular Science

Suivis des plans en métrique d'après les originaux



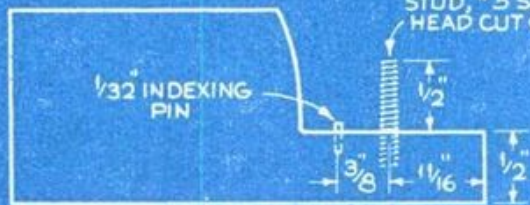
1/8" ALUMINUM ROD



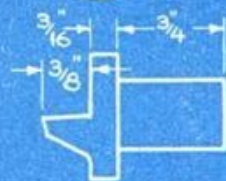
RIM GROUND AWAY EXCEPT PART USED FOR CUTTER



TURN OR FILE OFF NEEDLE POINT FOR FASTER OPENING



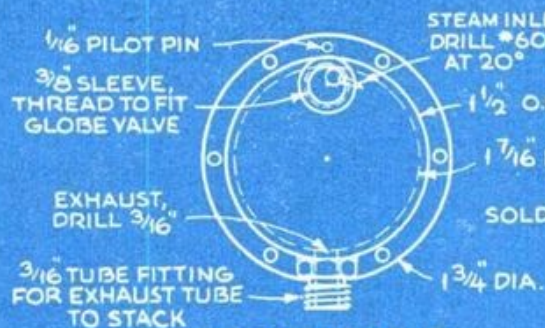
BLADE-CUTTING JIG



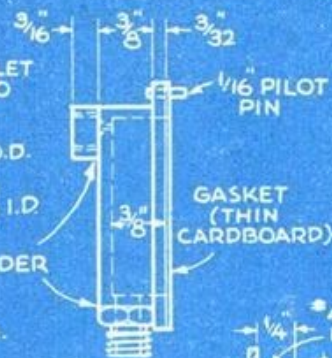
BLADE-CUTTING BIT



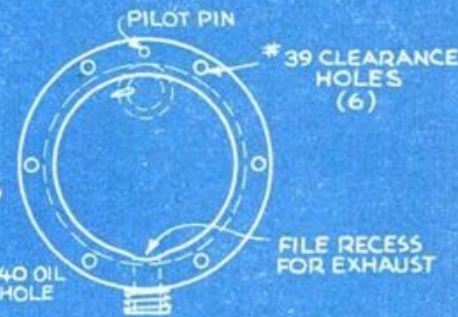
GLOBE VALVE



ROTOR HOUSING



TURBINE-SHAFT BEARING

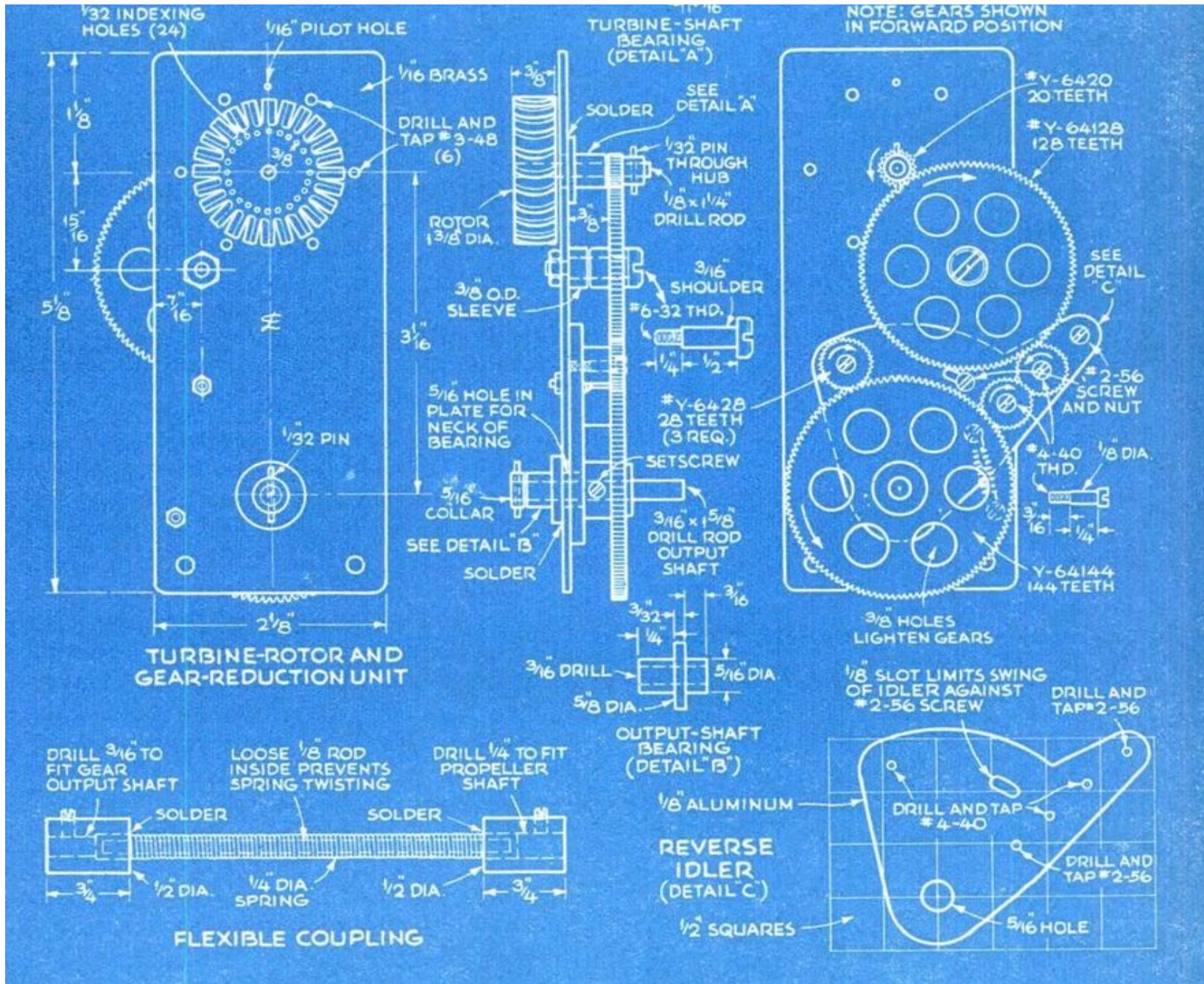


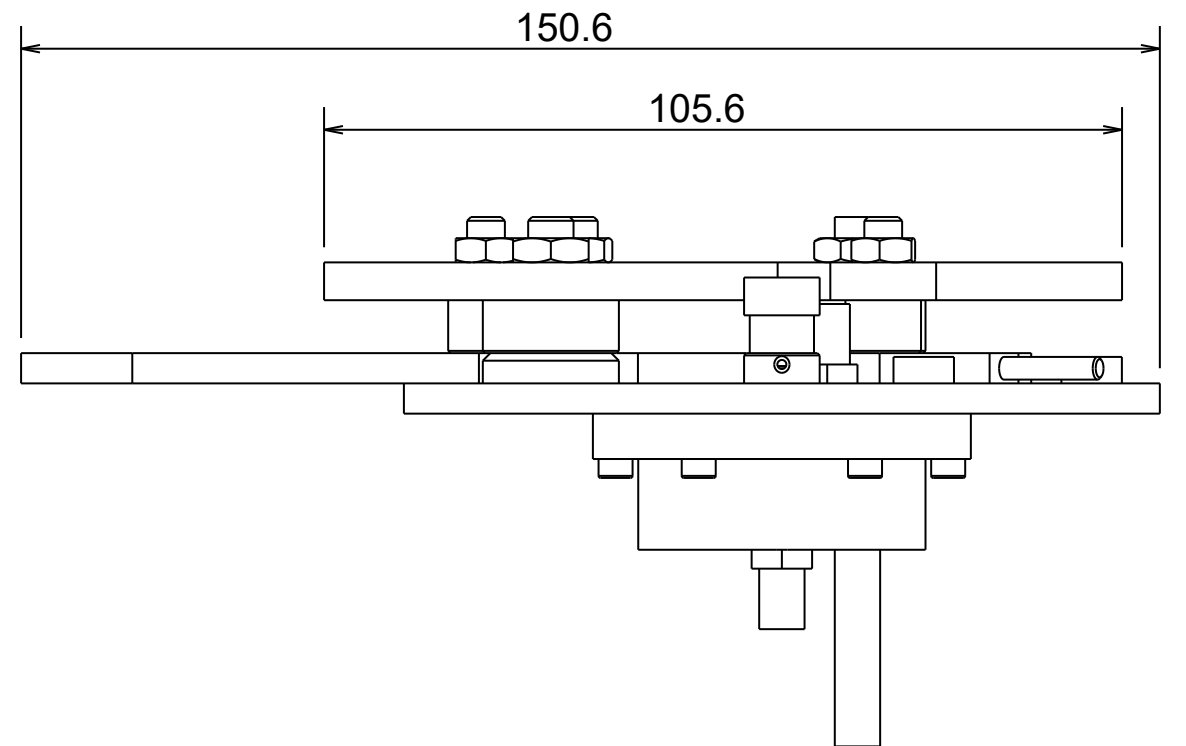
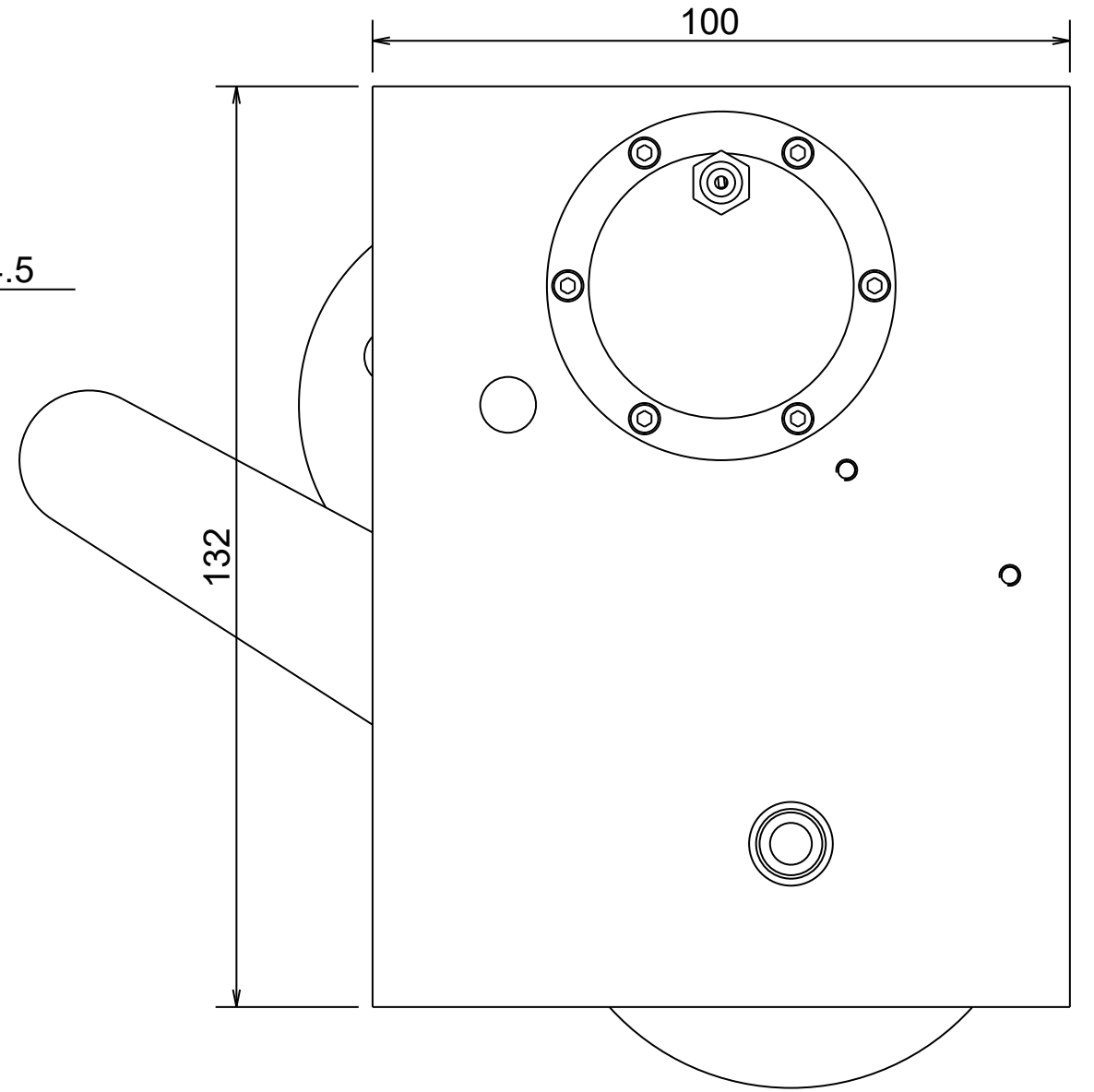
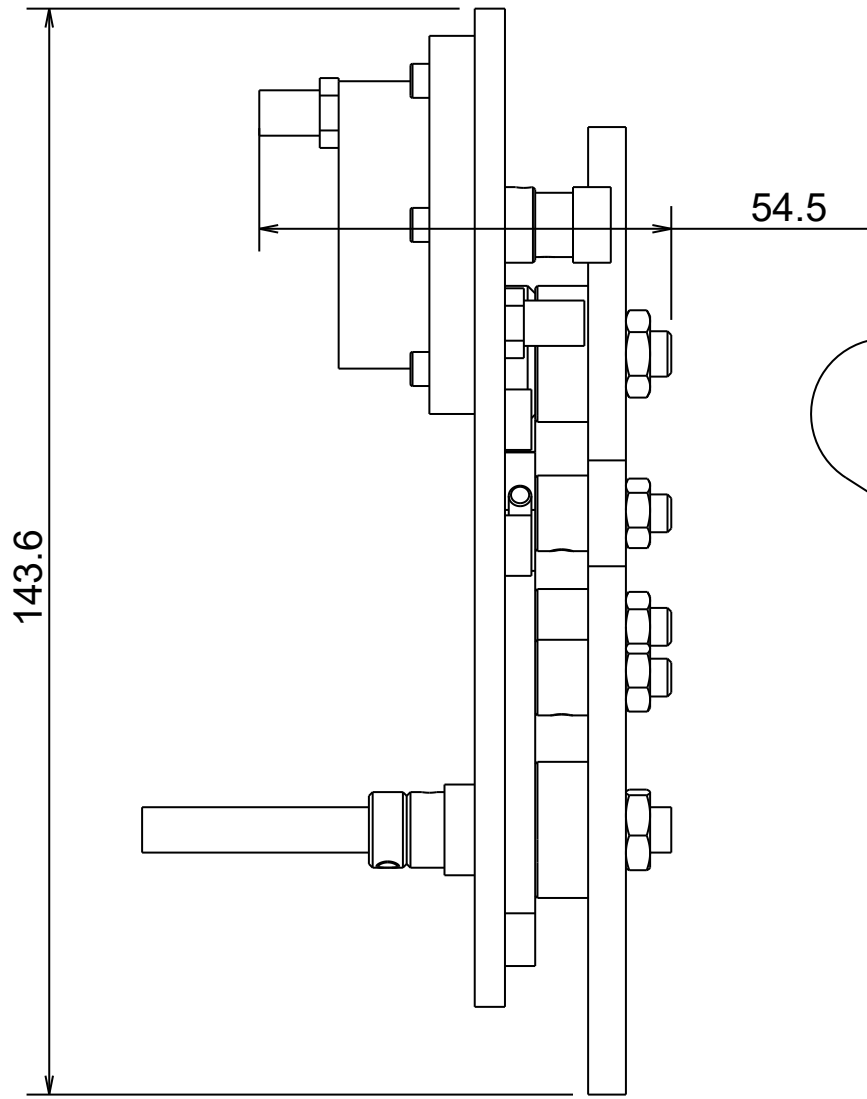
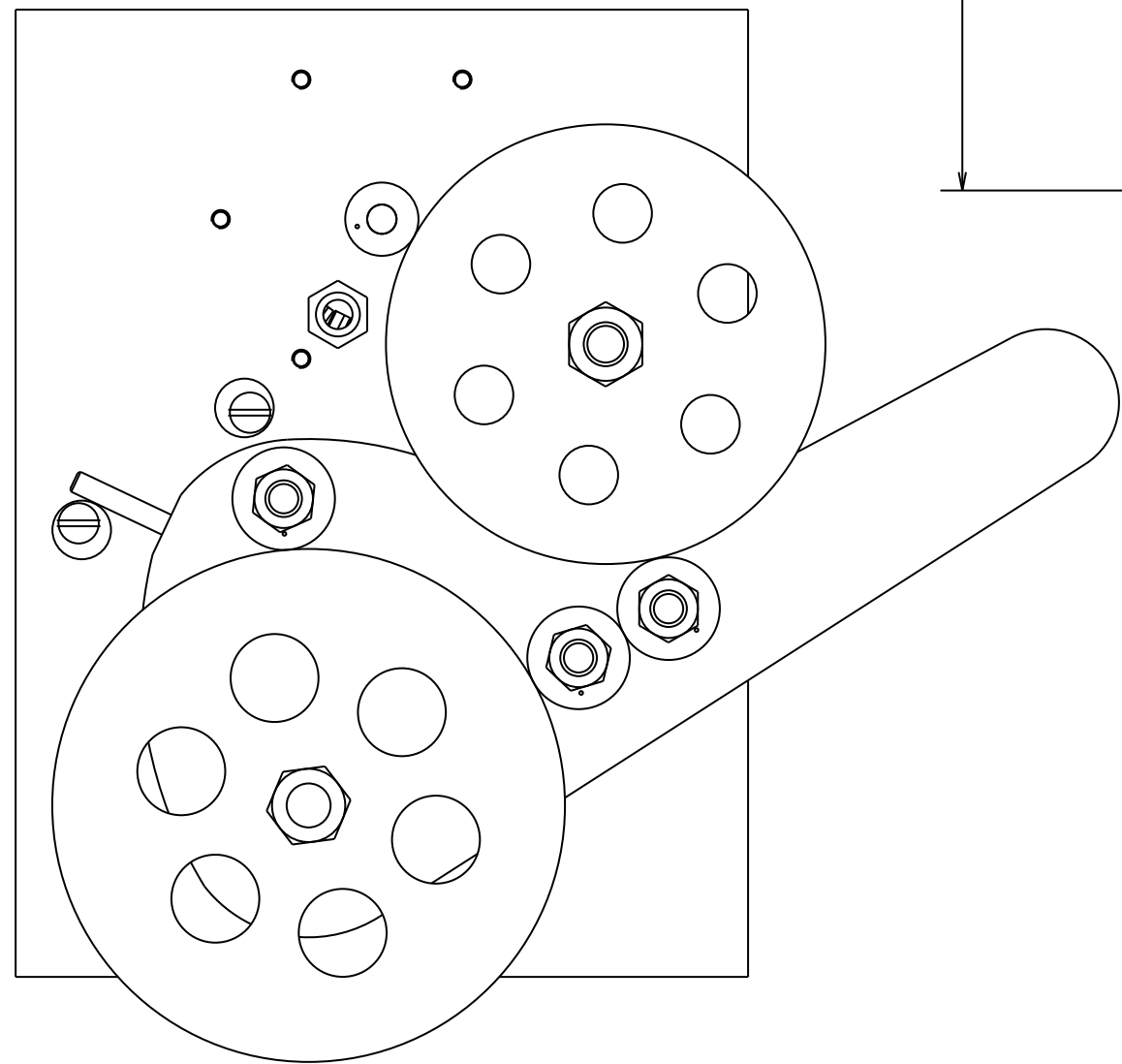
ALL GEAR NUMBERS, BOSTON GEAR WORKS

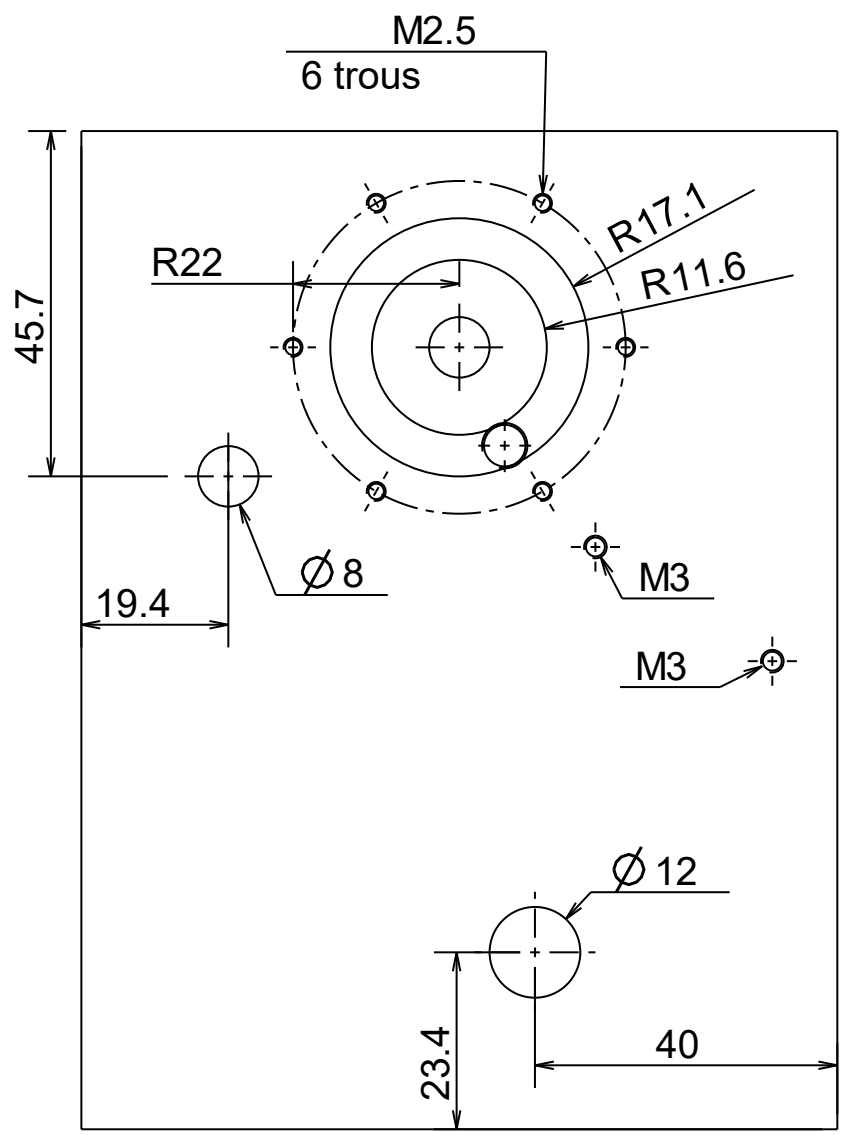
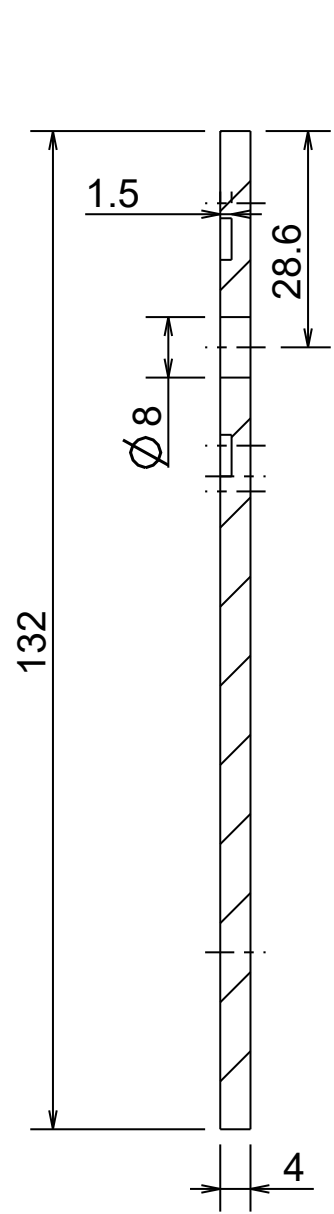
1/32" INDEXING HOLES (24)

1/16" PILOT HOLE

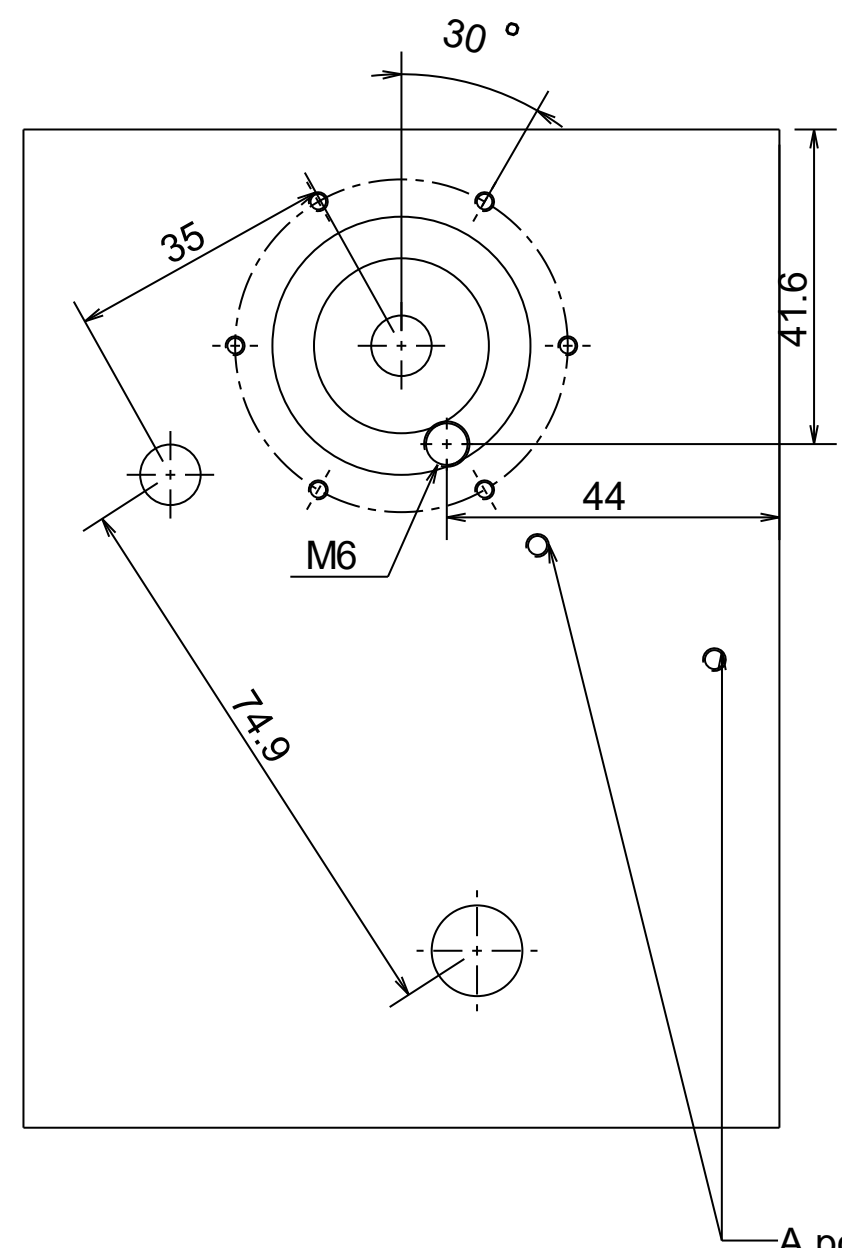
NOTE: GEARS SHOWN IN FORWARD POSITION



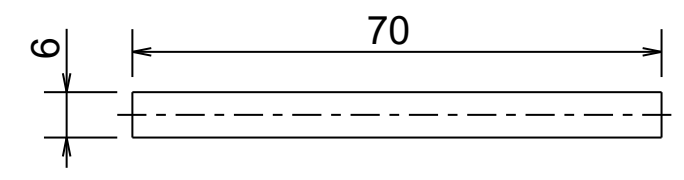




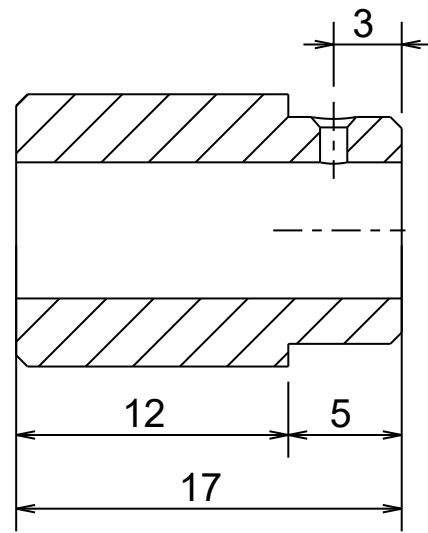
Plaque servant de bâti



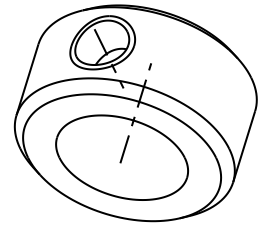
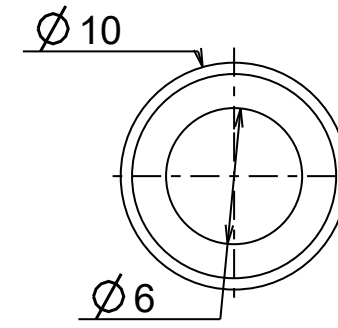
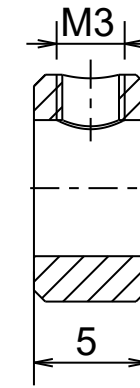
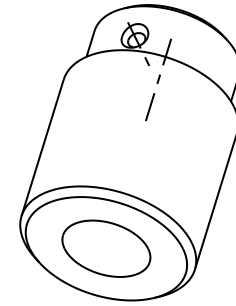
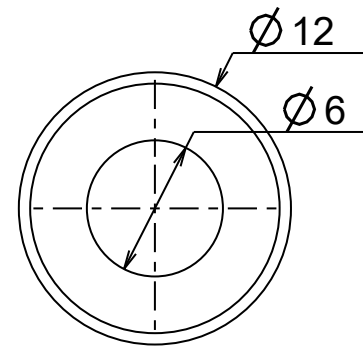
A pointer en place après réglage engrenages



Arbre de sortie
 (pour mémoire selon
 choix utilisateur)

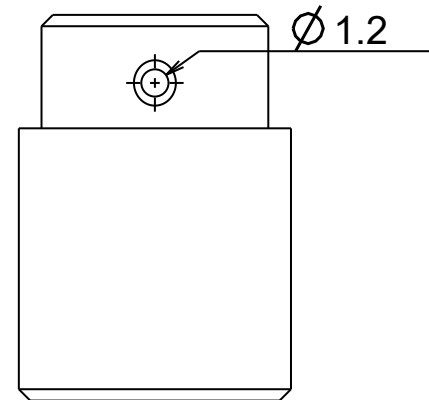


COUPE XSEC0001-XSEC0001

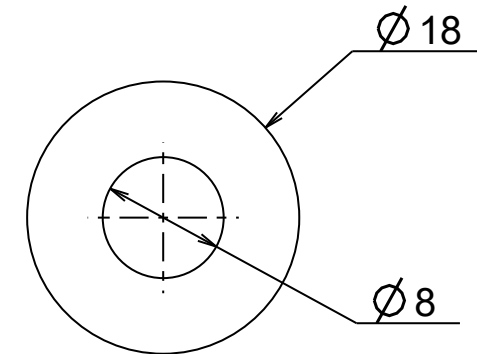
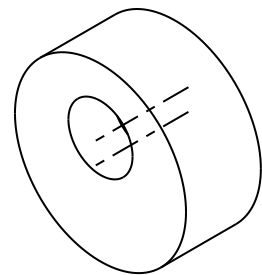


COUPE XSEC0001-XSEC0001

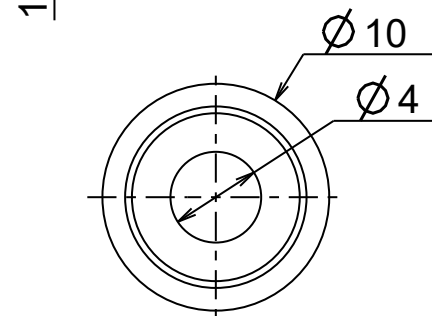
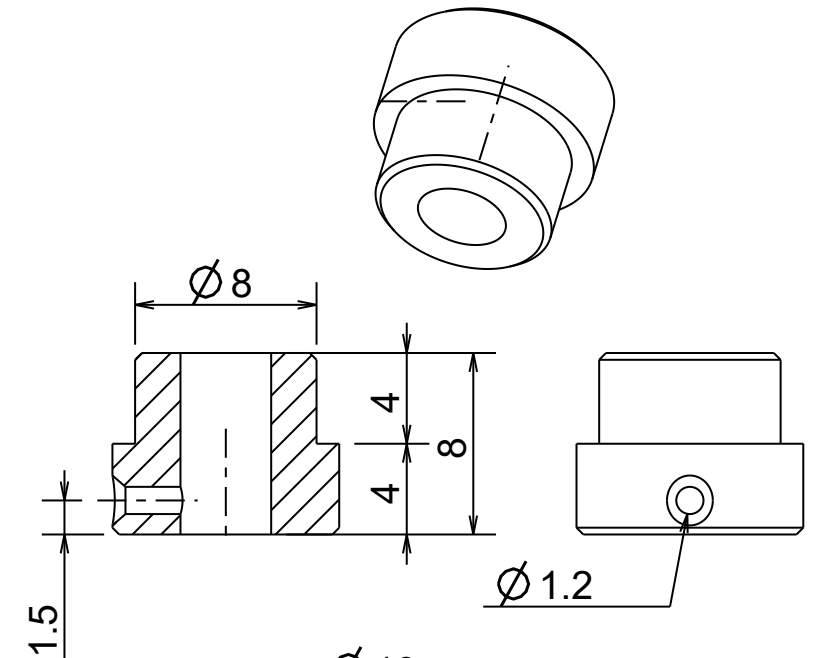
Bague arrêt
arbre de sortie



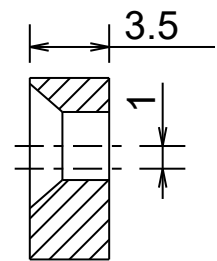
Palier arbre de sortie



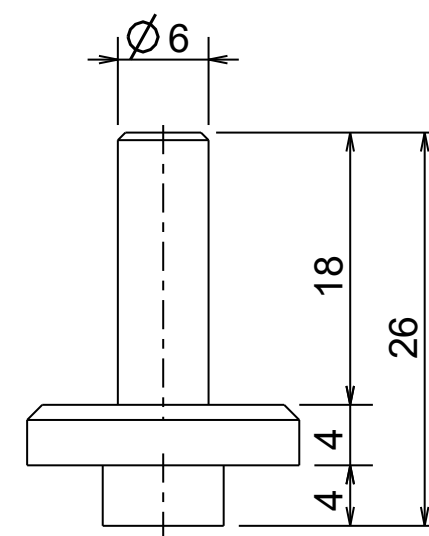
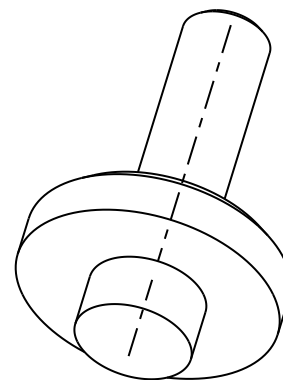
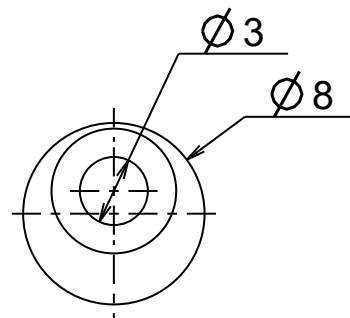
Palier
arbre secondaire



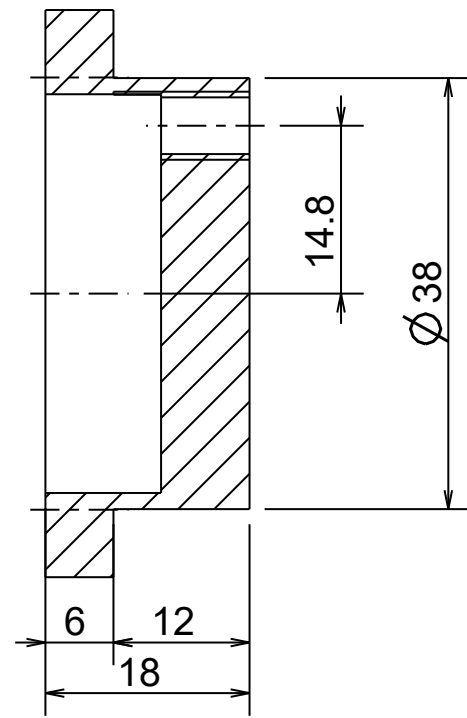
Palier arbre primaire



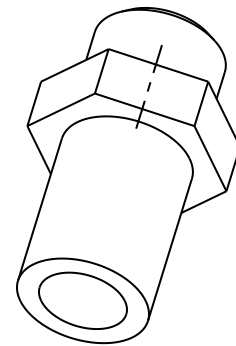
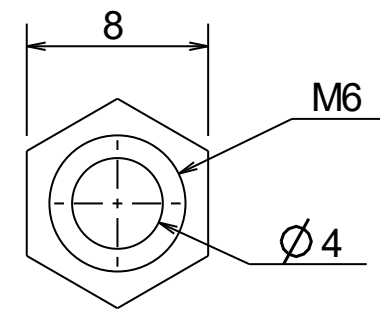
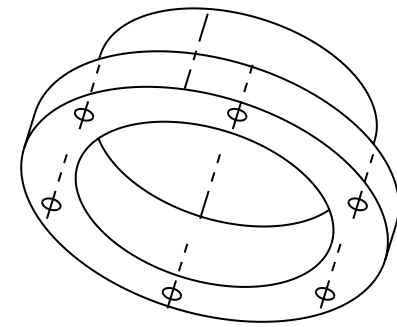
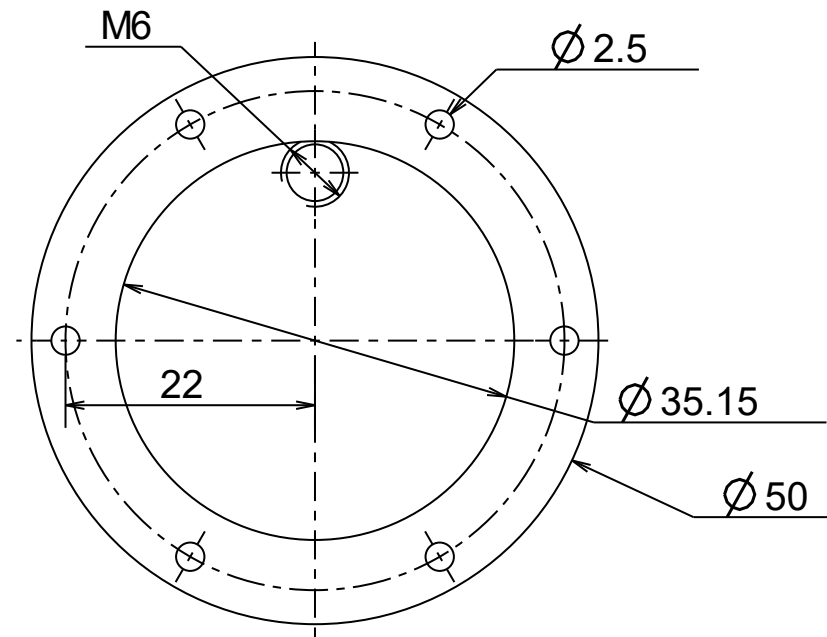
Butée inverseur



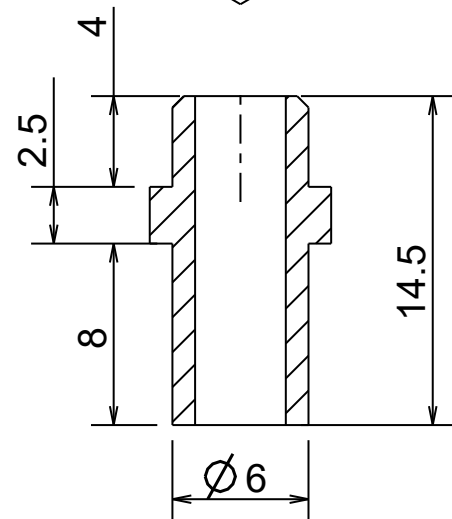
Stator



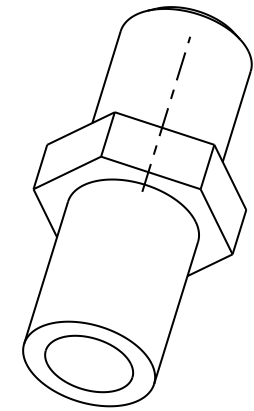
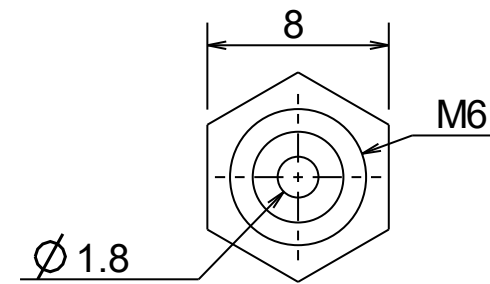
COUPE XSEC0001-XSEC0001



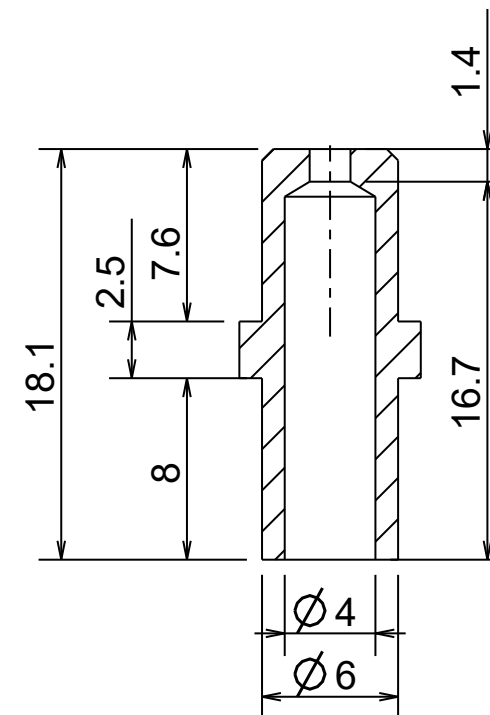
Echappement



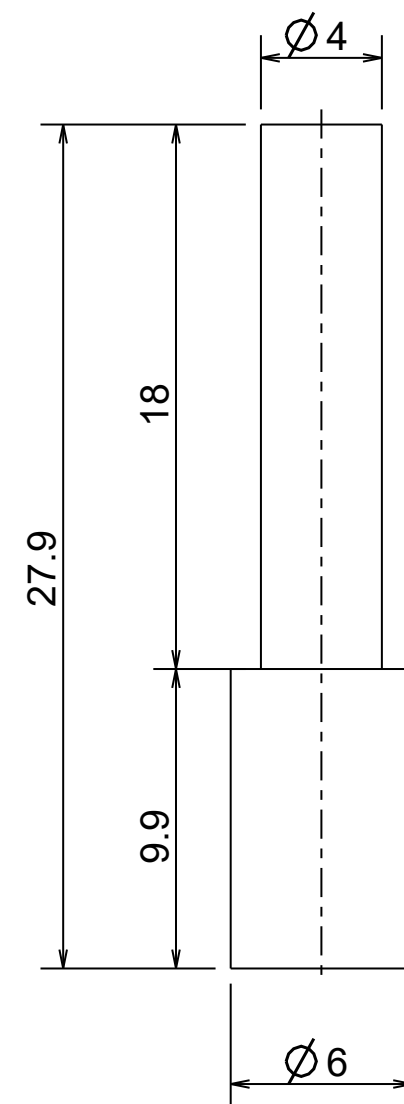
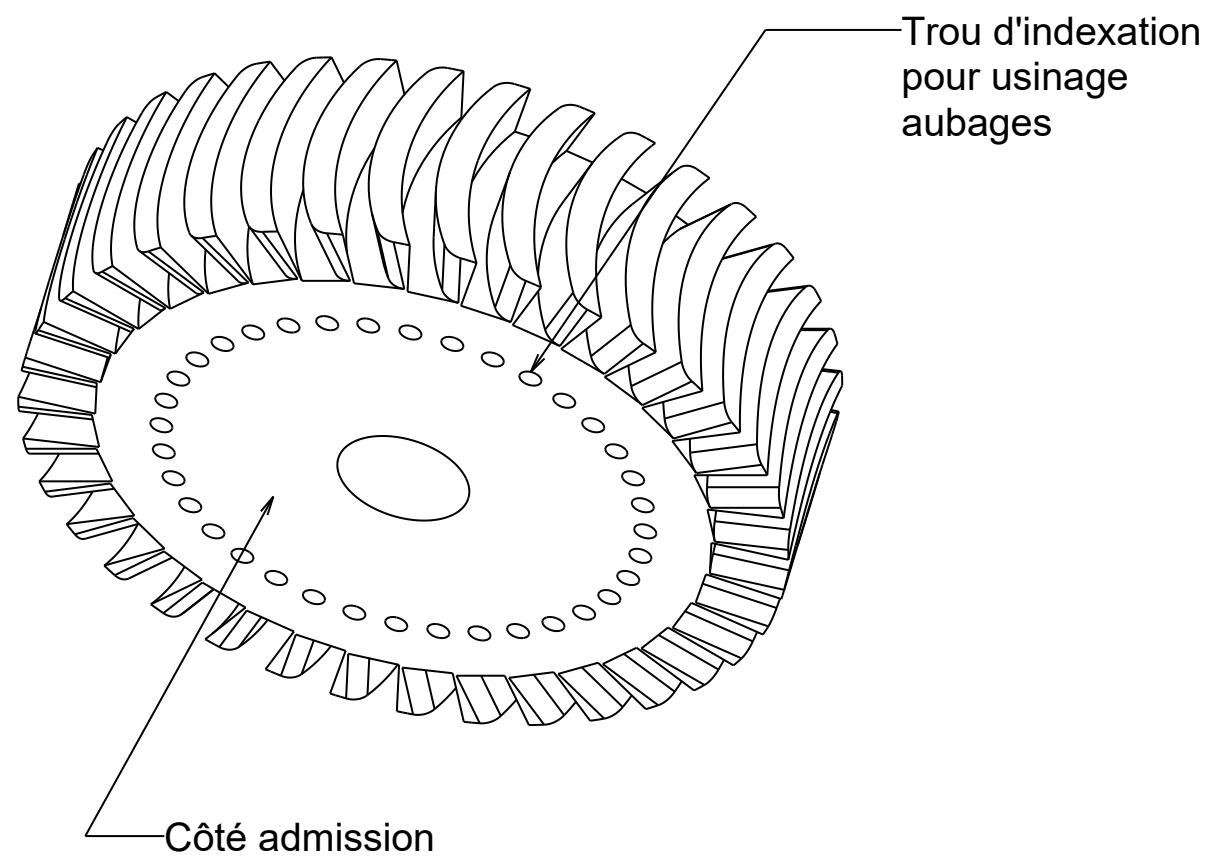
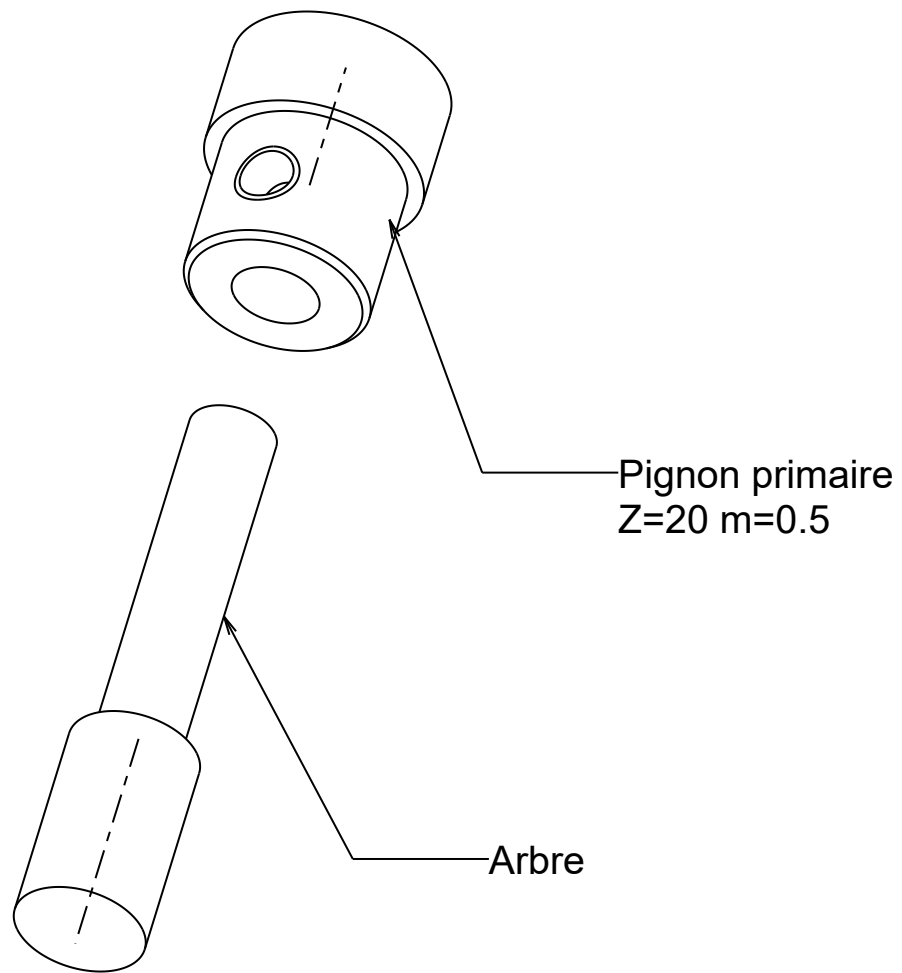
COUPE XSEC0001-XSEC0001



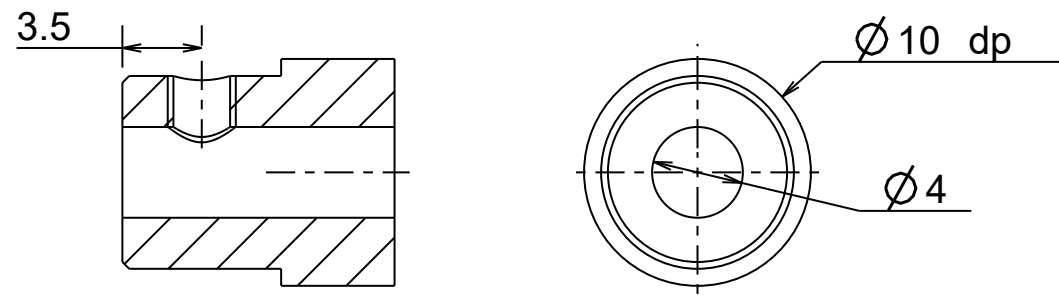
Injecteur vapeur



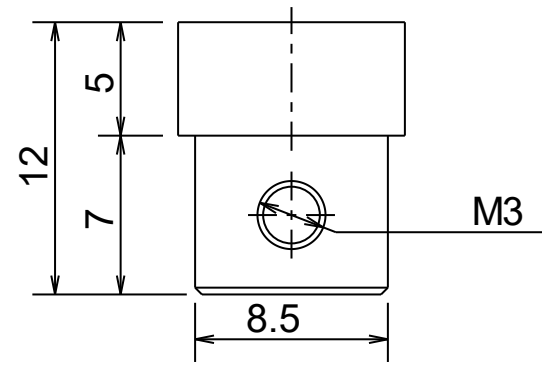
COUPE XSEC0001-XSEC0001



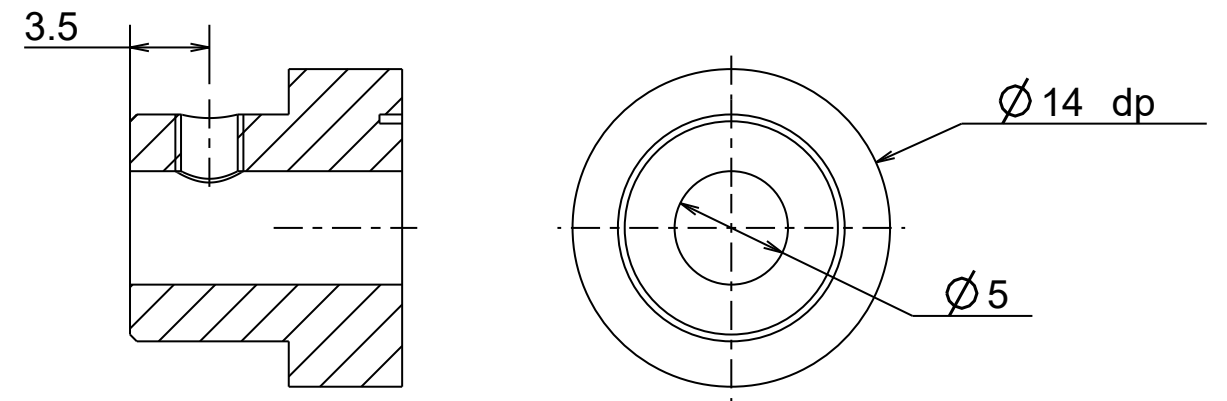
Arbre rotor



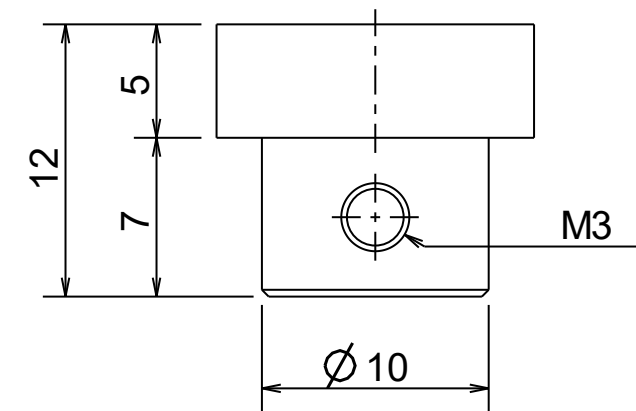
COUPE XSEC0001-XSEC0001



Pignon Z=20 m=0.5

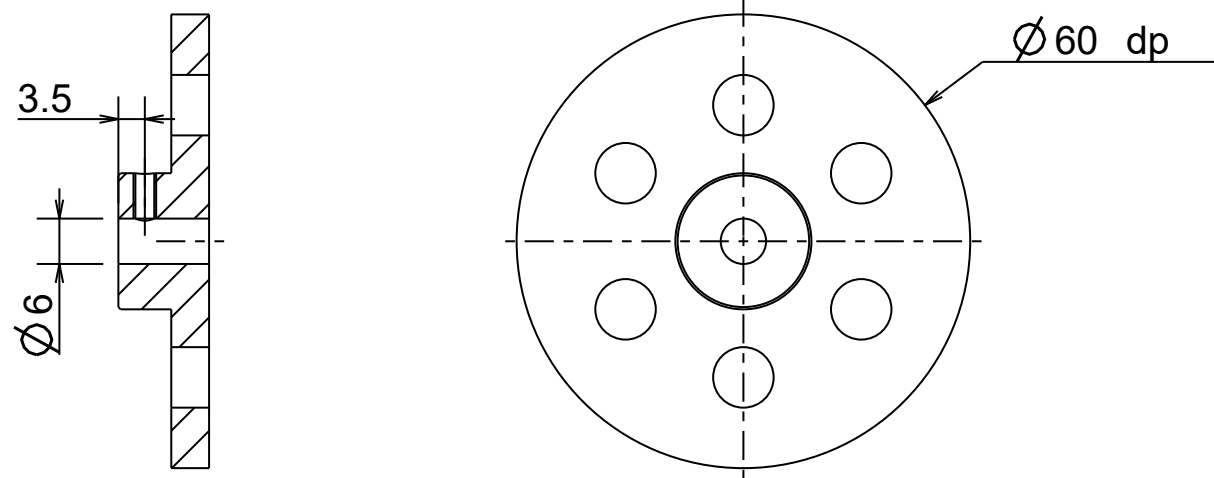


COUPE XSEC0001-XSEC0001

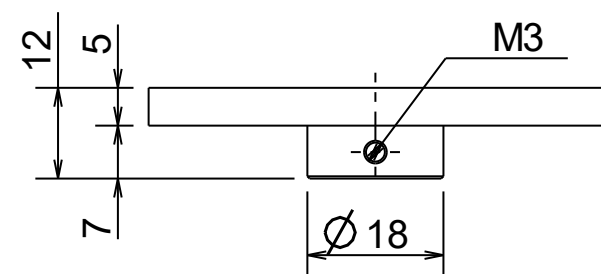


Pignon Z=28 m=0.5

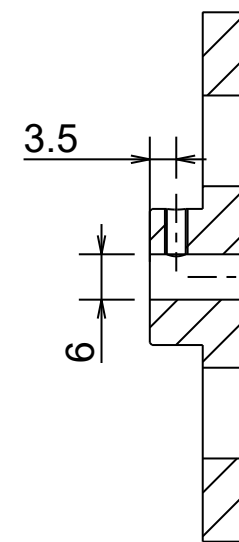
Les pignons sont dessinés avec leur diamètre primitif



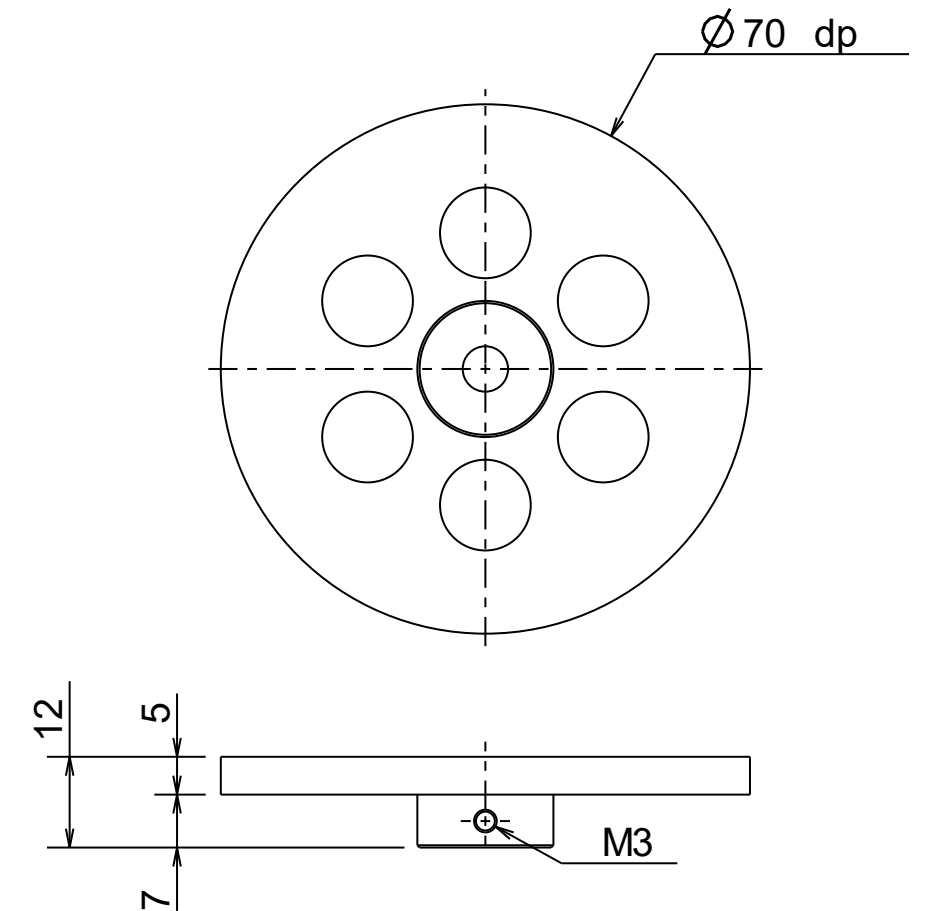
COUPE XSEC0001-XSEC0001



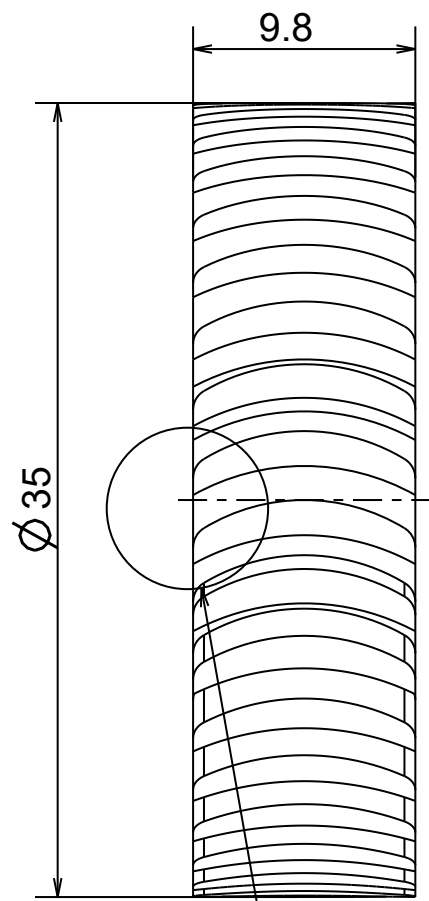
Pignon Z=120 m=0.5



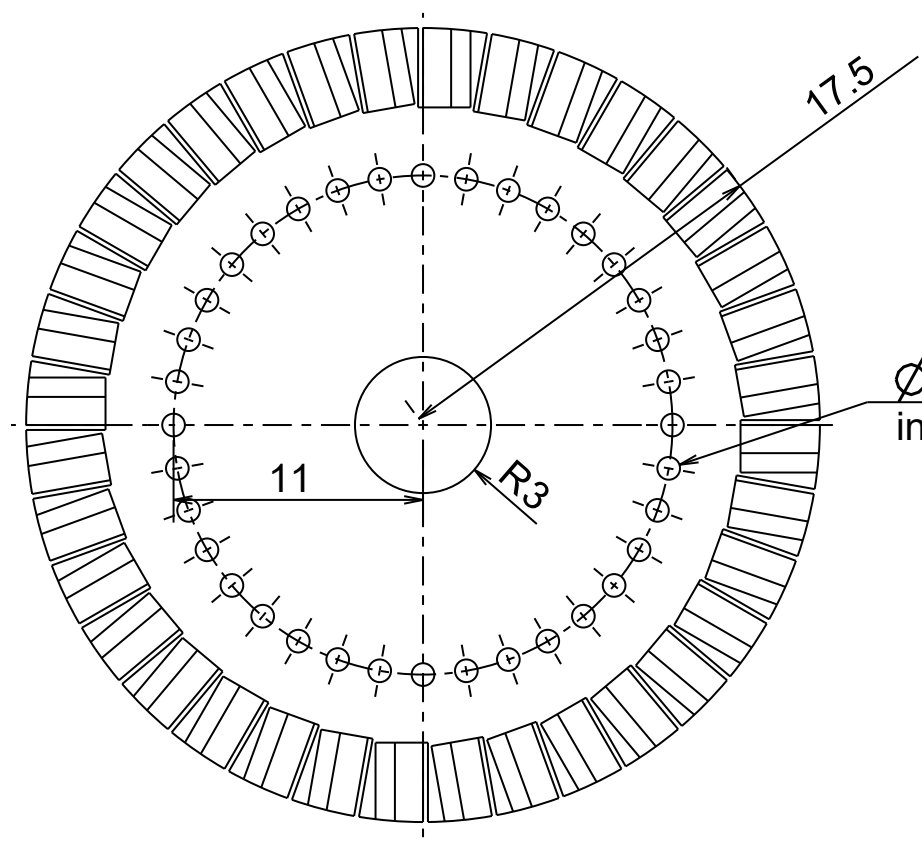
COUPE XSEC0001-XSEC0001



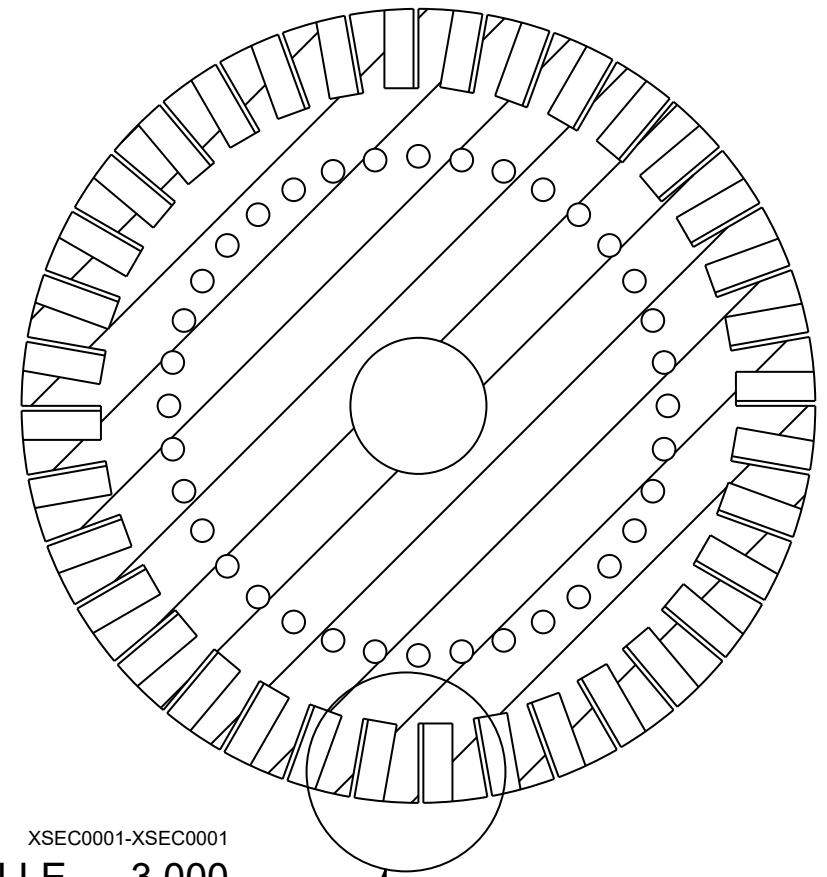
Pignon Z=140 m=0.5



VOIR DETAIL

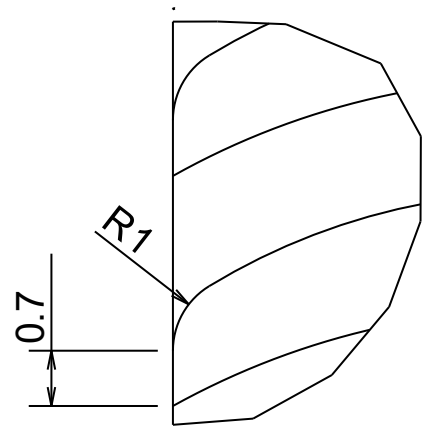


ECHELLE 3.000

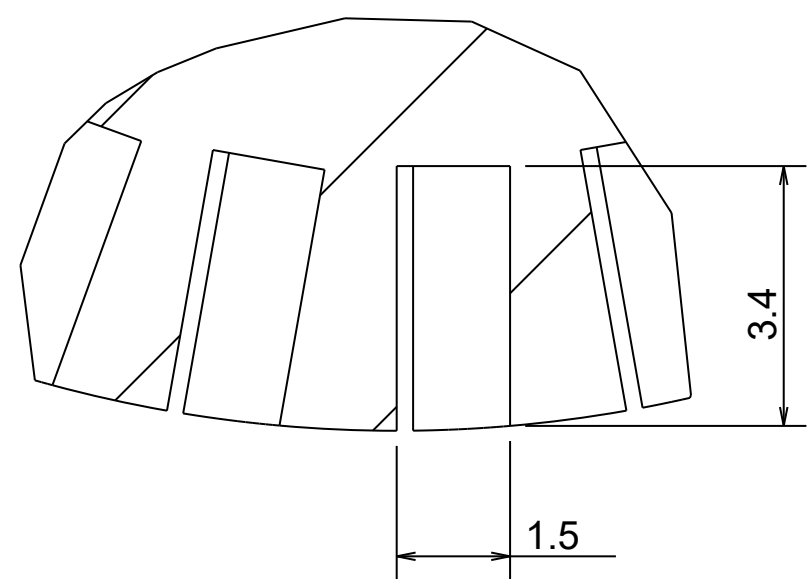


COUPE XSEC0001-XSEC0001
ECHELLE 3.000

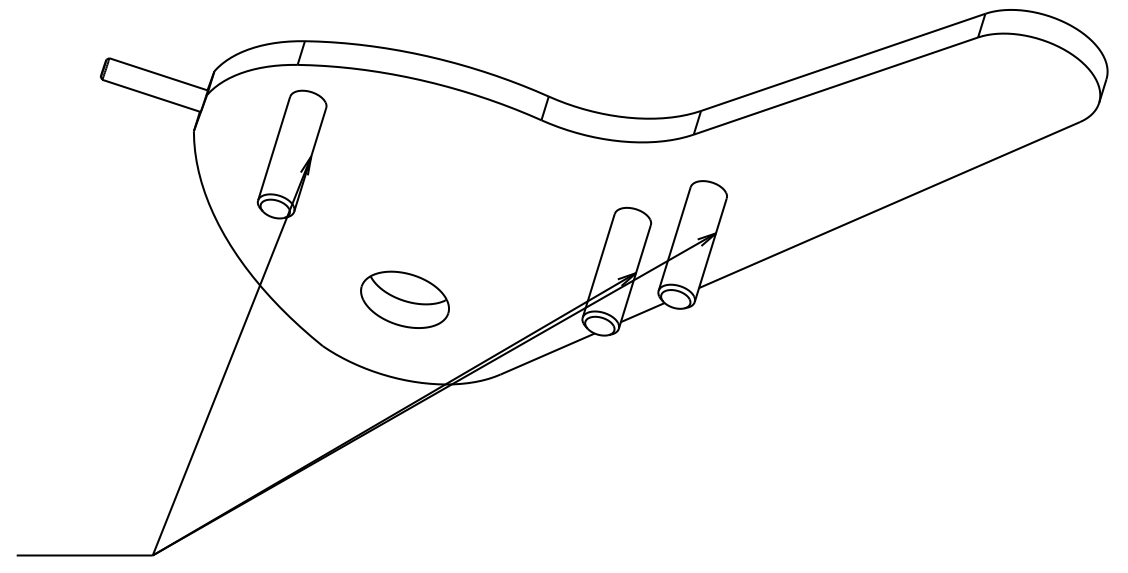
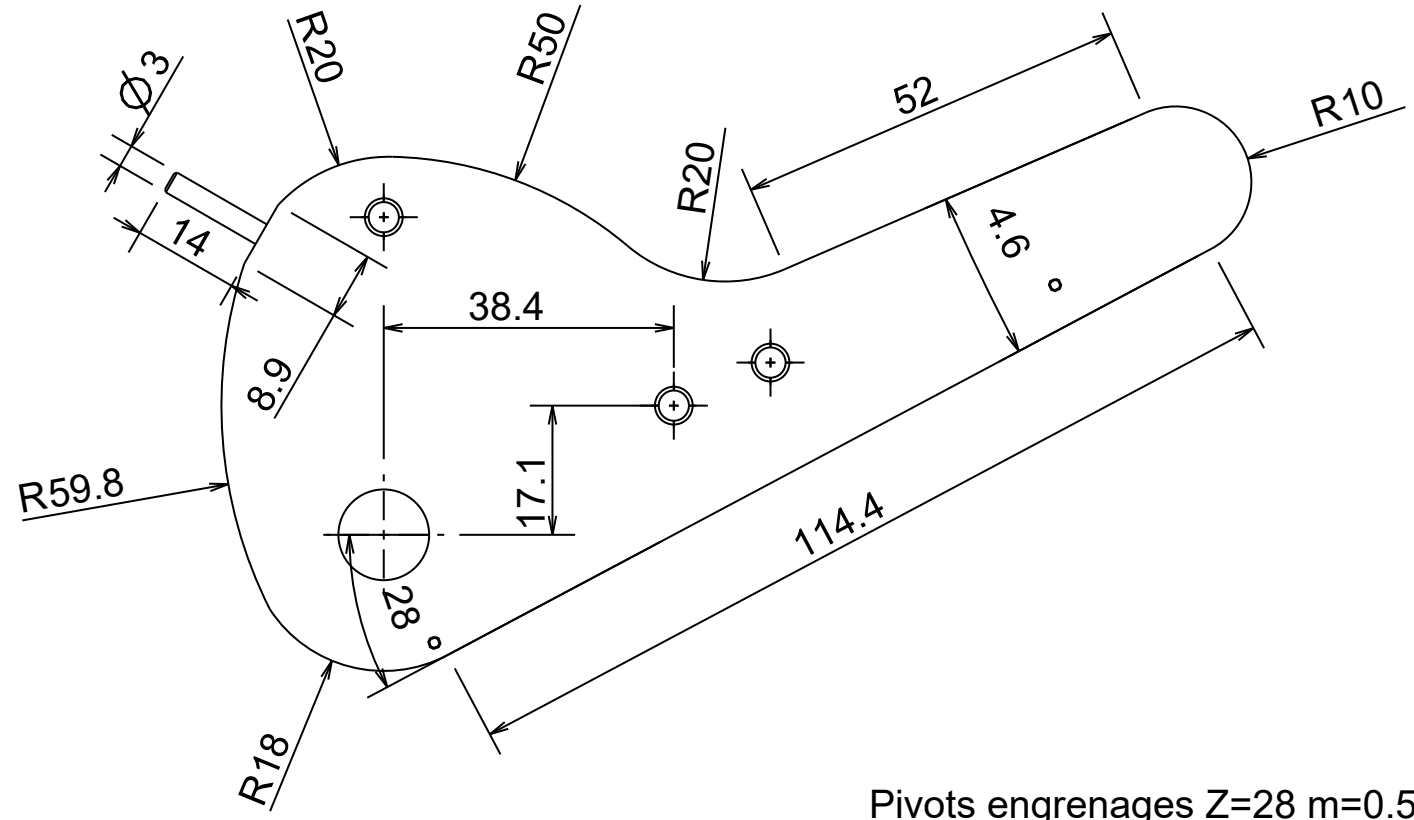
VOIR DETAIL



DETAIL B
ECHELLE 10.000

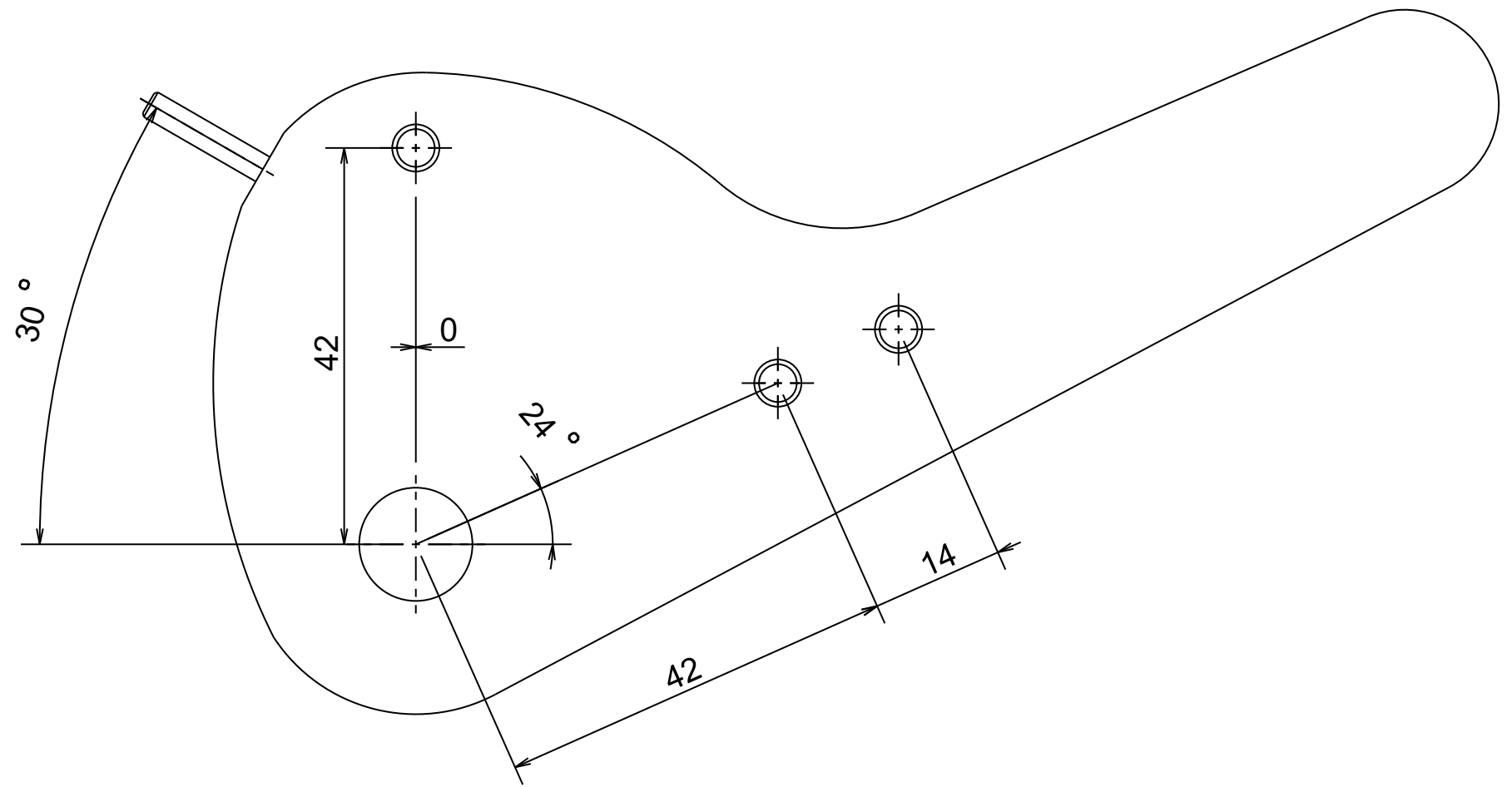
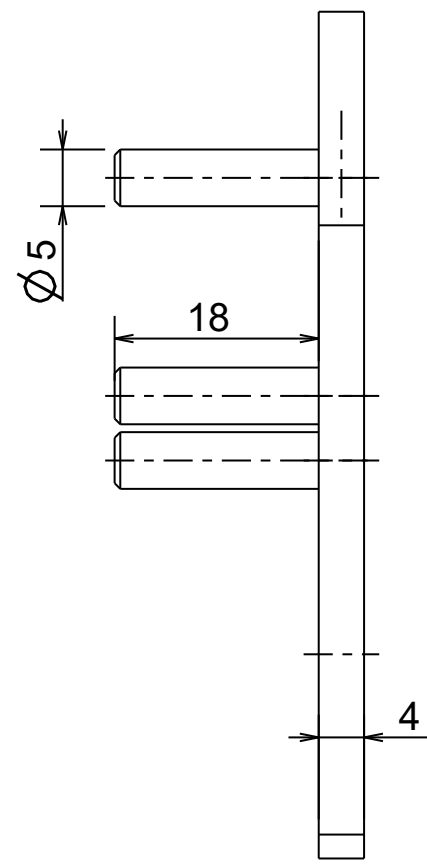


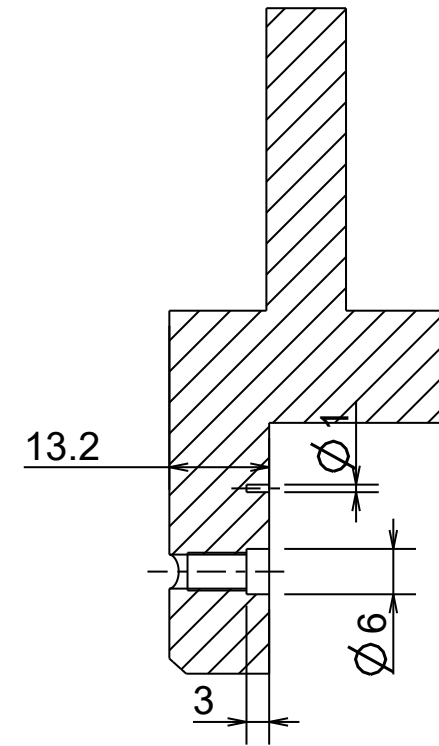
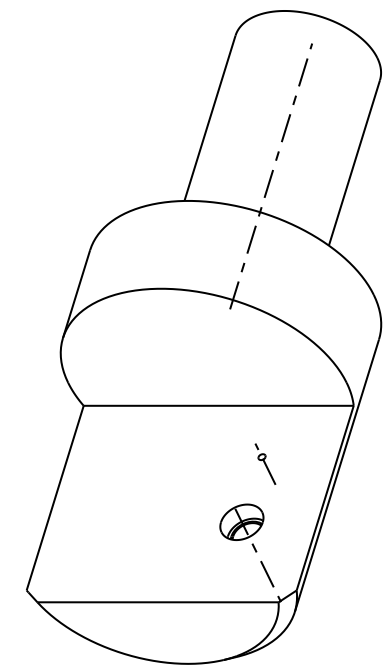
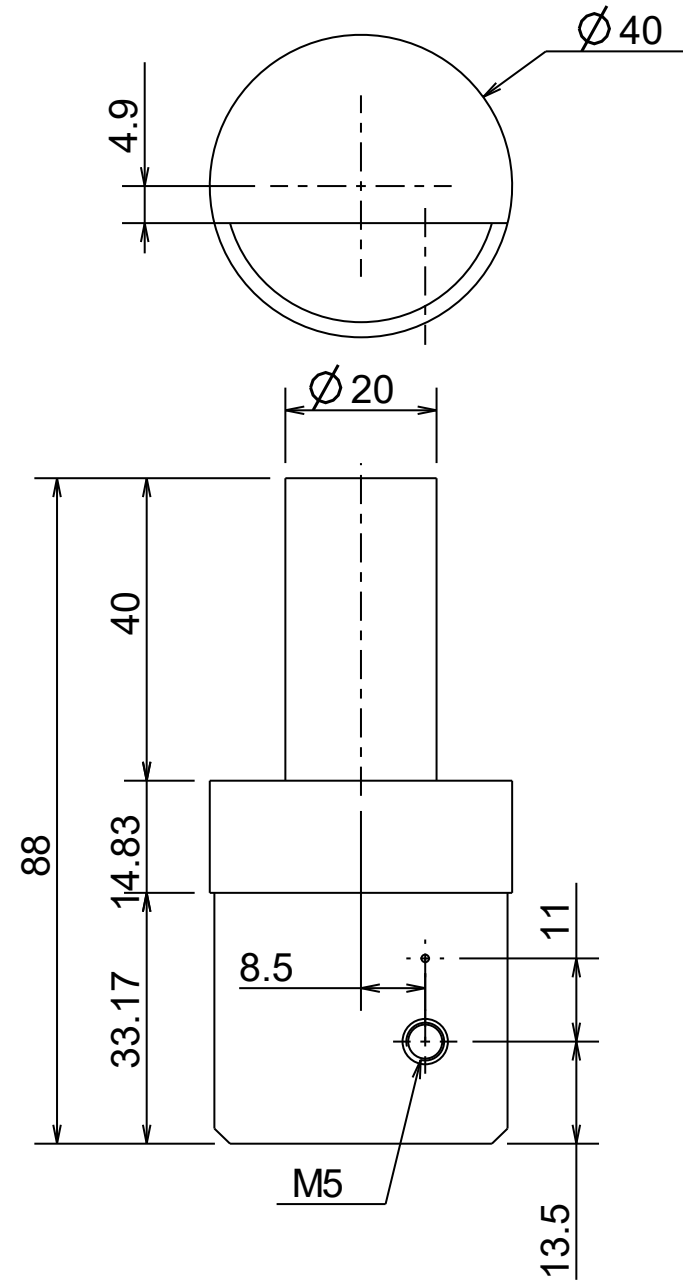
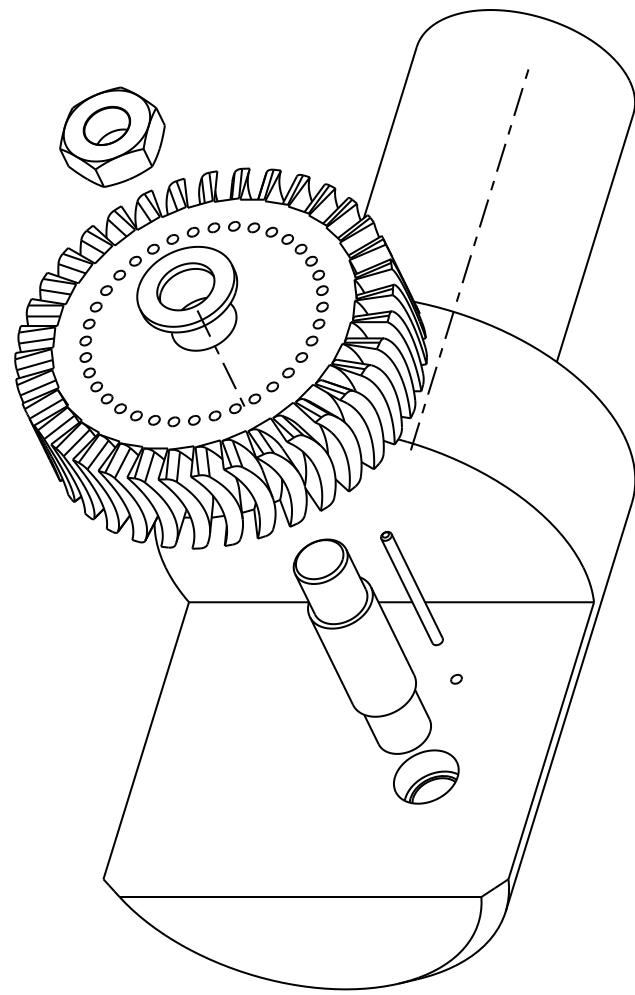
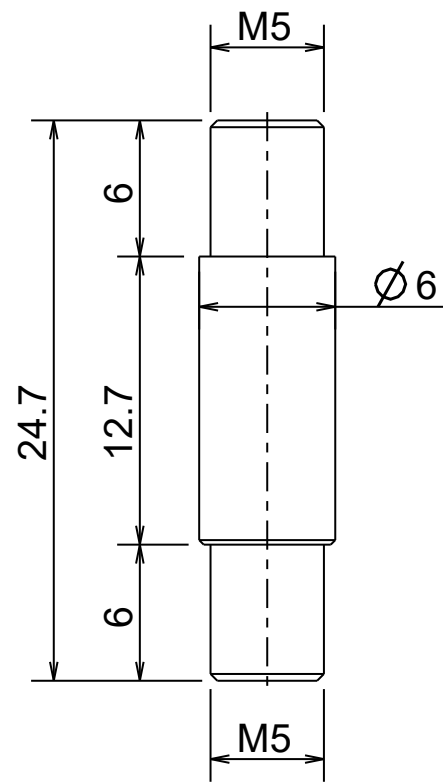
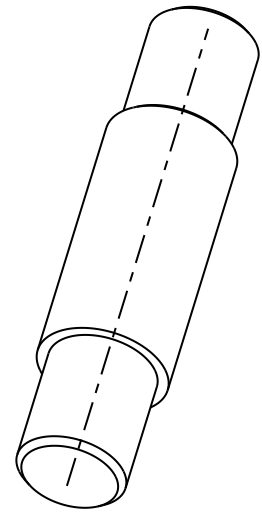
DETAIL A
ECHELLE 10.000



Pivots engrenages Z=28 m=0.5

Levier inverseur
profil de détournage non critique





COUPE

XSEC0001-XSEC0001