

Sifflets à vapeur



J'avais envie de comprendre comment fonctionnait un sifflet vapeur pour voir s'il est possible de construire des sifflets pour modèles réduits qui ne soient ni asthmatiques, ni ultrasoniques.

Tout ce qui suit correspond aux sifflets ou aux tuyaux d'orgue grandeur réelle. A petite échelle des phénomènes imperceptibles à grande échelle peuvent devenir prépondérants, c'est particulièrement vrai en mécanique des fluides.

Donc il reste beaucoup de place pour l'expérimentation et l'intuition.

Basiquement un sifflet se compose d'un **excitateur** et d'un **résonateur**.

Il y a cependant quelques notions et quelques définitions à bien posséder pour y voir clair.

Définitions et principes

Onde :

Une onde est une **perturbation réversible** qui se propage dans un milieu. Par réversible on veut dire qu'une fois la perturbation passée, le milieu revient spontanément à son état d'équilibre initial.

Une onde sonore est une perturbation de pression qui se propage dans un milieu liquide, solide ou gazeux.

Par exemple si vous claquez des mains, il y a une brusque variation de pression au moment et à l'endroit du contact des deux paumes. Cette variation de pression va se propager et sera perçue par un capteur (microphone, oreille) à l'autre extrémité de la pièce.

Il n'y a pas de déplacement de matière dans la direction de propagation de l'onde. Pour imager la chose, on dira par exemple que les molécules d'air oscillent autour de leur position moyenne d'équilibre.

Vitesse de propagation « c »

Elle dépend des caractéristiques du milieu et s'exprime en m/s. (multiplier par 3,6 pour avoir des km/h). Elle varie avec la température, l'humidité, la pression.

	« c » en m/s
Air sec	333
Hélium	1000
Eau	1480
Acier	5800
PVC rigide	2400
Verre	5300
Bois	3000 environ

Ce qui donne cette voix d'extra-terrestre lorsque on inhale un mélange air-hélium c'est la vitesse de propagation du son dans le mélange qui décale vers le haut les fréquences des résonateurs naturel (crâne, palais, gorge, arbre bronchique, etc.) .

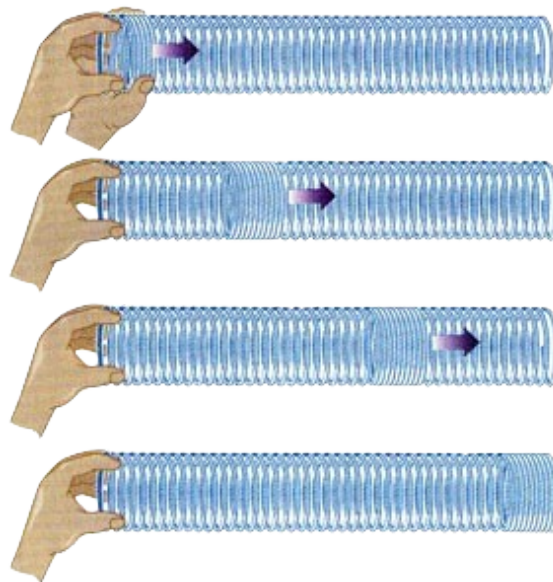
La vapeur d'eau pose un problème car elle contient un gaz (la vapeur) et un liquide en suspension sous forme de micro-gouttelettes (condensat¹). On prend en général une valeur $c = 400$ à 500 m/s.

On visualise très bien le mécanisme de propagation avec ces ressorts jouets appelés « slinky » et inventés en1940. Ils ont en particulier la propriété de descendre des escaliers et des plans inclinés par propagation d'une onde de déformation élastique du ressort.

¹ La vapeur d'eau « sèche » est totalement incolore et invisible. C'est l'aérosol de gouttelettes qui par réfraction de la lumière la rend visible.



<http://perceptionsonoretp.e.free.fr>



L'énergie appliquée sur une extrémité du ressort va être transmise par celui-ci pour arriver à l'autre extrémité par compression successive de chaque anneau du ressort.

Bien que l'énergie ait été transmise, il n'y a pas eu de déplacement de matière. En effet, le premier anneau reste dans sa position initiale, ainsi que tous les autres anneaux du ressort. Ce qui se passe après le premier parcours de l'onde va dépendre de ce qui se passe à l'extrémité du ressort, à son point d'attache (condition aux limites). Par exemple l'onde peut être réfléchiée et repartir en sens inverse.

La vitesse de propagation « c » de l'onde sonore est un paramètre important du problème « sifflet ».

Période, fréquence, longueur d'onde

Imaginez-vous en situation, un chronomètre en main, devant une corde vibrante. Vous souhaitez savoir combien de temps s'écoule pour que le point de la corde, point que vous avez repéré et que vous observez, repasse par la même position. Si la pulsation de la corde est stable, alors le point repasse dans une même position à intervalles de temps égaux. Cette durée c'est **la période** « T », qui s'exprime en secondes.

L'inverse de la période s'appelle **la fréquence** « f » qui donne le nombre de battements par seconde.

$F = 1/T$; l'unité est le Hertz (Hz)

La **longueur d'onde** c'est la distance dont se propage la perturbation pendant une durée égale à une période. C'est par exemple, lors d'une houle calme et bien formée, la distance en mètres de deux crêtes de vague de houle ou de deux creux.

C'est donc $\lambda = c \cdot T$ avec c en m/s et T en s

λ se dit « lambda ». Permet d'éviter les confusions avec d'autres grandeurs

La longueur d'onde est une grandeur importante pour nos sifflets comme nous le verrons par la suite.

La gamme de fréquence des sifflets vapeur s'étalait de 70 Hz (corne des paquebots, la basse fréquence favorisant la longue portée, voisine du km) à 800 Hz (pour les machines de chantier).

Fréquence et notes de musique

Cette section ne présente de l'intérêt que pour la culture générale ou si vous voulez fabriquer des sifflets multi-tons accordés.

On entre dans le domaine de la psychoacoustique. Certains sons et combinaisons de sons sont perçus comme apaisants ou agréables, d'autres non. Une part importante de la musique est basée sur le mécanisme tension-résolution de la tension.

L'oreille perçoit universellement très bien l'unisson qui correspond à l'émission simultanée d'un son de fréquence f_0 et d'un autre du double de sa fréquence $2f_0$. La manière de diviser cet intervalle de fréquence, appelé octave, donne lieu à de multiples échelles.

A partir de la Renaissance le besoin de transposer facilement des airs pour différents instruments et le développement de la polyphonie ont peu à peu fait émerger des problèmes d'harmonie et de dissonances. On est passé de la musique modale à la musique tonale et à des échelles à 12 niveaux. A partir de l'époque de J.S. Bach on s'est affairé à lisser les dissonances et à obtenir des degrés égaux. C'est la gamme tempérée actuelle qui est partout un peu fausse, mais pas trop. Cette gamme a amené de grosses simplifications par exemple Ré# et Mib sont devenues deux notes identiques. Cette gamme donne des résultats médiocres avec des instruments tels que le clavecin dont le son est formé d'une fondamentale peu puissante et de beaucoup d'harmoniques impairs. On retrouve des problèmes identiques sur des instruments comme le piano dans la partie aiguë du clavier.

Actuellement en musique occidentale c'est cette gamme tempérée qui est massivement utilisée. Même les approches modales (jazz, blues, etc) utilisent les notes un peu fausses de la gamme tempérée.

Dans une gamme tempérée une note se calcule à partir de la tonique par une formule simple.

Dans une gamme tempérée tonale, deux notes consécutives sont dans un rapport de

fréquence d'environ 1,05946 en fait $\sqrt[12]{2}$

Entre DO et FA il y a 5 intervalles donc pour un DO à 264 Hz le FA sera à

$$264 \times 1,059461^5 = 264 \times 1,3348 = 352,4 \text{ Hz}$$

Fréquences des notes dans 3 systèmes, do=264 Hz

Note	Juste intonation	Gamme de Pythagore	Gamme tempérée
do	264,00	264,00	264,00
do #	275,00	281,92	279,70
ré	297,00	297,00	296,33
mi b	316,80	312,89	313,95
mi	330,00	334,13	332,62
fa	352,00	352,00	352,40
fa #	371,25	375,89	373,35
sol	396,00	396,00	395,55
sol #	412,50	422,88	419,07
la	440,00	445,50	443,99
si b	475,20	469,33	470,39
si	495,00	501,19	498,37
do	528,00	528,00	528,00

Les notes de musique, do, ré, mi, etc. telles que nous les connaissons n'ont pas grand chose à voir avec la production d'un son musical. Une note conventionnelle ne se base que sur la fréquence fondamentale jouée par l'instrument, mais cette simplification grossière s'avère parfaitement opératoire. Tant mieux. Une note= une fréquence.

	Octave 0	Octave 1	Octave 2	Octave 3	Octave 4
do	32.70	65.41	130.8	261.6	523.3
do# réb	34.65	69.30	138.6	277.2	554.4
ré	36.71	73.42	146.8	293.7	587.3
ré# mib	38.89	77.78	155.6	311.1	622.3
mi	41.20	82.41	164.8	329.6	659.3
fa	43.65	87.31	174.6	349.2	698.5
fa# solb	46.25	92.50	185.0	370.0	740.0
sol	49.00	98.00	196.0	392.0	784.0
sol# lab	51.91	103.8	207.7	415.3	830.6
la	55.00	110.0	220.0	440.0	880.0
la# sib	58.27	116.5	233.1	466.2	932.3
si	61.74	123.5	246.9	493.9	987.8

	Octave 5	Octave 6	Octave 7	Octave 8	Octave 9
do	1046.5	2093.0	4186.0	8372.0	16744
do# réb	1108.7	2217.5	4434.9	8869.8	17740
ré	1174.7	2349.3	4698.6	9397.3	18795
ré# mib	1244.5	2489.0	4978.0	9956.1	19912
mi	1318.5	2637.0	5274.0	10548	21096
fa	1396.9	2793.8	5587.7	11175	22351
fa# solb	1480.0	2960.0	5919.9	11840	23680
sol	1568.0	3136.0	6271.9	12544	25088
sol# lab	1661.2	3322.4	6644.9	13290	26580
la	1760.0	3520.0	7040.0	14080	28160
la# sib	1864.7	3729.3	7458.6	14917	29834
si	1975.5	3951.1	7902.1	15804	31609

Voilà vous êtes prêts pour calculer les résonateurs de vos sifflets et les accorder

Intensité acoustique, puissance acoustique et décibels

- *Ce chapitre n'est pas vital pour le sujet traité mais éclaire quelques concepts périphériques.*
- *L'acoustique, dans sa définition d'origine, a pour objet l'étude des sons perçus par les humains. La grandeur physique la plus en rapport avec cette perception est la pression acoustique ; mais celle-ci ne concerne qu'un point de l'espace, et ne donne aucune indication sur la façon dont la vibration de l'air qui constitue le son s'est transmise.*

L'**intensité acoustique** « **I** » est la puissance transportée par les ondes sonores dans une direction donnée, par unité de surface et perpendiculairement à cette direction. C'est un flux d'énergie comme peut l'être un flux lumineux (éclairage) en optique-photométrie.

L'intensité acoustique s'exprime en Watt par mètre carré (W/m^2 aussi noté $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$)

L'intensité acoustique est une grandeur essentielle pour la description des espaces sonores. S'il n'y a pas d'intensité acoustique, il n'y a pas de transfert d'énergie d'un endroit à un autre, donc pas de signal sonore.

La **puissance acoustique**, c'est le travail (énergie) effectué par l'onde de pression pendant une unité de temps. C'est cette énergie qui met en mouvement le tympan de nos oreilles.

Il existe des lois plus ou moins complexes qui lient pression et intensité acoustique.

La puissance acoustique et l'énergie mise en jeu sont très faibles.

Le seuil de détection de l'oreille humaine serait de $I_0 = 1 \times 10^{-12} \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ (un picowatt par mètre carré).

Soit un millième de milliardième de Watt par m^2 unité aussi appelée « picoWatt »

Les acousticiens définissent le niveau d'intensité acoustique à partir du rapport de l'intensité acoustique du son à une intensité acoustique de référence I_0 .

$$L_I = 10 \cdot \log\left(\frac{I}{I_0}\right) \quad \text{Le rapport } \frac{I}{I_0} \text{ est ramené à un rapport de pressions.}$$

Nota : « log » est une fonction mathématique que l'on retrouve sur la calculatrice Windows en mode scientifique et qui présente des propriétés intéressantes. Il s'agit du $\log_{10}(x)$ à ne pas mélanger avec sa cousine $\ln(x)$

La **pression acoustique** s'exprime en pascal (Pa). Cependant l'oreille humaine, récepteur ultrasensible, détecte les sons dont l'amplitude varie de $2 \cdot 10^{-5}$ à 20 Pa.

Un niveau de pression en dB (décibel) quantifie l'intensité acoustique d'un son.

L'utilisation d'une échelle logarithmique, exprimée en dB, permet de réduire cette échelle étendue de pression.

Ordre de grandeur de la pression acoustique :
1 pascal (1 Pa = 1/100 000 de la pression atmosphérique).

Pression en Pa	Niveau sonore en dB
20	120
2	100
0,2	80
0,02	60
0,002	40
0,0002	20
0,00002	0

Décibel

Le décibel (dB) est une unité de grandeur sans dimension définie comme 10 fois le logarithme décimal du rapport entre deux puissances. A l'origine le bel et le décibel (dB) ont été utilisés dans les télécommunications pour étudier le facteur d'atténuation du signal dans les câbles par rapport à une référence donnée.

Le décibel est un sous-multiple du bel, qui est très rarement employé. Ni le bel, ni le décibel n'appartiennent au Système International d'unités.

Tous les champs de l'ingénierie peuvent utiliser le décibel. Il est particulièrement courant dans le domaine des télécommunications, dont il est originaire, dans l'électronique du traitement du signal, dans les technologies du son et dans l'acoustique.

Les décibels facilitent ainsi le travail quand :

- les grandeurs sont de même signe (il n'y a pas de logarithme d'un nombre négatif)
- les rapports s'étalent sur une large plage (plus d'un à cent)
- le rapport minimal est supérieur à 1,1

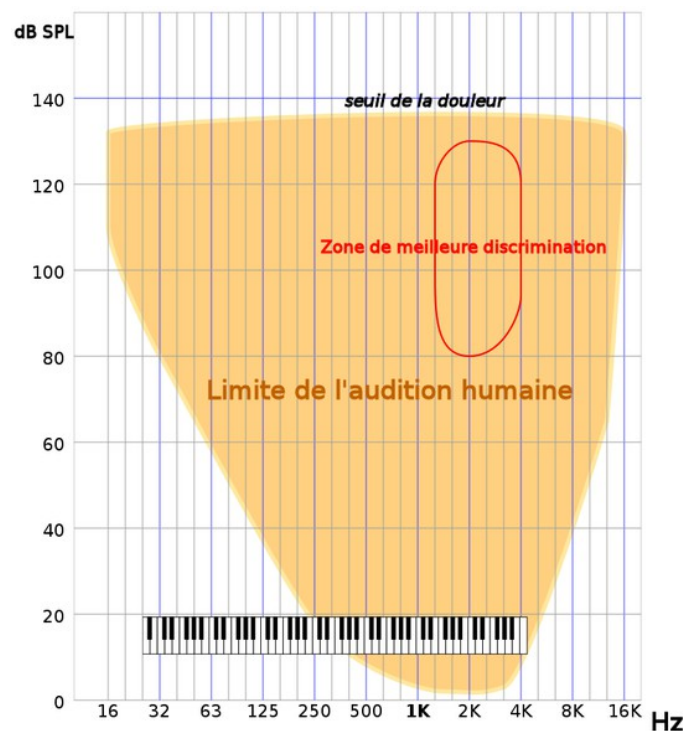
Dans le domaine de l'acoustique, on exprime couramment le niveau sonore en décibels. Cette valeur exprime alors le rapport des puissances entre la grandeur mesurée et une valeur de référence fixée par une norme.

$$X_{dB} = 10 \cdot \log(P_1/P_0)$$

P_1 est la pression acoustique mesurée et P_0 est la pression acoustique de référence. On rappelle que la mesure de pression acoustique est une mesure indirecte de l'intensité acoustique perçue.

Rapport des intensités acoustique I/I_0	1	1,6	2	4	10	40	100
Mesure en dB	0	2	3	6	10	16	20

Un marchand de panneaux acoustiques qui vous promet de diviser par 2 le bruit va abaisser le niveau sonore de -3dB ce qui n'est pas vraiment perceptible en situation d'activité normale !



Le schéma ci-dessus montre que pour entendre un son émis à 60Hz il faut qu'il y ait une pression acoustique d'au moins 60dB.

Le dBA intègre une correction liée à la sensibilité variable de l'oreille en fonction de la fréquence émise (voir figure ci-dessus). Cela implique de connaître la signature en fréquence de la source sonore.

Ondes stationnaires

Une onde stationnaire est le phénomène résultant de la propagation simultanée dans des directions différentes de plusieurs ondes de même fréquence, dans le même milieu physique.

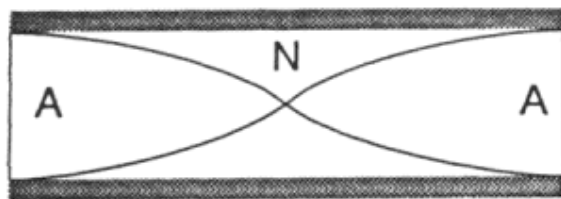
Pour un observateur la combinaison des effets de chaque onde prise individuellement, forme une figure dont certains éléments apparaissent fixes dans le temps. L'observateur constate une vibration stationnaire (indépendante du temps) mais d'amplitude différente, en chaque point observé. Les points fixes caractéristiques sont appelés des nœuds de pression. Ces points sont immobiles.

D'autres points présentent une amplitude de déplacement maximale, ce sont des ventres.

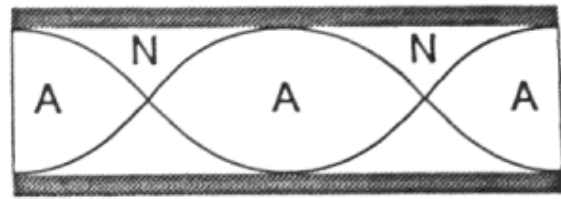
Les tubes de Kundt permettent de visualiser cela pour les ondes sonores en fonction de la fréquence de l'excitateur . On trouve sur Internet des vidéos sur les tubes de Kundt.

Les schémas ci-dessous montrent plusieurs types de formation d'ondes stationnaires dans des tubes.

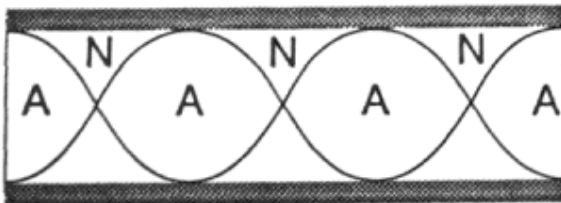
OPEN TUBE



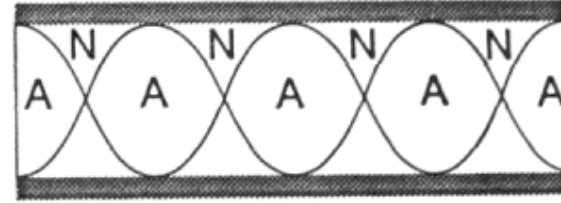
Fundamental: Open tube



1st Overtone: Open tube

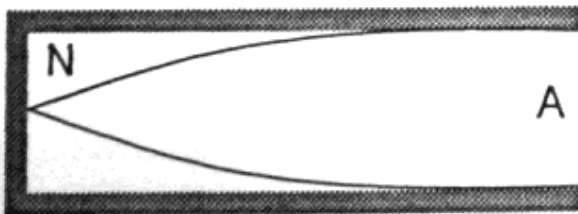


2nd Overtone: Open tube

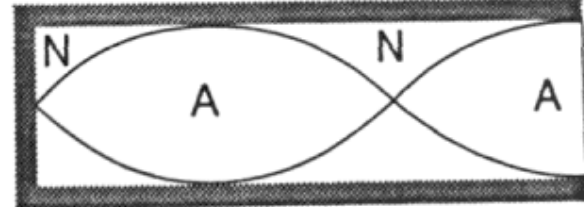


3rd Overtone: Open tube

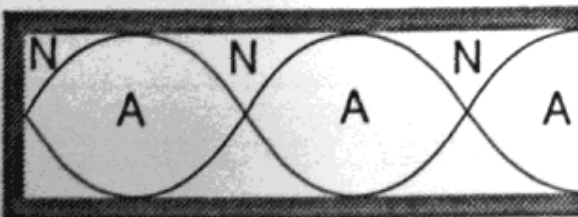
CLOSED TUBE



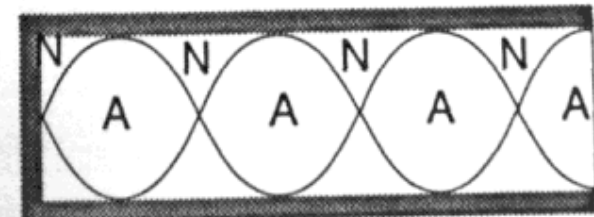
Fundamental: Closed tube



1st Overtone: Closed tube



2nd Overtone: Closed tube



3rd Overtone: Closed tube

Resonance States: Open and Closed Tubes

A longueur égale un tube fermé est capable d'émettre un son deux fois plus grave qu'un tube ouvert (flûte).

Le résonateur

Résonance, résonateurs

« La résonance est l'état d'un système vibratoire quelconque auquel une source extérieure fournit un apport d'énergie périodique en phase avec lui, et que le système en oscillation accumule à la condition que la fréquence de l'excitateur soit égale ou un multiple de la fréquence fondamentale du système. L'augmentation indéfinie de l'énergie d'oscillation est compensée par les pertes dues aux frottements qui dégradent l'énergie mécanique en chaleur ou en déformation mécanique voire par la destruction du système vibratoire. »

Plus simplement : quiconque aura fait de la balançoire sait que de petites poussées bien synchronisées suffisent à faire aller la balançoire de plus en plus haut. La balançoire et son passager est un système oscillant, appelé pendule, qui à chaque poussée accumule de l'énergie.

C'est cette amplification par résonance qui est recherchée dans les instruments acoustiques pour rendre le son audible.

La **fréquence fondamentale f_0** est la fréquence la plus basse qui provoque la résonance. Elle est parfois appelée fréquence naturelle de vibration. Les fréquences multiples sont appelées **harmoniques**.

En psychoacoustique on sait que les harmoniques de rang pair $2f_0$, $4f_0$ sont perçues plus douces, plus « harmonieuses »

Tube bouché²

C'est à ma connaissance le cas de tous les sifflets à vapeur.

Un cylindre fermé aura approximativement des résonances de

$$f = \frac{(1 + 2 \cdot n) \cdot c}{4 \cdot L}$$
 D est le diamètre du tube en m; c en m/s et L en m ; n un entier naturel (0, 1, 2, 3, ...). La longueur L du résonateur peut être remplacée par la valeur $L' = L + 0,4 \cdot D$ pour tenir compte des effets de bord ;

Personnellement j'ai le sentiment que sur les petites dimensions des sifflets de modèles réduits les conditions aux limites, comme les effets de bord à la bouche du sifflet, prennent une grande importance.

Ce type de tube a sa fréquence fondamentale une octave inférieure à celle d'un cylindre ouvert (c'est-à-dire, la moitié de la fréquence), et peut produire seulement les harmoniques impairs, " f ", " $3f$ ", " $5f$ "... par rapport au tube ouvert. Ce tube a un son plus brillant et plus agressif, à la manière des cuivres d'un orchestre, que les flûtes qui sont des tubes ouverts.

La fréquence f_0 dans de l'air sec à 20°C d'un tube de 0,50m de long et 0,05m de diamètre sera $f_0 = 333 / (4 \cdot (0,5 + 0,05 \cdot 0,4)) = 333 / 2,8 = 118,9$ Hz c'est une fréquence grave. Dans de la vapeur saturée avec une vitesse du son de 450 m/s, on aurait

$f_{0_vap} = 118,9 / 333 \cdot 450 = 160,7$ Hz.

² Parfois appelé tube $\frac{1}{4}$ d'onde.

Pour les mêmes caractéristiques un sifflet vapeur sonnera un peu plus aigu.

Pour un sifflet modèle réduit de $D=12\text{mm}$ et $L=40\text{ mm}$

$f_0_{\text{vapeur}}=450/(4*(0,04+0,4*0,012))=2511,2\text{ Hz}$ soit très aigu.

Résonateur d'Helmholtz



Type de résonateurs ayant servi à Helmholtz pour ses expériences

Résonateur/atténuateur réglable

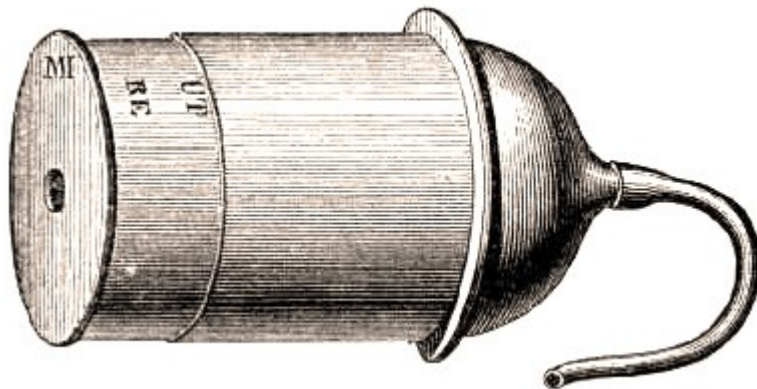
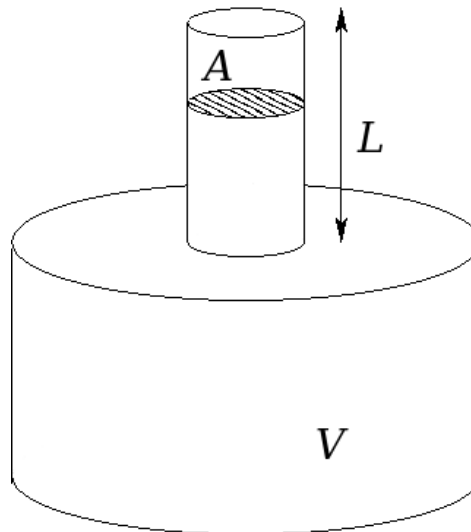


Schéma de principe du résonateur (ci-dessous)



C'est la fameuse bouteille de soda en verre dans laquelle on soufflait quand nous étions mômes pour faire de la musique.

La formule qui donne la fréquence de résonance est :

$$f_0 = \frac{c}{2\pi} * \sqrt{A/(V*L)} \quad c \text{ en m/s} ; A \text{ en m}^2 ; V \text{ en m}^3 ; L \text{ en m}$$

Si pour des raisons de commodité on exprime toutes les dimensions en mm le résultat final devra être multiplié par 1000, si c'est en cm on multipliera par 100.

Certains auteurs proposent une correction sur L ; $L_{\text{eff}} = L + 8*D/3/\pi$ avec D=diamètre du goulot.

Adjoignons une cavité au résonateur du sifflet précédent (D=12mm et L=40 mm), cavité de hauteur 70mm et de diamètre 60 mm. Le « goulot » correspond donc au tube du sifflet précédent.

$$A = 12 * 12 * 3,1416 / 4 = 113,1 \text{ mm}^2$$

$$L = 40 \text{ mm}$$

$$V = (60 * 60 * 3,1416 / 4) * 70 = 197920 \text{ mm}^3$$

$$A/(V*L) = 113,1 / 40 / 197820 = 0,0000143 \text{ et racine carrée vaut } 0,00346$$

comme on a pris les dimensions en mm on multiplie par 1000

$$f0_vap = 450 / (2 * 3,14) * 0,00346 * 1000 = 247,6 \text{ Hz}$$

On voit que la fréquence a considérablement baissé par rapport au sifflet traditionnel : 248 Hz contre 2500 Hz auparavant. Par

contre on ne peut rien dire sur la puissance acoustique émise car je n'ai trouvé aucune donnée sur ce point.

Est-elle aussi élevée que le sifflet simple ? Ce n'est pas évident car la taille du sifflet n'est peut-être pas très compatible avec les écoulements à basse fréquence, à voir.

Quelques règles concernant les tuyaux d'orgues bouchés

Longueur du résonateur

Il s'agit de la longueur intérieure nette de la colonne d'air.

On calcule la longueur de référence ($\frac{1}{4}$ de longueur d'onde pour les tubes bouchés) à partir des formules. A cette longueur il y a une correction à apporter car l'air au débouché du résonateur participe à la hauteur du son.

Ingerslev and Frobenius (1947) ont donné des formules empiriques de correction de longueur de résonateur.

- Si la surface de bouche S_m est beaucoup plus petite ($S_m/S < 0.25$) que la section du tube S , alors
$$dL_m = \frac{0,73 * S}{\sqrt{S_m}}$$
- Pour des surfaces de bouche plus grandes que $S_m/4$ on admet une correction
$$dL_m = 0,34 * \sqrt{S}$$

Il n'y a pas de secret, même si des formules traînent ici ou là, la longueur du tube devra être empiriquement ajustée. On rappelle que la vitesse du son dépend de facteurs comme la température et l'humidité et donc, à longueur de tube donnée, la hauteur de son va varier.

Diamètre du résonateur

Le ratio Longueur/Diamètre va avoir une influence importante sur le timbre émis et sur le rendement acoustique. Plus ce ratio est faible plus le son sera riche en harmoniques au détriment de la fondamentale. Le revers de la médaille c'est que :

- le tuyau risque de ne plus jouer que des harmoniques et/ou le timbre perdre en clarté
- perdre en puissance acoustique

Pour les sifflets, où l'on recherche le rendement acoustique, le rapport $L=3D$ est assez couramment utilisé.

L'excitateur

Pourquoi ça siffle ?

Le sifflement provient d'une excitation du résonateur. Pour comprendre il faut regarder à la pointe du biseau, ce que l'on sait faire aujourd'hui avec des lasers. La pointe du biseau est un obstacle à l'écoulement.

Schématiquement, il s'y forme des discontinuités sous forme de tourbillons. Ces tourbillons s'établissent alternativement du côté intérieur puis extérieur du biseau déviant la veine de fluide. Il n'y a pas à proprement parler de transport de matière, contrairement à une canalisation d'eau, mais des variations cycliques de pression à l'entrée du résonateur. Ce sont ces ondes de pression qui se propagent dans le résonateur.

Lorsque la veine de fluide « part » vers l'intérieur, la pression augmente dans le résonateur jusqu'au point où le fluide ne peut plus pénétrer à proximité du biseau, et le tourbillon se forme à l'extérieur. En coulant à l'extérieur il se crée une dépression à l'intérieur du tube jusqu'au moment où le fluide est « ré-aspiré ».

Si la fréquence de l'onde de pression est égale ou proche de la fréquence du résonateur alors le tube siffle.

Principe de Bernoulli

Bernoulli a établi un principe qui dit que dans un fluide incompressible **une baisse de pression induit une accélération du mouvement**. Formulé autrement, cela signifie que la vitesse et la pression sont liées. Pour les fluides réels compressibles et ayant une certaine viscosité l'affaire est plus compliquée, mais le principe reste vrai.

Ainsi au débouché de l'évent annulaire qui alimente le résonateur, la pression baisse brutalement car on passe de la pression d'alimentation à la pression atmosphérique. La conséquence immédiate est l'augmentation importante de la vitesse du fluide. La baisse brutale de pression induit aussi un refroidissement du gaz (détente adiabatique).

Jusqu'à une certaine valeur, cette augmentation de la vitesse d'éjection est bénéfique pour la production sonore et le rendement acoustique. Au-delà le rendement diminue et le résonateur résonne mal ou sur des harmoniques particuliers.

Géométrie de l'excitateur

Pour des géométries simples comme celle des sifflets la mise au point est facilitée en appliquant quelques règles.

Bouche

Pour posséder un bon rendement acoustique on admet que la surface de la bouche doit être sensiblement égale à la section du tuyau. En appelant H la hauteur de bouche et en confondant diamètre intérieur et extérieur du tube on voit que

$H=D/4$ et pour un ratio $L/D=3$ on a $H=L/12$

Event d'alimentation

Dans les tuyaux d'orgue la pression d'alimentation en pied de tube varie de 100 mbars à 500 mbars.

Les sifflets étaient eux alimentés en pleine vapeur. La baisse de pression s'effectue par perte de charge dans les conduites et laminage par l'évent de distribution.

Il y a très peu d'information documentée sur le sujet. Pour maximiser la puissance sonore émise, il y a une vitesse optimale en terme d'éjection du fluide, air ou vapeur, que l'on obtient par une fente d'évent étroite. Dans les sifflets les événements sont annulaires.

Pour les tuyaux d'orgue conventionnels (flûtes, bourdons,...) le nombre d'Ising permet de relier les principales grandeurs « dimensionnantes » entre elles. Une

valeur recommandée pour ce nombre est $I=2$. La formule s'écrit $I = \frac{V}{F} \sqrt{\frac{D}{H^3}}$

avec V vitesse du fluide au débouché de l'évent d'alimentation, F, la fréquence et H hauteur de bouche. Moyennant quelques hypothèses simplificatrices et quelques tours de passe-passe avec Bernoulli on peut se raccrocher à la pression d'alimentation.

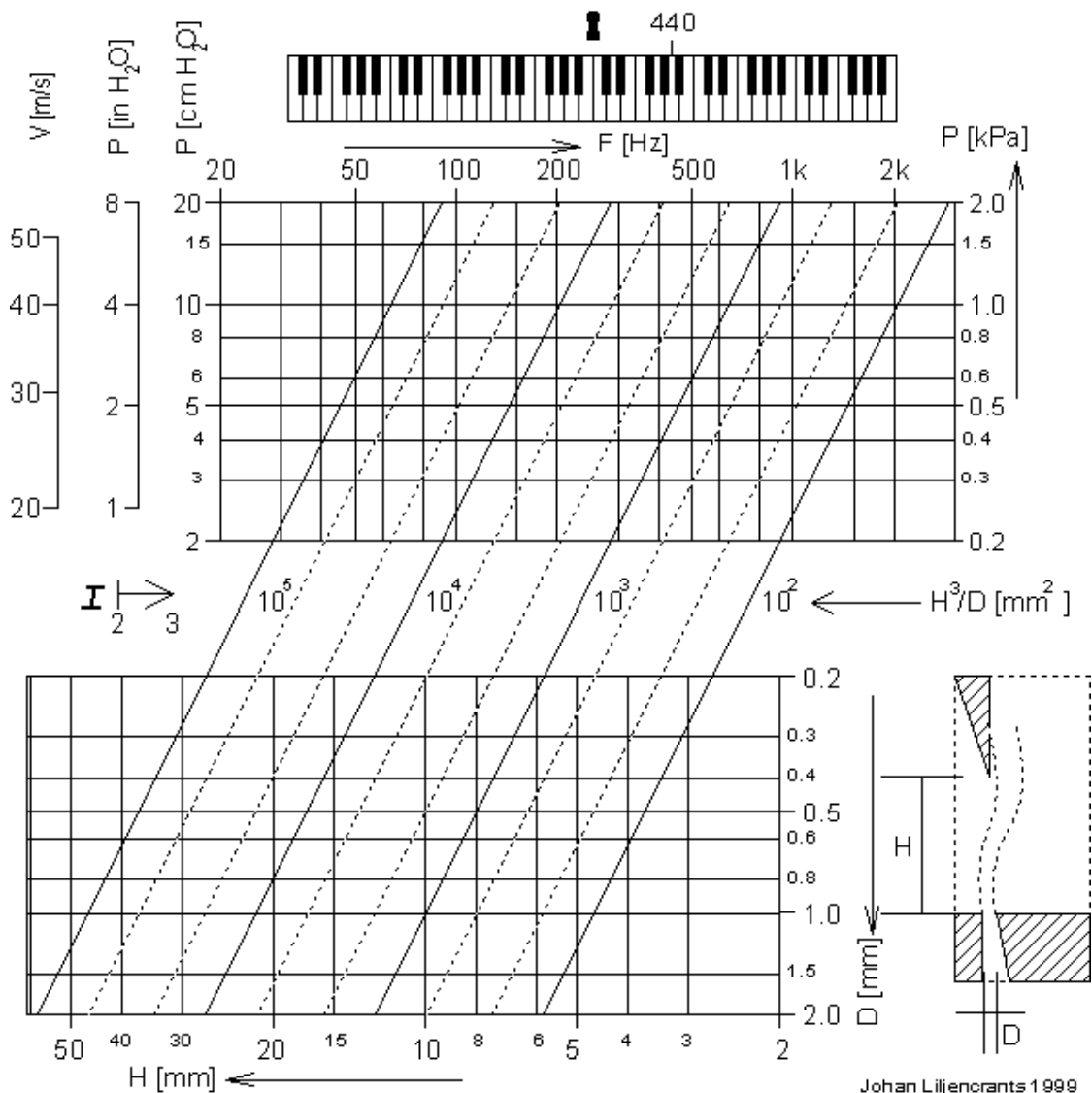
$$I = \frac{V}{F} \sqrt{\frac{D}{H^3}} = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{2 * P * D}{\rho * H^3}} \quad \rho \text{ est la masse volumique (kg/m}^3\text{) du fluide.}$$

Exemple d'abaque utilisé en pré-dimensionnement de tubes. On peut rentrer par n'importe quel bout. Généralement F et P sont les points d'entrée courants.

Source <http://www.fonema.se/ising/isint.htm>

Ising intonation number = 2

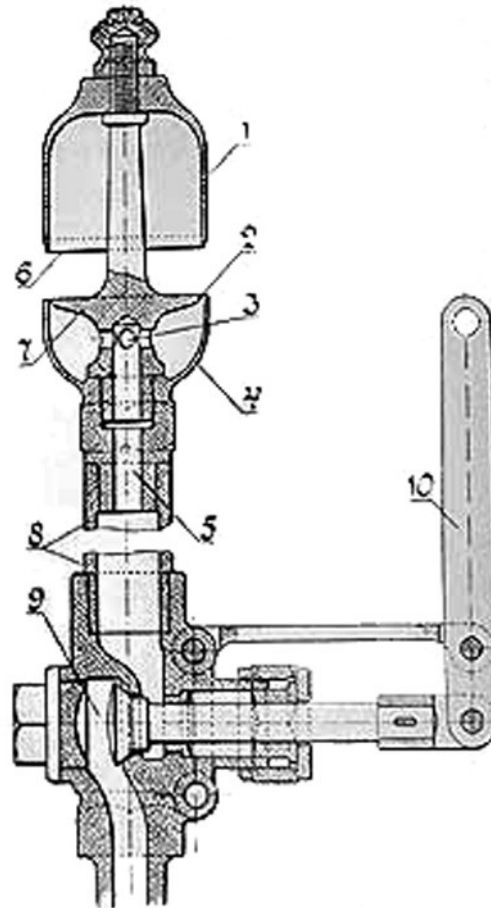
$$\mathbf{I} = \frac{V}{F} \sqrt{\frac{D}{H^3}} = \frac{1}{F} \sqrt{\frac{2PD}{\rho H^3}} = 2$$



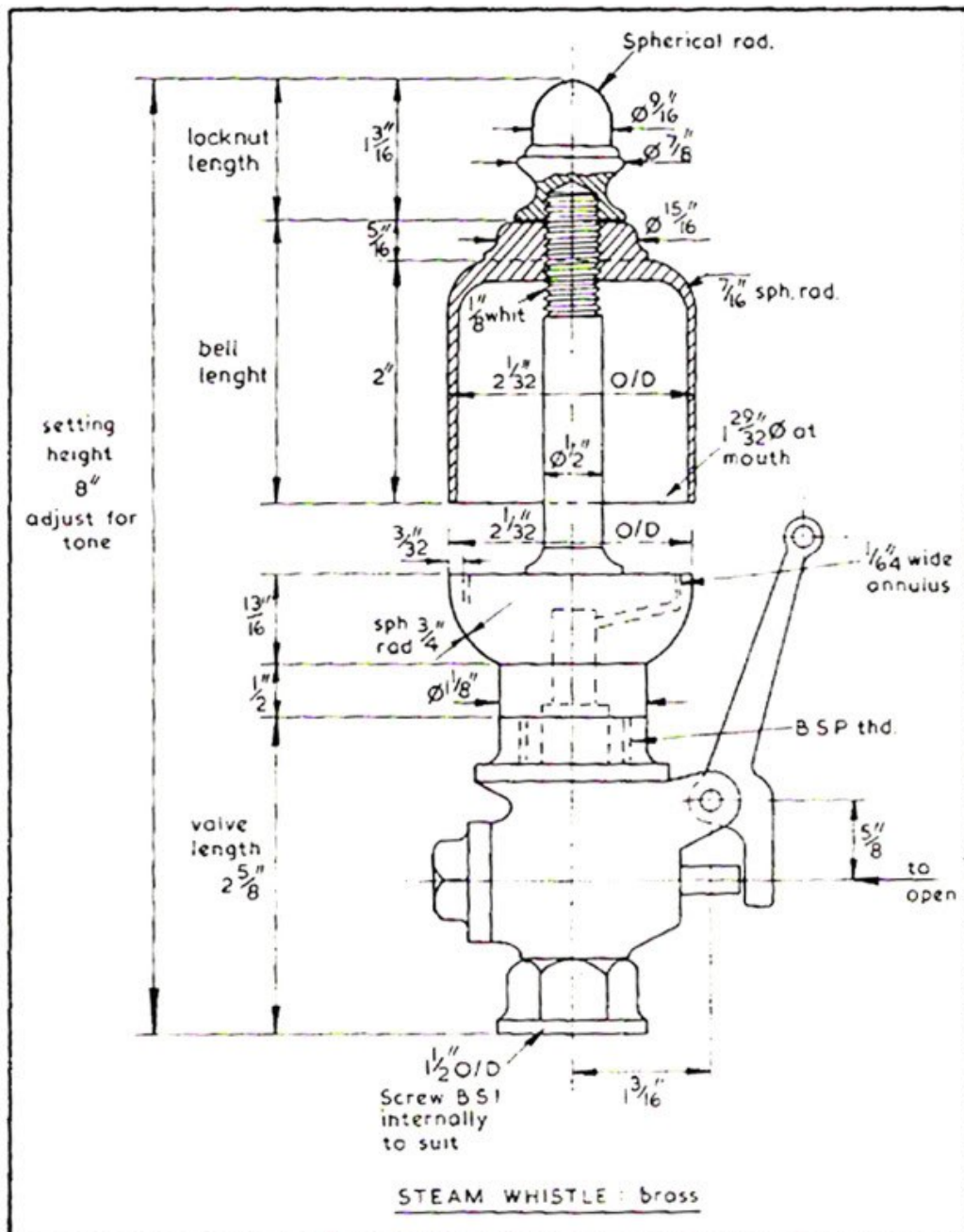
Anatomie d'un sifflet à vapeur

Pour faire simple, un sifflet devra être doté :

- d'une soupape à rappel automatique. Cette soupape doit être efficace d'abord en termes d'étanchéité et ensuite d'ouverture
- d'un évent calibré qui doit débiter avec précision et régularité de la vapeur
- d'un résonateur à grand rendement
- d'une grande robustesse car c'est un outil de signalement/communication vital qui est exposé à toutes les intempéries

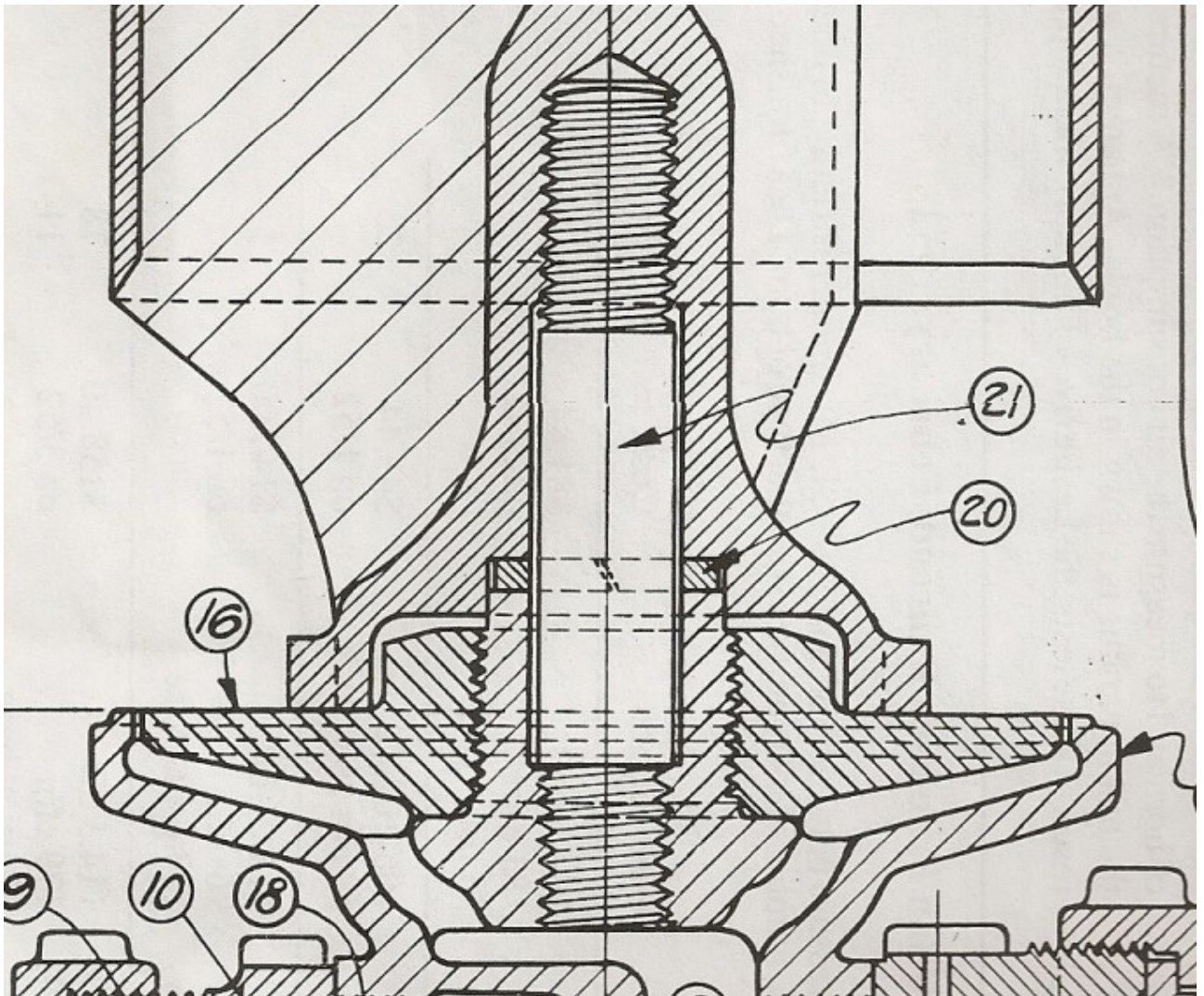
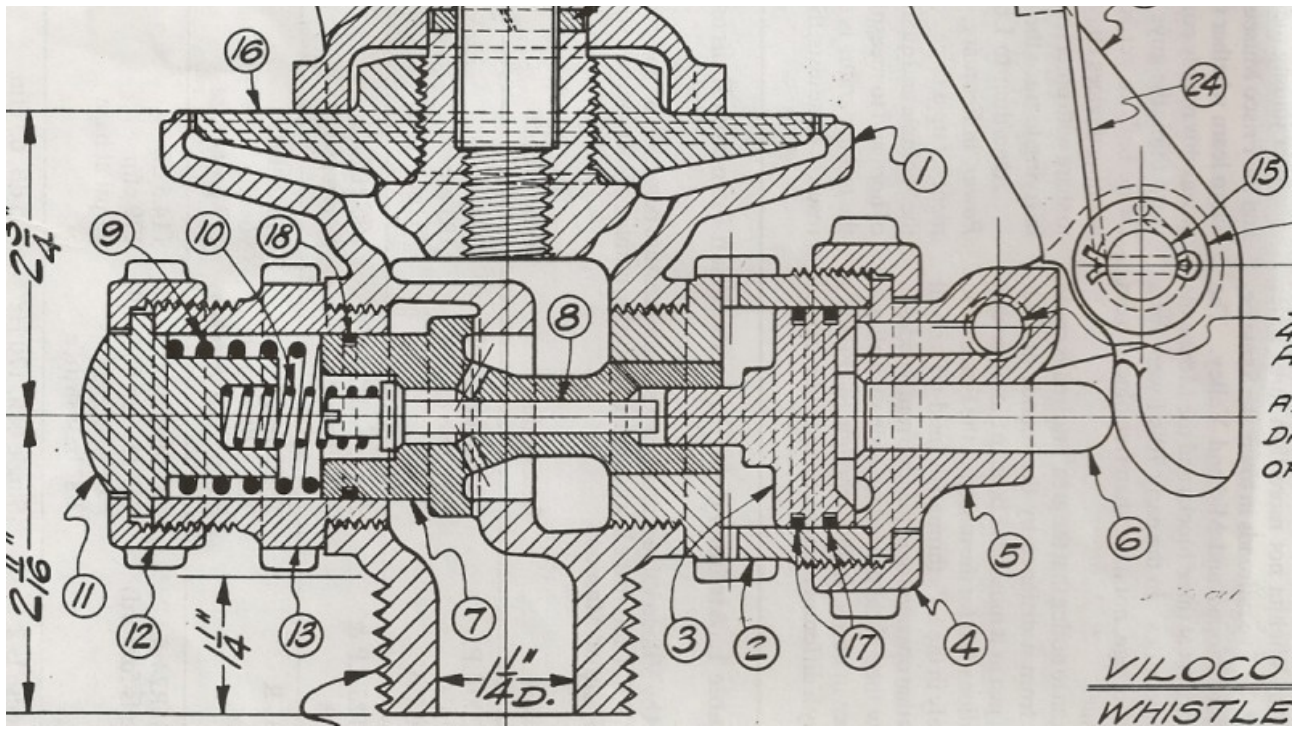


- 1-Résonateur
- 2-Bouche d'évent
- 3-Distribution vapeur
- 9-Soupape d'admission avec son canal vapeur

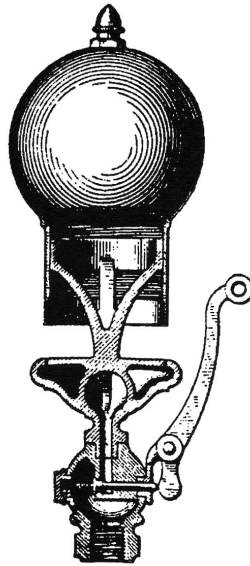


Vue de détail d'un sifflet pneumatique basé sur le même principe

Les deux figures suivantes concernent un sifflet à air comprimé à trois tons simultanés

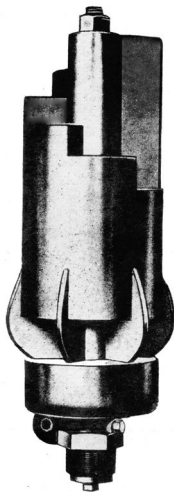


Quelques types de sifflets



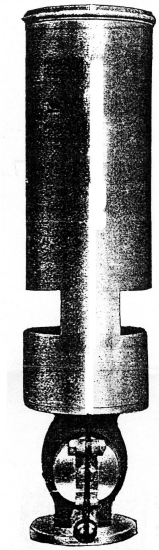
Sifflet à résonateur Helmholtz.

Sur cette vue on peut douter du fait qu'il s'agisse d'un vrai résonateur d'Helmholtz car il manque un goulot. Cela ressemble plus à une curiosité qu'à un produit industriel.



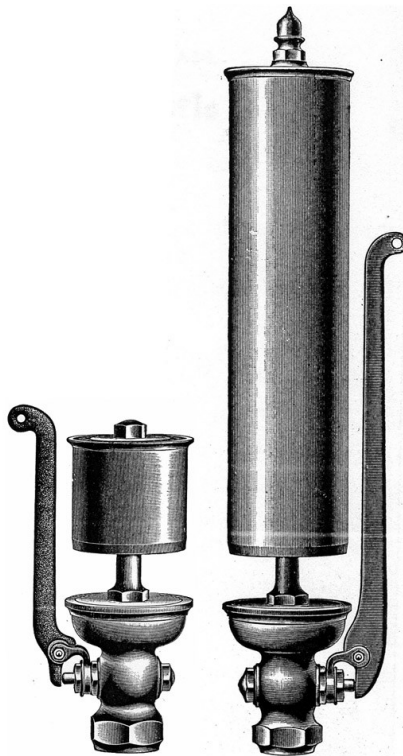
Sifflet compact multi-tons simultanés

Il s'agit d'un sifflet à 6 tons. On peut légitimement se poser la question de l'efficacité acoustique et de la justesse liée aux interférences de pression sur les bouches. En plus chaque son émis va avoir une direction préférentielle. Un sifflet apparemment monté sur des locomotives



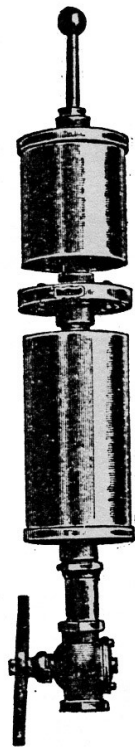
Sifflet à tube bouché de Calliope (orgue à vapeur)

La forme de la bouche influe sur le timbre final du sifflet. En général pour une utilisation musicale ces sifflets avaient un diamètre faible par rapport à la longueur, ce qui favorise des timbres particuliers par génération d'harmoniques. Pour un tube d'instrument de musique, étonnamment il n'apparaît pas de réglage de tonalité. Dans ces sifflets on cherche une réponse dynamique rapide pour une consommation minimale de vapeur. Leur essor a eu lieu sur les bateaux à aubes du Mississippi, la production de vapeur n'étant alors plus un souci.



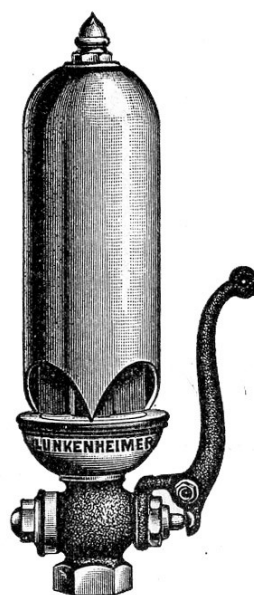
Couple de sifflets traditionnels

La hauteur des sons est obtenue par la longueur du résonateur. Ce sont des sifflets à très bon rendement acoustique et omnidirectionnels. On notera sur cette vue le biseau au bas du résonateur qui sert d'excitateur.



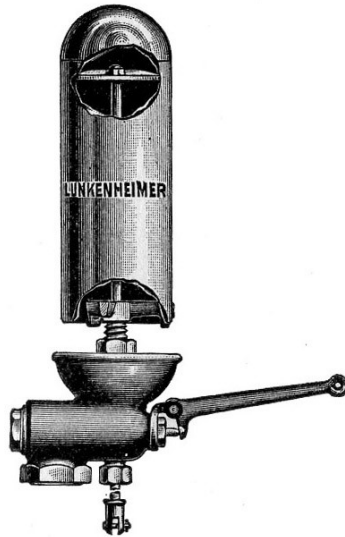
Sifflet de type Gong

Sifflet à résonateurs opposés avec une émission omnidirectionnelle. Souvent utilisés dans les usines.



Sifflet directionnel à deux tons simultanés

Une seule cloche abrite deux résonateurs accordés. C'est un sifflet directionnel qui projette le son plutôt vers l'avant. De taille imposante ils étaient utilisés dans les locomotives. Lunkenheimer était un fabricant renommé de ces sifflets.

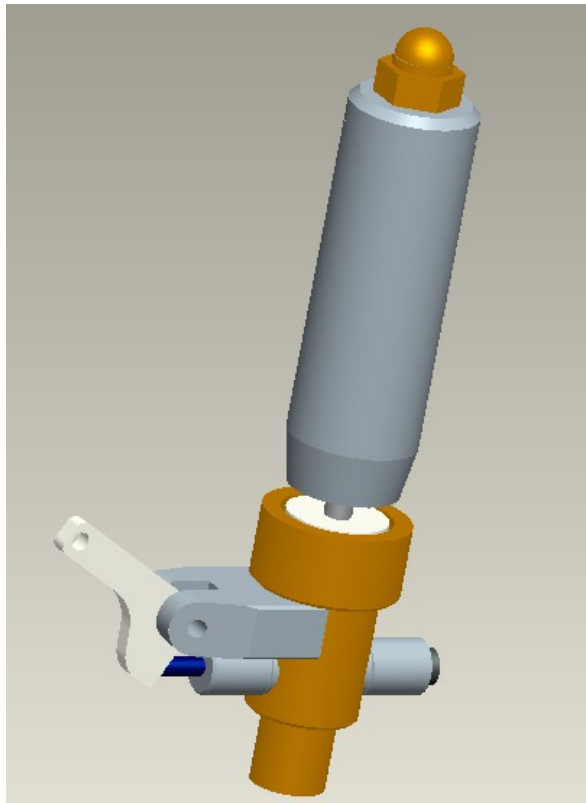


Sifflet à ton variable

La variation de hauteur est obtenue par piston mobile. Pour quelle utilisation ?

Sifflet modèle réduit

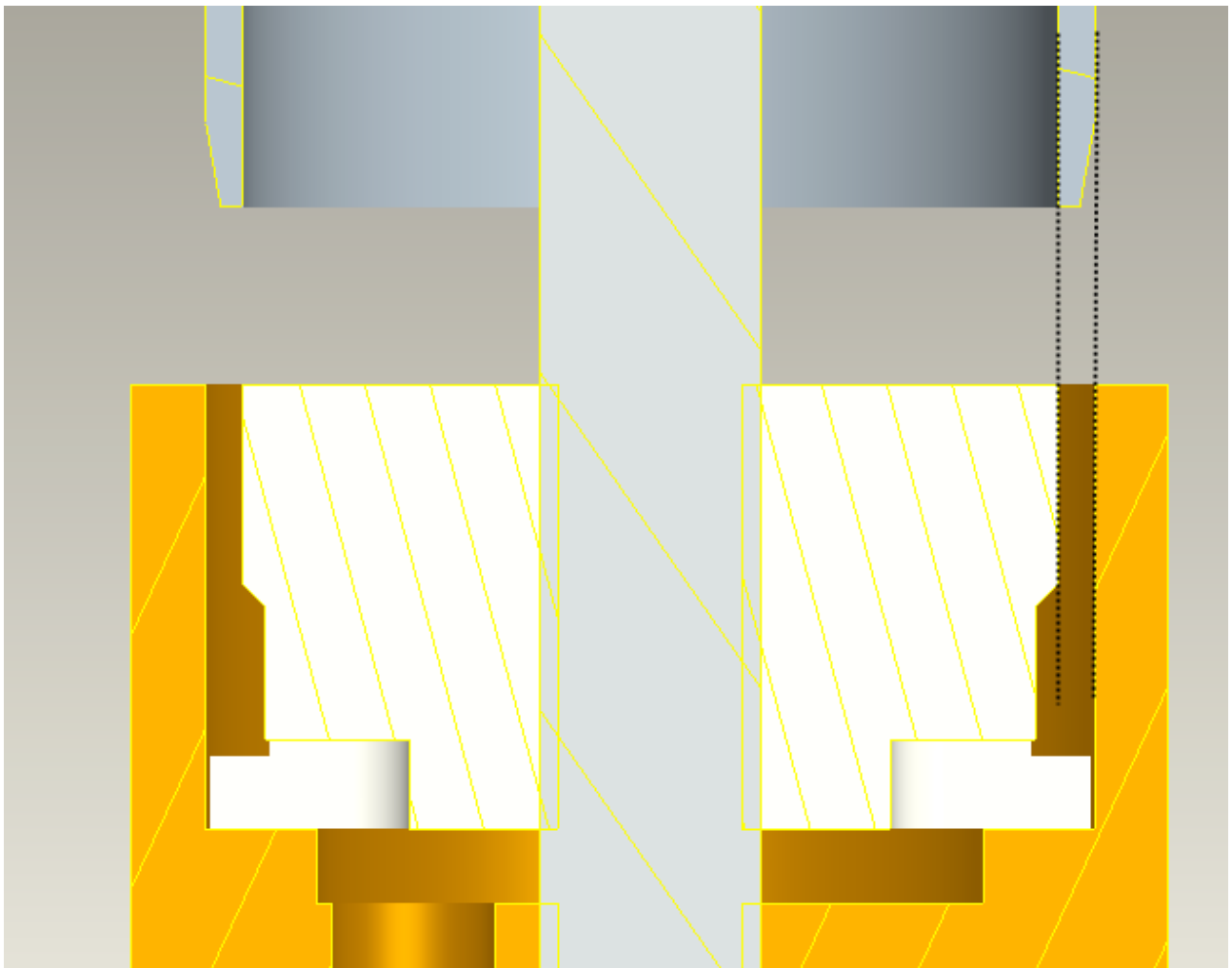
La conception du projet de sifflet provient dans ses grandes lignes de celui proposé par W.M Harris dans son ouvrage The Donkey Steam engine – Village Press Publications -ISBN 0-941653-69-2



On utilise une soupape à bille car dans ces dimensions une soupape classique est un peu délicate à usiner et ajuster.

Ce sifflet sera alimenté par des chaudières basse pression (3 à 5 bars) en vapeur saturée. Il ne faut pas laminier excessivement la vapeur (condensation, jet instable). La production de vapeur en qualité et quantité suffisante est un casse-tête en modélisme, il convient donc d'avoir un sifflet économe en vapeur ; étanchéité et rendement acoustique sont à peaufiner.

Sur la vue suivante on voit un détail de l'évent annulaire. L'avantage du concept, repris sur les sifflets industriel est qu'il est assez simple d'usiner le distributeur de vapeur pour régler la taille de l'évent annulaire. Sur l'image côté droit j'ai montré les contraintes d'alignement pour un bon fonctionnement



Dimensionnement du sifflet

Les dimensions tiennent compte de l'encombrement disponible. Par ailleurs plus le sifflet est gros plus le volume de vapeur consommé sera conséquent ce qui n'est pas souhaitable

c vitesse son	450,00 m/s		
Longueur nette	48,00 mm		
L/D	3,00		
D calculé	16,00 mm		
D choisi	12,00 mm	A (section tube)	113,10 mm ²
D/H	4,00		
H=	3,00 mm		
Sm	113,10 mm ²		
L corrigée 1	54,40 mm		
L corrigée 2	51,62 mm		
L corrigée moy	53,01 mm		
Type résonateur	4,00 ¼ onde		
L acoustique	212,03 mm		
f0	2122,33 Hz		

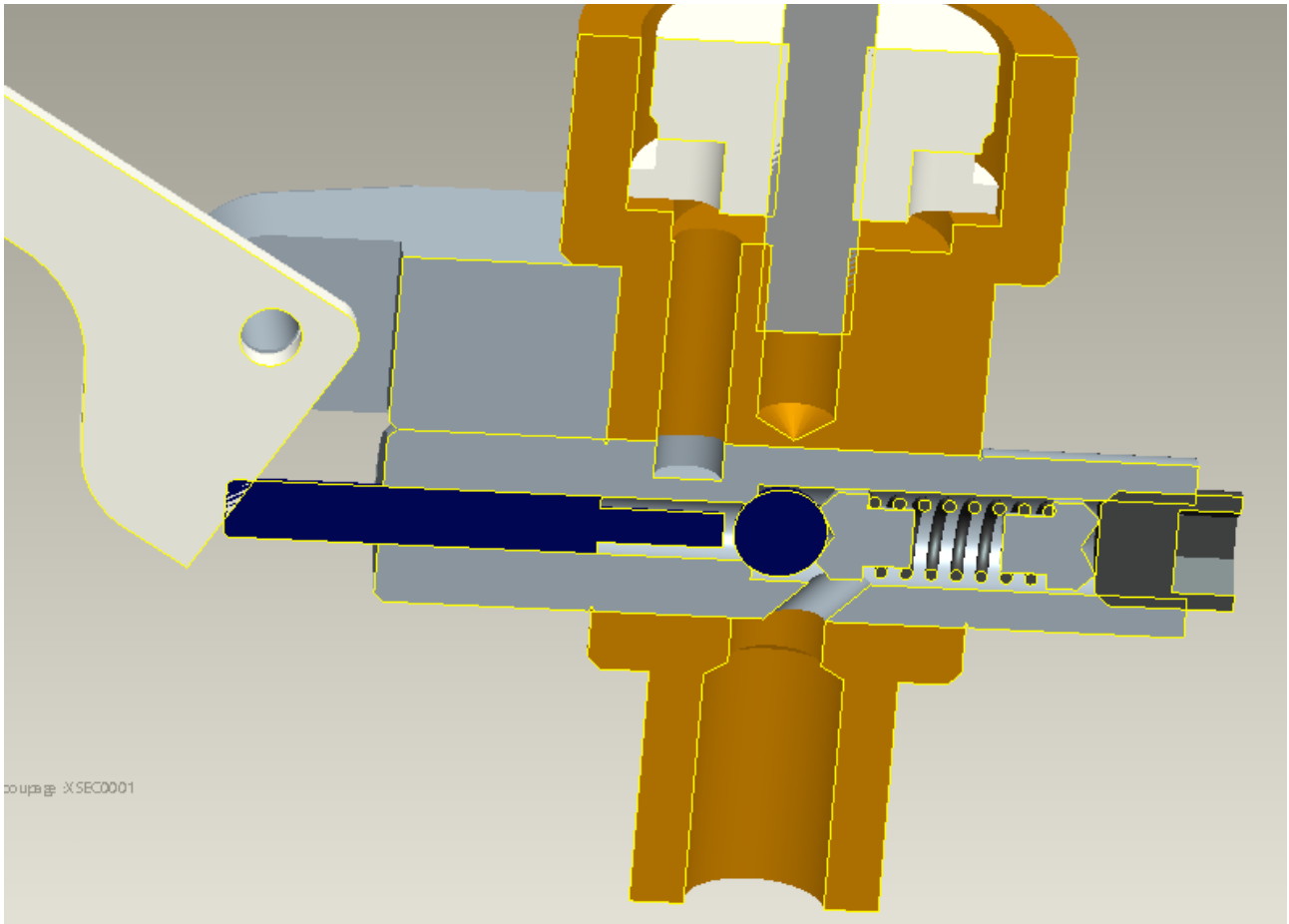
On voit à travers ce calcul que la note produite serait proche d'un DO 6/Ré_bémol 6 qui sont parmi les notes les plus aiguës du piano.

Notes d'atelier

Il s'agit de quelques points qui peuvent aider, mais bien entendu chacun a sa manière d'aborder un usinage.

Tout d'abord procurez-vous quelques billes, inox ou bronze, de diamètre $D=3\text{mm}$ ³.

³ Je pense que du ou 3,2mm (1/8") devrait convenir aussi mais il n'y a guère de jeu



Corps vertical

Partir d'un rond D=16mm ou même 15mm avec la longueur nette augmentée de la coupe et d'un tenon pour un prise en mandrin ER25.

1/ prise au mandrin sur tour.

Descendre les deux diamètres D=12mm et D=8mm ; percer D=3mm (attention de ne pas aller trop loin)

Percer D=4,5 mm sur 8mm puis tarauder M5x0,5 si c'est le taraudage de vos raccords.

Abbatre les angles

2/ prise sur pince ER25 en étau de fraiseuse.



Source : Arceurotrade

Perçage à $D=5,9\text{mm}$ puis aléser à $D=6\text{mm}$.

3/ Prise sur mandrin au tour

Dressage et mise à la cote d'épaisseur du $D=16\text{mm}$

Perçage légèrement débouchant $D=2,5\text{mm}$ puis filetage M3

Monter un fraise 2 dents coupe au centre et aléser $D=9\text{mm}$. Même manip pour le $D=12\text{mm}$

4/ Prise en pince ER25 et montage en étau sur fraiseuse.

Serrer modérément à la main.

Aligner l'axe de pièce et l'axe de broche.

Introduire ensuite un rond rectifié de 6mm dans $D=6$. Introduire un rond dans la broche. Mettre le rond de broche en contact avec celui inséré dans la pièce. Effectuer un déplacement longitudinal de 50mm environ pour aligner sommairement l'axe de X et celui du rond $D=6\text{mm}$.

Recentrer et se déplacer de $X=3,2\text{mm}$ pour percer le trou de $2,2\text{mm}$. En fait le trou tangente l'alésage de $D=9\text{mm}$.

Corps horizontal

1/ Prise mandrin de tour

Mise à la longueur rond $D=6\text{mm}$. Percer $D=2\text{mm}$ sur au moins 1mm .

Retourner la pièce. Perçage de précision à $D=3,3\text{mm}$ longueur totale 14mm (cône du foret compris).

Araser le fond à la cote 14mm .

Pour araser le fond le plus simple est de fabriquer un fleuret plat (*D-bits*) dans un morceau de rond en acier trempable.



Source : Practical machinist

Le plat et l'arête coupante doivent se trouver sur le diamètre du rond ou quelques centièmes en dessous. Mettre une dépouille classique pour éviter le talonnage

Pour la trempe pas de prise de tête : chauffer au rouge vif, tremper le tranchant dans de l'eau salée. Reprendre et chauffer légèrement en flamme douce jusqu'à ce qu'une coloration « jaunâtre » apparaisse. Laisser refroidir à l'air.

Nota : avant soudure de la pièce sur le corps vertical, penser à mater le siège de la bille pour une meilleure étanchéité. Cela consiste à mettre la bille dans logement en appui sur son siège et frapper un coup sec sur un rond.

2/ Prise ne pinces ER25 sur étau de fraiseuse

L'angle et la position du canal vapeur n'est pas très critique pour autant que le débouché se trouve derrière la bille dans le trou $D=3,3\text{mm}$. Repasser un coup de D-bit pour ébavurer.

3/ Reprendre au tour avec contre-pointe

A l'aide d'un outil à fileter faire deux légères marques sur le corps pour le positionnement de soudure. Faire un montage à blanc pour s'assurer de la position du canal vapeur.

Tarauder M4

Nota : avant soudure, penser à mater le siège de la bille pour une meilleure étanchéité. Cela consiste à mettre la bille dans logement en appui sur son siège et frapper un coup sec

Charnière de levier de commande

Partir d'une ébauche suffisamment grande pour percer en toute tranquillité le trou de $D=12\text{mm}$. (Pré-perçage à $D=6\text{mm}$ puis passage fraise 2 dents coupe au centre de $D=12\text{mm}$)

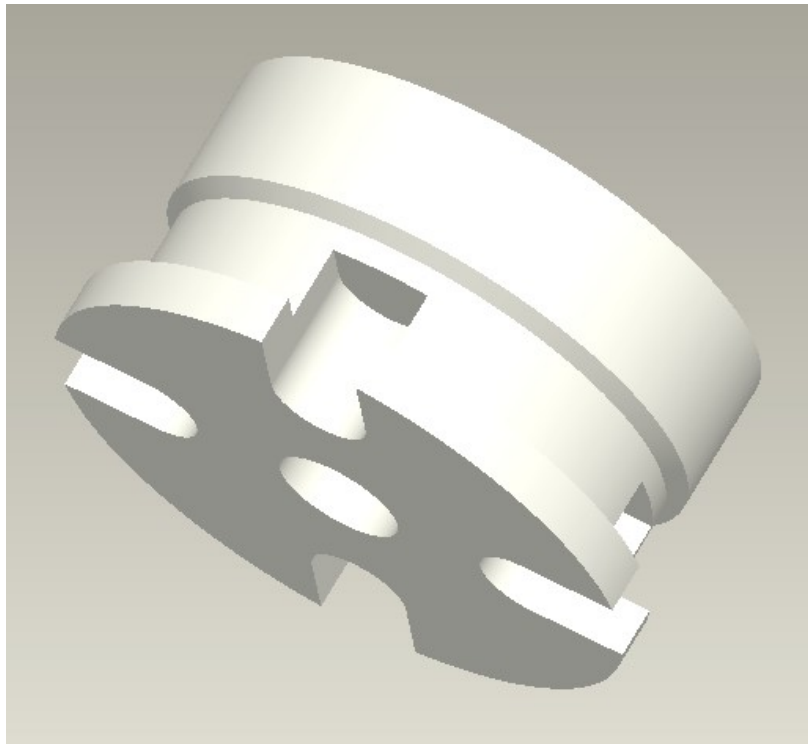
Pour le confort du positionnement avant soudure j'ai usiné une gorge $D=6\text{mm}$ sur 3mm de profondeur. On peut utiliser une fraise ad'hoc ou bien prendre une fraise à gorge de défonceuse à bois en carbure. On notera que, en fraise grand public, la fraise HSS pour le métal est bien moins chère que la fraise de défonceuse.

Source Arceurotrade



Fraise de défonceuse-source : <http://www.arondia.com>

Buse de distribution de vapeur



1/ Prise sur mandrin au tour

Prendre un rond D=12mm. Percer D=2,5mm sur 9mm. Tarauder M3.

Visser un boulon BTR M3. Descendre la tête au diamètre 5mm. Ce boulon va servir de butée de fraisage pour les encoches de passage vapeur.

Dresser la face de la pièce si nécessaire.

Monter un outil à tronçonner.

Descendre une gorge de 6mm à 7 mm au diamètre précis D=11mm, puis exécuter la gorge D=10,4 mm de 2mm de large.

Monter un outil chanfreiner taillant à 45°. Exécuter le chanfrein

2/Prendre sur collet ER25 dans l'étau de fraisage

Aligner l'axe de pièce et de broche

Monter une fraise 3 dents de $D=2\text{mm}$. Pour du laiton j'ai réglé la vitesse de broche à 2500 trs/mn.

Fraiser les quatre passages vapeur en butant sur la tête du boulon.

Démonter le boulon en fin de travail. Le conserver.

3/ Montage en mandrin au tour

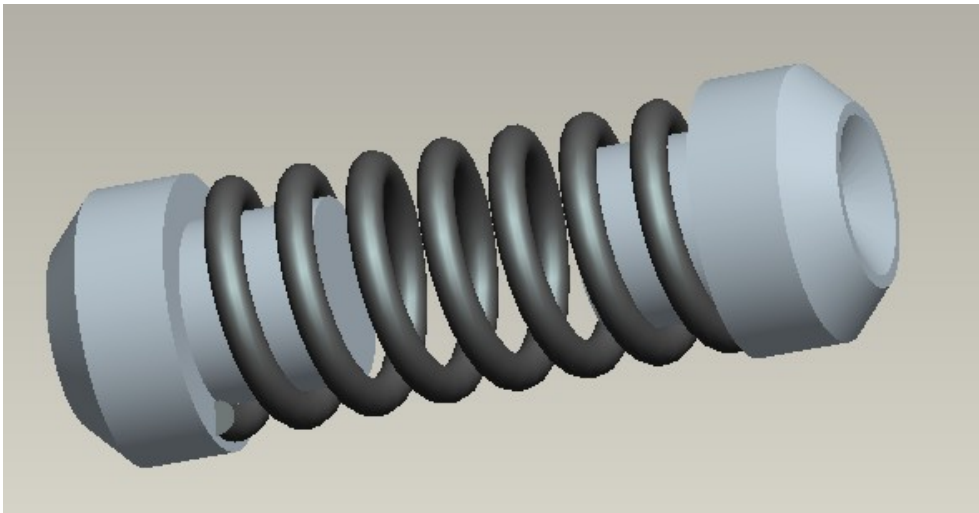
Tronçonner avec une surcote de 1mm (ou 0,5mm si vous êtes sûr de votre coup).

Dresser la face du tenon encore pris au mandrin. Percer $D=2,5\text{mm}$ et tarauder M3.

Serrer le tenon et la pièce à finir avec le boulon BTR.

Faire des passes légère pour aller à la cote finie.

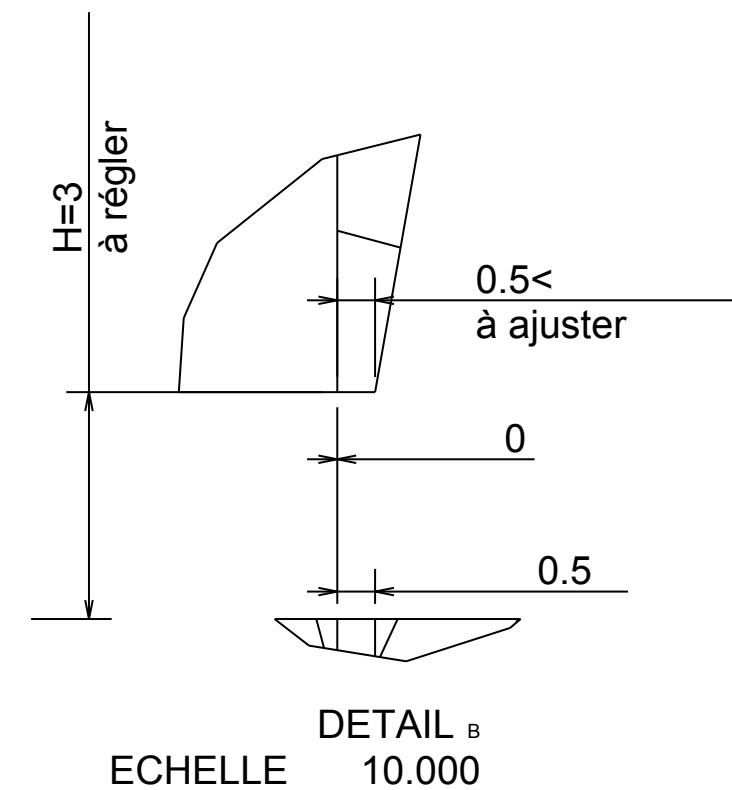
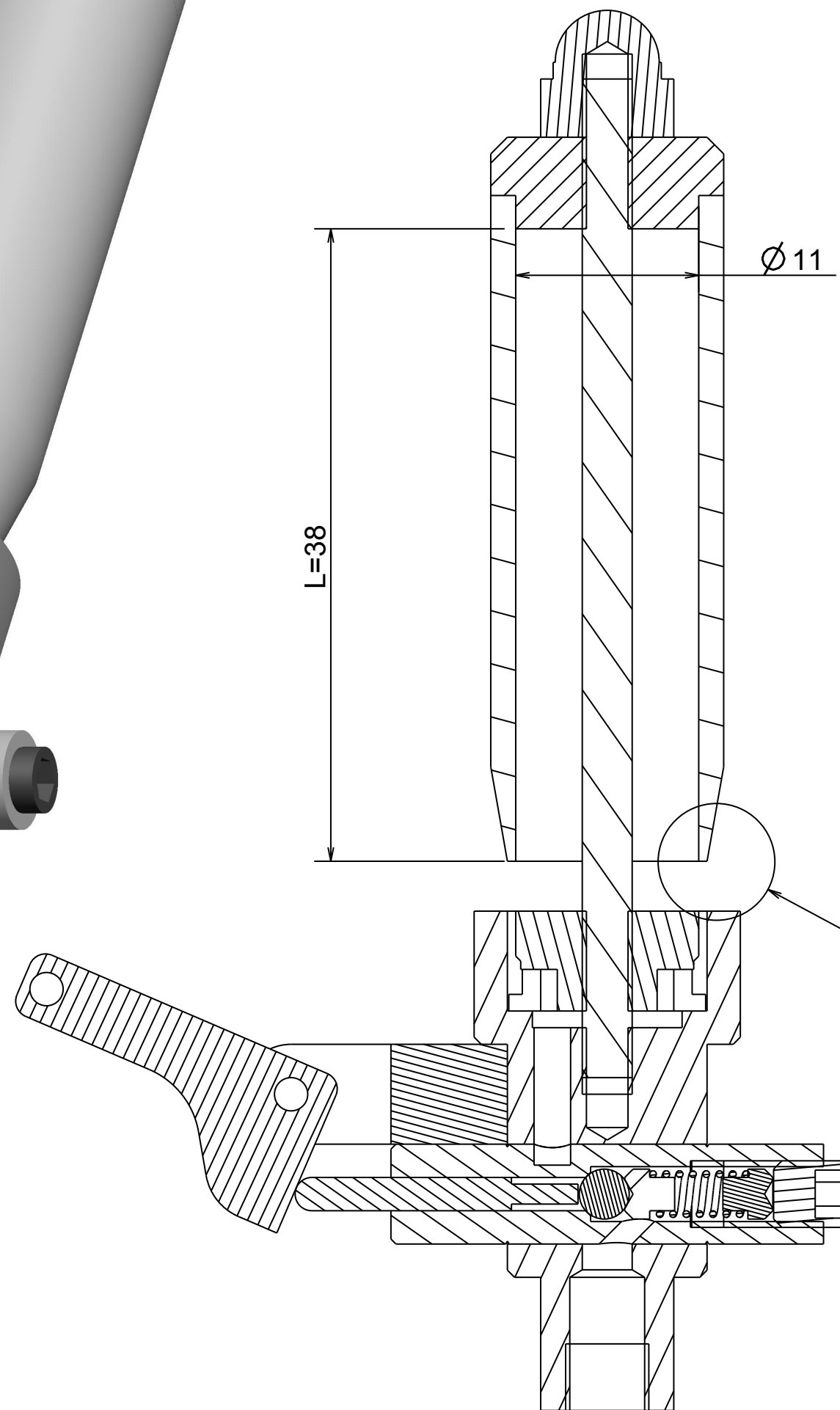
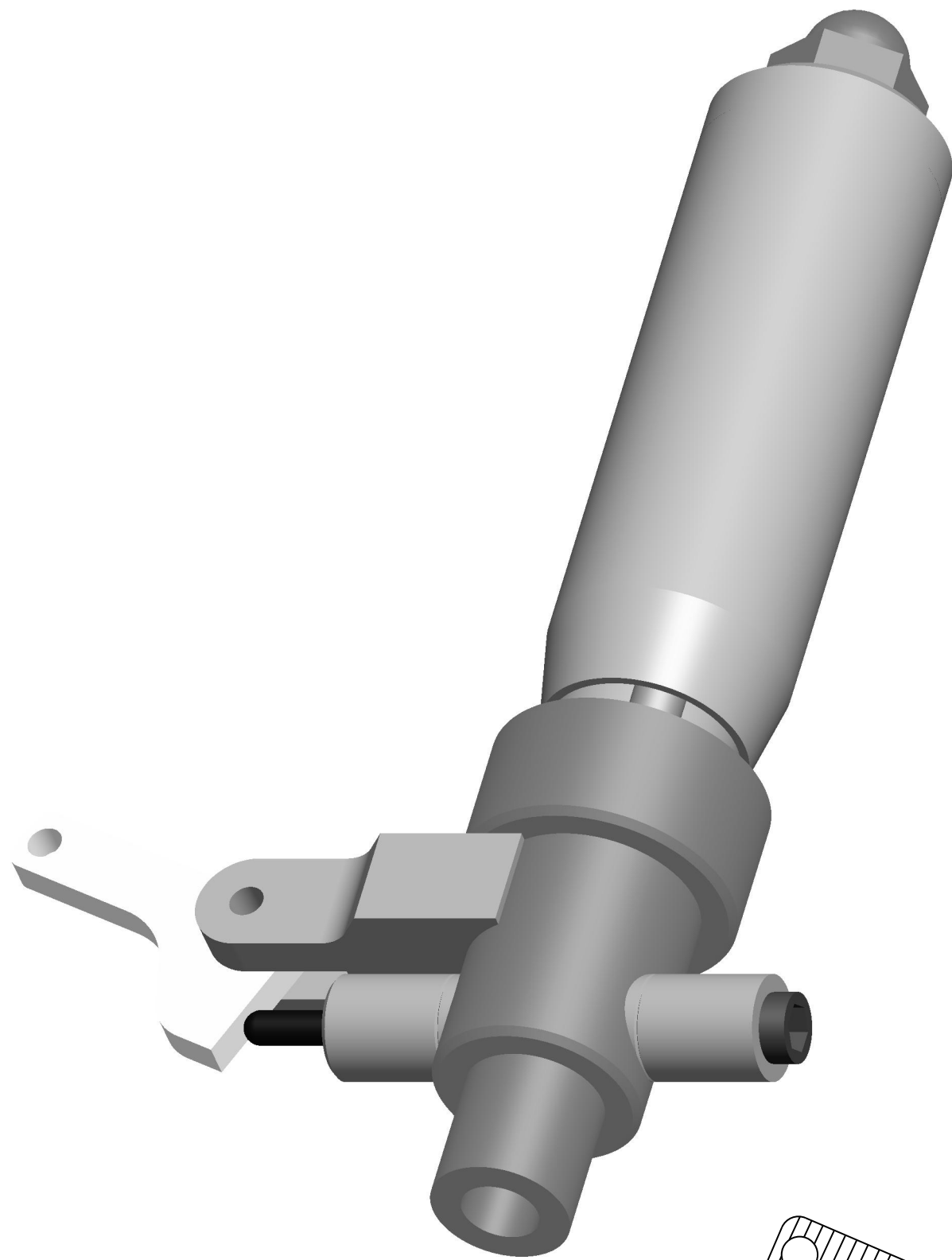
Coupelle de ressort



Ces petites pièces sont facultatives. Mes ressorts n'étant pas fameux ils ont tendance à se coincer et à s'écarter. Ces deux petites pièces limitent le problème.

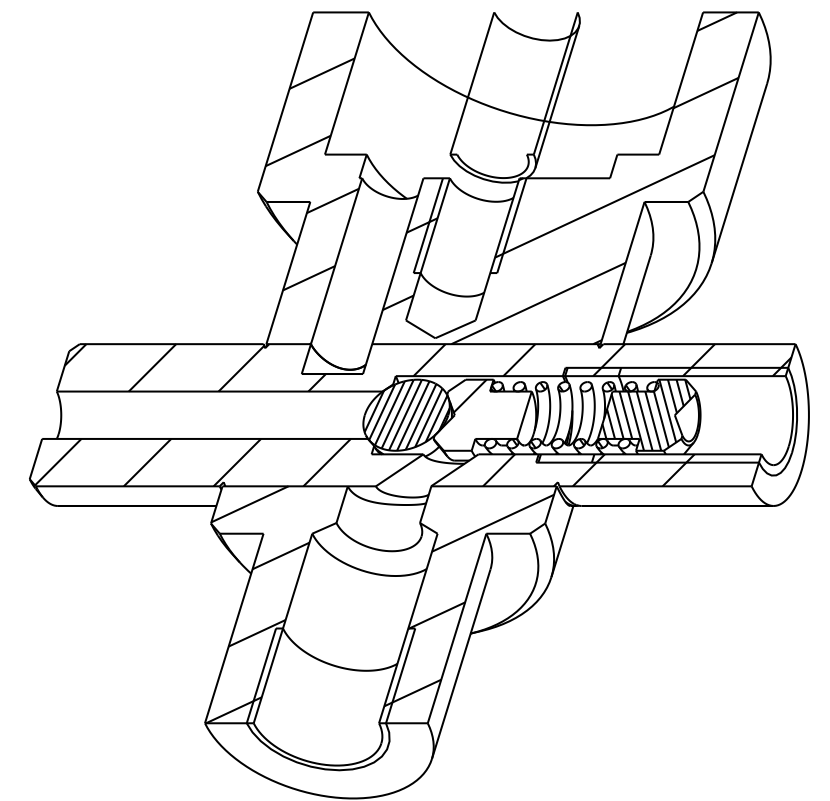
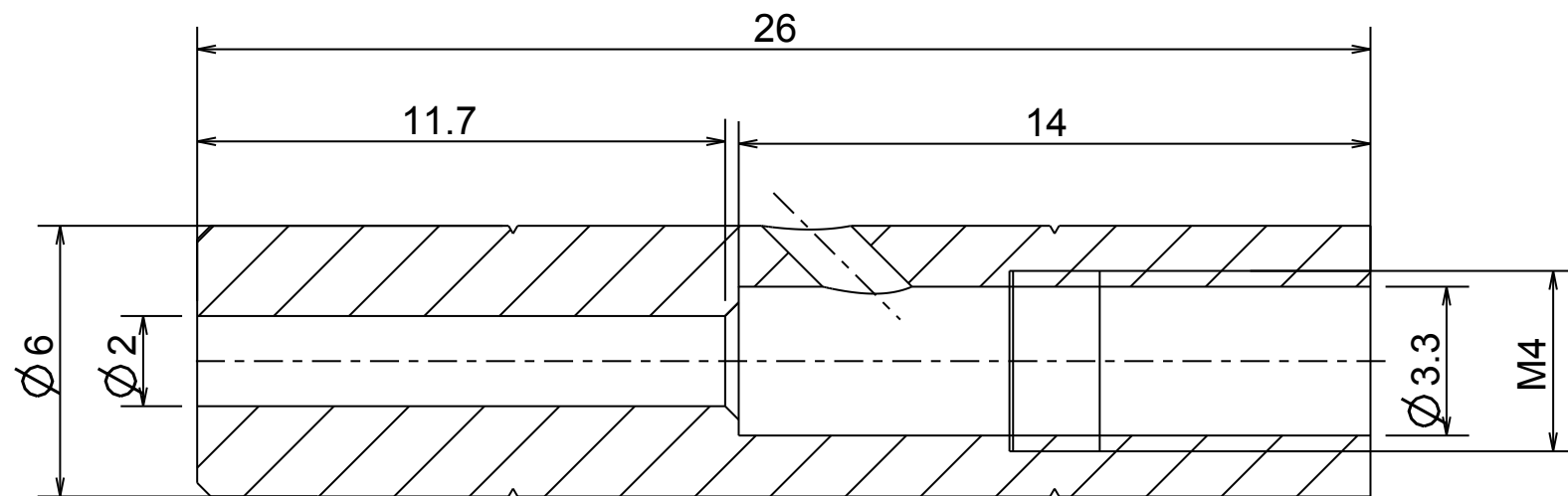
On part d'un rond de $D=3\text{mm}$. On perce légèrement pour former un appui centré sur la bille.

On descend la gorge. On tronçonne. Il faut veiller à avoir ces pièces les moins larges possible.

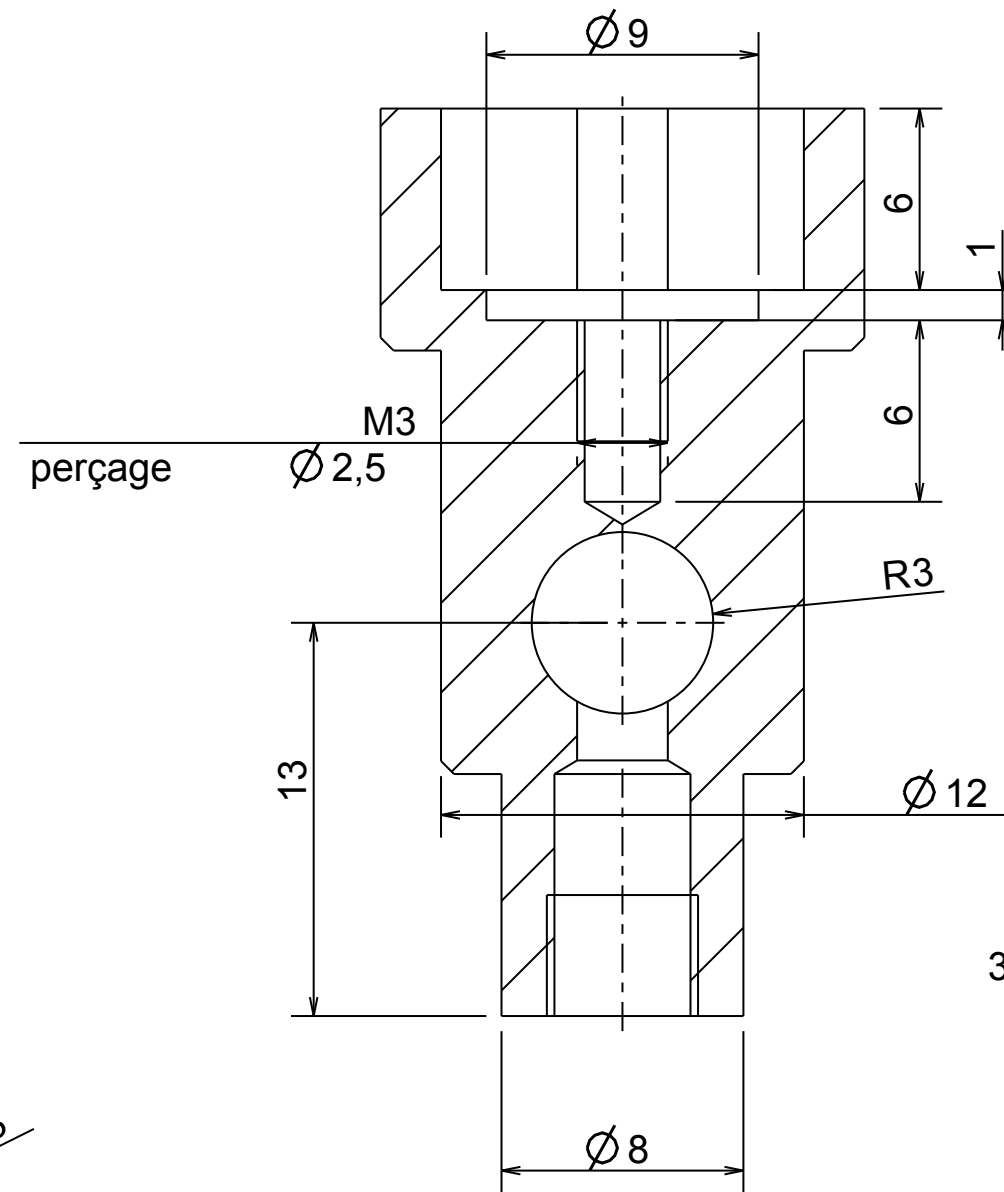
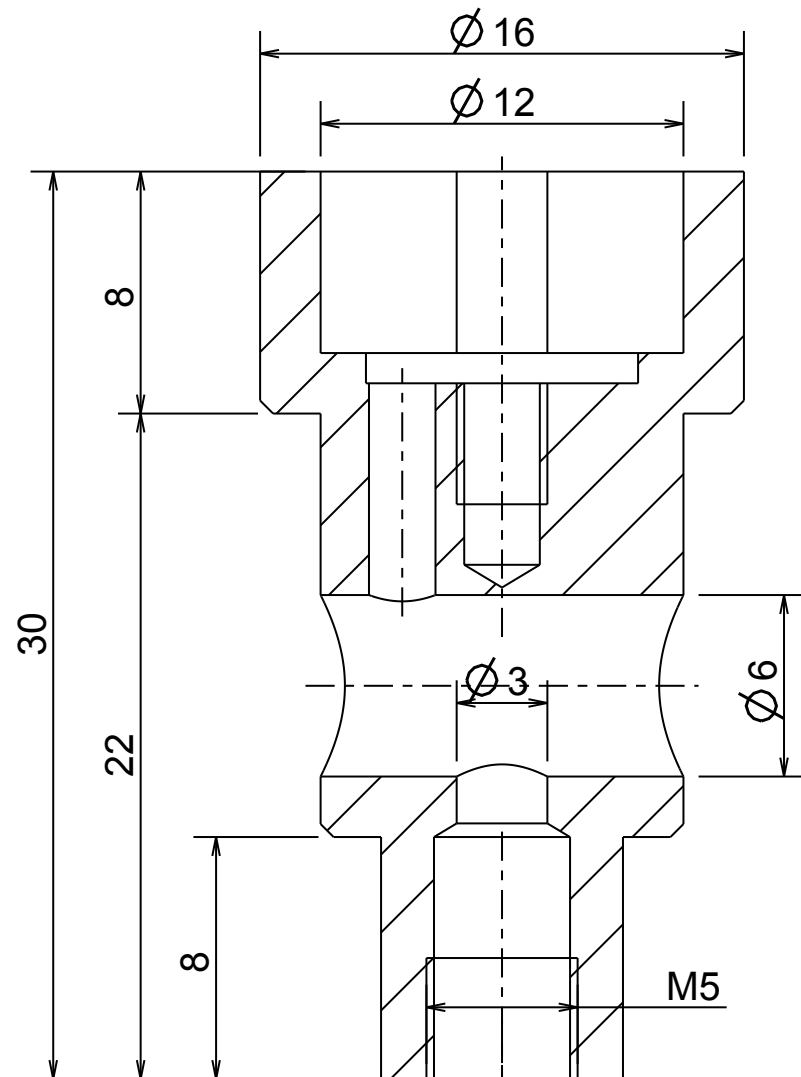


VOIR DETAIL

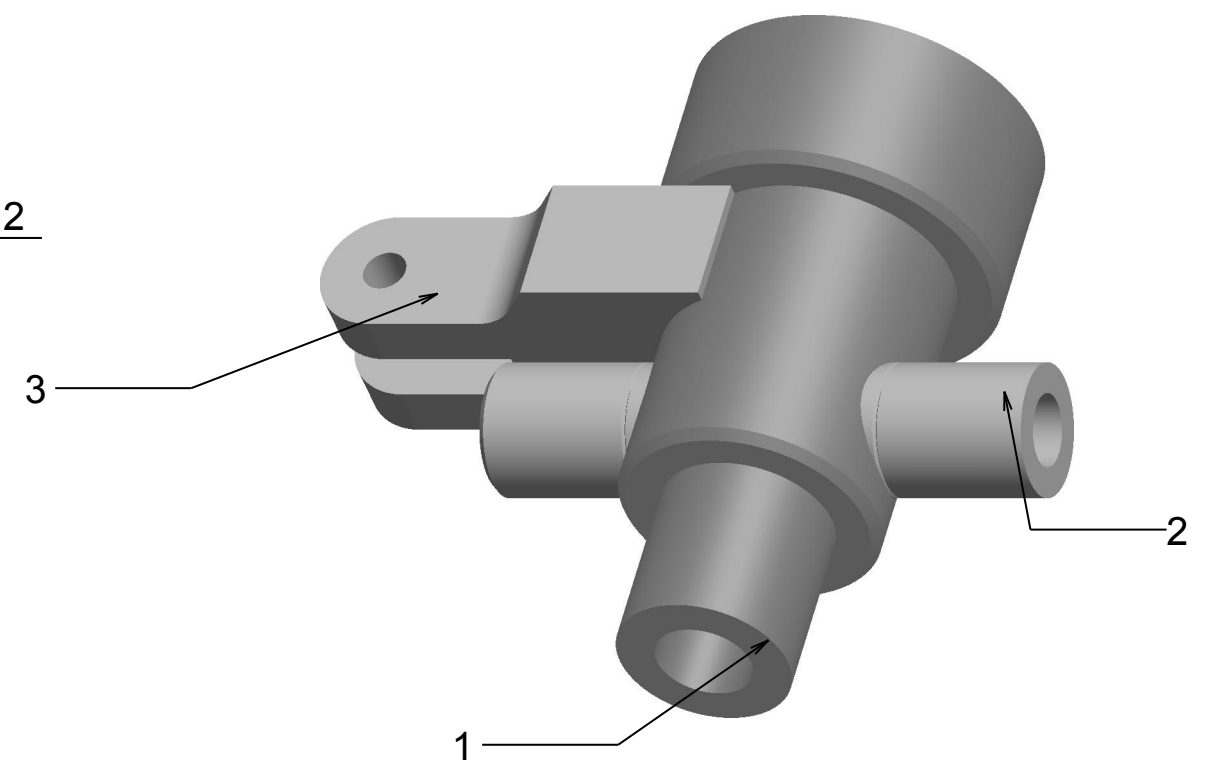
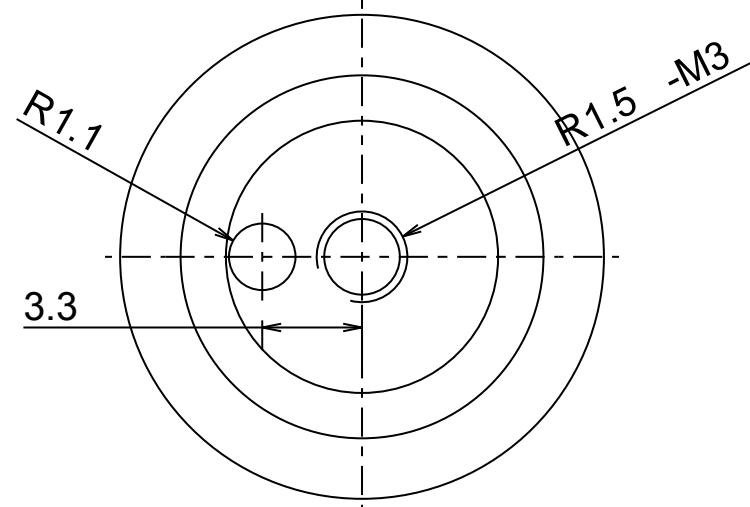
B



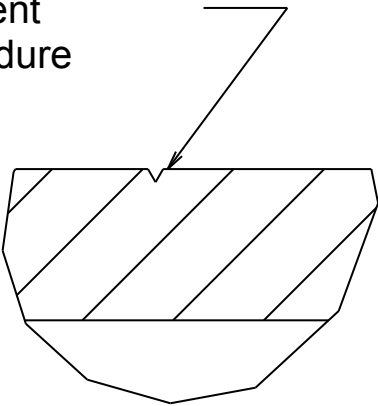
Corps de sifflet
assemblé par mécano-soudure



Pièce 1

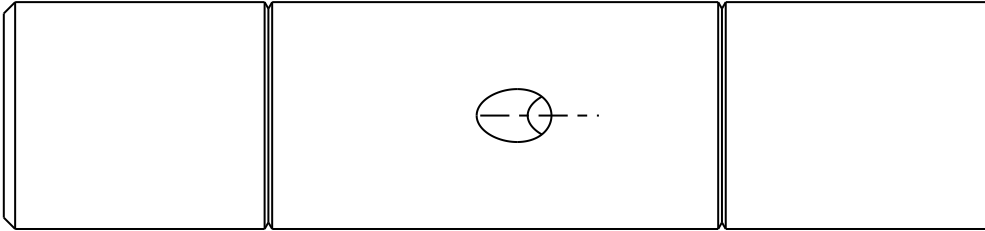
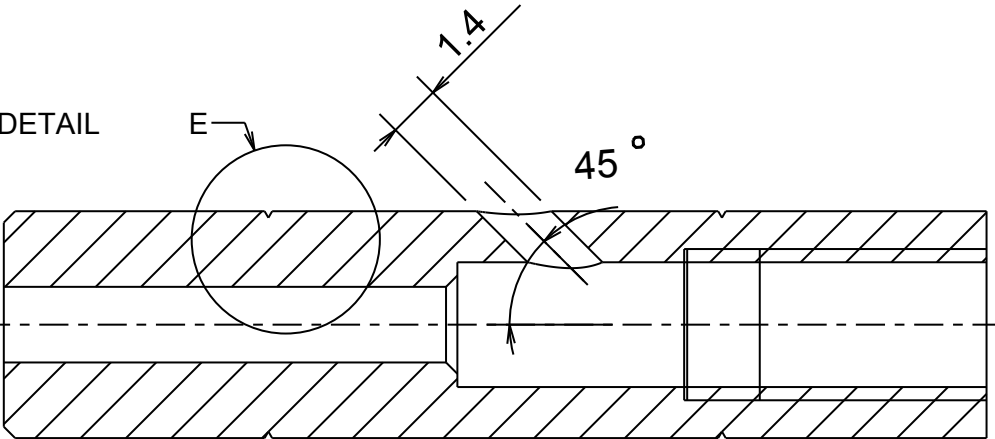


Repère placement
pour soudure

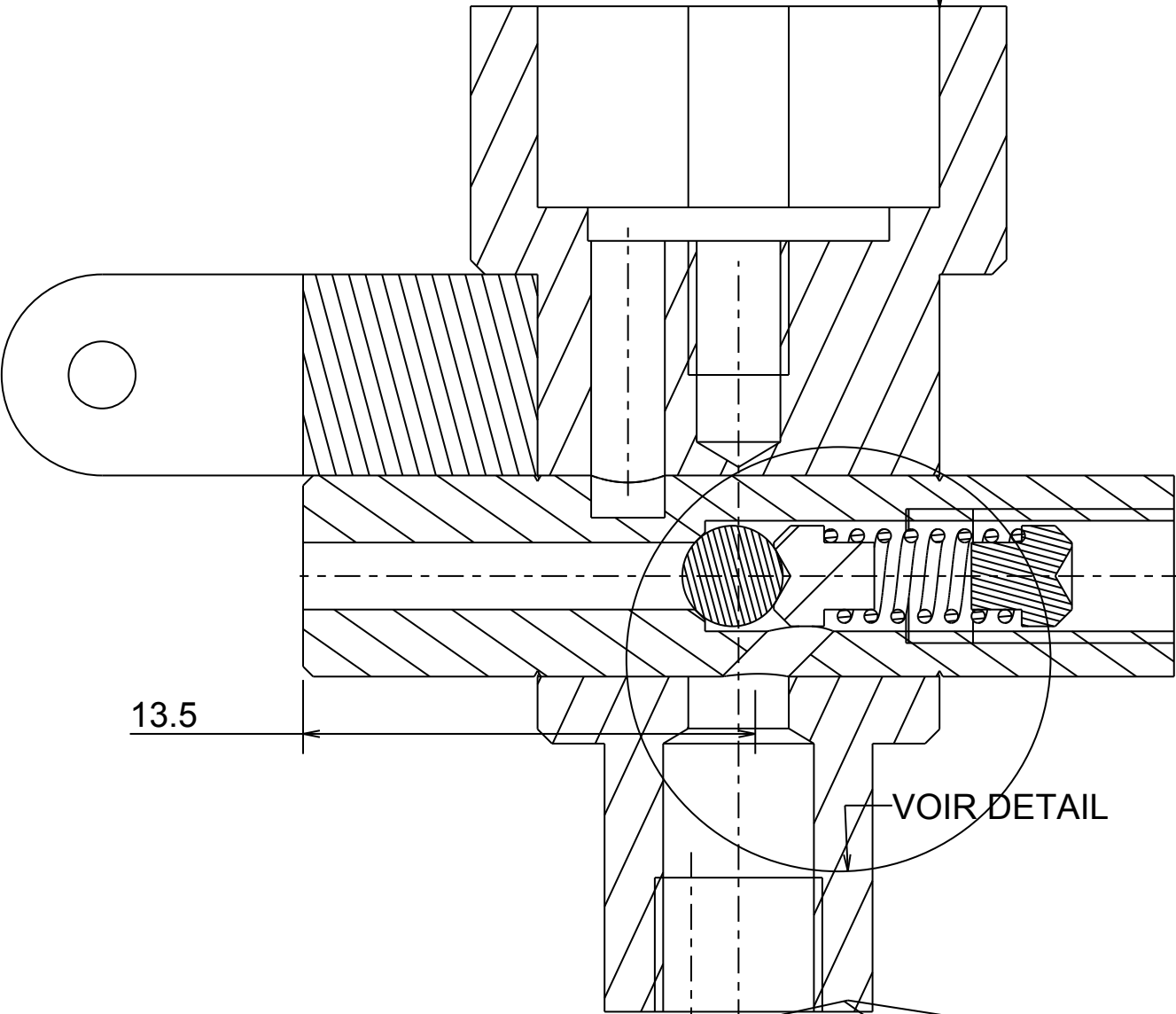


DETAIL _E
ECHELLE 10.000

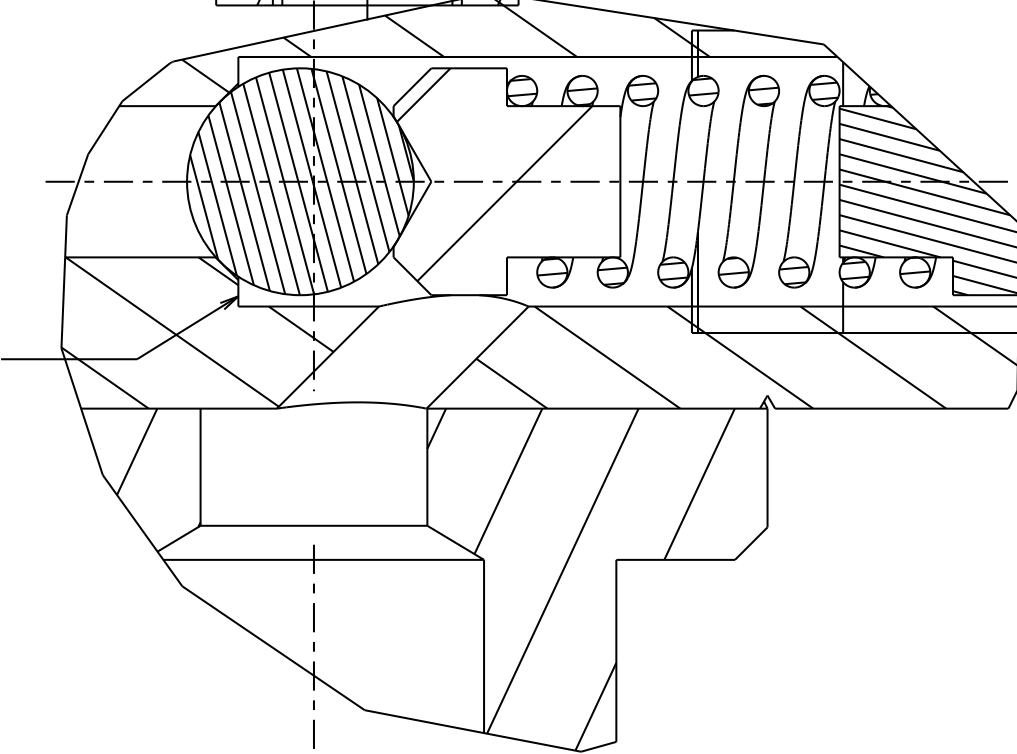
VOIR DETAIL



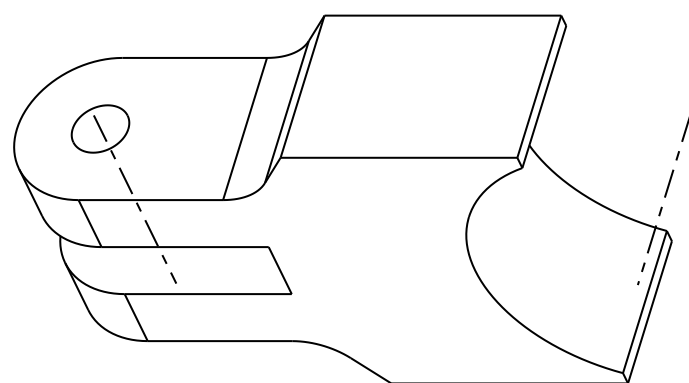
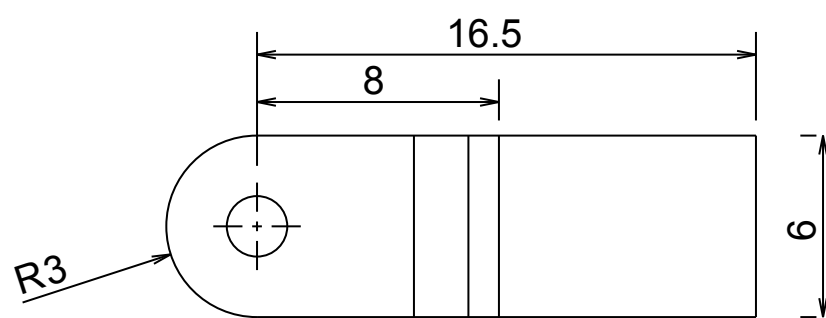
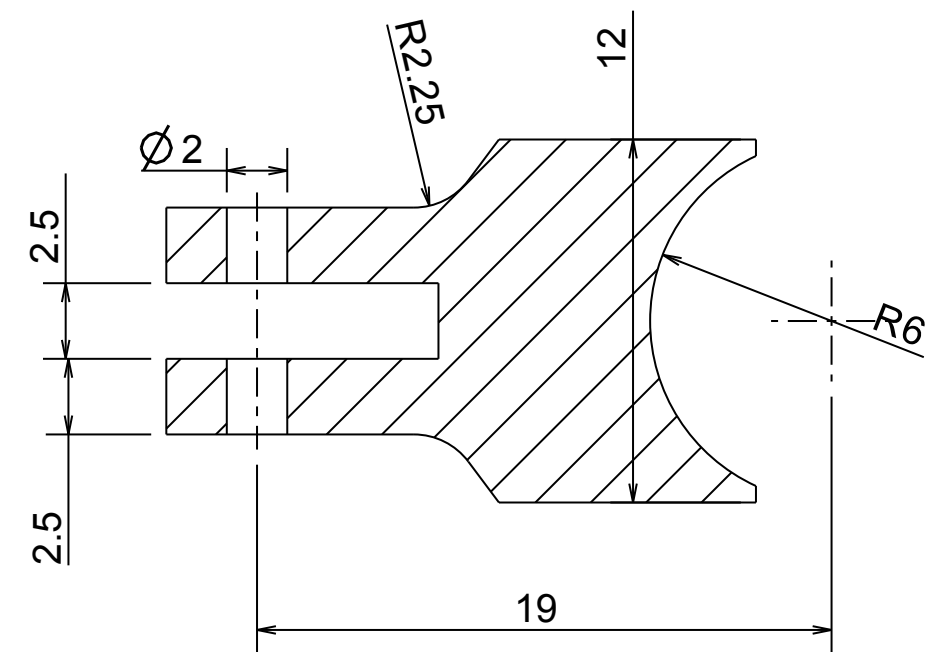
Le trou d'arrivée vapeur doit déboucher derrière la bille
Il doit être percé avant soudure



Après perçage
rendre le fonds du trou
plat (D_bit ou fraise à
téton pilote)

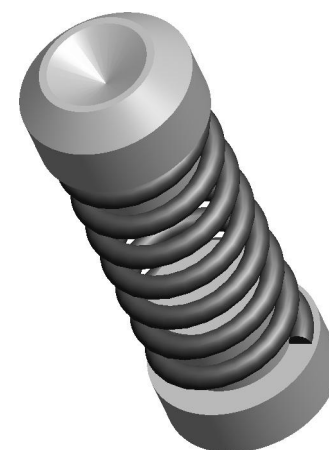
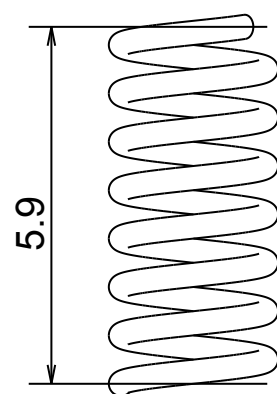


DETAIL _c
ECHELLE 10.000

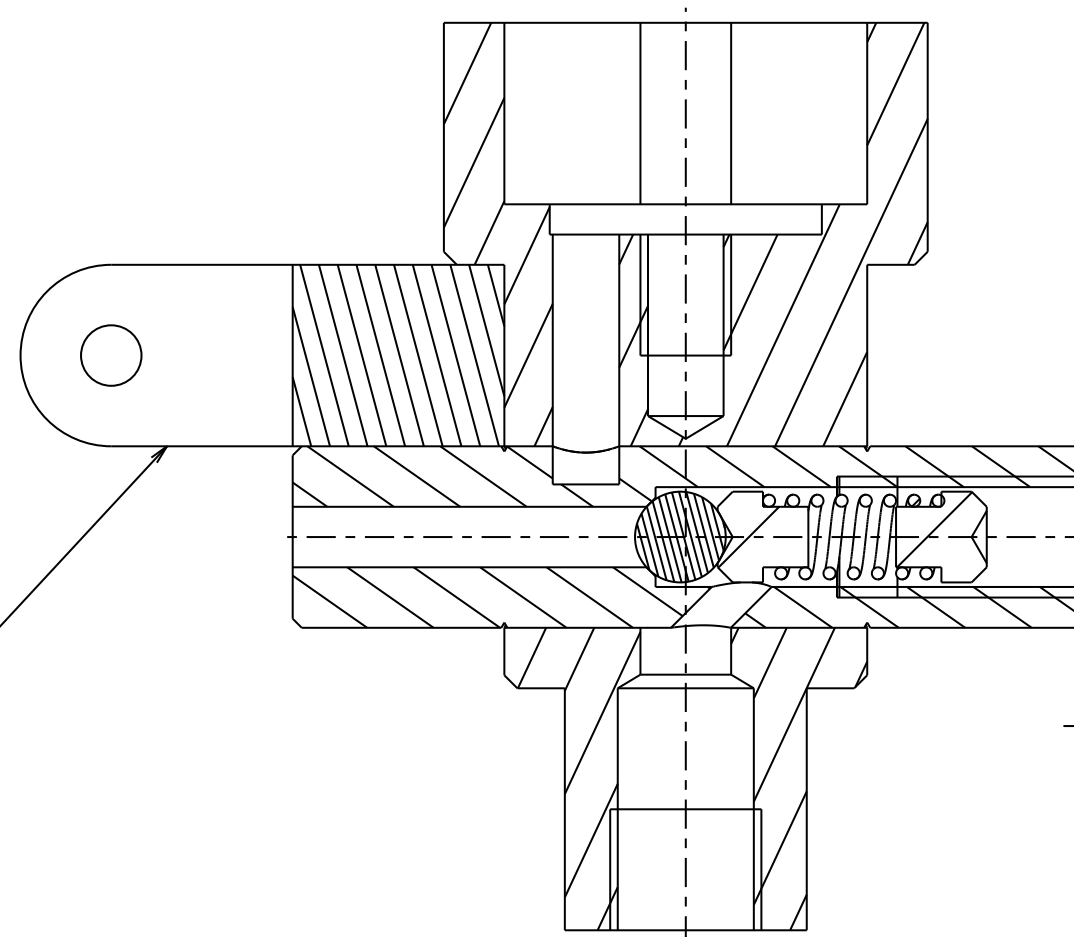


Pièce 3
Soudée sur le corps
pévoir une ébauche
de 22mm au moins

Ressort de rappel (compression)
D=2,4mm environ
Fil D=0.4mm

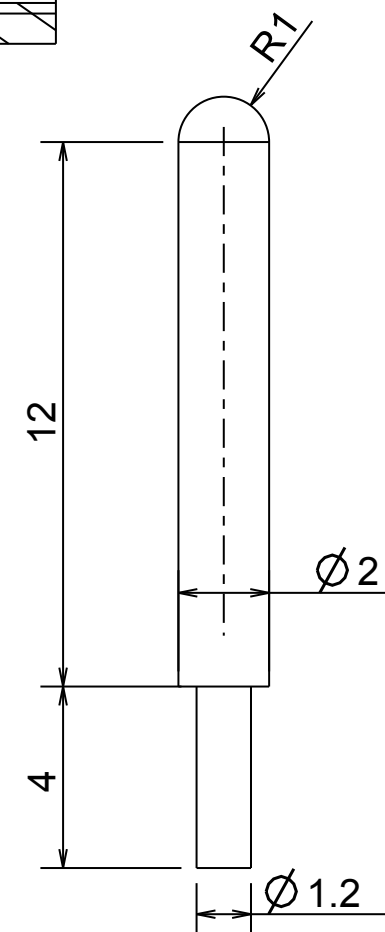
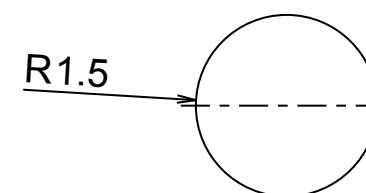


Pièce 3

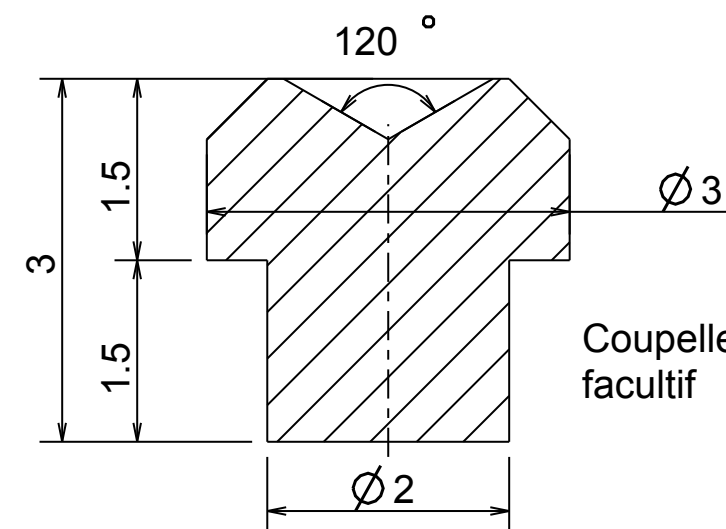


Bille

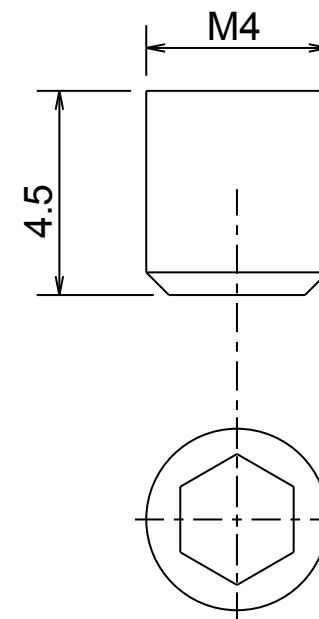
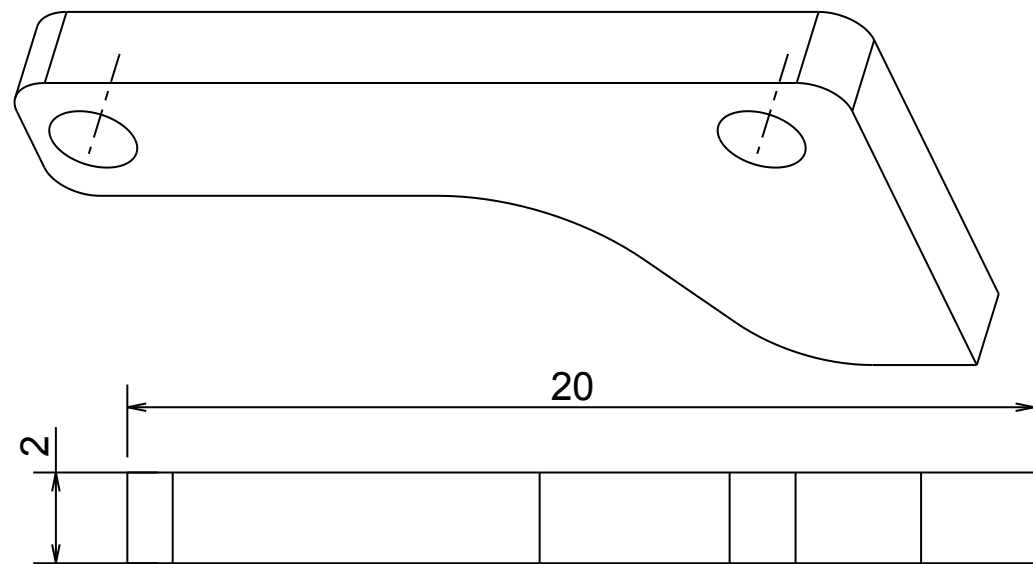
bille D=3 ou 3,2mm (1/8")
sinon adapter toutes les cotes!



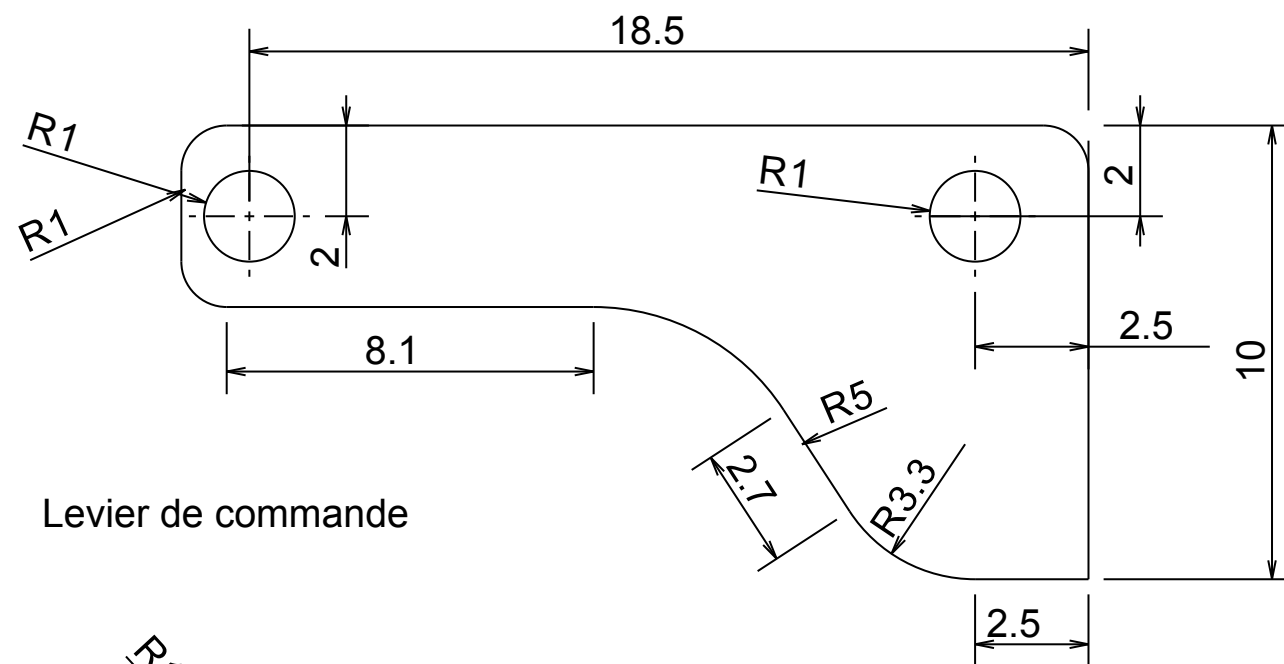
Piston poussoir



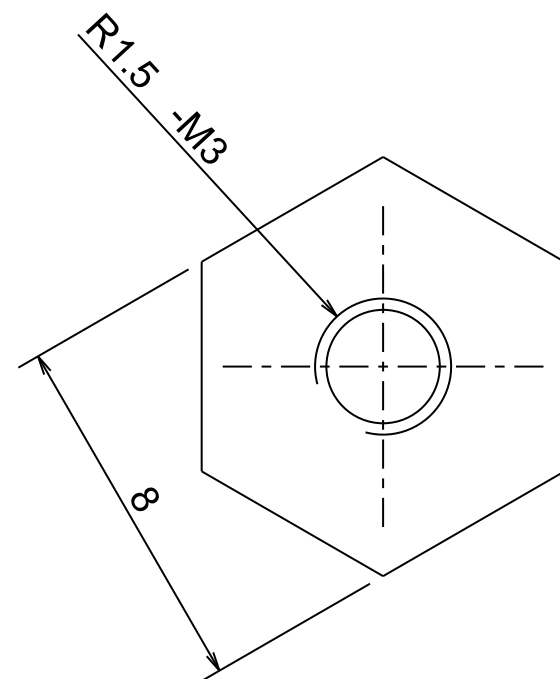
Coupelle ressort
facultif



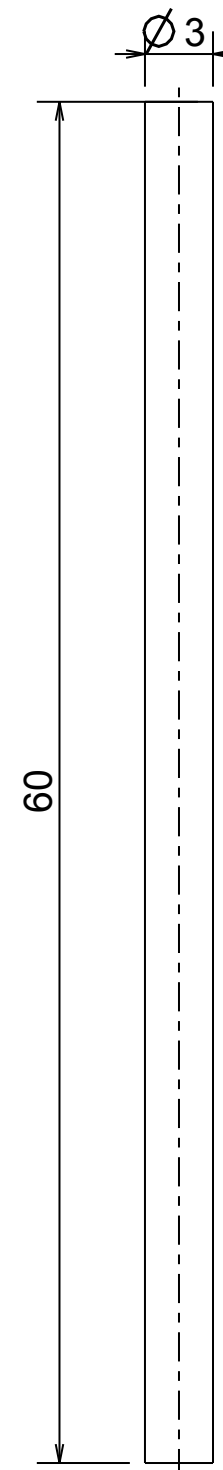
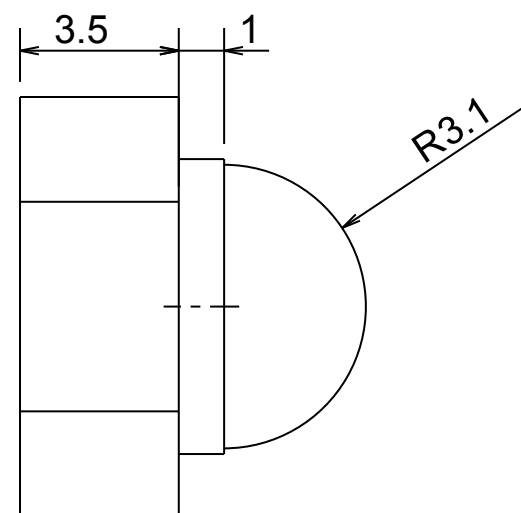
Bouchon



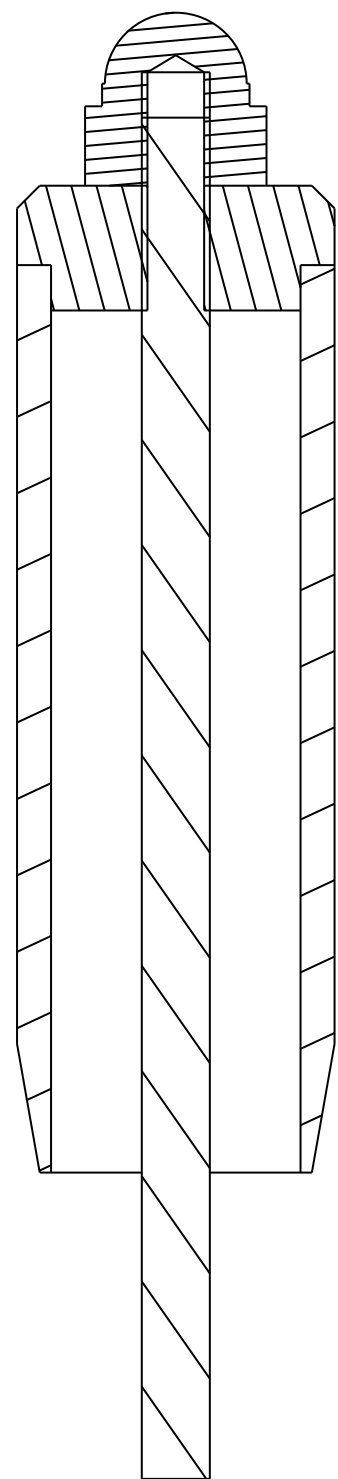
Levier de commande



Ecrou résonateur

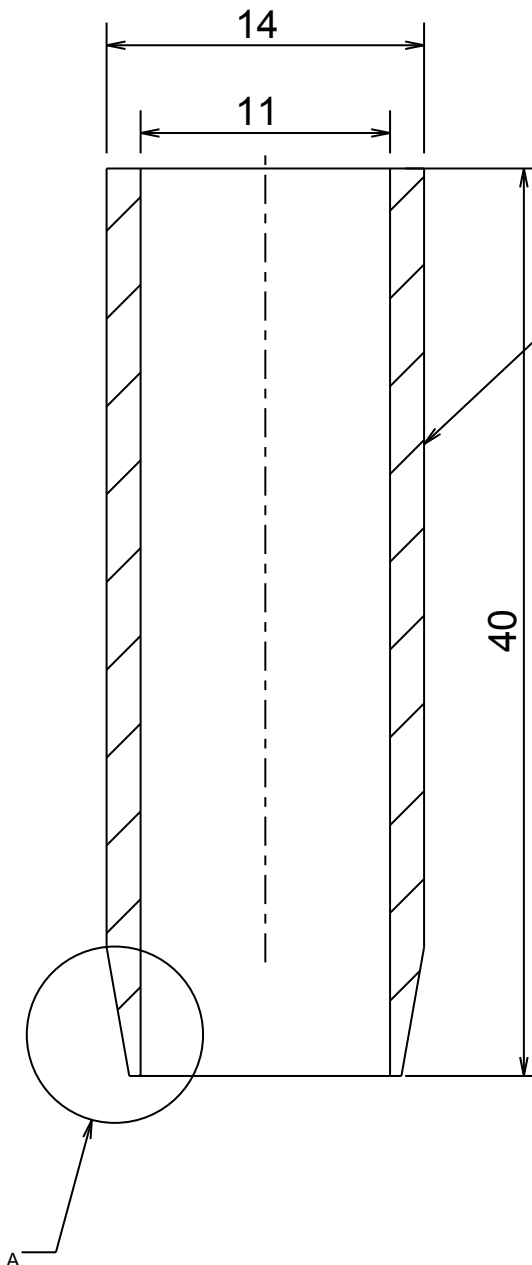
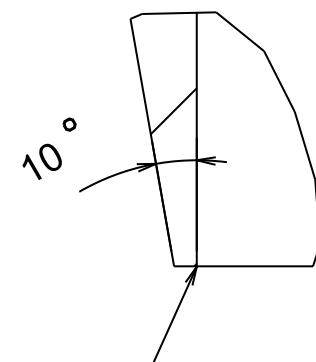


Tige de montage
filetée M3 aux 2 bouts

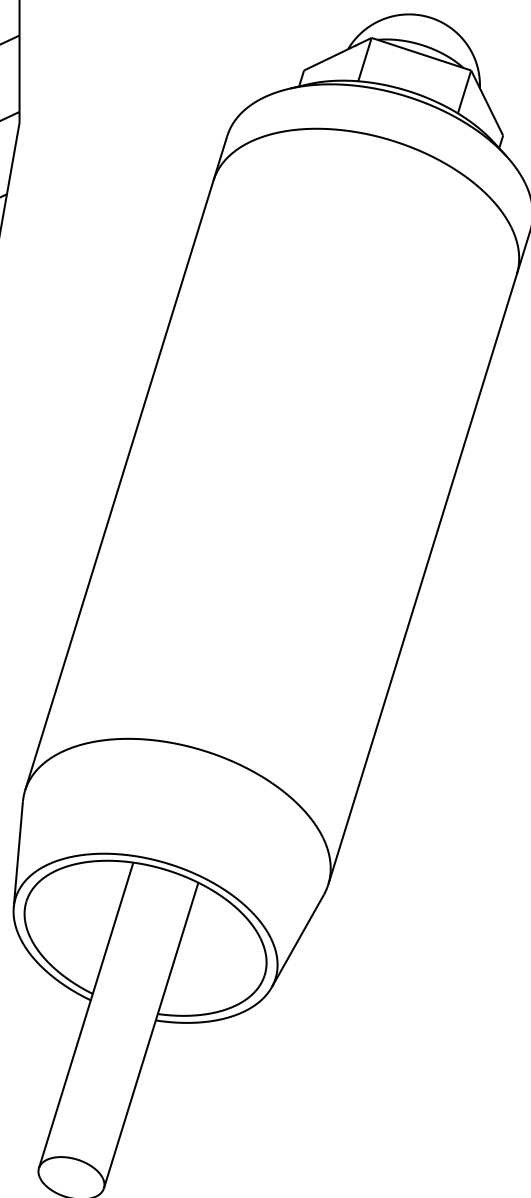


Biseau servant
d'excitateur

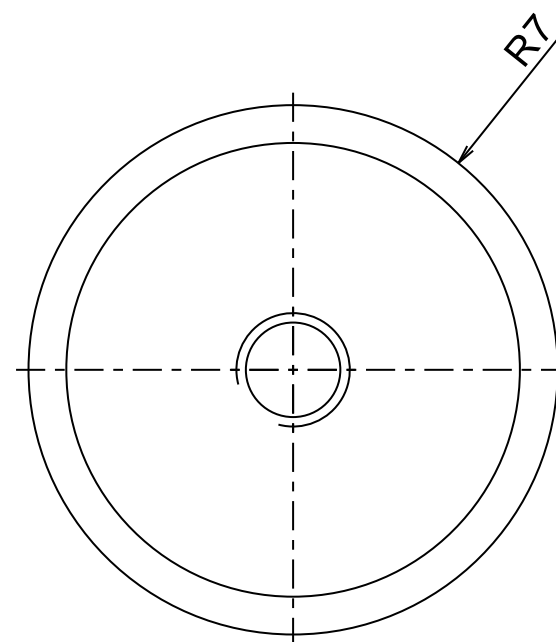
Angle vif



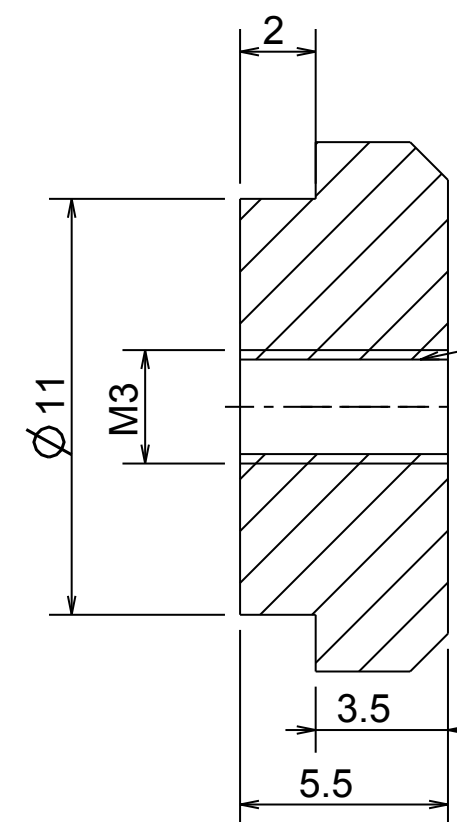
Longueur à régler
pour obtenir
la note souhaitée



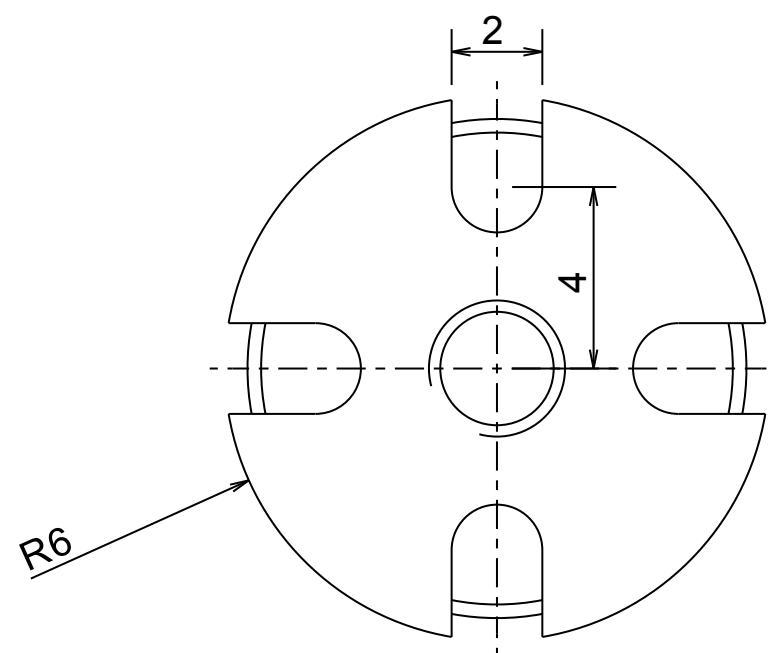
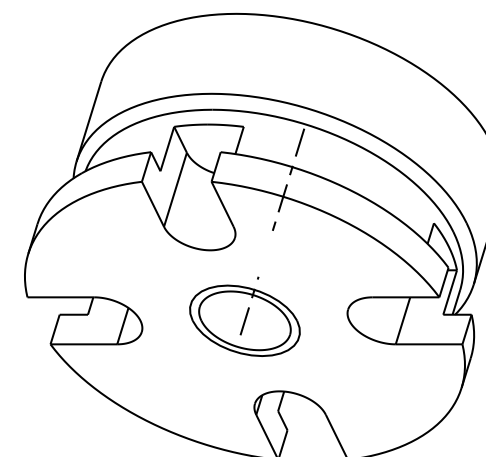
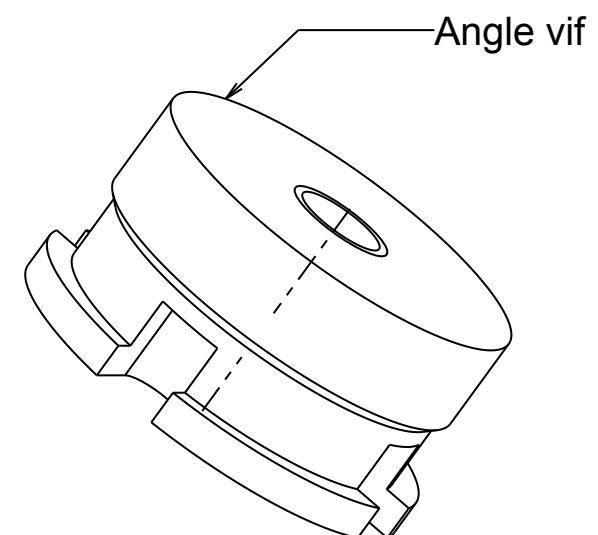
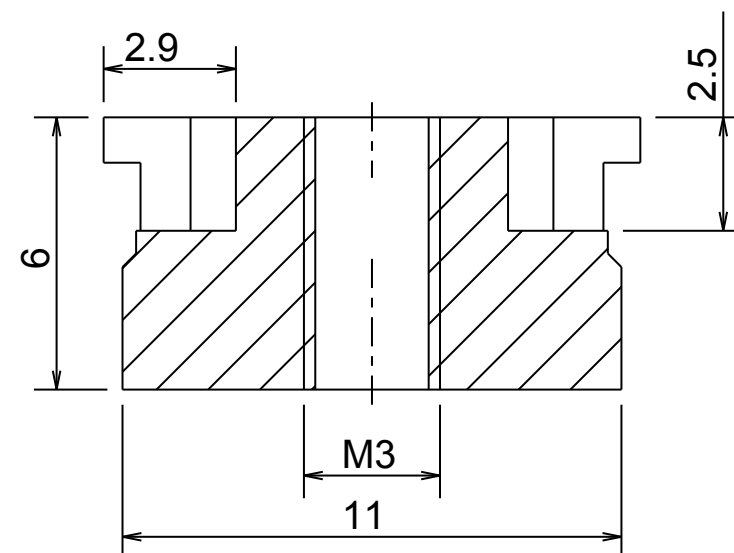
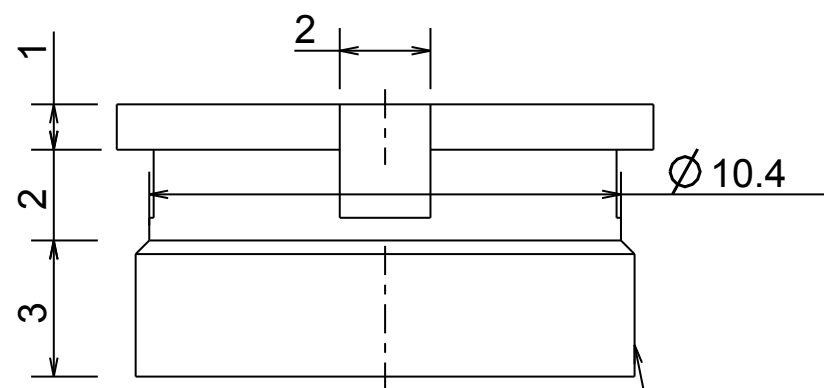
VOIR DETAIL



Bouchon résonateur
soudé sur tube



Taraudage M3
après soudure



Buse d'échappement

