FICHE TECHNIQUE
SOUPAPE DE DECHARGE

FTe05

1. INTRODUCTION

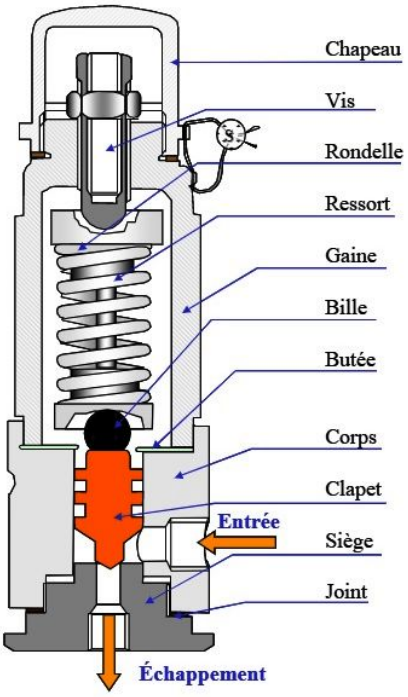
Dans cette fiche, vous trouverez toutes les informations concernant le dimensionnement des soupapes de décharge de nos modèles à vapeur du 1/32^{e} au 1/13^{e}, la méthode de calcul vous permettant de concevoir une soupape, et des plans sur 3 modèles : version usuelle compacte avec clapet à bille servant de bouchon de remplissage de la chaudière, une version traditionnelle à clapet à bille et une version clapet à portée conique en Téflon. Nous vous proposons également une soupape très simple pour chaudière de jouet. Un exemple de dimensionnement sur la soupape de la chaudière KINDON et en dernier lieu, des exemples de soupapes industrielles.

2. SOMMAIRE

1. Introduction 1
2. Sommaire 1
3. Avant propos 1
4. Conception 2
5. Annexe 1 : Méthodes de calcul 3
6. Annexe 2 : Note d'atelier, généralité sur l'usinage des soupapes 16
7. Cas particulier d'une chaudière chauffage au charbon 20
8. Plans de soupape 20
9. Pré-dimensionnement d'une soupape 26
10. Banc de vérification des soupapes 28
11. Quelques soupapes anciennes 30

3. AVANT PROPOS

La soupape de décharge est un organe de sécurité fondamental. Il convient de ne pas prendre à la légère sa conception et de l'usiner correctement. Avant toute mise en chauffe on vérifiera manuellement qu'elle n'est pas bloquée.
Une soupape de décharge ou limiteur de pression est conçue pour fonctionner en cyclage lors du fonctionnement de routine. On la confond souvent avec une soupape de sûreté dont le fonctionnement est exceptionnel ou encore avec une soupape de régulation. Après le déclenchement d'une soupape de sûreté l'installation est généralement mise à l'arrêt et inspectée.



On voit sur le dessin la coupe d'une soupape industrielle pour la régulation de pression vapeur. Sur les soupapes industrielles le siège du clapet est rectifié et souvent rapporté par vissage et épaulement.
Sur nos modèles on va retrouver la plupart des éléments de cette vanne mais très simplifiés.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

4. CONCEPTION

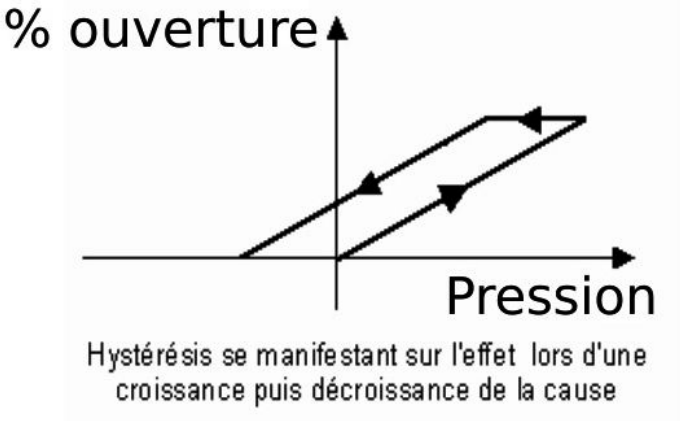
Chaque soupape doit être capable de se déclencher à la pression nominale admissible de la chaudière et d'évacuer le débit-volume de vapeur maximal que produit la chaudière qu'elle équipe. En ce sens il n'y a pas de soupape standard.
La soupape doit absolument être testée et réglée en vapeur dans les conditions nominales de fonctionnement avant son montage définitif.

Un outil d'aide à la conception se trouve ici http://vapeur45.fr/dimensionnement/soupape-de-decharge

La mise au point peut être faite sur banc à l'air comprimé pour la vérification du bon fonctionnement et les réglages préliminaires. Cela est possible car les caractéristiques de l'air et de la vapeur d'eau vers 4 bars-140°C ne sont pas trop éloignées

Gaz	Masse volumique (kg/m3)	Viscosité dynamique (Pa.s) *10^5	Viscosité cinématique
Air	2,6	2,3	0,885
Vapeur d'eau	1,9	1,4	0,736

Voir chapitre 10 : *Banc de vérification des soupapes*



Hystérésis se manifestant sur l'effet lors d'une croissance puis décroissance de la cause

La soupape doit avoir une hystérésis(1). Elle se déclenche pour atteindre la pleine ouverture lorsque la pression atteint par exemple **1,1*P_service**, mais ne se referme que lorsque la pression redescend par exemple à **0,9*P_service**. On admet en modélisme vapeur qu'un écart de 0,3 à 0,5 bars est une bonne valeur de compromis

En préliminaire on vérifie que :

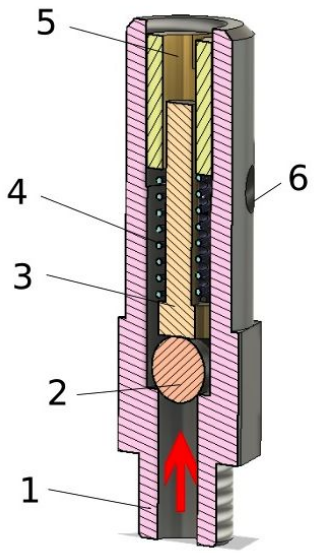
- lors de la pleine levée du clapet les évents seront dimensionnés pour évacuer 1,2 fois le débit maximal de vaporisation de la chaudière.
- Le ressort est correctement taré à 1,1 fois la pression nominale de fonctionnement

(1) L'hystérésis est la propriété d'un système dont l'évolution ne suit pas le même chemin selon qu'une cause extérieure augmente ou diminue.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

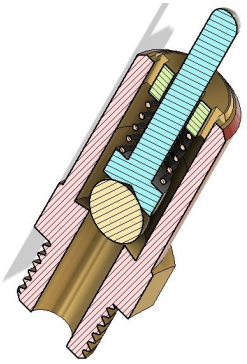
FICHE TECHNIQUE
SOUPAPE DE DECHARGE

FTe05



1. Corps vissé sur la chaudière
2. Clapet (bille inox ou bronze)
3. Tige de soupape
4. Ressort de compression (fil inox)
5. Ecrou de tarage et guide tige de soupape
6. Event de décharge

La conception ci-dessus permet, outre une section de passage importante, un très bon guidage de la tige de soupape.



Lorsque l'évacuation latérale ne sera pas souhaitable et qu'une grande compacité est nécessaire on pourra opter pour la conception ci-contre.

5. ANNEXE 1 : METHODES DE CALCUL

Cette section ne prétend pas au calcul exact d'une soupape. Il permet d'accélérer le processus de conception et de mise au point de la soupape.

Note : choisissez un système d'unités par exemple Gramme-Millimètre-Seconde et n'en changez plus. Beaucoup de données seront disponibles dans le système international SI. Effectuez les conversions nécessaires avant tout calcul.

On rappelle que dans tous les cas la soupape devra être testée en vapeur dans les conditions réelles d'exploitation.

5.1. Clapet

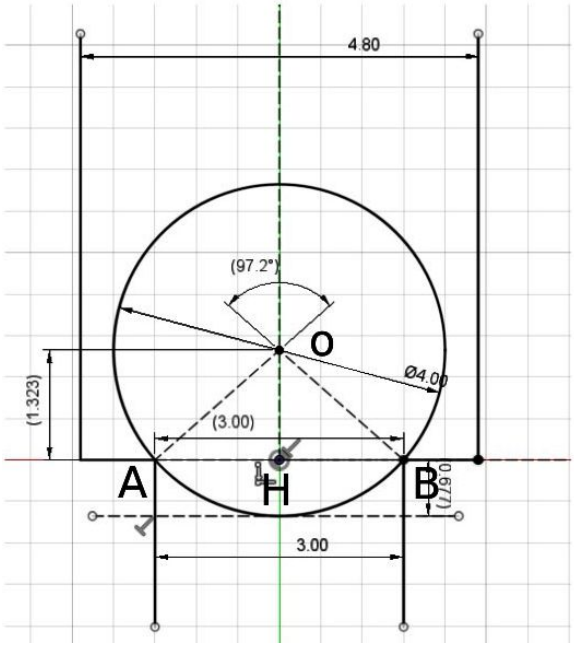
Dans le domaine des clapets, les clapets à billes sont les plus utilisés par les modélistes et de loin. On rencontre de temps en temps des clapets coniques comme sur les locomotives de marque REGNER. Le clapet conique de chez REGNER est en Téflon. *(Voir description dans le chapitre des plans)*

6.1.1 Clapet à bille

Aujourd'hui le matériau le plus courant c'est l'inox. Avec un choix réduit, les billes en bronze sont de plus en plus difficiles à se procurer. Quand on en trouve, les billes en Viton ou équivalent sont aussi un bon choix.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

Le premier problème qui se pose est le choix du diamètre de bille par rapport au diamètre du siège qui, de façon générale pour des raisons d'encombrement, est le même que celui du tuyau d'admission vapeur.



Si la bille est de trop grand diamètre elle risque être instable et mal assise sur son siège. Si à contrario elle est de trop petit diamètre il y a des risques de coincement.
Afin d'avoir un bon compromis, empiriquement les modélistes se sont rendu compte que l'angle au centre qui intercepte les bords du siège devait avoir une valeur comprise entre 90 et 100°. La valeur de 90° est souvent retenue.

A partir du diamètre du siège **AB** et de l'angle au centre **AÔB** il est possible de calculer le rayon OB de la bille. Les relations dans le triangle(2) permettent d'écrire :

Sin (HÔB) = HB/OB soit OB= HB/sin (HÔB) avec notre exemple sin (97,2/2)= 1,5/OB soit noté autrement

OB = 1,5/sin (97,2/2) = 1,9997 c'est à dire un diamètre de bille de 4 mm. Après calcul on choisit dans les diamètres de billes commerciales standards la valeur la plus proche du résultat du calcul.

6.1.2 Corps de soupape

Que la bille soit bien assise sur son siège et se lève avec aisance c'est une bonne chose, encore faut-il qu'elle soit bien guidée et que le débit volumique de vapeur puisse s'évacuer.

(2) Les fonctions trigonométriques comme le sinus se trouvent sur toutes les calculettes basculées en mode scientifique

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

Si l'on suit le trajet de la vapeur après la levée de la bille, le fluide va passer par un étranglement au droit de la section équatoriale de la bille, ensuite la vapeur poursuit son chemin jusqu'aux évents qui l'éjectent à l'atmosphère. On admet couramment des vitesses d'éjection de 15 à 20 m/s, vitesses que l'on ne devra pas dépasser.

L'alésage du corps de la soupape ne doit pas être trop large pour que la bille reste suffisamment guidée pour bien retomber sur son siège. Mais si le jeu est trop réduit alors la perte de charge sera excessive et le débit passant sera trop faible. Pour démarrer la conception on prend souvent :

D_alésage = D_bille + 0,8 mm

Notre méthode de vérification est très approximative, elle est là pour éviter les erreurs grossières de conception. En fait on vérifie l'ordre de grandeur de la vitesse de vapeur. Le calcul se déroule de la façon suivante :

1. Calcul du débit-volume de la chaudière. On commence par mesurer le débit-masse de la chaudière voir http://vapeur45.fr/dimensionnement/pre-dimensionnement-moteur-a-vapeur
2. Calcul de la vitesse d'écoulement dans le conduit d'admission vapeur
3. Calcul de la vitesse d'écoulement au plan équatorial de la bille
4. Calcul de la vitesse d'éjection au droit d'un évent.

Le débit volumique s'exprime par :

Débit_volume = Section * Vitesse_Fluide = 3,1459/4*D²*V = 0,7854* D²*V
Ecrit autrement V = Débit_volume / (0,7854* D²) = 1,2732*Débit_volume / D²
Passer du Débit_masse au Débit_volume

La masse volumique moyenne(3) de la vapeur dans notre domaine de fonctionnement, entre 3 et 6 bars, est de 2,4 kg/m³. Autrement dit 2,4 kg de vapeur, entre 3 et 6 bars, va occuper un volume de 1 m^3.

Nos chaudières produisent entre 200 g et 1,5 kg de vapeur par heure. Elles débitent donc en une seconde 3600 fois moins, soit entre 0,055 g/s et 0,4167 g/s de vapeur.

1kg = 1 000 g, 1m^3 = 1 000 000 000 mm^3

kg/m³ = (1 000 g)/ (1 000 000 000 mm³) = 1/1 000 000 g/mm^3 ;

Écrit autrement m^3/kg = 1 000 000 mm^3/g

Débit_volume = Débit_masse / Masse_volumique

Exemple : Débit_volume= 0,055 / (2 400/1 000 000) = 22,92 mm³/s

(3) *Des tables de caractéristique vapeur existent sur Internet*

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

Calcul de la vitesse dans la veine d'admission

Exemple : veine d'admission de 3 mm de diamètre. S = 3,1459/4*3*3 = 7,08 mm²
V = 22,92 / 7,08 = 3,24 m/s

Calcul de la vitesse au diamètre équatorial

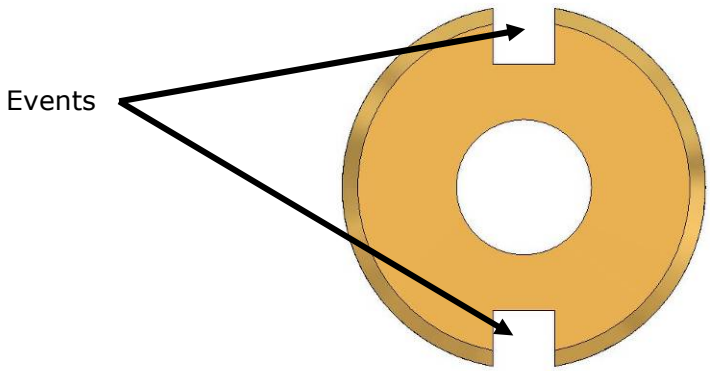
La section de passage vaut S_équateur = S_alésage – S_bille

D_bille = 4mm ; D_alésage = 4,8mm

S_équateur= 3,1459/4* (4,8*4,8-4*4) = 5,53 mm²

V= 22,92/5,53 = 4,15 m/s

Calcul de la vitesse au droit des évents



La méthode de calcul est la même que précédemment il suffira de prendre deux carrés et de calculer leurs surfaces.

5.2. Levée de bille

En ce qui concerne la bille deux situations sont à considérer :

- la bille est en appui sur son siège
- la bille est décollée et « flotte » dans la veine de vapeur

Bille en appui

La bille est en équilibre sous l'effet de la pression de vapeur, de la résistance du ressort et de son propre poids augmenté du poids du ressort et de celui de la tige de soupape.

Force de pression : **F_pression** = **P***S**
La section **S** est celle du conduit d'admission vapeur.
On aura juste avant la levée **F_pression** = **Poids_soupape** + **F_ressort**.

On en déduira la force de compression à exercer par le ressort. A partir de là on aura des éléments de dimensionnement du ressort.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

On peut négliger l'effet du poids de l'équipage mobile de la soupape comme le montre l'exemple suivant.

Exemple :

Pression 3 bars ; 1 bar = 1,019 kgf/cm² = 1,019*1000/100 = 10,2 g/mm² ; Diamètre admission D = 3 mm

F_pression = 3*10,2*3,14519/4*3*3 = 216,3 g

Poids de l'équipage mobile

Bille D = 4 mm : Tige soupape formée d'une tige D = 2 sur 16 mm, du plateau d'appui qui est un disque de 4,5mm sur 2 d'épaisseur ; le ressort est formé de 110 mm de fil de D = 0,3 mm

Volume bille 4/3*3,14159*2*2*2 = 33,5 mm³

Volume tige = 16*3,14159/4*2*2 + 2*3,1459/4*4,5*4,5 = 50,3 +31,8 = 82,1 mm³

Volume ressort = 110*3,14159/4*0,3*0,3 = 7,79 mm³

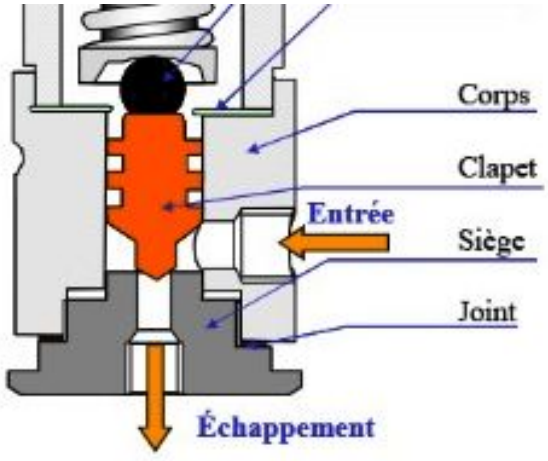
Volume total = 33,5+82,1+7,79 = 123,3 mm³

Masse volumique acier inoxydable :

8010 kg/m³ = 8010*1 000/1 000 000 000 = 0,00801 g/mm3

Masse de l'équipage mobile : 123,3*0,00801 = 0,99 g

5.3. Levée de la bille

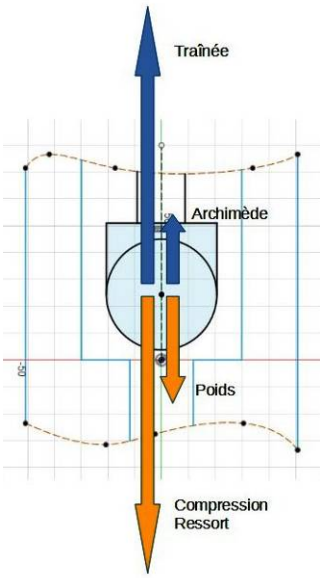


Sur une soupape industrielle la levée du clapet ne dépend que de la contre-pression régnant dans la chambre de décharge. Dans le cas des soupapes à bille utilisées en modélisme l'étude du fonctionnement est complexe car la bille est soumise à une force de traînée provoquée par l'écoulement de vapeur autour de l'ensemble bille-tige soupape-ressort. Dans une veine fluide la pression et la vitesse de l'écoulement sont liées. Si la pression augmente, la vitesse diminue et réciproquement.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

FICHE TECHNIQUE
SOUPAPE DE DECHARGE

FTe05



La bille est en lévitation. La force de compression du ressort et le poids de l'équipage mobile sont contrebalancés par la poussée d'Archimède et la traînée aérodynamique.

Le poids est négligeable et comme le fluide est de la vapeur (faible masse volumique) la poussée d'Archimède l'est aussi. Donc en première approche on se retrouve avec deux forces à considérer : la traînée aérodynamique et la force de compression du ressort.

La traînée est fonction d'un coefficient et de la vitesse du fluide, et elle est proportionnelle à la surface de référence couramment appelée maître-couple. Le maître couple est la surface frontale c'est à dire projetée sur un plan perpendiculaire à l'écoulement. Pour la bille ce sera son diamètre.

L'expression de la force est de la forme générale :

$$F = qSC$$

q étant la pression dynamique, $q = \frac{1}{2}\rho V^2$

d'où : $F = \frac{1}{2}\rho V^2 SC$

ρ (rhô) = masse volumique de l'air (ρ varie avec la température et la pression) ;

- S = surface de référence ;
- C = coefficient aérodynamique ;
- V = Vitesse de déplacement.

Dès que la soupape quitte son siège et que l'écoulement s'amorce la force aérodynamique apparaît. Elle sera d'autant plus importante que la vitesse de la vapeur autour de la bille sera élevée. On voit donc que la section de passage au droit du plan équatorial de la bille est un facteur majeur de bon fonctionnement. Si la section est trop grande, la vitesse

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

d'écoulement est faible et la force de maintien face au ressort pourrait être insuffisante. La bille retomberait aussitôt.

A l'équilibre on aura la force de rappel du ressort égale à la force aérodynamique sur la bille.

5.4. Estimation du jeu à laisser entre bille et alésage

On peut calculer l'ordre de grandeur du jeu admissible en fonction du débit passant Q. On se souviendra que la vitesse de passage ne devra pas être trop grande. On essaie de limiter à des vitesses inférieures à 10 m/s.

Fr = 1/2*Mv*V²*Sb*Cx

Fr : force rappel ressort ;

Mv(4) : masse volumique vapeur

Sb : surface bille ;

Cx : coefficient de traînée

Pour simplifier l'écriture on pose A = 1/2*Mv*Sb*Cx. L'égalité s'écrit Fr= A*V²

V = (Fr/A) ^{0,5}

Vitesse et débit volumique sont liés **Q** = **Sp** * **V** en notant **Sp** la section libre de passage de la vapeur au plan équatorial de la bille.

Sp = Q/V

La section de l'alésage S_alésage= Sp + Sb = Pi/4*D_alésage²

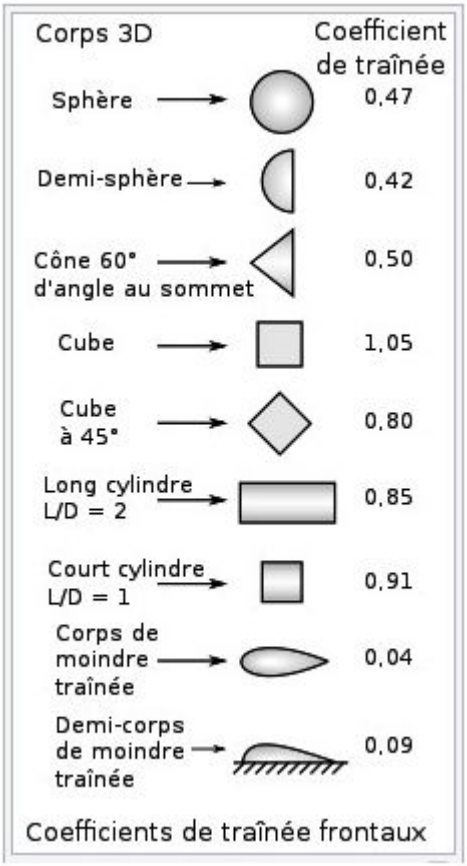
D_alésage = [4/Pi*(Sp + Sb)]0,5
Pour une bille de D = 4 mm et une force du ressort de Fr = 2,16 N soit 220,2 gf il vient :

Diamètre alésage		
Cx	0,50	
1/2Mv*Sb*Cx	0,000007540	
V_lévit	5,40	m/s
S_passage	6,4245	mm²
S_alésage	18,99	mm²
D_alésage calculé	*4,92*	mm

(4) A adapter en fonction de la pression de service. On peut prendre une valeur moyenne de 2,4 kg/m³

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

5.5. Coefficient de traînée



Dans la pratique on pourra choisir un coefficient de traînée compris entre 0,5 et 0,8. De par la forme du clapet et de part la vitesse de l'écoulement nous avons tendance à plutôt prendre un Cx = 0.8. Nous entendons par clapet l'ensemble (Bille + Porte-bille + Ressort)

5.6. Calcul du ressort de compression

- d = diamètre du fil
- k = constante de raideur
- D_m = diamètre moyen
- L_0 = longueur libre
- L_c = longueur à spires jointives
- G = module de cisaillement (module d'élasticité transversal)
- s = flèche
- n = nombre de spires actives
- n_t = nombre total de spires
- F = charge appliquée en newtons
- m = pas (c'est l'espace entre la fibre neutre d'une spire et la fibre neutre de la prochaine spire)

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

$F = k \cdot s$ Charge de compression :

$$k = \frac{G \cdot d^4}{8 \cdot {D_m}^3 \cdot n}$$ Raideur

$$s = \frac{8 \cdot {D_m}^3 \cdot n \cdot F}{G \cdot d^4}$$ Flèche, la flèche notée '**s**' est en fait le raccourcissement du ressort.

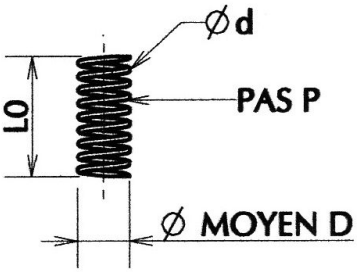
$$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$$ Est le module de cisaillement ou module de Coulomb en N/mm², égal à 81 000 MPa (=81 000 N/mm²) pour les aciers et 70 000 à 76 000 N/mm² pour les inox.

E est le module de Young en N/mm²

V est le coefficient de Poisson adimensionnel, égal à 0.33 pour les aciers.

Le calcul simplifié s'effectue en suivant les étapes suivantes :

1. Calcul du diamètre de fil minimal. Choix du diamètre marchand **d** immédiatement supérieur
2. Calcul du diamètre du ressort **D**. Calcul de la raideur **k**
3. Calcul du nombre de spires **n** et de la longueur au repos **L0**. Ce calcul dépend du type de contrainte imposé : raideur, longueur au repos, flèche.
4. Vérification de la stabilité du ressort et des contraintes dimensionnelles



La force ***F*** est connue. Le matériau est du fil inox **G** = 70 000 N/mm²

2. Rapport conseillé d'enroulement *D/d* :

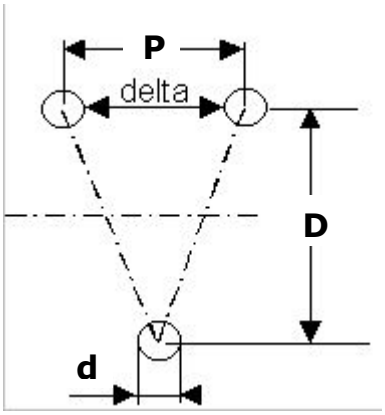
Le rapport d'enroulement ***D/d*** est un coefficient important pour le ressort de compression.
Si le rapport ***D/d*** est petit le ressort est raide. Le rapport conseillé d'enroulement est :

d (mm)	0,2-0,4	0,45 - 1	1,1 – 2,2	2,5 - 6	7 - 16	18- 42
$\frac{D}{d}$	7-14	5 - 12	5 - 10	4 - 9	4 - 8	4 - 6

3. Pas conseillé du ressort :

$$p < 0{,}5D$$

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***



Le rapport d'enroulement **w** = D/d est connu. En général il est pris égal à 10. Cela donne un ressort facile à fabriquer et réalisant un bon compromis mécanique. Le pas **P** est couramment pris égal à **0,3*d**.

P est le pas du ressort ; ***delta*** : espace inter-spire ; **D** : diamètre moyen; **d** : diamètre de fil
delta est la déformation maximale du ressort spires jointives aussi appelé ressort à bloc.

Sous la force maximale ***F***, le ressort fabriqué doit respecter un espace minimal entre les spires. Cet espace est pris égal à 0.15 **d** (norme simplifiée). Pour en tenir compte le pas théorique du ressort est modifié et prend la valeur **P** = ***delta*** + 1.15 **d**

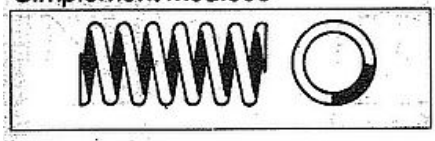
5.7. Extrémités du ressort

Les extrémités du ressort peuvent être libres ou jointives, coupées ou meulées.
Le tableau ci-après donne des formules bien pratiques selon le type d'extrémités choisies. Dans tous les cas on aura intérêt à meuler les extrémités pur un bon appui du ressort. Il est recommandé d'avoir des spires jointives pour réduire les risques d'ouverture de la dernière spire lors d'une compression à bloc. Il conviendrait d'en tenir compte lorsque le diamètre intérieur du ressort est très proche du diamètre de son appui inférieur.

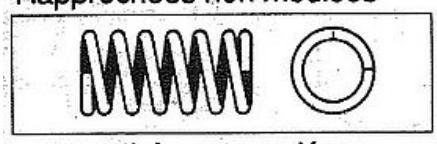
- Forme des extrémités

Simplement coupées

Simplement meulées



Rapprochées non meulées



Rapprochées et meulées

- Relations à observer

Forme des extrémités		Simplement coupées	Simplement meulées
Nombre de spires utiles	(n)	$n = N - 1/2$	$n = N - 1$
Nombre de spires totales	(N)	$N = n + 1/2$ $N = \frac{L-d}{P}$	$N = n + 1$ $N = \frac{L-d/2}{P}$
Hauteur comprimée à bloc	(H)	$H = d\,(N+1)$	$H = d(N + 1/2)$
Longueur libre	(L)	$L = d + Np$	$L = d/2 + Np$
Pas	(p)	$p = \frac{L-d}{N}$	$p = \frac{L-d/2}{N}$

Forme des extrémités		Rapprochées non meulées	Rapprochées et meulées
Nombre de spires utiles	(n)	$n = N - 2$	$n = N - 2$
Nombre de spires totales	(N)	$N = n + 2$ $N = 2 + \frac{L-3d}{P}$	$N = n + 2$ $N = 2 + \frac{L-2d}{P}$
Hauteur comprimée à bloc	(H)	$H = d\,(N + 1)$	$H = d\,N$
Longueur libre	(L)	$L = 3d + np$	$L = 2d + np$
Pas	(p)	$p = \frac{L-3d}{n}$	$p = \frac{L-2d}{n}$

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

5.8. Taux de travail et fatigue

Le ressort n'est pas destiné a subir des cycles comme sur des presses ou un amortisseur automobile. Il n'y a pas lieu de s'en préoccuper.

5.9. Déformation diamétrale

Lorsque le ressort se comprime le diamètre des spires augmente. Dans notre pratique ce phénomène n'a pas à être pris en compte.

5. Augmentation du diamètre extérieur lorsque le ressort est comprimé à bloc :

$$\Delta D_e = 0{,}1 \cdot \frac{p^2 - 0.8 \cdot p \cdot d - 0{,}2 d^2}{D}$$

avec :

D	diamètre moyen du ressort	*en mm*
p	pas du ressort	*en mm*
d	diamètre du fil	*en mm*

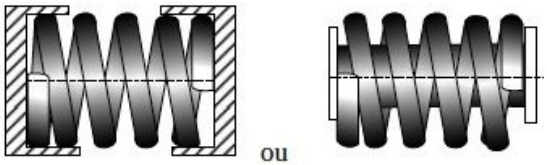
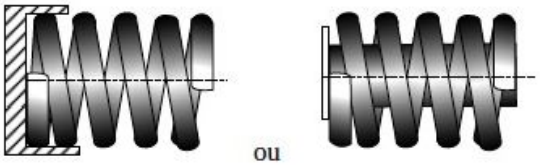
5.10. Stabilité du ressort

Sous charge le ressort peut dévier latéralement de manière plus ou moins prononcée.
Pour éviter ce phénomène on vérifiera la valeur du rapport **L0/D**

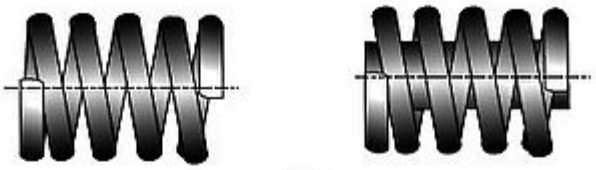
Les règles de choix du rapport L_0/D sont :

(1) En général pour que le ressort soit stable, les rapports L_0/D, que nous conseillons, sont sous la condition ci-dessous :

Tableau 4-10 **Règles de choix le rapport L_0/D**

Fixation de ressort	Figure	Rapport L_0/D conseillés
Cas 1 Le ressort est guidé aux deux extrémités	 ou	$\frac{L_0}{D} \leq 5{,}3$
Cas 2 Le ressort est guidé à l'une extrémité et libéré à l'autre extrémité :	 ou	$\frac{L_0}{D} \leq 3{,}7$

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

Fixation de ressort	Figure	Rapport L_0/D conseillés
Cas3 Le ressort est libéré au deux extrémités	 ou	$\frac{L_0}{D} \leq 2,6$

(2) Si le rapport L_0/D est supérieur à ce que nous conseillons dans le tableau, la charge critique, charge maximum admissible, est calculée par la formule ci-dessous :

$$F_c = C_u K L_0$$

avec :

C_u coefficient de stabilité (choisir dans la figure 4-7)
K raideur du ressort *en N/mm*

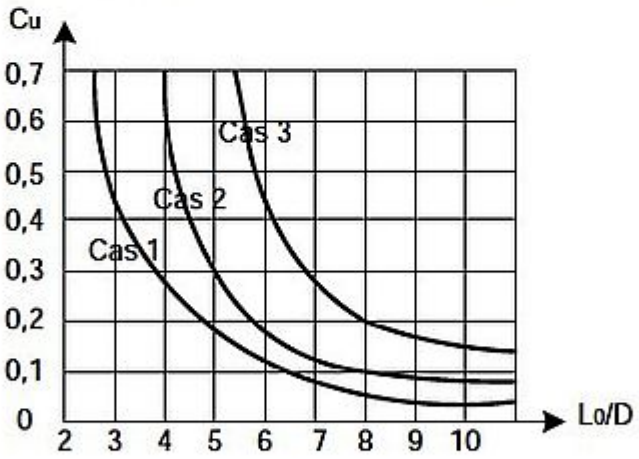


Figure 4-7 **Coefficient de stabilité C_u**

Cas 1 Le ressort est guidé aux deux extrémités
Cas 2 Le ressort est guidé à l'une extrémité et libéré à l'autre extrémité
Cas 3 Le ressort est libre au deux extrémités

(3) Pour que le ressort fonctionne correctement, le rapport L_0/D doit supérieur de 0,4.

$$\frac{L_0}{D} \geq 0,4$$

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

5.11. Calcul du diamètre minimum théorique d

d = [(8*F*w3) / G / (0,3*w-1)] ^{0,5} on aura à choisir un diamètre marchand. C'est avec ce diamètre que l'on fait la suite des calculs.

W est le rapport d'enroulement **D**/**d**

5.12. Calcul du Diamètre moyen de spire

D = **w***d

La suite des valeurs à calculer va dépendre des contraintes, par exemple on peut imposer la longueur au repos **L0** ou une flèche **s** (raccourcissement sous charge) ou la raideur du ressort (si on se préoccupe de la réponse dynamique).

1/ Si la longueur **L0** est imposée :
Le nombre de spires utiles du ressort est calculé :

$$\mathbf{n} = (\mathbf{L0} - \mathbf{ni}*\mathbf{d}) / (\text{delta} + 1.15\ \mathbf{d})$$

Avec **ni** = 1.5 pour les extrémités rapprochées et meulées et **ni** = 3 pour les extrémités rapprochées.

$$\mathbf{R} = G*d^4 / (8*n*D^3)$$

2/ Si la déformée totale f (f = L0 - L2) est imposée :
Le nombre de spires utiles du ressort est calculé :

$$\mathbf{n} = f\ R' / F2.$$

Maintenant, la longueur libre du ressort peut être définie en respectant l'espace minimal entre les spires au cours du fonctionnement :

$$\mathbf{L0} = \mathbf{n}\ (\text{delta} + 1.15\ \mathbf{d}) + \mathbf{ni}*\mathbf{d}$$

Avec **ni** = 1.5 pour les extrémités rapprochées et meulées et **ni** = 3 pour les extrémités rapprochées.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

6. ANNEXE 2 : NOTE D'ATELIER, GENERALITE SUR L'USINAGE DES SOUPAPES

Nos échelles se cantonnant pour l'essentiel entre le 1/32^{e} et le 1/13^{e}, il n'y aura généralement pas de grandes différences au niveau des pressions de service et des capacités de vaporisation des chaudières. Il en découle qu'une gamme réduite de soupapes suffira à couvrir tous les besoins courants. L'exception se porte sur les chaudières à vaporisation instantanée (*flash steam*) mais elles ne sont pas courantes.

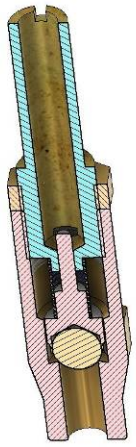
Ce chapitre explique la façon dont nous procédons dans notre pratique, mais d'autres approches sont possibles bien sûr.

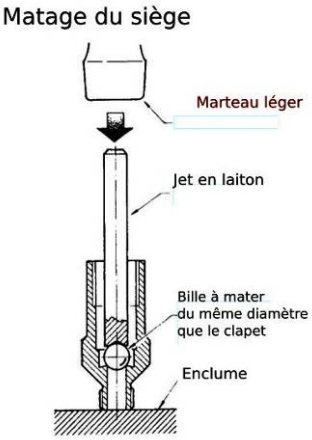
6.1. Géométrie et usinage du siège de soupape

Les sièges coniques sont peu usités en modélisme car pour obtenir une étanchéité sans faille ils demandent d'être rectifiés tout comme le clapet. On utilise presque exclusivement des sièges plats avec matage par empreinte d'une bille. En général on commence par percer le corps de soupape au diamètre avec un foret. Ensuite on dresse le fond à la cote finie avec une fraise.

Si l'on vise une conception plus soignée on usinera le siège en cône inversé avec un outil de fabrication maison.

On voit ci-après un type de soupape très utilisé sur les locomotives à vapeur aux échelles 3''1/2 et 5''.
Le réglage de déclenchement s'effectue en jouant sur la compression du ressort. L'hystérésis est obtenue en jouant sur la taille des lumières vapeur dans l'évent. La pression de fermeture, ou plutôt la différence entre la pression de levée et la pression de fermeture est de 0,5 à 0,70 bars(5). Cela peut être obtenu en ajustant les tailles des ouvertures sur les côtés inférieurs du corps de l'évent de soupape. Plus petites seront ces ouvertures, plus basse sera la pression de fermeture. Les meilleurs résultats sont obtenus en usinant ces ouvertures un peu plus petites que les cotes spécifiées et en les ajustant à la lime ou par reprise en fraisage lors de test de fonctionnement vapeur. Faire ces réglages lors des premières mises en vapeur de la locomotive. Bien entendu le démontage de la soupape pour régler les lumières s'effectue machine entièrement froide.

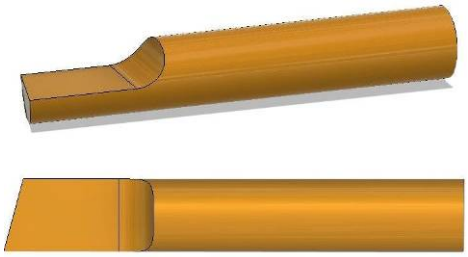




(5) Pour les chaudières des locomotives au gabarit de voie 3''1/2 ou 5''

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

Le cône inversé du siège est fabriqué dans de l'acier d'outillage puis trempé. Comme le métal à usiner est du laiton, la trempe n'a pas besoin d'être d'une grande précision quant à la dureté après recuit. On voit ci dessous l'outil, appelé D_bit ou D_drill dans les pays anglo-saxons.

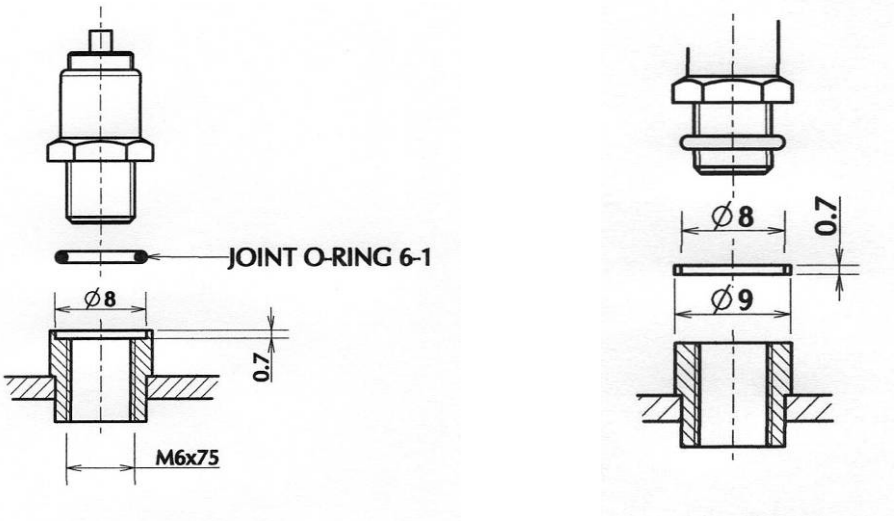


6.2. Montage de la soupape

La soupape peut être fixée sur la chaudière de deux façons, par joint torique ou par joint cuivre et ruban Téflon.

6.2.1 Montage de la soupape par joint torique

Idéalement il faudrait utiliser un joint en Viton[6]. La pratique montre que des joints néoprène de plomberie, adaptés à l'eau chaude sanitaire suffisent. Vendus par sachets de 10 unités ils sont peu coûteux. En cas de rupture, rien de bien grave, la soupape fuira un peu via le jeu de son filetage. Pour l'efficacité, la gorge devra être usinée suivant les recommandations normalisées que nous vous proposons ci-après.



Sur le schéma de gauche, un lamage est réalisé sur la virole, la profondeur de ce lamage limite l'écrasement du joint, pour un joint de 1 mm de diamètre, un écrasement de 0.3 mm est suffisant. Sur le schéma de droite, la compression du joint est limitée par une bague en laiton.

- **Il est impératif de toujours desserrer la soupape après utilisation, afin de ne pas laisser le joint en compression.**

(6) Les élastomères constituent environ 80 % des fluoroélastomères et possèdent une excellente résistance à la chaleur (utilisation de −10 à 250 °C), aux carburants et aux produits chimiques agressifs.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

6.2.2 Montage d'une soupape par joint cuivre

Les joints d'étanchéité cuivre, comme les joints torique en caoutchouc, permettent d'éviter les fuites et assurent la durabilité des montages. Ils s'emploient principalement lorsque la soupape (ou autres pièces ayant besoin d'une étanchéité) ne se démonte pas, en effet, à chaque démontage il faudra changer le joint cuivre. En plus du joint cuivre, dans les kits de machine à vapeur, le fabricant préconise de mettre sur le filetage de la soupape, au raz du joint cuivre, du Téflon. Téflon largeur 12 mm épaisseur 0,1 mm, plié en deux et enroulé dans le sens du vissage pour éviter qu'il ne bourre lors du serrage de la soupape sur la chaudière.
Les deux types de joints que nous utilisons sont :

Diamètre int.	Diamètre ext.	Epaisseur
5	7	0.25
6	8	0.25

Les joints cuivre sont légèrement concaves permettant un écrasement optimum entre les deux pièces.

Ne jamais placer des joints en aluminium car Le contact direct de l'aluminium avec du cuivre ou l'un de ses alliages tel laiton ou bronze est toujours très dangereux car pouvant provoquer une corrosion galvanique importante de l'aluminium. Nous avons ici toutes les conditions qui favorisent la corrosion électrolytique :

- Les métaux qui ont une grande différence de potentiels *(cuivre noble, aluminium moins noble)*.
- Température élevée, humidité élevée, acidité élevée.
- Petite partie de revêtement de surface sur le métal anode.

6.3. Ressort

Il sera en fil inox. Généralement la nuance est Z15 CN 18,08. Cet alliage conserve ses propriétés jusqu'à 250°C. La corde à piano a une mauvaise tenue à la corrosion, la tenue en température ne dépasse pas 100°C. On se reportera à l'Annexe de calcul pour un pré-dimensionnement. La réalisation de ressort au tour est largement documentée sur Internet. Lors de sa compression les spires du ressort aux deux extrémités ont tendance à voir leur diamètre augmenter. Il faut en tenir compte afin que le ressort ne chevauche pas la tête inférieure de la tige de piston et produise un blocage de soupape. Les spires ne devront être quasi jointives que pour la levée maximale admissible du clapet, clapet qui dans notre cas est une bille. On doit cependant laisser une réserve de déplacement d'au moins 5 % de la hauteur du ressort comprimé à bloc c'est à dire déformé sous l'effet de la force maximale. Nous conseillons d'avoir les premières spires jointives et meulées.

6.4. Tige de soupape

La tige de soupape est usinée dans du rond en laiton. Le rapport Longueur/Diamètre est grand (>3) et le diamètre est de faible section. La pièce ne résistera pas à la pression transversale de l'outil. Il faut procéder par tournage fractionné. On va sortir de la pince environ 5mm de rond brut, on descend le diamètre à la cote finie+0,05mm. On recommence. L'arrêt et le mouvement du rond vont produire de petites variations d'où la surcote de + 0,05mm laissée pour la finition. Lorsque la longueur complète est exécutée on égalise avec une lime douce ou même un papier abrasif de grain 320 ou plus.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

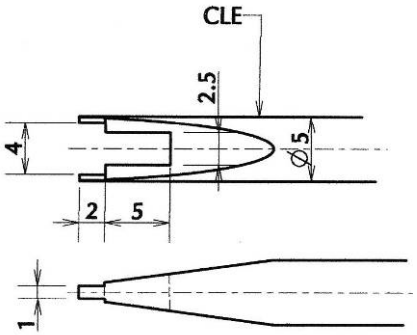
1. Tournage fractionné de la queue - mise à la cote finie
2. Retournement et prise en pince. Dressage-Mise à la cote d'épaisseur
3. Pointage au foret à centrer de gros calibre. Usinage de l'appui conique avec une fraise à chanfreiner à 90°

Attention : ces fraises n'ont pas de coupe au centre d'où le pointage au foret à centrer.

Note importante : Si l'axe de la queue de la tige et/ou l'axe du logement conique ne sont pas parfaitement colinéaires avec l'axe du siège de bille, la bille pourrait ne pas être correctement appuyée sur son siège. La soupape serait fuyarde ce qui est pénalisant mais présente peu de risques quant à la sécurité.

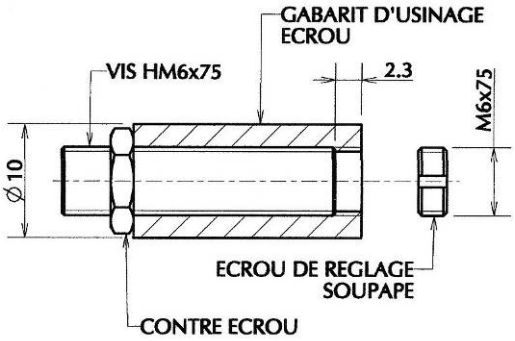
6.5. Ecrou de réglage et guide tige

Pour le réglage de l'écrou on utilisera un tournevis dédié dans lequel on aura usiné le logement pour le passage de la tige de maintien de la bille. Ce tournevis imposera les cotes de la fente à usiner dans l'écrou.



6.5.1 Usinage de l'écrou

On part d'une barre ronde de diamètre 6 mm
1. Ebauche : Dressage face – Filetage M6x75 – Perçage D = 2 mm sur 15 mm (de manière à réaliser 2 ou 3 écrous).
2. Montage en fraisage et réalisation des rainures par fraise scie épaisseur 1 mm.
3. Tronçonnage à une longueur d'environ 3 mm.
3. Reprise sur un gabarit d'usinage sur tour permettant la mise à longueur définitive.



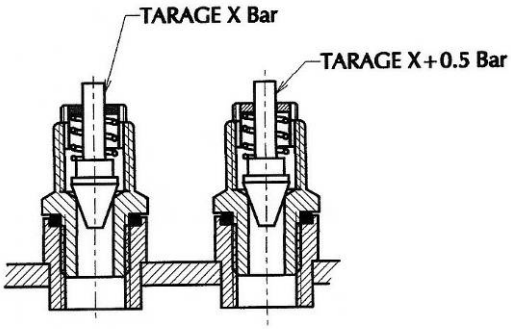
A gauche, réalisation des rainures, à droite, gabarit d'usinage de mise à longueur de l'écrou.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

7. CAS PARTICULIER D'UNE CHAUDIERE CHAUFFAGE AU CHARBON

Dans le cas d'une chaudière chauffage au charbon, il convient de placer, par sécurité, deux soupapes de décharge à déclenchement décalé. Les raisons en sont les suivantes :

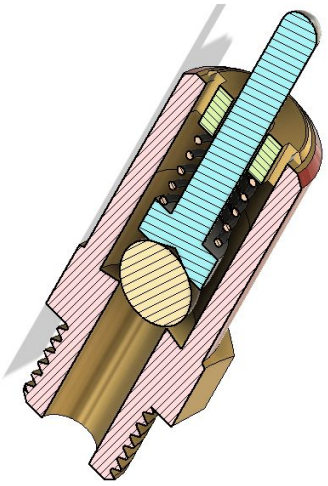
- en cas de problème on ne peut pas stopper la production de chaleur comme avec du gaz
- la production calorifique est en forme de cloche avec un pic de puissance très élevé lorsque la combustion est à son maximum avec toute la charge de charbon incandescente.

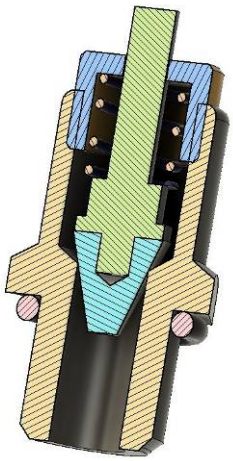


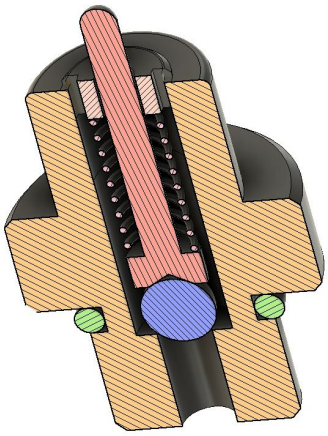
Un exemple avec soupape à clapet Téflon.

La première soupape sera tarée à la pression de service, la deuxième avec 0,5 bar en plus. Le risque que les deux soupapes soient bloquées simultanément pendant la chauffe de la chaudière est très faible, surtout si on suit le protocole de mise en chauffe avec vérification manuelle de la levée de la soupape.

8. PLANS DE SOUPAPE

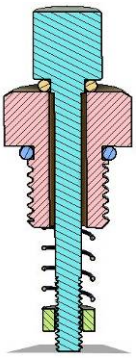






Nous vous proposons 4 types de soupape :

- ***Vue de gauche*** *: version traditionnelle à clapet à bille. Chapitre 8.2*
- ***Au centre*** *: la version clapet à portée conique en Téflon. Chapitre 8.3*
- ***Vue de droite*** *: la version usuelle compacte avec clapet à bille servant de bouchon de remplissage de la chaudière. Chapitre 8.4*
- ***Ci-contre*** *: Nous commencerons par une soupape très simple pour chaudière basse pression (1 à 2 bars) Chapitre 8.1*



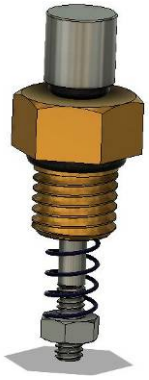
*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

FICHE TECHNIQUE
SOUPAPE DE DECHARGE

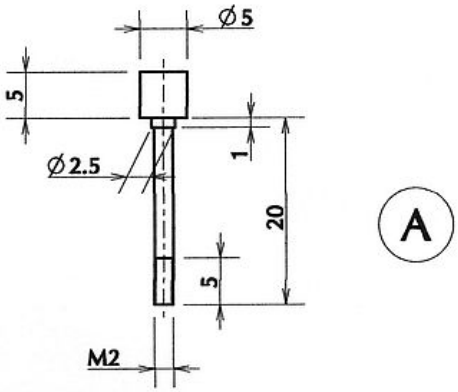
FTe05

8.1. Soupape pour jouet style Wilesco

Nous ne pouvons pas passer à coté des soupapes pour chaudières de faible production de vapeur telles que les jouets Wilesco ou autres marques. Sur les modèles les plus simples, le rendement global n'étant pas une préoccupation, on ne produit que de la vapeur saturée basse pression sans surchauffe. Les chaudières sont très simples et ne comportent généralement qu'un tube foyer, sans tubes de retour ni économiseur.



Dans le cadre d'une action pédagogique avec un collège de St Amand les eaux, nous avions réalisé un projet de construction d'un véhicule à partir d'une base de chaudière et d'un moteur réalisés par **VAPEUR 45**, d'une boite Mécano et de laisser libre cours à l'imagination des élèves pour la réalisation de ce véhicule.

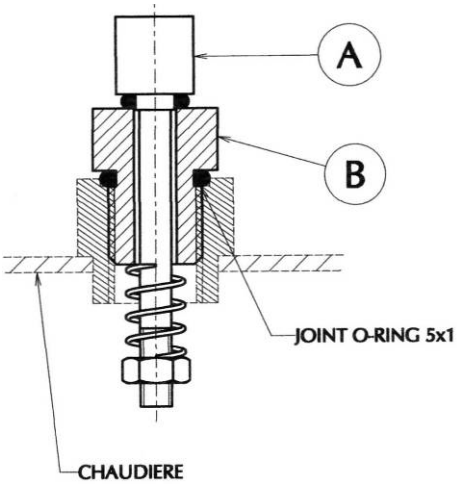


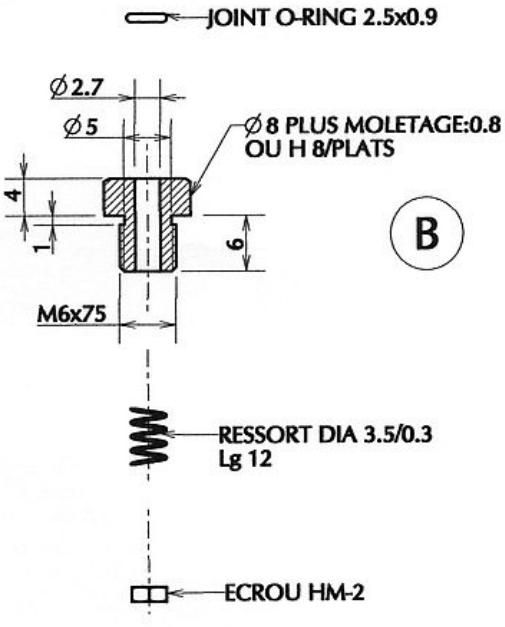
Sur ce type de chaudière ne dépassant pas 1 bar de pression cette soupape simplifiée est vraiment bien adaptée. Cette soupape à pour deuxième fonction de servir de bouchon de remplissage de la chaudière.

Note d'atelier

La réalisation ne pose pas de problème, la pièce Rep **B** sera réalisée soit dans un hexagone de 8 soit à partir d'un rond avec un moletage. Vous trouverez le joint O-Ring de 2.5x0.9 dans certains briquets jetable.

Le joint d'étanchéité de 5x1 peut être remplacé par un joint carton. Parfois on voit la pratique de renforcer ce joint papier en l'enduisant de graisse à filetage des chauffagistes ou de graisse téflon

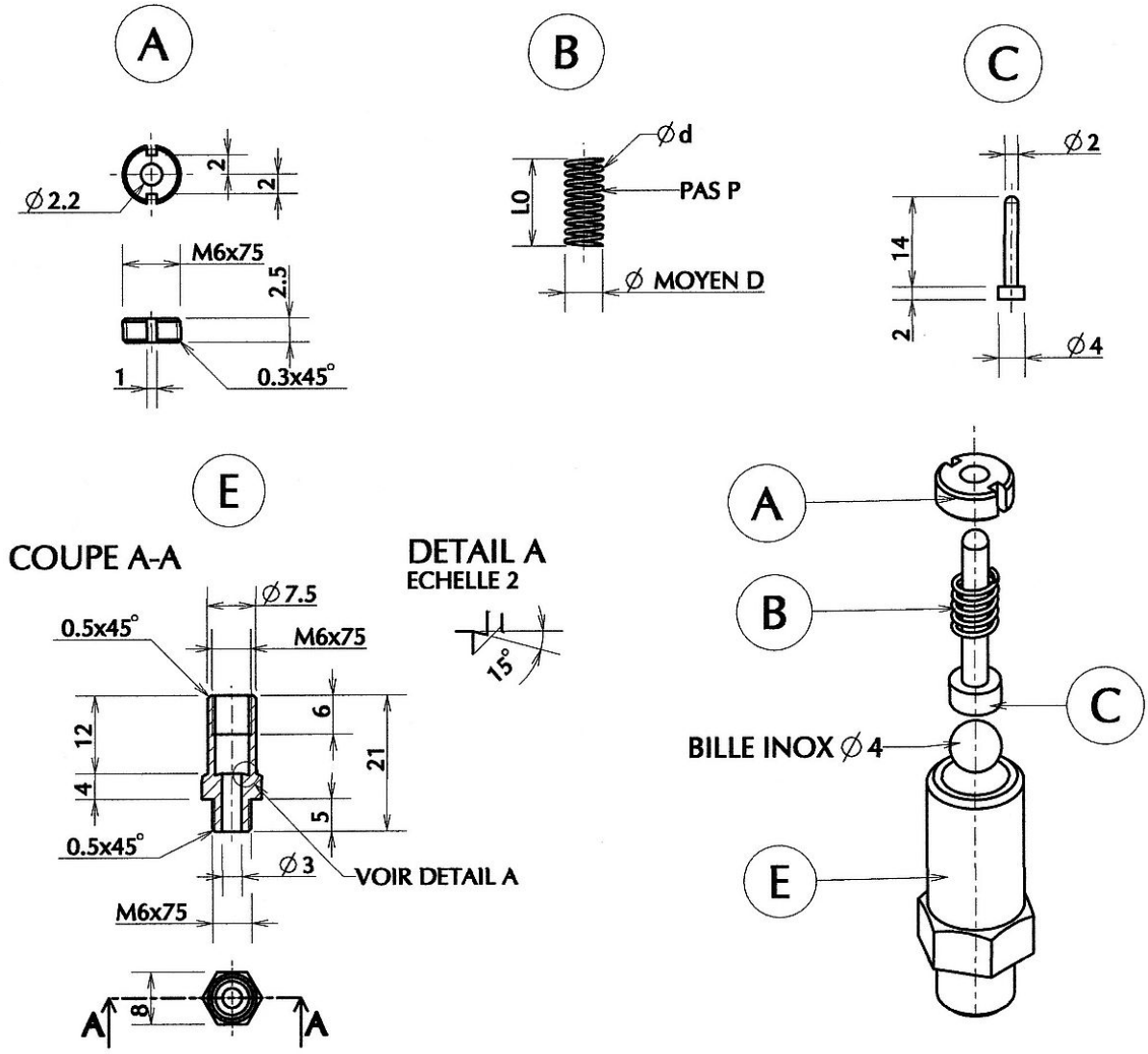




*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

8.2. Soupape traditionnelle à bille

Ce chapitre explique la façon dont nous procédons dans notre pratique, mais d'autres approches sont possibles bien sûr.



Note d'atelier

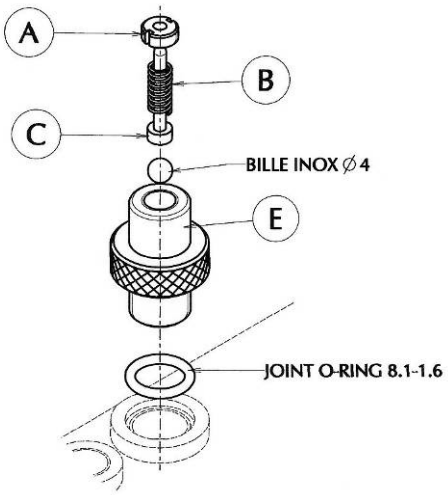
Ce type de soupape ne présente pas de difficulté de réalisation, les éléments sont expliqués dans le chapitre 6.

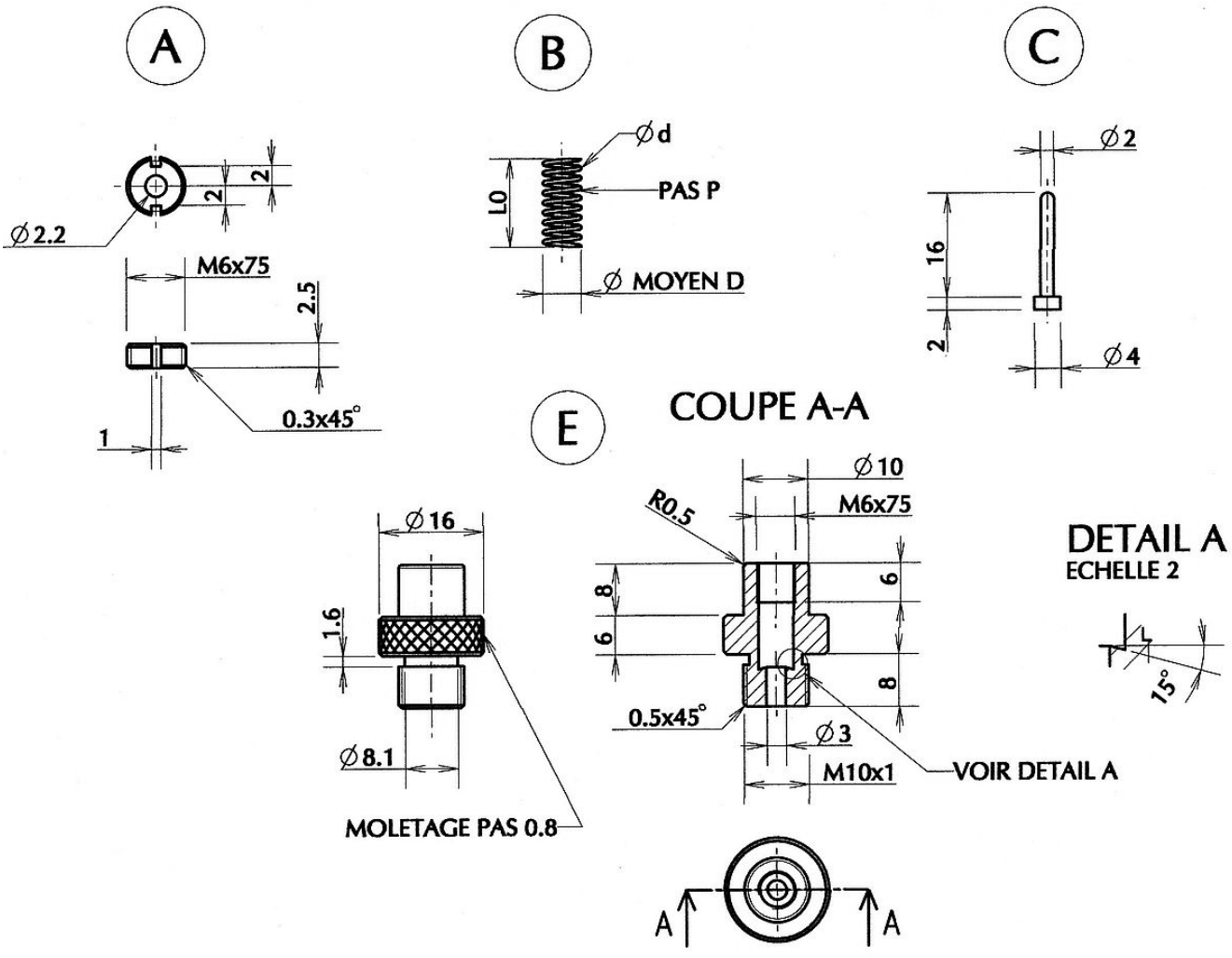
*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

8.3. Soupape version bouchon de remplissage

Cette soupape permet d'allier deux fonctions indispensables sur nos machines, la fonction de soupape, évidemment et la fonction de remplissage de la chaudière.

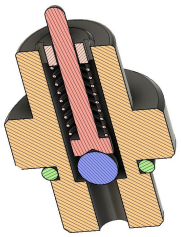
Dans ce cas, le corps de soupape devra être serré fermement mais seulement à la main. C'est la raison du moletage sur le corps de soupape ainsi que de l'utilisation d'un filetage à pas fin.





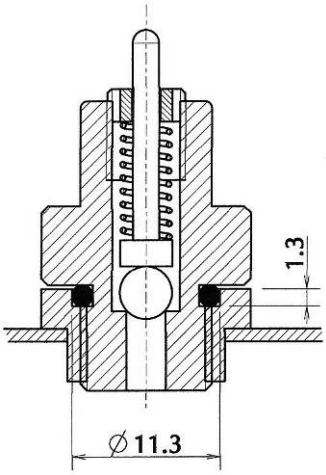
*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

8.3.1 Note d'atelier - Corps de soupape (E)



1. On part d'un rond en laiton D = 16 mm pris en mandrin 3 mors ou en pince ER.
2. Descendre au diamètre 10 mm à la cote finie sur la longueur 6.
3. Percer à D = 5,2 mm à la cote finie. Terminer le fond avec un D-bit dia 5,2 et angle de 15°.
4. Perçage traversant D = 3 mm
5. Moletage
6. Tarauder M6x75 à la cote finie
7. Tronçonner. Reprendre en pince ER. Dresser la face brute, mettre à la cote finie
8. Usiner la gorge. Les cotes dépendent bien sûr du joint choisi. Pour l'usinage[7] nous avons opté pour un outil ad 'hoc meulé dans un barreau HSS.
9. Filetage M10x1

Pour les repères A, B et C voir chapitre "Généralités sur l'usinage des soupapes.

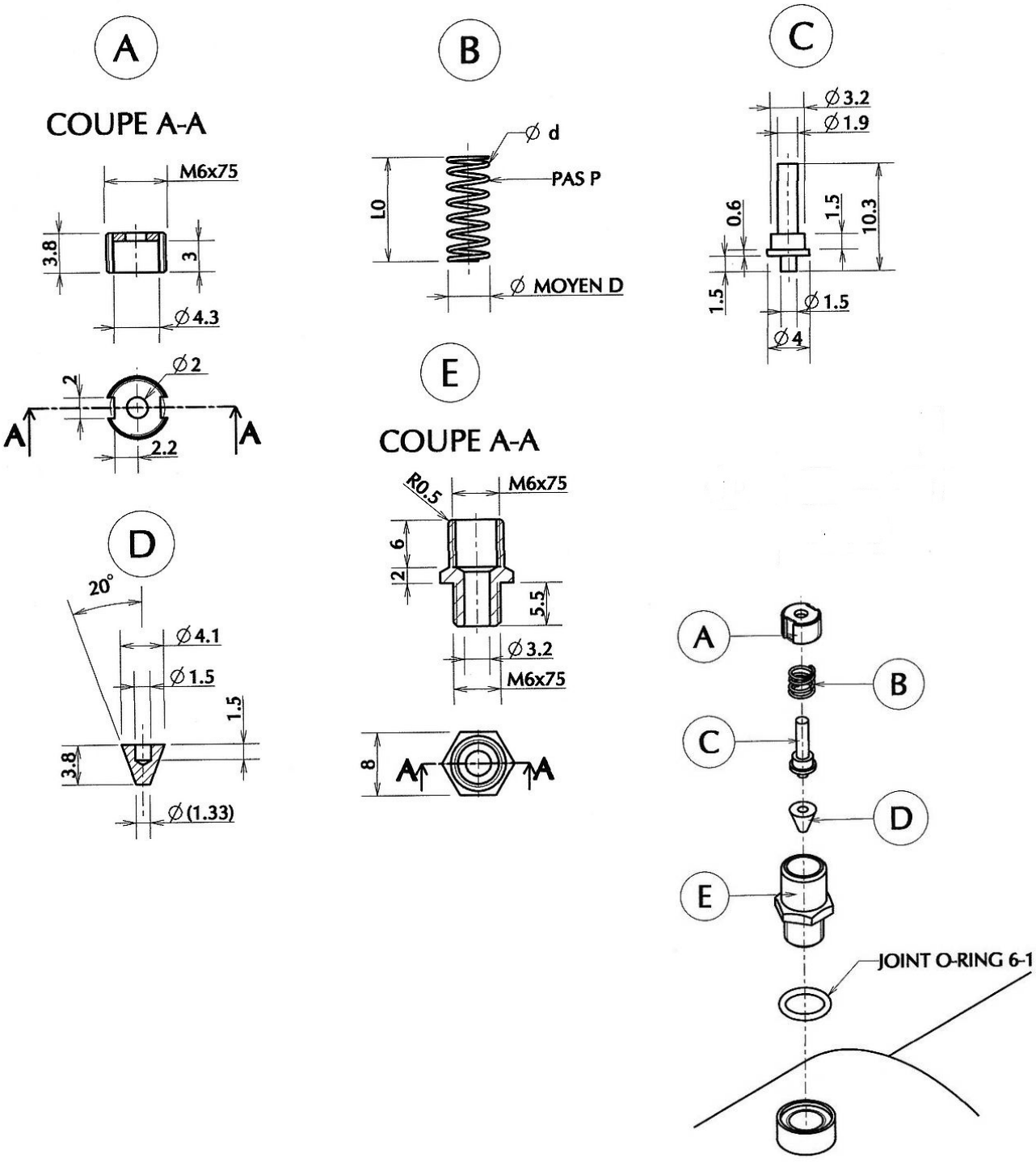


Ci-contre, schéma du lamage pour un joint torique de 8.1x1.6. L'étanchéité s'effectue sur un écrasement du joint de 0,3 mm.

(7) Des tables de caractéristique vapeur existent sur Internet

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

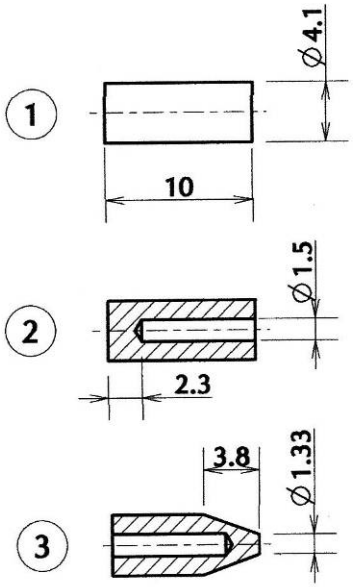
8.4. Soupape à portée conique en Téflon



*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

8.3.1 Note d'atelier – Usinage du siège en Téflon (D)

1. On part d'un rond en Téflon D = 5 mm pris en mandrin 3 mors ou en pince ER.
2. Descendre au diamètre 4.1 mm à la cote finie sur une longueur de 12 mm.
3. Dresser la face
4. Tronçonner à une longueur arbitraire de 11 mm et dresser afin d'obtenir une cote finie, ici 10 mm. *(la cote n'a pas d'importance, elle doit être suffisante pour une reprise au tour)* (1)
5. Percer à D = 1,5 mm sur une longueur de 7.7 mm. (2)
6. Usiner le cône. (3)
7. Tronçonner à 3.8 mm.



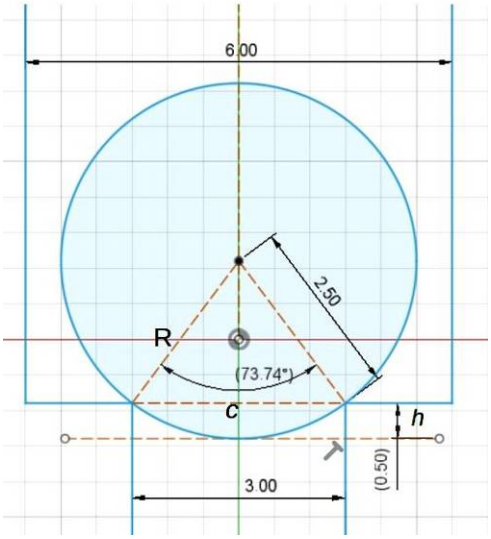
9. PRE-DIMENSIONNEMENT D'UNE SOUPAPE

Cela se passe en trois temps :

- on détermine la capacité évaporative maximale de la chaudière
- on dessine la soupape, le plus souvent à partir d'une base connue
- on vérifie par calcul l'adéquation de la soupape à sa fonction. On dimensionne le ressort.

Nous allons raisonner sur un exemple. La chaudière Kindon http://vapeur45.fr/dimensionnement/pre-dimensionnement-moteur-a-vapeur débite 0,40 g/s de vapeur saturée sous 5 bars absolus (4 bars lus au manomètre), soit un débit volumique de 152 cm³/s.

On utilise la feuille de calcul "*Calcul_geometrie_soupape_v1.0.ods*" que vous trouverez ici : http://vapeur45.fr/dimensionnement/soupape-de-decharge



*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

FICHE TECHNIQUE
SOUPAPE DE DECHARGE

FTe05

On commence par renseigner les données d'entrée.

Diamètre conduit vapeur	3,00	mm
Diamètre bille	5,00	mm
Diamètre alésage corps de soupape	6,00	mm
Vitesse vapeur maximale à l'évent (10 30 m/s)	20,00	m/s
Pression de service	4,00	kgf/cm²
Masse volumique vapeur saturée	2,67	g/cm3
% augmentation P_service (marge de surpression)	10	%

En général on tare l'ouverture de la soupape à +10 à +20 % de la pression de service, ceci afin d'éviter des ouvertures intempestives sur de courtes fluctuations de pression.
La feuille de calcul donne alors le débit maximal admissible d'évacuation, débit qui bien sûr va devoir être supérieur à la capacité évaporative de la chaudière.

	cellules modifiables				
			Caractéristiques chaudière		
Débit volume maximal à pleine ouverture					
Pression de service	4,00	kgf/cm²	Débit horaire	1440	g/h
Diamètre intérieur conduit vapeur	3,00	mm		*0,4*	g/s
section vapeur	*7,07*	mm²	Pression service	4	bars
Diamètre bille	5,00	mm	Vol_massique vapeur	0,38	m3/kg
section équatoriale bille	*19,63*	mm²		*380*	cm3/g
Diamètre alésage	6,00	mm	Masse volumique	2,67	kg/m³
section alésage	*28,27*	mm²	Débit_vol vapeur	152	cm³/s
Vitesse vapeur (10 à 30 m/s)	20,00	m/s			
Section passage à pleine ouverture	*8,64*	mm²			
Débit-vol max dans le conduit vapeur	**172,79**	cm³/s			
	<OK>				

La raideur, notée k, exprime la relation de proportionnalité entre la force F appliquée en un point et la déflexion x résultante en ce point :

$$k = \frac{F}{x}$$

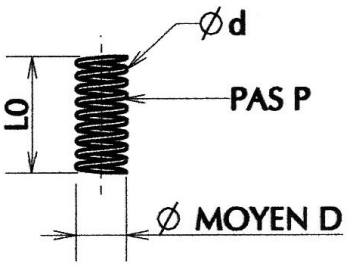
où

F est la force appliquée ;
x est la déflexion de la structure au point considéré.

Calcul du ressort		
Levée minimale (dégagement siège)	0,50	mm
% augmentation P (marge de surpression)	10,00	%
Force sur le ressort	311,02	g
	3,05	N
Raideur k	6,10	N/mm
nombre de spires	5	
Diamètre moyen du ressort	4,00	mm
G	81000,00	N/mm²
D fil	**0,66**	mm

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

On définit le ressort, nombre de spires, diamètre de la fibre moyenne **D**.
On récupère alors le diamètre du fil à utiliser. On utilise des formules simplifiées pour calculer le diamètre du fil **d**. Dans l'exemple qui suit, on retiendra un fil de diamètre 0,6-0,7 mm. On peut jouer aussi sur le nombre de spires et sur le diamètre moyen pour adapter le ressort.



Bien entendu, comme cela a déjà été dit, on devra vérifier le bon dimensionnement en conditions réelles.

10. BANC DE VERIFICATION DES SOUPAPES

Nous avons vu dans le chapitre 4, que la mise au point d'une soupape peut être faite sur banc à l'air comprimé pour les réglages préliminaires du fait des mêmes caractéristiques entre l'air et de la vapeur d'eau vers 4 bars et 140°C.

10.1. Caractéristiques

Le banc sera constitué d'un bloc de laiton pouvant recevoir divers types de filetages, M6x75, M8x75, M10x1 et ¼" 40 filets au pouce pour les soupapes du commerce d'outre Manche. Ce bloc est relié à une cuve tampon sur laquelle est raccordé un manomètre 0-4 bars. **La cuve tampon aura préalablement subi une épreuve hydraulique comme nous le faisons pour les chaudières que nous construisons.**
Le bloc comporte également une vanne de réglage permettant de laminer le débit d'entrée d'air de manière à être dans les mêmes conditions que la chaudière vapeur, il est nécessaire d'obtenir une montée progressive de la pression dans la cuve. Le bloc est doté également d'une purge d'air. Chaque raccordement de soupape comporte un bouchon d'isolement.

Le banc est relié à une source d'air comprimé, dont la pression de service sera supérieure au tarage de la soupape. Le compresseur doit être doté d'une cuve tampon afin d'obtenir un flux d'air constant.

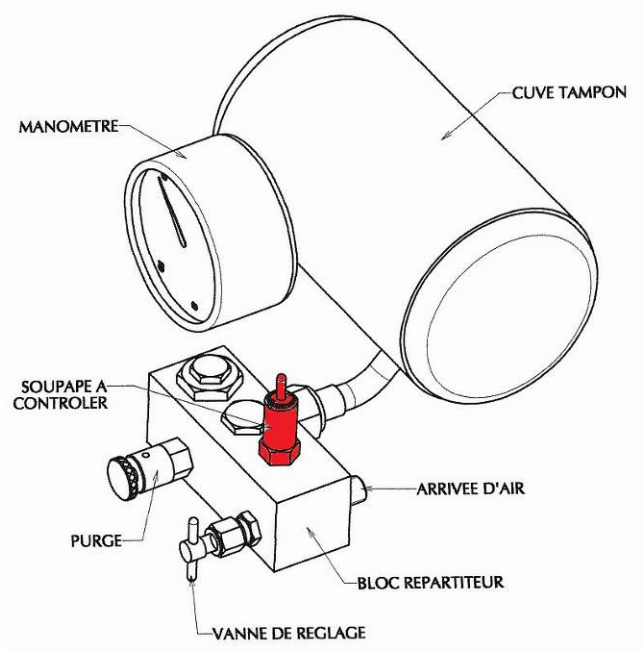
Pour la réalisation du banc, il n'y a pas de montage type, il faut simplement rassembler sur les éléments définis ci-dessus.
Nous rappelons que votre banc devra être étanche et éprouvé comme pour une chaudière. Nous ne donnons pas de dessins de détail, les directives suffisent pour fabriquer en fonction des pièces que vous avez chez vous.

Voici un exemple de banc de test de soupape. En bas à droite, le bloc répartiteur avec la purge, la vanne de réglage d'entrée d'air, le raccordement au réservoir tampon muni de son manomètre. Le tout repose sur une platine comportant des trous filetés permettant de placer le bouchon en fonction du filetage utilisé.

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

10.2. Mise en œuvre

- Visser la soupape à vérifier dans le logement correspondant à l'aide d'un joint téflon.
- Brancher le banc de vérification à un compresseur d'air.
- Ouvrir légèrement la vanne de réglage.
- Surveiller le manomètre de manière à avoir une montée progressive.
- Le manomètre se stabilisera à une pression, par exemple 3 bars. Il suffira de serrer ou desserrer l'écrou de réglage de la pression du ressort pour obtenir la pression de service.
- Si vous ouvrez en grand la vanne de réglage, le manomètre bougera de 0.1 à 0.2 bar, mais la soupape laissera passer le trop plein d'air.

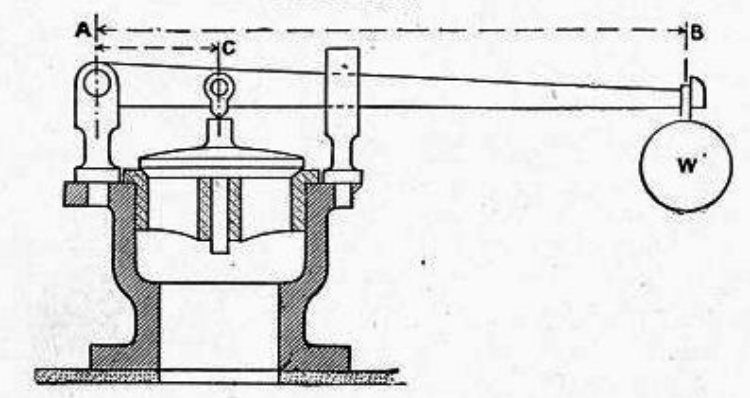


*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

11. QUELQUES SOUPAPES ANCIENNES

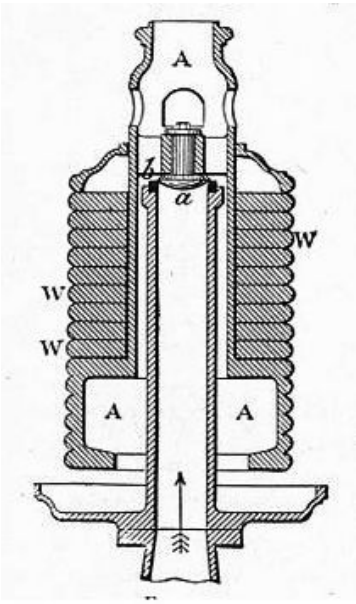
11.1. Soupapes à levier

Ce sont les plus anciens modèles de soupapes, à une époque où la fabrication et le tarage des ressorts n'était pas chose évidente. Leur fonctionnement se comprend sans explications. L'inventeur de cette soupape est le français Denis Papin. Sur les machines le mécanicien avait la responsabilité de déplacer empiriquement le poids W en fonction du régime de charge.



11.2. Soupape à masse fixe.

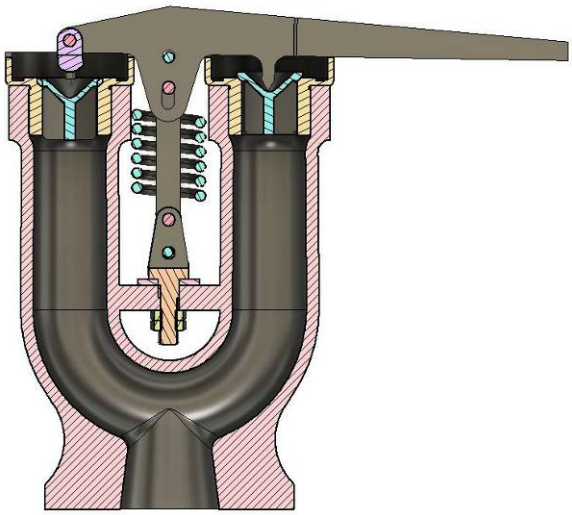
Ces soupapes ont initialement été utilisées sur les locomotives car la soupape à levier était trop sensible et déclenchait trop souvent. Par la suite elles furent pendant un temps employées sur les petites installations stationnaires, fonctionnant à charge sensiblement constante.



*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***

11.3. Soupape Ramsbotton

Inventée par John Ramsbottom en 1865 elle eut beaucoup de succès sous diverses variantes. Elle pouvait être déclenchée manuellement en actionnant le levier. Mal entretenue et/ou mal réglée elle pouvait se montrer dangereuse, les clapets risquant se bloquer sur leur siège.



*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Vous pouvez l'imprimer, le sauvegarder pour votre usage personnel. Tout autre usage est soumis à autorisation express. Les photos sont la propriété des auteurs. Toute reproduction et/ou diffusion de ce document et des illustrations qu'il contient, partielle ou complète, quelque soit le support de diffusion ou le procédé est prohibée.*

*Le contenu du document est fourni par **VAPEUR 45** à titre d'information et ne peut lui être opposable pour quelque préjudice que ce soit.*

*Crédit photos et plans : **VAPEUR 45**; Joël, Patrick et Robert*

Réalisation ROCHART Robert & LECLERE Patrick

*Ce document est la propriété de **VAPEUR 45**. Il ne doit pas être copié ni donné à des tiers sans l'autorisation de **VAPEUR 45***