



Visserie, boulonnerie et serrage

Force et couple : la différence

- **Force** : une action mécanique capable d'imposer un mouvement à un objet. Le mouvement est parallèle à la direction de la force et de même sens.

Les forces se mesurent en Newton (N). 1 N vaut environ 98,1 grammes, que l'on arrondit le plus souvent à 100 g. Ainsi, 1 kg = 10 N.

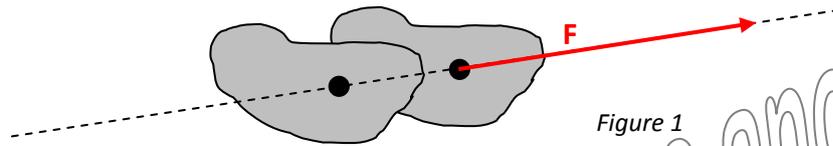


Figure 1

- **Couple** : action mécanique en rotation autour d'un axe (pivot). Le couple a donc besoin d'une force, et d'un axe de rotation non situé sur la direction de la force.

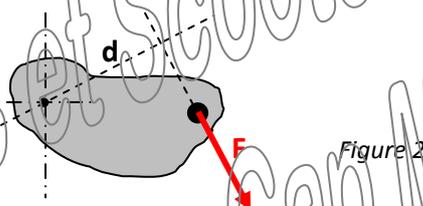


Figure 2

Le couple agit sur l'objet par son moment, qui vaut $M = d \times F$, d est en mètres, F en Newton. L'unité de mesure d'un couple est donc le Newton.mètre (Nm). Si on mesure la force en kg, alors l'unité est le mkg, qui vaut presque 10 Nm.

Résistance d'une tige ou d'une vis en traction

Pour prévoir comment se comportera une vis ou un goujon dans un assemblage, on fait un essai de traction sur une éprouvette. Cet essai est un grand classique de la résistance des matériaux. La procédure de l'essai et les dimensions de l'éprouvette sont normalisées et les résultats sont bien répétitifs. Ils représentent bien ce qui se passera dans l'assemblage.

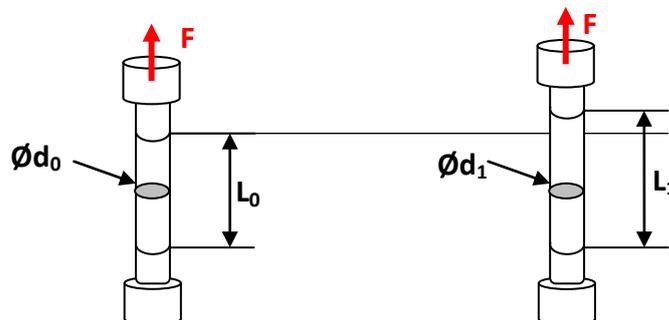


Figure 3

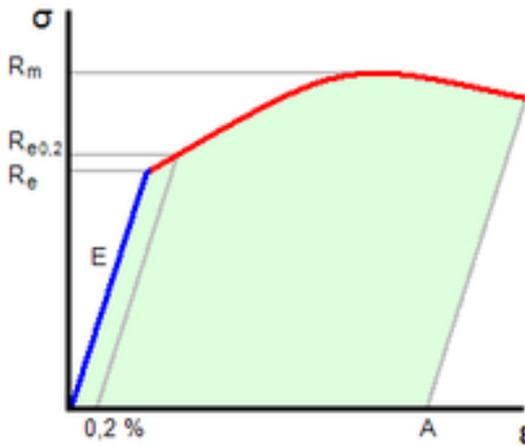
Sous l'effort de traction, l'éprouvette commence par s'allonger de manière réversible. C'est la phase élastique. Ensuite, l'allongement se poursuit, mais la déformation devient rémanente. C'est la phase plastique (ou élasto-plastique). Enfin, l'éprouvette finit par casser. C'est la rupture.

Sous l'effort, la longueur initiale L_0 devient L_1 : l'éprouvette s'allonge de $L_1 - L_0$, ou bien en pourcentage de $(L_1 - L_0)/L_0$. C'est l'allongement relatif ϵ . Par exemple, si $L_0 = 100$ mm et $L_1 = 105$ mm, $L_1 - L_0 = 5$ mm, et $\epsilon = 5\%$.

La section initiale, $S_0 = \pi d_0^2/4$ se réduit, et devient $S_1 = \pi d_1^2/4$. On calcule la contrainte dans l'éprouvette. C'est $\sigma = F/d_0$. Elle se mesure en Pascal, c'est-à-dire en Newton par m^2 (N/m^2) ou en N/mm^2 , ou encore en kg/mm^2 .

Et on trace la courbe de variation de la contrainte en fonction de l'allongement relatif.

Dans un assemblage, une vis ou un goujon se comporte comme cette éprouvette. Ce comportement est le suivant :



- ϵ (epsilon) : allongement relatif en %
- σ (sigma) : contrainte dans l'éprouvette en Pa
- R_m : contrainte à la rupture en Pa
- $R_{e0,2}$: contrainte conventionnelle à 0,2% d'allongement
- R_e : contrainte à la limite d'élasticité (déformation réversible)
- E : pente de la droite = module de Young
- A : allongement à la rupture en %

Figure 4

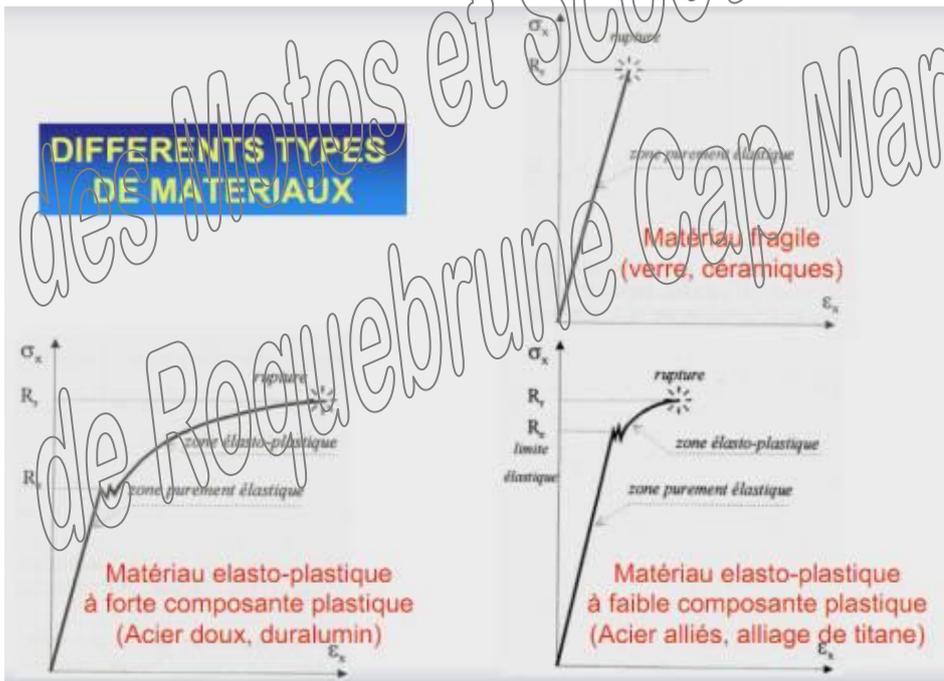


Figure 5

Quand on utilise une vis, on s'arrange pour qu'elle travaille dans la zone élastique, et pas dans la zone élasto-plastique (sauf applications particulières). Dans la zone élastique, l'éprouvette, ou la vis, se comporte comme un ressort : quand on cesse de tirer dessus, elle reprend sa longueur initiale. Dès qu'on sort de cette zone élastique, ce n'est plus le cas, et la pièce reste allongée.

A la fin de la zone élasto-plastique, la contrainte vaut, pour les aciers, environ 600 MPa (ou 600 N/mm^2 , ou 60 kg/mm^2). A ce moment-là, l'éprouvette s'est allongée de 0,2%. Si elle faisait 100 mm avant l'essai, elle fait 100,2 mm après. Elle s'est allongée de 0,2 mm.

Il existe toutes sortes d'aciers pour la visserie, des moins durs aux plus durs. On a donc défini des classes de vis et écrous, d'après les contraintes qu'ils peuvent supporter. Selon les applications, on choisira la classe de vis appropriée. Les vis et écrous sont marqués pour refléter cette classe. Le marquage est fait de 2 chiffres séparés par un point, comme :

Exemple : pour une vis de classe **9.8** (vue de la tête, de dessus) :

- **9** x 100 → la limite de rupture R_m vaut au moins 900 MPa,
- **9** x **8** x 10 → la limite élastique $R_{e0.2}$ est supérieure à 720 MPa.

Sur l'image ci-contre, la lettre « M » est une marque propre au fabricant de la vis (ou de l'écrou).

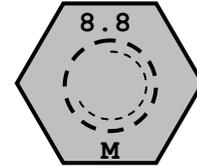


Figure 6

Dans les classes courantes, on obtient:

Classe	R_m (MPa)	R_e (MPa)	Dureté			Allongement %
			Vickers HV min	Rockwell		
				min	max	
3.6	300	180	95			25
4.6	400	240	120	B67	B95	22
4.8	400	320	130	B74	B95	16
5.6	500	300	155			20
5.8	500	400	160	B82	B95	10
6.8	600	480	190			8
8.8	800	640	250	C23	C34	12
9.8	900	720	290	C27	C36	10
10.9	1000	900	320	C33	C39	9
12.9	1200	1080	385	C38	C44	8
14.9	1400	1260				

La classe la plus courante est **8.8**. C'est ce qu'on trouve normalement en quincaillerie. Les classes au-dessus de 10.9 sont plus fragiles au choc et à basse température. Elles sont déconseillées.

Les tiges filetées qu'on trouve couramment dans le commerce sont en classe **4.6**. Elles sont donc très peu résistantes, et il faut éviter de les utiliser comme goujon de fixation d'une culasse !

Il ne faut pas associer les vis et écrous n'importe comment : il ne faut pas associer une vis avec un écrou de qualité inférieure. L'écrou doit être de meilleure qualité que la vis, ou de qualité identique.

Serrage d'un assemblage par un boulon

Définitions de la boulonnerie

Une vis est une tige cylindrique (et quelquefois conique) sur laquelle on a creusé des rainures hélicoïdales laissant en relief le filet ; la tige filetée ainsi obtenue se visse dans un trou cylindrique présentant des rainures correspondant aux filets de la vis. On dit que le trou est taraudé.

- Un écrou est une pièce présentant un trou taraudé et se vissant sur une tige filetée.
- L'ensemble d'une tige filetée présentant une tête (la vis) et d'un écrou constitue un boulon.
- Pour créer un filetage sur une tige (faire une vis), on utilise une filière.
- Pour créer un filetage dans un trou (faire un écrou), on utilise un taraud.

Que cherche t'on quand on serre une vis pour maintenir une pièce A sur une pièce B ? On veut que les deux pièces A et B soient suffisamment plaquées l'une contre l'autre pour qu'elles ne se déplacent pas l'une par rapport à l'autre, même en cas de dilatation ou de rétrécissement thermiques, de vibrations, de contraintes, de corrosion. Elles peuvent ainsi continuer à assurer la fonction mécanique pour laquelle leur assemblage a été conçu. Mais en même temps, il ne faut pas serrer trop fort. On risquerait de trop écraser la pièce A, d'allonger voire de casser la vis. Le risque d'arracher le filetage est très faible, parce que le filetage ISO a été conçu pour ce soit le corps de la vis qui casse en premier (c'est plus facile à réparer).

On doit donc serrer juste ce qu'il faut. Voyons ce que ce juste ce qu'il faut signifie.

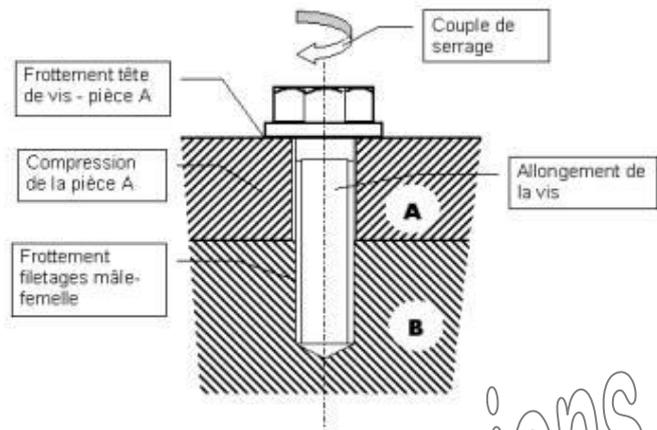


Figure 7

Quand on tourne la vis pour la serrer, on exerce sur elle un couple. Ce couple est d'abord très faible, puisqu'on peut l'exercer avec le bout des doigts. Il sert à enfoncer la vis jusqu'à ce que le dessous de la tête vienne en contact avec la pièce A. A partir de ce moment là, le couple augmente fortement, et on a besoin d'un outil pour l'exercer : tournevis, clé plate, à tube, etc.

A quoi sert ce couple ? A quatre effets, qui ont tous leur utilité :

1. Vaincre les frottements apparaissant entre la surface inférieure de la tête de vis et la pièce A
2. Vaincre les frottements apparaissant entre le filetage (mâle) de la vis et le taraudage (femelle) dans la pièce B.
3. Tirer sur la vis pour l'allonger.
4. Ecraser la pièce A pour la comprimer et maintenir, éventuellement, une étanchéité (présence d'un joint entre A et B).

Les effets 1. et 2. serviront à empêcher la vis de se dévisser toute seule. Mais pendant le vissage, ces effets sont parasites. A couple de serrage égal, l'effet 3. sera plus ou moins grand selon que les frottements seront plus ou moins grands. Si on a lubrifié la vis, les frottements seront plus faibles. Et comme on exerce un couple constant, l'effet 3. sera plus important.

L'effet 3. sert à profiter de l'élasticité de la vis pour qu'elle comprime la pièce A et la plaque contre la pièce B, même en cas de variations de côtes. Plus on serrera fort, plus on tirera sur la vis, et plus on empêchera les deux pièces A et B de se décoller sous l'effet des vibrations, des variations de température, des efforts extérieurs.

L'effet 4. est complémentaire de l'effet 3. Si la vis est beaucoup plus résistante que la pièce B, celle-ci s'écrasera beaucoup alors que la vis s'allongera peu. Et inversement.

Ayant identifié ce qui se passe exactement pendant le serrage d'une vis, il n'a pas fallu longtemps aux ingénieurs pour mettre tout ça en équations, faire des essais, et en tirer les valeurs de couples ad hoc. Et ce bien avant que les ordinateurs n'apparaissent. C'est pourquoi les constructeurs donnent dans leurs notices techniques les couples de serrage à appliquer lors du remontage. Il faut respecter ces prescriptions avec soin. Il y a quand même un problème :

$$\begin{aligned} \text{Couple de serrage} &= \text{couple de frottement sous tête (1)} \\ &+ \text{couple de frottement du filetage (2)} \\ &+ \text{couple produisant l'allongement de la vis (3)} \\ &+ \text{couple produisant l'écrasement de la pièce A (4)} \end{aligned}$$

On voit que le couple de serrage est la résultante de quatre effets. Les deux premiers sont très fortement influencés par les frottements vis-écrou-pièces, donc par les états de surface et la lubrification des pièces. Comme le couple total est celui prescrit, il est constant. Les deux effets intéressants, qui forment le couple utile, sont donc eux-aussi influencés par les mêmes frottements, mais dans l'autre sens. Plus les frottements seront élevés, moins le couple utile sera élevé.

Or les notices n'indiquent jamais dans quel état sont les pièces : état de surface de la pièce **A** sous la tête de la vis, lubrification du filetage. Que faire? On peut supposer que les couples prescrits sont ceux qui sont appliqués sur des pièces neuves, telles qu'elles sont reçues sur la chaîne de fabrication du constructeur :

propres, non lubrifiées, zinguées (le plus souvent), zinguées-bichromatées (autrefois).

C'est donc comme ça qu'il faut voir les choses. Et savoir que si on lubrifie la vis, on tire d'avantage dessus pour un couple affiché à la clé dynamométrique identique.

Si on n'a pas d'indication : si on ne dispose d'aucune notice, voici les couples de serrage à appliquer, pour des vis de qualité 8.8, qui est la plus courante :

Les couples sont en Nm	Visserie zinguée lubrifiée de manière adéquate	Visserie noire ou zinguée, lubrifiée sommairement	Visserie revêtue ou non, à sec
	Coeff. de frottement 0,10	Coeff. de frottement 0,15	Coeff. de frottement 0,20
Vis de 6	7,5	9,5	11,1
Vis de 8	18,2	23	27
Vis de 10	36	46	53

On peut voir que moins la vis est lubrifiée, plus le couple appliqué doit être important puisque ce couple sert surtout à vaincre les frottements.

Serrage angulaire

Ce problème de l'influence des frottements sur la tension finale de la vis entraîne une incertitude importante sur le résultat final. C'est pourquoi, pour les serrages délicats, on a mis au point le serrage angulaire : après avoir serré la vis à un certain couple, prescrit par le constructeur, on serre encore mais d'un angle particulier, par exemple 70°. On s'aide pour ça d'une clé avec un rapporteur. Comme le couple de prévisage est assez faible, les frottements et leur dispersion n'ont pas encore commencé à intervenir. Le serrage final conduit alors à une tension de vis bien plus précise.

Sur la CB750 et les motos d'avant les années 80, il n'est pas question de serrage angulaire.

Serrage des bougies

Le serrage des bougies d'allumage est un exemple de serrage angulaire. En effet, les bougies doivent être serrées avec le couple ad-hoc, sous peine de les détériorer ou d'abîmer le filetage de la culasse. Comme il est rare qu'on utilise une clé dynamométrique, voici un moyen commode de serrer une bougie (source : documentation technique Bosch) :

1. Visser la bougie dans le filetage (préalablement nettoyé) **à la main** jusqu'à ce qu'il ne soit plus possible de l'enfoncer.
2. Passer alors à la clé à bougie.
3. Sur une bougie neuve, après la première résistance, serrer d'environ **90° d'angle**.
4. Sur une bougie usagée, après la première résistance, serrer **d'un angle de 15°** environ, ce qui correspondrait pour les aiguilles d'une montre à 5 minutes.

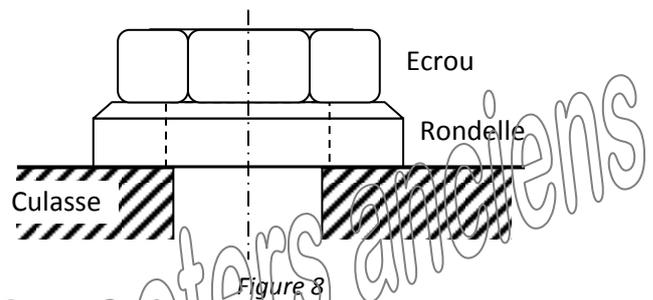
C'est bien un serrage angulaire. Voici néanmoins les couples recommandés par Bosch :

Matériau de la culasse :		acier	alu
Couple de serrage		en Nm (10 Nm = 1 mkg environ)	
Bougies à siège plat	M14 x 1,25	20 à 40	20 à 30
	M18 x 1,5	30 à 45	20 à 35
Bougies à siège conique	M14 x 1,25	15 à 25	10 à 20
	M18 x 1,5	20 à 30	15 à 23

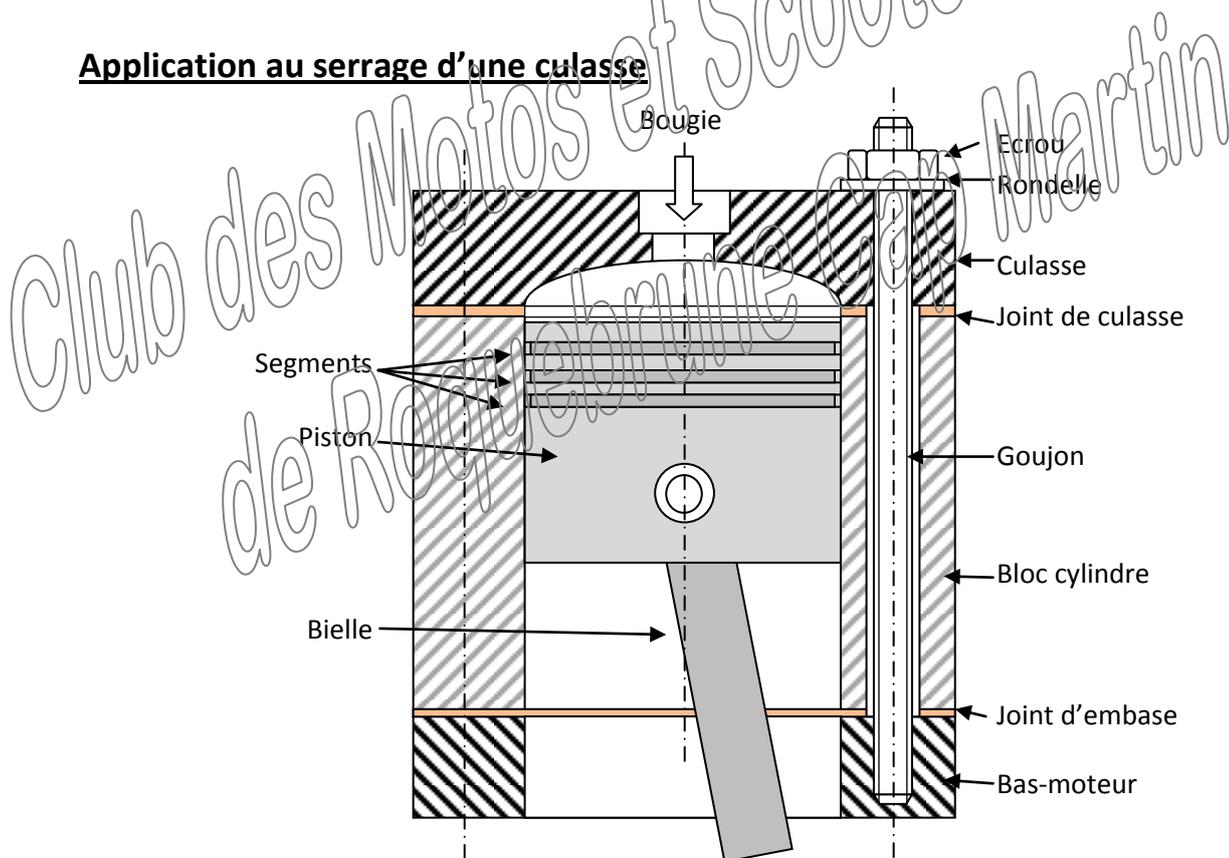
Rondelles

Une rondelle sous la tête de vis ou sous l'écrou aide à bien répartir la pression de serrage sur l'assemblage (par exemple la culasse). Dans l'association vis-rondelle, la rondelle doit être d'une dureté au moins égale à celle de la vis. En clair, la rondelle doit être plus dure que la vis. La rondelle sous la tête d'une vis ne doit pas tourner pendant le serrage de la vis.

Dans la culasse de la Honda CB750, les écrous des goujons sont équipés de rondelles particulières, épaisses, avec un chanfrein sur le diamètre extérieur, d'un seul côté. Ce chanfrein doit être placé contre l'écrou, de telle sorte que la surface de contact entre rondelle et culasse soit maximale.



Application au serrage d'une culasse



Quand on serre l'écrou, voici ce qui se passe :

- On écrase la rondelle, la culasse, le joint de culasse, le bloc-cylindre, le joint d'embase ;

- On tend le goujon, qui s'allonge un peu ;
- On vainc les frottements entre écrou et rondelle, filets de l'écrou et du goujon.

Il faut serrer l'écrou juste ce qu'il faut.

- Si on ne serre pas assez, le joint de culasse ne sera pas assez comprimé, et sous l'effet de la compression dans la chambre de compression, laissera fuir des gaz. Le joint d'embase est moins critique, puisqu'il ne subit que la pression entre bloc et bas-moteur, qui est bien plus faible que celle dans la chambre de compression. Il y a également risque de desserrage de l'écrou.
- Si on serre trop, on sortira par le haut de la zone élastique du goujon, avec risque de rupture.

Utilisation d'une clé dynamométrique

Pour serrer les écrous au bon couple, il faut une clé dynamométrique en bon état. Il existe :

- des clefs très simples, avec un index qui se déplace devant une graduation en arc de cercle ;



Figure 10

- des clefs à déclenchement, où on serre jusqu'à ce que le mécanisme de la clef fasse entendre un *clac* caractéristique ; en voici deux :



Figure 11



Figure 12

Mode d'emploi un peu plus loin...

- des clefs à affichage électronique, très précises, avec des fonctions annexes (comptage des vis serrées par exemple).

Processus de serrage

Pour ces opérations, suivre les recommandations du fabricant, ou celles d'une revue technique. Si on n'en dispose pas, utiliser le tableau des couples proposé en page 5.

Mettre en place la pièce à fixer. Positionner les écrous avec leur rondelle sur les vis (ou goujons), et les serrer à la main le plus possible. Passer au serrage à la clef. Par exemple, si les goujons ont comme diamètre nominal 8, et que les pièces sont propres et sèches, il faut serrer à 27 mN ou 2,7 mkg. Serrer en deux ou trois étapes : une première à 10 mN, une deuxième à 20, et la finale à 27 mN.

Ce qui est important dans une culasse, c'est de serrer toutes les vis avec le même couple, même si ce couple n'est pas exactement celui spécifié. Il faut aussi suivre un ordre de serrage. On se fiera aux recommandations du fabricant du moteur. Pour un monocylindre à quatre ou cinq écrous, un serrage en croix ou en étoile convient parfaitement.

Vérification d'une clef dynamométrique

Vérifier une clé dynamométrique est très facile. Il faut pour cela revenir à la définition du couple, et appliquer un couple connu sur le manche de la clé. Voici comment :

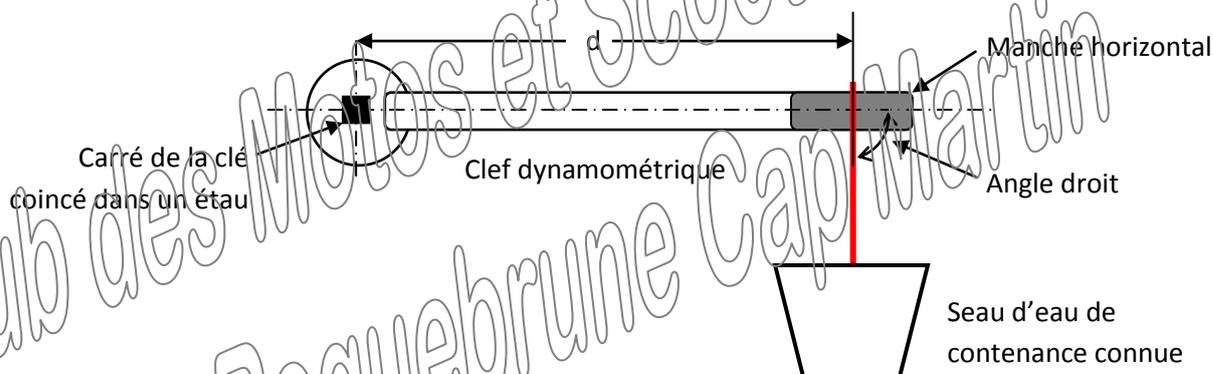


Figure 13

Si $d = 80 \text{ cm} = 0,8 \text{ m}$, et si le seau d'eau pèse $3 \text{ kg} = 30 \text{ N}$, alors le couple exercé sur la clé est :

$$0,8 \times 30 = 2,4 \text{ Nm.}$$

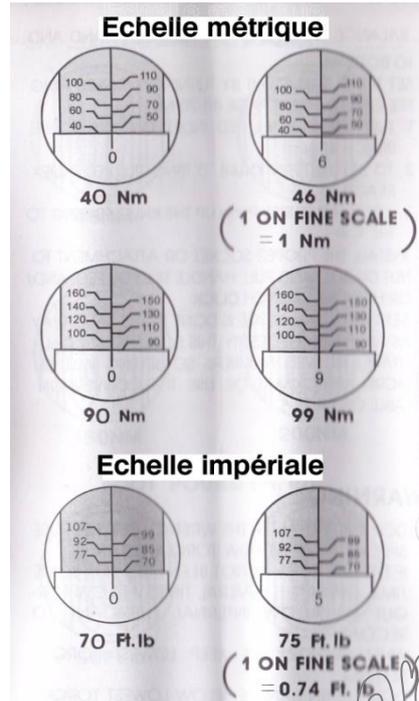
La distance d se mesure au mètre ruban, et le poids du seau d'eau se mesure sur un pèse-personne, ou en le remplissant d'eau avec des bouteilles de 1 litre. Ici, la clef réglée à 2,4 Nm doit déclencher à peu près à cette valeur. Exemple :



Figure 14

Attention : pour les clés à déclenchement, toujours dévisser la vis de réglage à fond avant de les ranger. Il ne faut pas laisser le ressort interne bandé au repos.

Mode de réglage d'une clé à déclenchement :



Attention
 1. Ne pas essayer de tourner la poignée quand elle est bloquée
 2. Ne pas tourner la poignée plus d'un tour en dessous du bas de l'échelle ou au dessus du haut de l'échelle.

Figure 15

Cas d'une culasse de moteur à 4 temps

Certains moteurs japonais utilisent les conduits des goujons dans le bloc comme tubes pour monter l'huile dans la culasse.

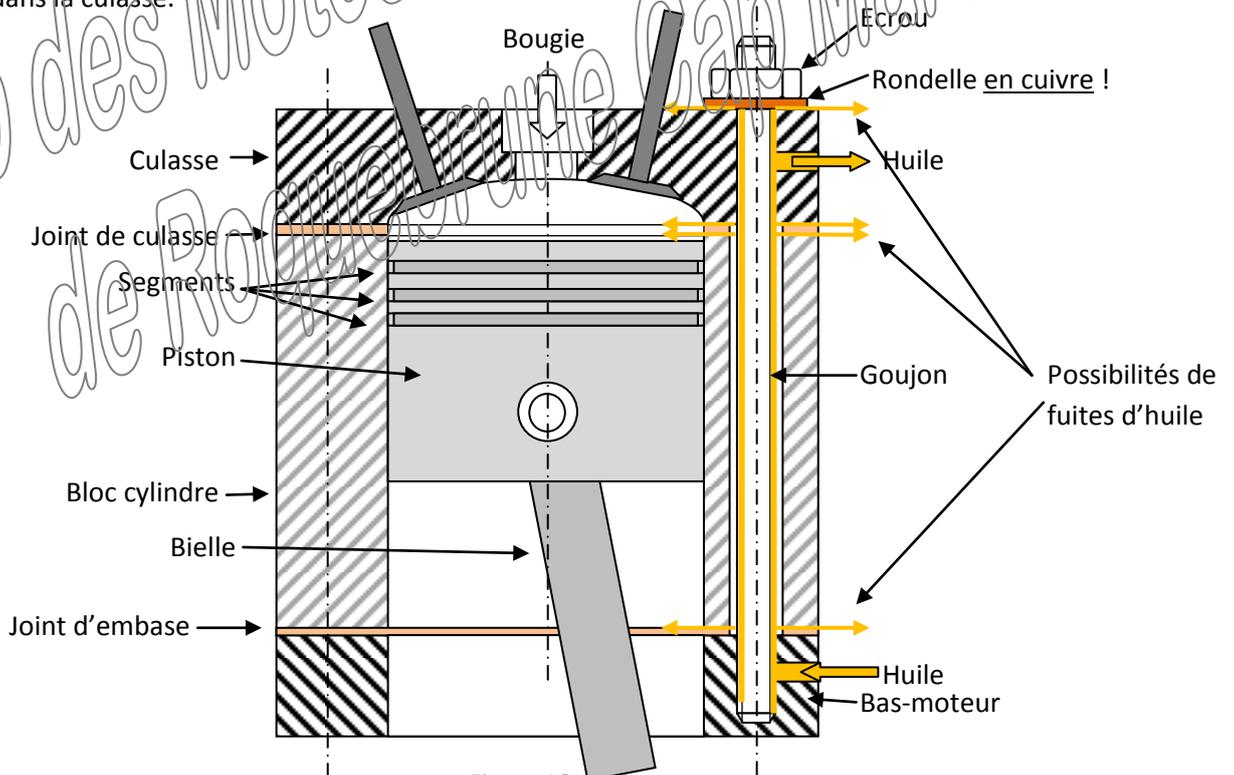


Figure 16

Si les écrous de culasse ne sont pas bien serrés, il y a risque de fuite d'huile. Même chose si le joint de culasse n'est pas adapté. L'huile peut être aspirée depuis le conduit vertical vers la chambre de combustion pendant la phase d'admission. Et ça fume ! Les fuites vers l'extérieur sont très fréquentes aussi.

Pour éviter ça, on peut appliquer une très fine couche de pâte à joint haute température sur le joint de culasse, autour des trous de passage des goujons, ainsi que sur les rondelles sous les écrous. Ces rondelles pourront avantageusement être en cuivre et non en acier.

Ci-contre, le joint de culasse d'une Kawasaki 900Z1 de 1973.



Figure 17

Bibliographie et sites Internet

Mémento de Technologie Automobile Bosch. ISBN 3-934584-19-5.

Les pages « Lexique des méthodes » de la Revue Moto Technique.

Mémento de visserie-boulonnerie : <http://technocalcul.celeonet.fr/FR/index.html>.

Site Facom sur le vissage : <http://www.facom.com/fr/services/serrage/guide.php>

Et de nombreux autres sites en français et en d'autres langues.

JP Corbier

Mars 2011