



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

Université Abbes LAGHROUR Khenchela

Faculté des Sciences et Technologie

Département de Génie Mécanique

Assemblage des Matériaux

Pour les étudiants de 3^{ème} Année licence

Spécialité : Génie des Matériaux

Dr. Khelifa MANSOURI

Année universitaire 2021/2022

Avant-propos

Le polycopié consiste à donner un aperçu sur les techniques utilisées pour l'assemblage des différentes classes de matériaux (métaux, polymères et céramiques). Il s'agit d'un support de cours de la matière « **Assemblage des matériaux** » destiné aux étudiants de la 3^{ème} année licence académique, semestre 5 (S5), spécialité **Génie des matériaux** (GM) du domaine des Sciences et Technologie (ST). Le contenu de ce document est inspiré du canevas de la formation et des sources citées dans la liste des références bibliographiques, nous avons abordé :

- 1/ Le premier chapitre est consacré aux différentes techniques utilisées dans l'assemblage des métaux (assemblages filetés, les éléments d'obstacle, par adhérence, les rivures, la soudure et l'assemblage des pièces par montage à force).
- 2/ Dans le deuxième chapitre, on a fait une présentation des différentes techniques de l'assemblage des polymères comme : le collage, le soudage, l'encliquetage, Bande «Velcro» et le vissage.
- 3/ Le troisième et dernier chapitre est consacré aux assemblages des céramiques, les procédés utilisés dans cette classe de matériau sont : Assemblages céramique-céramique par soudage-diffusion, l'assemblage par brasage, l'adhérence et le brasage avec brasure métallique.

Tables des matières

Chapitre I Assemblage des métaux

I.1 Introduction.....	1
I.2 Les assemblages démontables.....	1
I.2.1 Les assemblages filetés	1
I.2.1.1 Généralité	1
I.2.1.2 Définitions	1
I.2.1.3 Réalisation du filetage.....	2
I.2.1.4 Caractéristiques des éléments filetés.....	2
I.2.1.5 Les éléments filetés.....	6
I.2.1.6 Résistance des matériaux des filets.....	10
I.2.2 Eléments d'obstacle	13
I.2.2.1 Clavettes.....	13
I.2.2.2 Cannelures	16
I.2.2.3 Anneaux élastiques.....	16
I.2.2.4 Goupilles.....	19
I.2.2.5 Adhérence	22
I.2.2.6 Les ressorts.....	23
I.3 Assemblages non démontables	26
I.3.1 Rivures.....	26
I.3.1.1 Types de rivetages.....	27
I.3.1.2 Rivetage massif.....	27
I.3.1.3 Différents rivets à tige cylindrique pleine.....	30
I.3.1.4 Détermination de la longueur des rivets.....	31
I.3.1.5 Détermination du diamètre des rivets.....	32
I.3.1.6 Calcul des rivures.....	33
I.3.2 La soudure.....	35
I.3.2.1 Définition de la soudabilité	35
I.3.2.2 La zone affectée thermiquement.	36
I.3.2.3 Les défauts de soudure	36
I.3.2.4 Différentes techniques de soudures.....	37
I.3.2.5 Types de soudures	39
I.3.2.6 Calcul des soudures.....	40
I.3.3 Assemblage des pièces par montage à force	45
I.3.3.1 Montage par échauffement du moyeu.....	46
I.3.3.2 Montage par refroidissement de l'arbre	46

Chapitre II Assemblage des polymères

II.1 Introduction	47
II.2. Collage.....	47
II.2.1 Avantages du collage	47
II.2.2 Limitations du collage.....	48
II.2.3 Principaux adhésifs utilisés dans les assemblages.....	48
II.3 Le soudage	49
II.3.1 Soudage sans apport	50
II.3.1.1 Soudage thermique	50
II.3.2 Soudage avec apport	52

II.4 Encliquetage.....	52
II.5 Bande « Velcro »	52
II.9 Vissage.....	52

Chapitre III Assemblage des céramiques

III.1 Introduction	54
III.2 Types des céramiques techniques.....	54
III.3 Propriétés des céramiques.....	55
III.4 Assemblage mécanique.....	55
III.4.1 Vissage.....	55
III.4.2 Collage et enrobage	55
III.4.1 Assemblages par soudage-diffusion.....	56
III.4.2 Assemblages par brasage.....	57
III.4.3 Adhérence et compatibilité.....	57
III.4.4 Brasage avec brasure métallique.....	58
Références bibliographiques.....	59

Chapitre I Assemblage des métaux

I.1 Introduction

Les mécanismes assemblés comportent des pièces liées les une avec les autres. Certaines de ces pièces sont mobiles, elles doivent être assemblées aux d'autres pièces fixes dans le but de les guider en translation ou limiter leur déplacement. Des besoins de réparation, de montage, de transport ou de fabrication imposent les constructeurs à supposer en plusieurs pièces certains mécanismes mobiles ou fixes. Les assemblages utilisés pour réunir les pièces en construction mécanique sont très variés; plusieurs facteurs influent sur le choix de la technique d'assemblage:

- la nature de la liaison,
- la forme des pièces à assembler,
- les moyens utilisés pour réunir les pièces,
- la grandeur et le sens des efforts à transmettre.

I.2 Les assemblages démontables

I.2.1 Les assemblages filetés

I.2.1.1 Généralité

Dans la construction mécanique, l'assemblage par filetage est très fréquent. Les assemblages filetés sont assurés par une liaison rigide démontable. Les éléments filetés (ou taraudés) assurent deux fonctions:

➤ **Garantir une charge de pression**

Immobiliser les pièces assemblées les unes par rapport aux autres.

➤ **Transformer un mouvement**

Le mouvement de rotation est transformé en translation (ou l'inverse).

I.2.1.2 Définitions

- Filetage

Le filetage peut être conçu sur une tige cylindrique dont on réalise une **rainure hélicoïdale** (ou plusieurs).

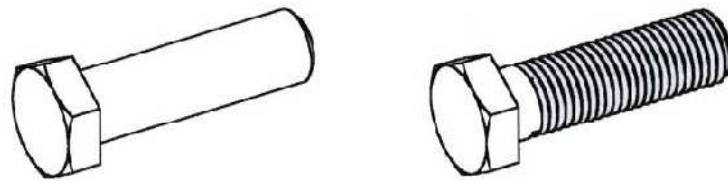


Fig I.1 Filetage

- Taraudage

Le taraudage peut être conçu à partir d'un moyeu dont on réalise une **rainures hélicoïdales** (ou plusieurs).



Fig I.2 Taraudage

I.2.1.3 Réalisation du filetage

Dans le cas des vis, la technique la plus utilisée est le roulage. Le filetage peut être obtenu sur machine par usinage.

Pour réaliser un filetage manuellement on utilise une filière, alors que pour le taraudage on utilise un taraud.

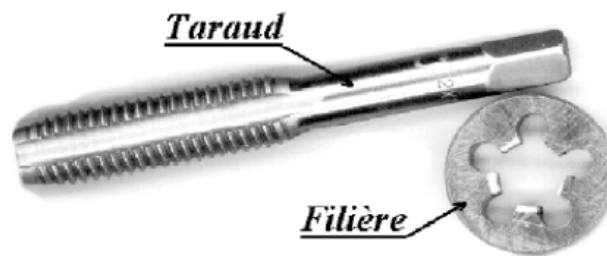


Fig I.3 Réalisation des filetages et taraudages manuellement

I.2.1.4 Caractéristiques des éléments filetés

Pour qu'une vis et un écrou puissent être assemblés, il faut qu'ils possèdent les mêmes caractéristiques:

- les diamètres ;
- les pas ;
- les profils du filet ;
- les nombres de filets ;
- le sens des hélices.

a) Le diamètre nominal

Le diamètre nominal est mesuré sur les sommets des filets de la vis, alors qu'il est mesuré sur le fond de filet des écrous.

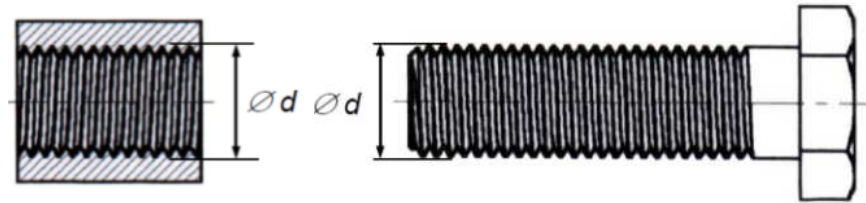


Fig I.4 Diamètre nominal

b) Les types de filets

- Profil Triangulaire « M »

C'est le profil le plus répandu et le plus courant du commerce (les vis d'assemblage).

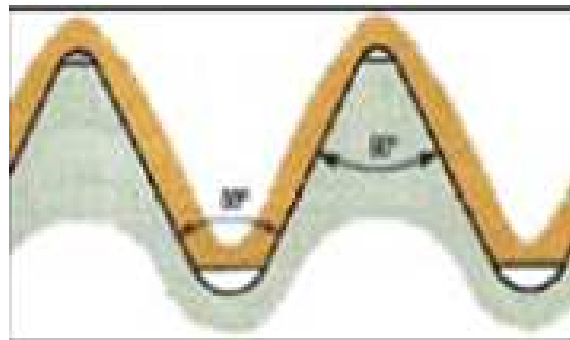


Fig I.5 Profil triangulaire

- Profil trapézoïdale « Tr »

Il est utilisé dans les transmissions des mouvements avec des efforts importants.

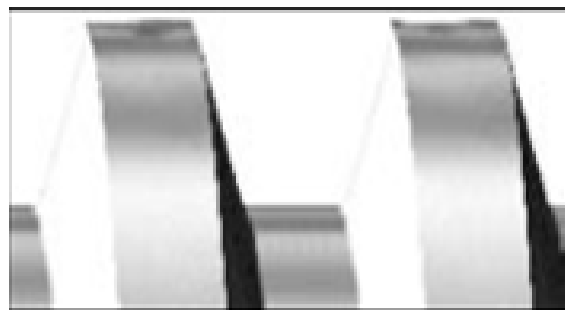


Fig I.6 Profil trapézoïdale

- Profil conique « Rc » ou cylindrique « Rp »

Ce type de profil est utilisé dans les assemblages qui nécessitent une bonne étanchéité comme les robinetteries et la tuyauterie.

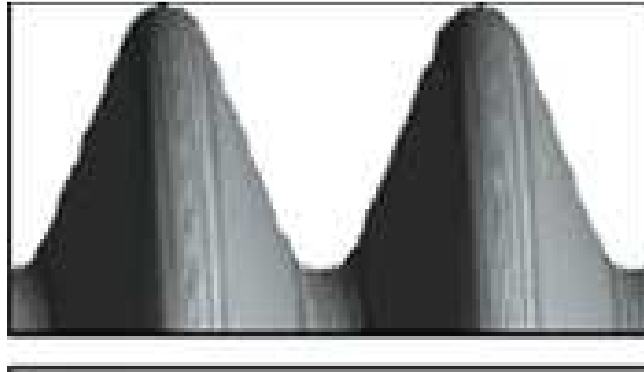


Fig I.7 Profil conique

- Profil dissymétrique ou à dents de scie

Ces profils sont utilisés dans les transmissions des charges importantes dans une seule direction.

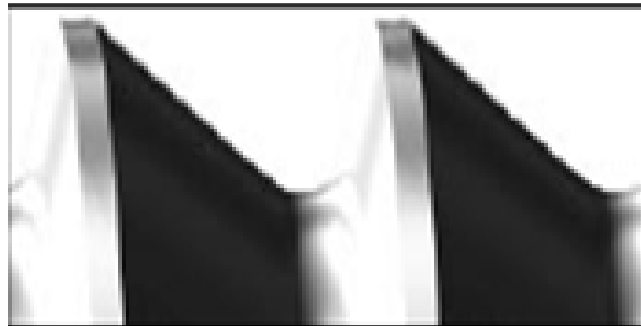


Fig I.8 Profil dissymétrique

- Profil rond « Rd »

Les profils ronds supportent des efforts importants avec des chocs.

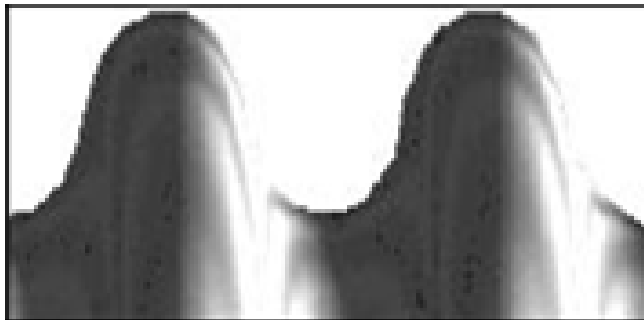


Fig I.9 Profil rond

c) Le pas

Le pas est la valeur du déplacement résultante d'un tour de vissage. C'est aussi la dimension axiale entre deux filets (même hélicoïde).

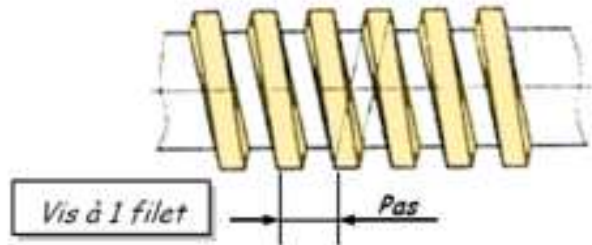


Fig I.10 Pas du filet

d) Le sens de l'hélice

Lorsque le filetage monte vers la droite on obtient un filetage à droite, par contre lorsqu'il monte vers la gauche on obtient un filetage à gauche. Dans le cas des vis à droite, le vissage est effectué en tournant la vis dans la direction des aiguilles.

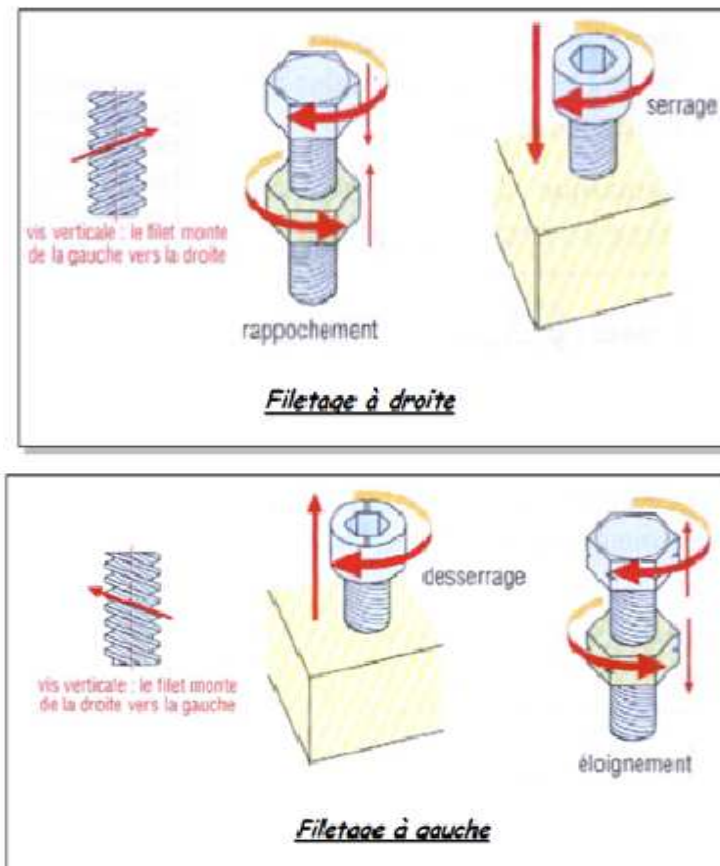


Fig I.11 Sens de l'hélice

e) Le nombre de filets

Il existe des vis qui ont le nombre d'hélice supérieur à un (deux ou trois).

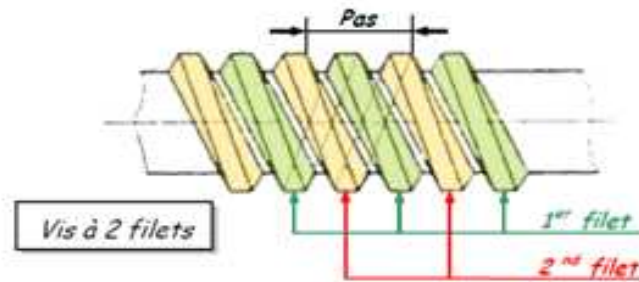


Fig I.12 Vis à deux filets

I.2.1.5 Les éléments filetés

a) Vis pour l'assemblage

Tige filetée associée à une tête de forme adaptée à un type d'outil.

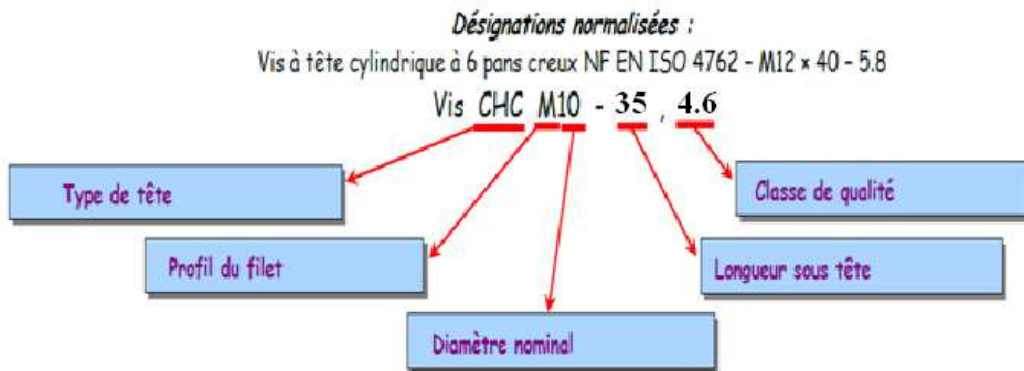
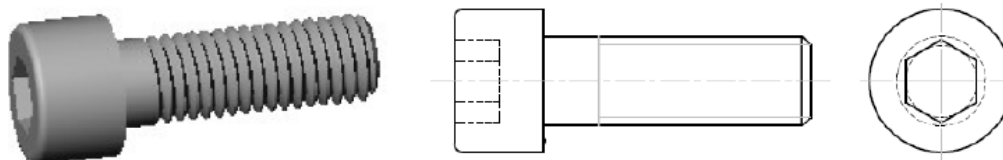






Fig I.13 Désignation d'une vis

- Types de tête

REPRESENTATIONS	SYMBOLES			DESIGNATION Ancienne désignation Nouvelle désignation Outils nécessaires à l'utilisation d'une telle vis
	Forme générale	Forme complémentaire	Forme outil manoeuvre	
 	H hexagonale			Vis H M10 - 50 , 6.8 longueur filetée : 30 mm Vis à tête hexagonale NF EN ISO 4014 - M10 x 50 - 6.8 (ISO 4017 si entièrement filetée)
 	Q carrée			Vis Q M16 - 90 , 12.9 entièrement filetée

	C cylindrique	HC Hexagonale creux	Vis CHC M12 - 40 , 5.8 Vis à tête cylindrique à 6 pans creux NF EN ISO 4762 - M12 x 40 - 5.8	
	C cylindrique	X 6 lobes	Vis CX M10 - 60 , 5.8 Vis à tête cylindrique basse, 6 lobes internes NF EN ISO 14580 - M10 x 60 - 5.8	
	C Cylindrique	S Fendue	Vis CS M8 - 50 , 5.8 Vis à tête cylindrique fendue NF EN ISO 1207 - M8 x 50 - 5.8	
	C Cylindrique	L Large	S Fendue	Vis CLS M12 - 40 , 5.8 Vis à tête cylindrique large fendue NF EN ISO 1580 - M12 x 40 - 5.8
	F Fraisée	B Bombée	S Fendue	Vis FBS M4 - 20 , 4.8 Vis à tête fraisée bombée fendue NF EN ISO 2010 - M4 x 20 - 4.8
	F Fraisée	B Bombée	H Cruciforme	Vis FBH M4 - 40 , 6.8 Vis à tête fraisée bombée à empreinte cruciforme type H NF EN ISO 7047 - M4 x 40 - 6.8
	F Fraisée	S Fendue		Vis FS M6 - 30 , 5.8 Vis à tête fraisée fendue NF EN ISO 2009 - M6 x 30 - 5.8
	F Fraisée	Z Cruciforme		Vis FZ M5 - 15 , 4.8 Vis à tête fraisée à empreinte cruciforme type H NF EN ISO 7046-1 - M5 x 15 - 4.8
	F Fraisée	HC Hexagonale creux		Vis FHC M8 - 25 , 8.8 Vis à tête fraisée à 6 pans creux NF EN ISO 10642 - M8 x 25 - 8.8

- Longueur sous tête

La longueur sous tête "l" peut être partiellement ou entièrement filetée,



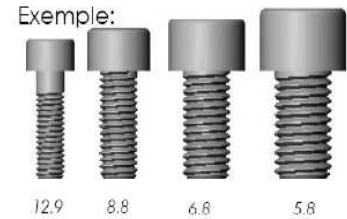
Fig I.14 Longueur sous tête

- Classe de qualité

La classe de qualité décrit la résistance à la traction, on la trouve parfois marquée sur la tête de la vis.

Tableau I.1 Classe de qualité

marquage des têtes	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
classes de résistance	3.6	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	9.8	10.9	12.9
limite élastique R_e , N/mm ² ou MPa	180	240	320	300	400	480	640	720	900	1 080
limite à la rupture R_t , N/mm ² ou MPa	330	400	420	500	520	600	800	900	1 040	1 220



Exemple : Classe 4.6

1er chiffre $\times 100 = 4 \times 100 = 400 \text{ MPa}$ \longrightarrow résistance à la rupture en traction.

2ème chiffre \times 1er chiffre $\times 10 = 6 \times 4 \times 10 = 240 \text{ Mpa}$ \longrightarrow résistance élastique en traction.

b) Ecrus

On appelle écrou une pièce taraudée ayant une tête de forme adaptée à un type de dispositif de manœuvre qui permet le serrage.

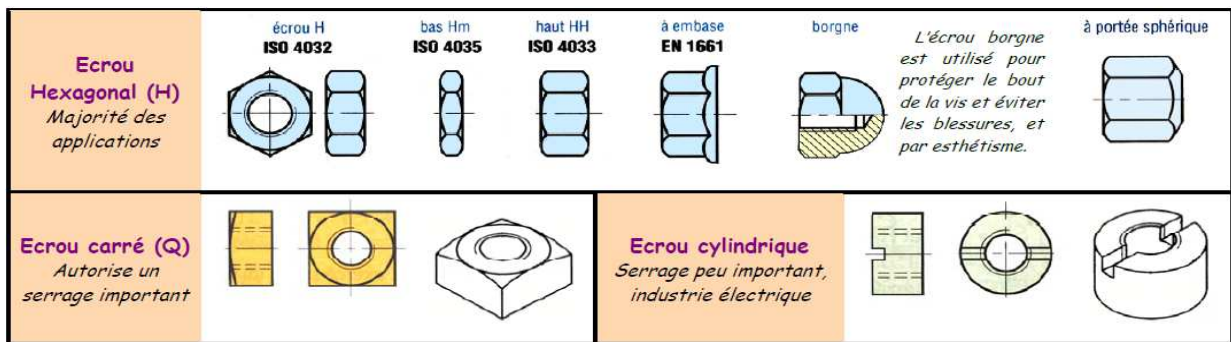


Fig I.15 Différents types d'écrous

c) Boulons

Il est constitué d'un écrou et d'une vis ayant des caractéristiques identiques.



Fig I.16 Boulon

d) Les rondelles

- Les rondelles d'appui

Le but de l'utilisation des rondelles d'appui est d'agrandir la surface de contact et aussi elles diminuent la pression de serrage.

- Les rondelles frein

Les rondelles freins sont utilisées pour éviter le desserrage de l'écrou ou de la vis.

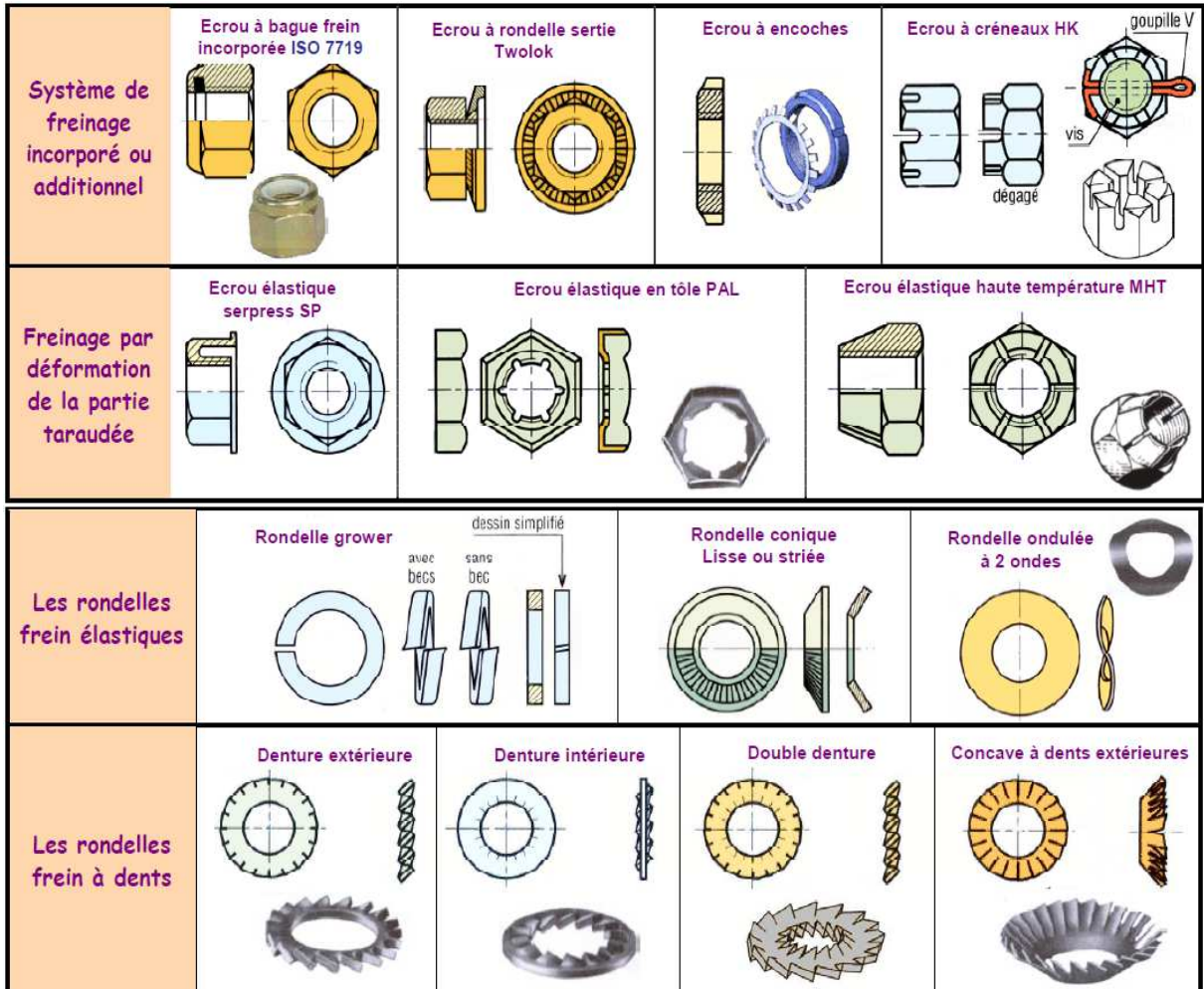


Fig I.17 Rondelles frein

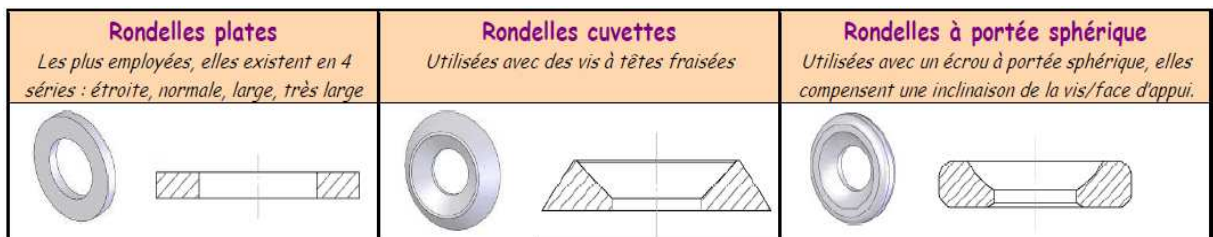


Fig I.18 Rondelles plate, cuvettes et à portée sphérique

e) Goujons

Un goujon est une tige filetée sur ces deux extrémités. Ils sont utilisés pour réunir des pièces ne pouvant être traversées par des vis.

Les goujons sont aussi utilisés dans le cas où le desserrage trop fréquent des vis peut conduire à la dégradation des filets du moyeu taraudé.

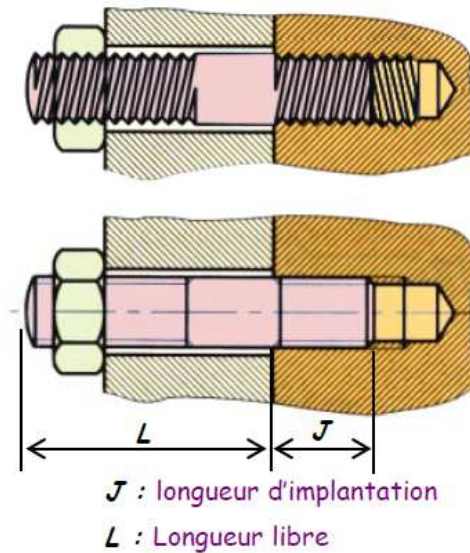
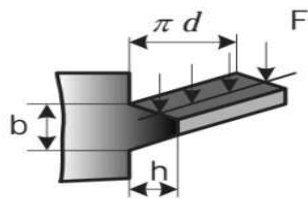


Fig I.19 Goujon

I.2.1.6 Résistance des matériaux des filets

a) Résistance de filet de vis



Contrainte cisaillement

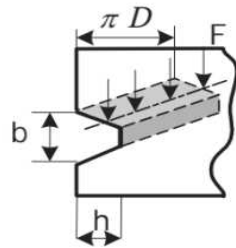
$$\tau = \frac{F}{k \pi d b z} \leq [\tau]$$

Contrainte normale

$$\sigma = \frac{3 F h}{k \pi d b^2 z} \leq [\sigma]$$

F	force axiale	en N
d	diamètre de vis	en mm
b	largeur de filet de vis	en mm
h	hauteur de filet de vis	en mm
k	coefficient de sécurité	
$[\sigma]$, $[\tau]$	contrainte normale et contrainte cisaillement	en N/mm^2

b) Résistance de filet des écrous



Contrainte cisaillement

$$\tau = \frac{F}{k\pi D b z} \leq [\tau]$$

Contrainte normale

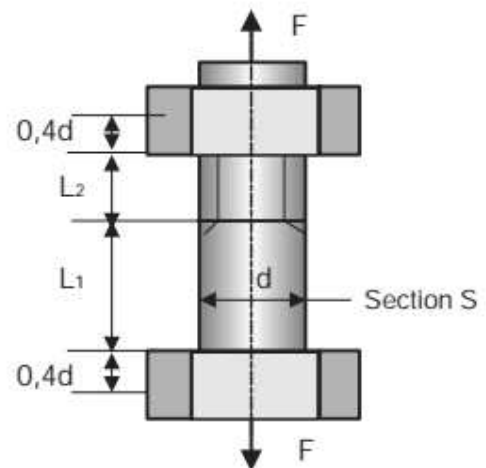
$$\sigma = \frac{3 F h}{k\pi D b^2 z} \leq [\sigma]$$

F	force axiale	en N
d	diamètre de vis	en mm
b	largeur de filet de vis	en mm
h	hauteur de filet de vis	en mm
k	coefficient sécurité	
[σ], [τ]	contrainte normale et contrainte cisaillement	en N/mm ²

c) Rigidité du boulon K_B

Le calcul de la rigidité du boulon prend en compte :

- la déformation de l'écrou ;
- la déformation de la tête de la vis;



Définition de rigidité k $K = F_0 / \Delta L$

Rigidité du boulon $K_B \frac{1}{K_B} = \frac{L_1 + 0.4d}{E.A} + \frac{L_2 + 0.4d}{E.A^*}$

avec :

E module d'élasticité longitudinale du boulon ;

A aire du fût de section S ;

A^* aire équivalente de section S ;

d diamètre nominal ;

F_0 précharge ;

d) Charge appliquée sur les assemblages boulonnés

Lorsque des boulons sont montés (le serrage), une charge statique de montage (appelée une précharge) est appliquée. Cette précharge dépend :

- du couple de serrage M_c ;
- du diamètre nominal d de la vis ;
- du coefficient de frottement sous tête (entre l'écrou et la vis).

- Couple de serrage

$$M_c = F_0 \frac{d_2}{2} \tan(\alpha + \varphi) + F_0 K_f \frac{d_m}{2} \quad (\text{I.1})$$

F_0 : précharge ;

d_m : diamètre moyen de la portée sous tête ;

$F_0 K_f \frac{d_m}{2}$: Frottement au niveau de la tête ;

$\tan \varphi = \frac{K_f}{\cos \beta}$: Angle d'inclinaison des flancs de filets ;

$\alpha = p$: est l'angle d'hélice ;

p : pas du filetage ;

d_2 : diamètre sur flanc.

- Précharge F_0

$$F_0 = \frac{M_c}{0.161P + K_f \left(0.583d_2 + \frac{d_m}{2} \right)} \quad (\text{I.2})$$

Avec M_c moment du couple de serrage ;

d_2 diamètre sur flanc ;

d_m diamètre moyen des portées sous tête ;

K_f coefficient de frottement ;

p pas du filetage ;

- Précharge maximum

La précharge maximum est défini:

$$F_0 \text{ max} = \gamma \cdot F \text{ min} \quad (\text{I.3})$$

Avec : γ coefficient d'incertitude sur serrage

Tableau I.2 Coefficient d'incertitude sur serrage γ

	Moyen de serrage	Coefficient d'incertitude sur serrage γ
1	Clé dynamique	1,5
2	Visseuse rotative avec étalonnage sur montage	1,5
3	Clé à choc avec adaptation de rigidité et étalonnage périodique sur le montage	2,5
4	Clé à main	4
5	Clé à choc sans étalonnage	4

- Serrage minimum

Pour calculer le serrage minimum, on utilise la formule ci – dessous :

$$F_{0\min} = F_e + \frac{T_e}{\tan \varphi} \quad (\text{I.4})$$

Avec :

F_e est l'effort de traction ;

T_e est l'effort tangentiel dû à l'effort transversal sur l'assemblage ;

$\tan \varphi$ est un facteur de frottement qui existe entre les pièces assemblées.

I.2.2 Eléments d'obstacle

I.2.2.1 Clavettes

La méthode la plus utilisée pour assembler un moyeu avec un arbre est l'assemblage par clavette.

Pour placé une clavette dans un mécanisme, il faut monter la moitié de cette clavette dans l'arbre et l'autre moitié dans le moyeu.

a. Fonction

Cinématique : une clavette supprime la rotation entre l'arbre et le moyeu.

Statique : une clavette transmet un moment entre l'arbre et le moyeu.

b. Principe de réalisation

L'usinage d'une rainure (parallèles à l'axe) dans l'arbre et d'une rainure débouchante dans le moyeu (pour des impératifs de fabrication) est nécessaire pour l'installation d'une clavette.

On utilise une « fraise – disque » pour usiner une rainure sur l'arbre. Ce dernier procédé conduit à des concentrations de contrainte en flexion plus faibles. La rainure débouchante du moyeu est obtenue par mortaisage où l'alésage rainuré est réalisé par brochage.

c. Remarque

Le moyeu n'est lié qu'en rotation, alors il peut glisser sur l'arbre à cause de la présence du jeu entre la clavette et la rainure dans le moyeu.

d. Clavettes Parallèles

Les clavettes parallèles sont utilisées généralement pour la réalisation des clavetages courts, dont la longueur L est déterminé par : $L \leq 1.5 \times d$.

Où d est le diamètre de l'arbre.

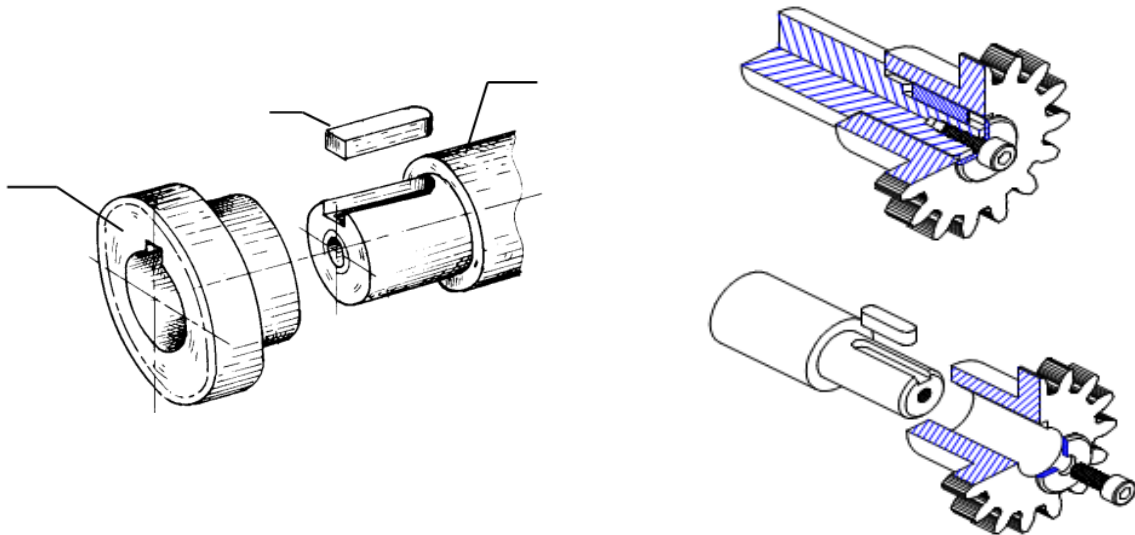


Fig I.20 Principe du clavetage

Il existe 3 formes de clavettes parallèles.

Tableau I.3 Forme de clavettes parallèles

Forme	Exemple de désignation	Dessin
A	Clavette parallèle, forme A, 5x5x25	
B	Clavette parallèle, forme B, 8x7x30	
C	Clavette parallèle, forme C, 10x8x40	

Tableau I.4 Dimensions des clavettes avec l'arbre

clavette $b \times h$	diamètre arbre d		profondeur rainure	
	$>$	\leq	arbre t_1	moyeu t_2
2 x 2	6	8	1,2	1
3 x 3	8	10	1,8	1,4
4 x 4	10	12	2,5	1,8
5 x 5	12	17	3	2,3
6 x 6	17	22	3,5	2,8
8 x 7	22	30	4	3,3
10 x 8	30	38	5	3,3
12 x 8	38	44	5	3,3
14 x 9	44	50	5,5	3,8
16 x 10	50	58	6	4,3
18 x 11	58	65	7	4,4
20 x 12	65	75	7,5	4,9
22 x 14	75	85	9	5,4
25 x 14	85	95	9	5,4
28 x 16	95	110	10	6,4
32 x 18	110	130	11	7,4
36 x 20	130	150	12	8,4
40 x 22	150	170	13	9,4
45 x 25	170	200	15	10,4
50 x 28	200	230	17	11,4
56 x 32	230	260	20	12,4
63 x 32	260	290	20	12,4
70 x 36	290	330	22	14,4
80 x 40	330	380	25	15,4
90 x 45	380	440	28	17,4
100 x 50	440	500	31	19,5

I.2.2.2 Cannelures

Les arbres cannelés sont utilisés dans le cas où le couple transmis est très important (ne peut pas être supporté par une clavette). Les cannelures sont d'usage fréquent dans les boîtes de vitesses (où le changement de rapport est fréquent). Au début, les cannelures ont toujours leurs côtés parallèles. Quand le nombre de dents z est limité ($6 \leq z \leq 10$) l'hyperstaticité sera réduite, le centrage du moyeu est monté sur la circonférence intérieure.

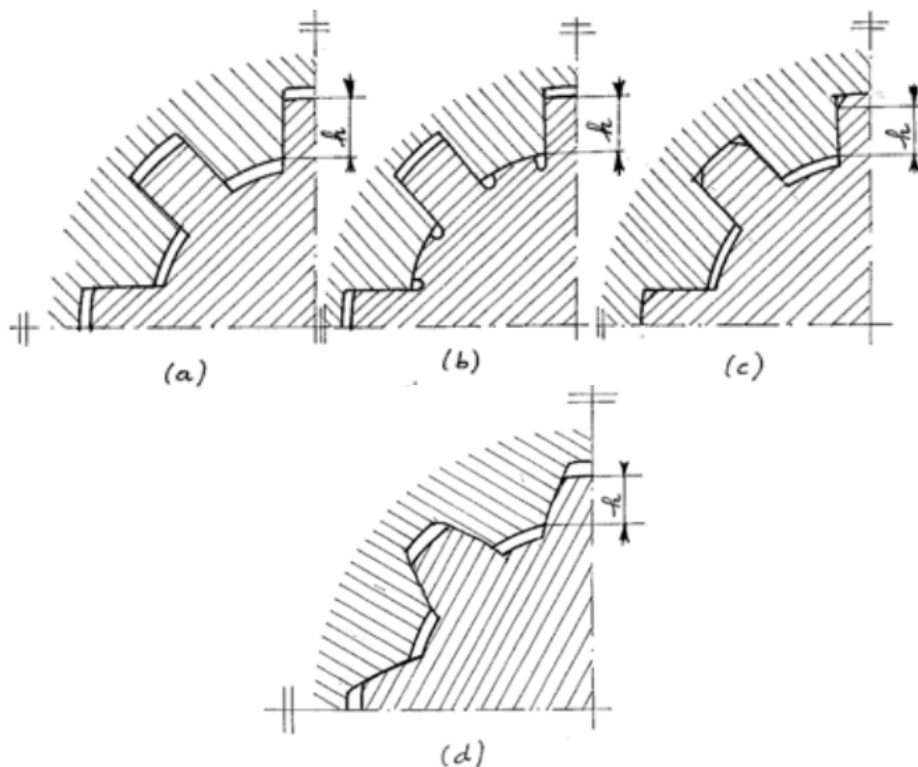


Fig I.21 Centrage du moyeu

I.2.2.3 Les segments d'arrêt (Anneaux élastiques)

Appelés aussi les circlips, les anneaux élastiques sont des pièces destinés pour immobiliser une pièce cylindrique par rapport à une autre en translation souvent sollicité par des efforts axiaux. Le but de l'utilisation des anneaux élastiques est d'établir un épaulement frontal bloquant les pièces soutenues contre lui, ces anneaux sont montés dans un logement ou sur un arbre tout en occupant un espace limitée.

Ces segments d'arrêts sont souvent normalisés, mais on peut trouver des formes propres.

a. Circlips standards

Cette famille regroupe les anneaux élastiques à montage axial, cette famille comporte trois normes :

- la norme f : contenant des segments avec une capacité de transmettre des grands efforts axiaux entre la pièce fixée et la gorge.
- la norme J : la hauteur radiale de montage est inférieure à celle de la norme f, elle forme un épaulement permettant de les utiliser là où l'espace radial est réduit.
- la norme K : cette norme possède des expansions réparties uniformément sur le périmètre extérieur, ces expansions assurent une meilleure fixation.

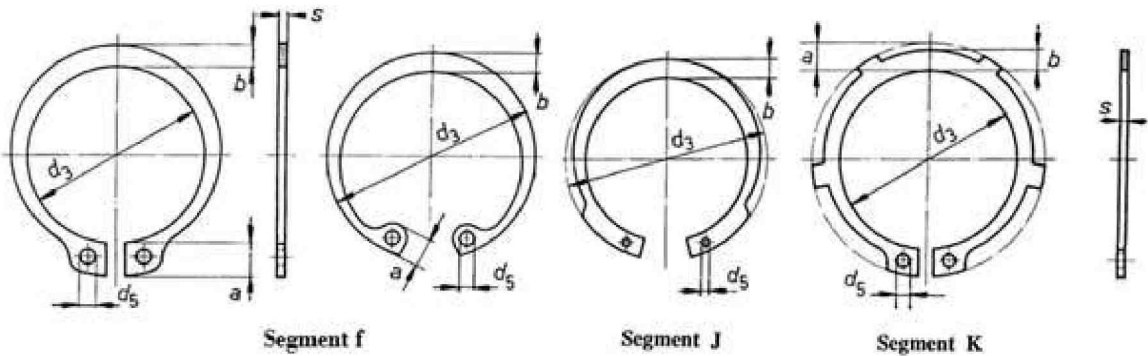


Fig I.22 Segments d'arrêt standards.

b. Circlips à verrouillage autonome

Ce type d'anneau élastique est habituellement utilisé dans le cas où les arbres sont lisses dépourvus d'une gorge (ou alésages). Il rassemble les normes suivantes:

- Les segments collier : ce type est utilisé sur les arbres lisses de faible diamètre, sans gorge.
- Les triangles de blocage : ils ont une forme transversale bombée, équipée de trois languettes renforcées qui exercent un effet de ressort. Ce segment est placé dans sans logement, il assure un blocage parfait des pièces montées sur l'arbre. La poussée des triangles sur l'arbre élimine les déplacements dans le sens opposé, dans ce cas le démontage sera impossible.
- Les anneaux dentelés : ils ont la même fonction que le type de segments précédent, mais ils disposent d'une hauteur d'installation réduite.

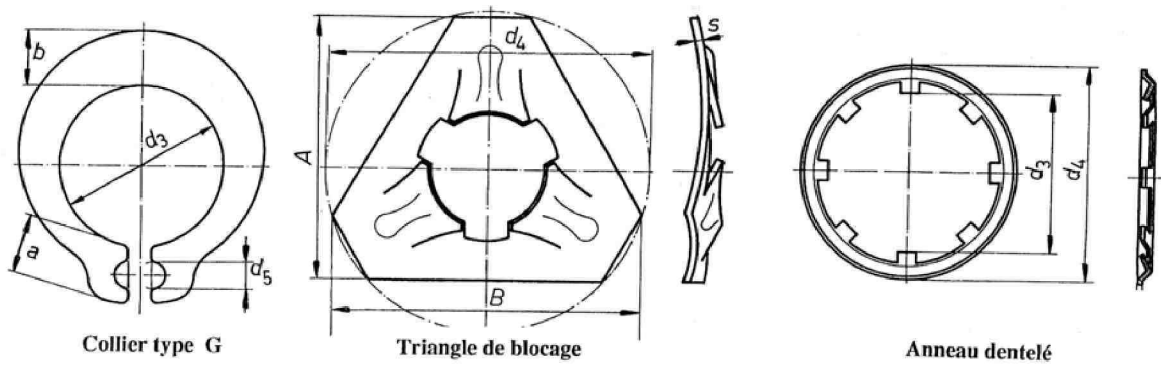


Fig I.23 Segments à verrouillage autonome.

c. Circlips compensant le jeu axial

Ces anneaux élastiques sont caractérisés par la compensation élastique du jeu axial, ce jeu est la conséquence directe de l'usinage de la gorge et aussi des pièces assemblées. La Figure ci-dessous présente les normes les plus rencontrées.

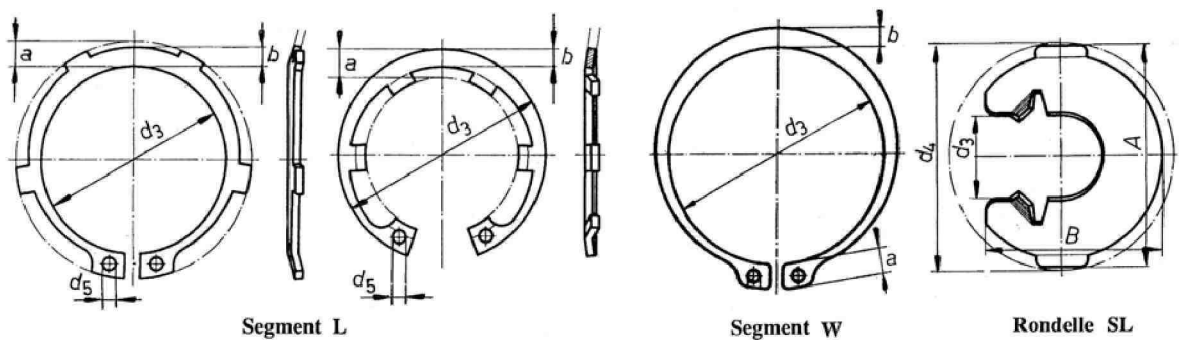


Fig I.24 Segments d'arrêt compensant le jeu axial

- Les segments de type L : ils ont la forme des segments K, mais avec une inclinaison des expansions.
- Les segments W : ils peuvent contenir des jeux plus importants par l'exécution d'un effort plus faible.
- Les rondelles SL : ces segments sont utilisés dans les assemblages à montage radial, possédants une forme avec une bosse dans un seul sens, cette bosse permet de compensé les jeux axiaux.

d. Circlips à montage radial

Les circlips à montage radial assurent deux avantages :

- le choix de la profondeur de la gorge est libre,
- le montage manuel est possible.

Cette famille comporte les types suivant:

- les segments colliers et les segments cavaliers : à cause de leurs largeurs importantes, ce type de segments ont une force de portance élevée. Ils sont utilisés dans les petits axes.
- Les segments croissant : ce sont les seuls à montage radial possédant une faible hauteur d'épaulement.
- les anneaux en deux pièces : ce sont les seuls anneaux élastiques qui résistent à la force centrifuge.

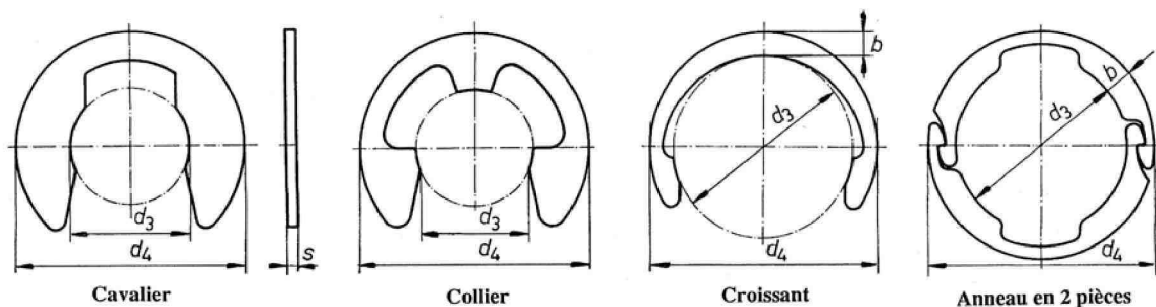


Fig I.25 Segments à montage radial

I.2.2.4 Goupilles

La goupille est fabriquée en acier trempé. La réalisation d'un perçage dans l'arbre a pour conséquence l'affaiblissement de l'arbre, spécialement en flexion. Les goupilles ne sont utilisées que dans le cas où on cherche à transmettre de faibles couples. Une goupille pleine peut être utilisée comme limiteurs de couple, elle doit être vérifiée au cisaillement.

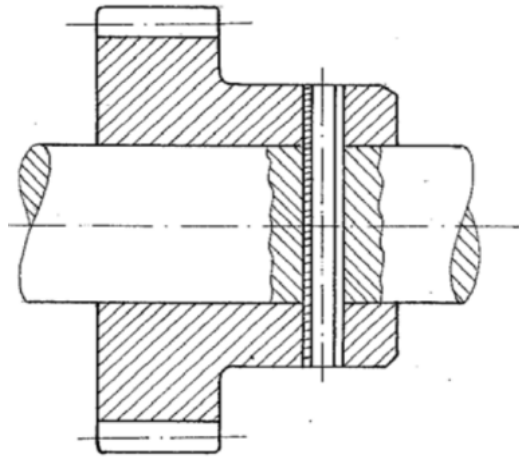


Fig I.26 Exemple d'un assemblage par goupille

a- Goupille cylindrique

La goupille doit être montée avec serrage (éliminer le jeu entre la goupille et le logement). Ce type de goupille est utilisé généralement lorsqu'on cherche une précision dans la position d'une pièce par rapport à une autre.

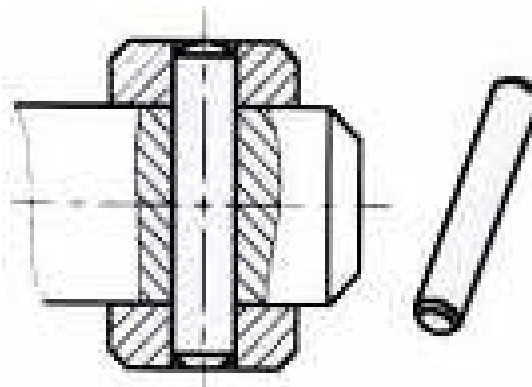


Fig I.27 Goupille cylindrique

b- Goupille élastique (Mécanindus)

Ces goupilles sont maintenues dans leurs logements par expansion élastique. Cette goupille se loge dans un trou brut beaucoup moins onéreux.

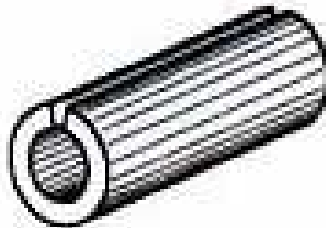


Fig I.28 Goupille élastique

c- Goupille fendue et goupille cavalier

Ces goupilles sont utilisées généralement pour le freinage des axes, écrous ...



Fig I.29 Goupille fendue et cavalière

d- Goupille cannelée

On réalisant trois fentes à 120° conduit a provoqué un léger gonflement de la matière en périmètre de la goupille assurant un maintien en position par coincement dans le trou cylindrique.

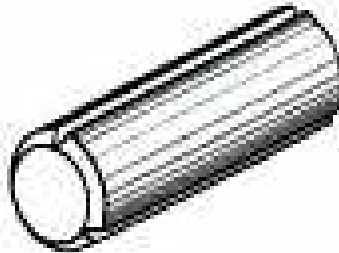


Fig I.30 Goupille cannelée

e- Calcul des goupilles

Pour le calcul des goupilles pleines, on doit vérifier seulement la contrainte de cisaillement.

Cette contrainte est donnée par:

$$\tau = \frac{F}{N.S} \leq [\tau]_{cis} \quad (I.5)$$

Où :

- S ; section cisailée ;
- N : nombre de sections cisailées ;
- F : charge appliquée.

Exercice :

Soit une goupille pleine de diamètre $d=10mm$ avec deux section cisillée, fabriquée d'un matériau dont $[\tau]_{cis} = 120 N/mm$.

- Déterminer $[F]$ la charge admissible.

On a:

$$\tau = \frac{F}{N.S} \leq [\tau]_{cis} \Rightarrow \tau = \frac{F}{N \cdot \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau]_{cis} \Rightarrow [F] \leq \frac{N \cdot \pi d^2 \cdot [\tau]_{cis}}{4}$$

$$[F] \leq \frac{2 \cdot \pi (10)^2 \cdot 120}{4} \Rightarrow [F] \leq 18840N$$

I.2.2.5 Adhérence

a) Par déformation ou pincement

L'une des deux pièces à lier assure la liaison par déformation (exemple : la fixation du siège de vélo).

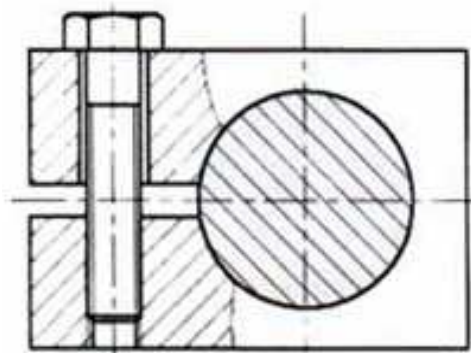


Fig I.31 Assemblage par déformation

b) Par tampons tangents

Le maintien en position des pièces à lier est assuré par rapprochement des deux tampons.

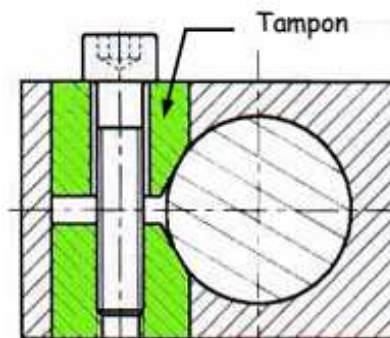


Fig I.32 Assemblage par tampons

c) Par coincement

La conicité des pièces à assembler est assurée par l'adhérence entre ces pièces liées (exemple : manche de marteau).

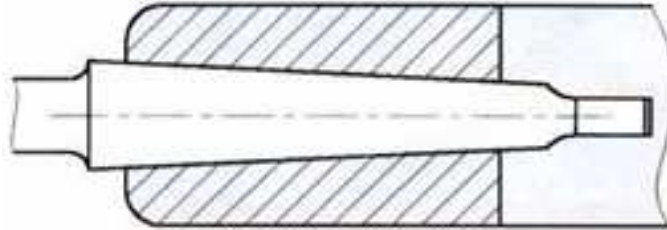


Fig I.33 Assemblage par coincement

I.2.2.6 Les ressorts

Le ressort est une pièce possédant une déformation élastique, il absorbe l'énergie résultante de la soumission d'une force appliquée, il amorti le mouvement et minimise les vibrations. Lorsque le ressort arrive à sa fin de course, il remet l'énergie emmagasinée pour revenir à sa forme initiale. Pour assurer une bonne élasticité des ressorts, on a besoin des matériaux de hautes limites élastiques comme: les aciers tréfilés durs, les aciers inoxydables, les aciers trempés à l'huile, le bronze béryllium, le titane.

Les fonctions des ressorts :

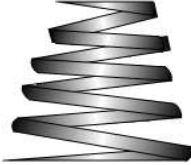
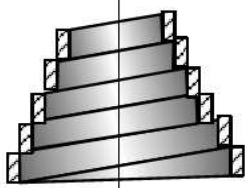
- Amortir et réduire les chocs (cas des véhicules);
- Mesurer les charges (cas des balances).
- Emmagasinement de l'énergie (cas des montres).
- Contrôler les mouvements (Ressort de soupape).

a) Types de ressort

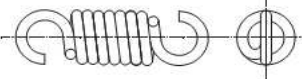

- Ressorts de compression

Se sont les plus répandus, le fil enroulé est sollicité en torsion.

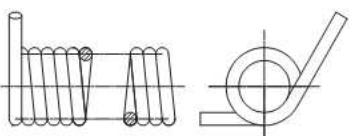
Ressort	Caractéristique	Figure
(1) Ressorts cylindriques de compression	a/ Ce type de ressort est fait pour supporter la charge de compression. b/ Le fil du ressort travaille en torsion. c/ Le ressort est souvent meulé aux deux extrémités. d/ Les spires deviennent jointives, en contact les unes avec les autres, en cas de surcharge le ressort réagit comme un solide, ce qui le protège de la rupture.	

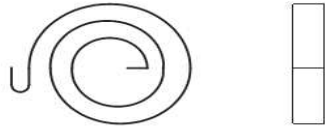
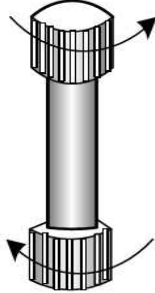
<p>(2) Ressorts coniques de compression</p>	<p>Les ressorts coniques de compression sont très peu encombrants en position comprimée.</p>	
<p>(3) Ressorts coniques à volutes</p>	<p>Les ressorts coniques à volutes sont très peu encombrants en position comprimée.</p>	

- Ressorts de traction


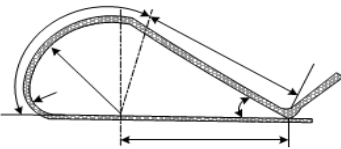
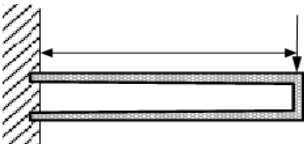
Ressort	Caractéristique	Figure
<p>(1) Ressort hélicoïdal cylindrique de traction</p>	<p>a/ Ces ressorts sont habituellement réalisés en fil rond et à spires jointives. b/ Le métal est sollicité à la torsion dans la partie active du ressort et en flexion et torsion sur une portion de l'attache. c/ Le ressort hélicoïdal de traction est fait pour supporter la charge de traction. d/ Les ressorts de traction peuvent avoir des attaches différentes.</p>	
<p>(2) Ressort hélicoïdale conique de traction</p>		

- Ressorts de torsion

Ressort	Caractéristique	Figure
<p>(1) Ressorts cylindriques de torsion</p>	<p>a/ Ce type de ressort est fait pour supporter la charge de torsion. b/ Le fil du ressort travaille en flexion. c/ Le ressort est souvent monté sur un axe.</p>	

Ressort	Caractéristique	Figure
(2) Ressorts en spirale (Ressort hélicoïdal de torsion)	<p>a/ Ce type de ressort est fait pour supporter la charge de torsion.</p> <p>b/ La matière travaille en flexion.</p> <p>c/ Le ressort a un grand diamètre et une petite hauteur.</p>	
(3) Barre de torsion	<p>a/ Les ressorts en barres de torsion sont des barres cylindriques pleines soumises à un moment suivant leur axe.</p> <p>b/ Elles sont munies, à chaque extrémité, de cannelures permettant leur ancrage.</p> <p>c/ La barre de torsion est utilisée dans les suspensions automobile.</p>	

- Ressorts de flexion

Ressort	Caractéristique	Figure
(1) Ressorts à lames	<p>a/ Une lame peut être assimilée à une poutre de section constante encastrée à une extrémité. L'autre extrémité supporte la charge. Elle est donc soumise à la flexion.</p> <p>b/ Lorsqu'un ressort est constitué de plusieurs lames en flexion, celles-ci glissent les unes sur les autres. Ce frottement absorbe de l'énergie et amorti le mouvement.</p> <p>c/ Le ressort à lame est utilisé pour les voitures (de moins en moins), les camions, les wagons.</p>	
(2) Ressort de forme en fil	<p>a/ Ce type de ressort pourrait supporter plusieurs charges.</p> <p>b/ Il est généralement fabriqué par des machines de pliage.</p>	
(3) Ressort de forme en feuillard	<p>a/ Ce type de ressort pourrait supporter plusieurs charges.</p> <p>b/ Le ressort est généralement fabriqué par des machines à multi coulisseaux ou des presses.</p>	

- Ressorts pneumatiques

Ressort	Caractéristique	Figure
<p>(1) Ressorts à gaz</p> <p>(Dans le cas la fonction entre la charge et la flèche est linéaire)</p>	<p>a/ Le ressort à gaz est constitué d'un tube de précision dans lequel se place une tige d'acier rectifiée et chromée ou nitrurée équipée d'un ensemble guide de sortie avec joint, et d'un piston, obturé en fond sur le tube par un couvercle.</p> <p>b/ Le ressort est utilisée en poussée, en équilibrage ou en amortissement.</p>	
<p>(2) Ressorts pneumatique</p> <p>(Ressort - amortisseur)</p> <p>(Dans le cas la fonction entre la charge et la flèche est linéaire)</p>	<p>a/ La forme du ressort pneumatique est libre. Nous pouvons décider les raideurs souhaitées de toutes les dimensions.</p> <p>b/ Son module d'élasticité est petit, nous pouvons obtenir une grande déformation.</p> <p>c/ Le ressort pneumatique a un très bon amortissement et supporte bien les chocs.</p> <p>d/ Le ressort pneumatique peut supporter des charges venants de différentes directions.</p>	

b) Effort supporté par ressort

La force appliquée par déplacement (dans même direction) représente la rigidité linéaire

$$k_x = \frac{F_x}{x} ; \quad k_y = \frac{F_y}{y} ; \quad k_z = \frac{F_z}{z} \quad \text{en } N/mm \quad \text{(I.6)}$$

Le moment appliqué par déplacement angulaire (dans même direction) représente la rigidité de torsion :

$$C_x = \frac{M_x}{\alpha} ; \quad C_y = \frac{M_y}{\beta} ; \quad C_z = \frac{M_z}{\gamma} \quad \text{en } Nm/rad \quad \text{(I.7)}$$

c) La contrainte maximale

En statique : elle ne doit pas être supérieure à la limite élastique du ressort.

En dynamique : elle est tolérée et plus faible.

I.3 Assemblages non démontables

I.3.1 Rivures

La construction rivetée consiste à assembler des pièces en utilisant des rivets. Cet assemblage constitue une liaison permanente sans aucun dommage sur les pièces constituantes. Les rivets sont constitués d'une tige cylindrique ayant sur l'extrémité une tête de forme changeant.

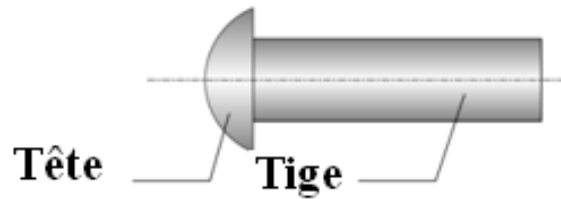


Fig I.34 Le rivet

Après la pose du rivet dans son trou, l'autre extrémité est refoulée dans le but de créer une tête de fermeture, alors la rivure est formée.

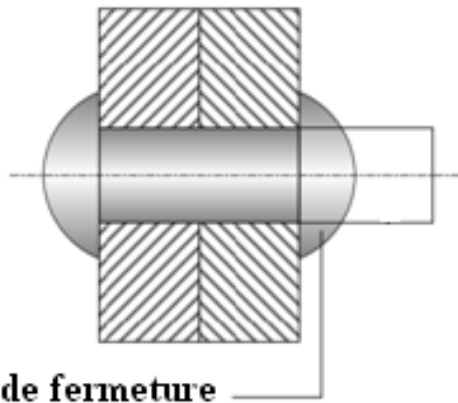


Fig I.35 Création de tête de fermeture

I.3.1.1 Types de rivetages

- Les rivets creux sont utilisés dans l'assemblage de tôles minces.
- Les rivetages massifs sont employés pour l'assemblage de tôles épaisses.

I.3.1.2 Rivetage massif

a) Pose d'un rivet

Lorsque on pose un rivet, la tête doit être maintenue par une contre – bouterolle ; lorsque l'autre extrémité de la tige se déforme, la rivure est obtenue.

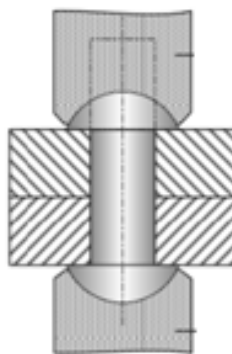


Fig I.36 Pose d'un rivet

Selon le diamètre et la nature du matériau du rivet, le rivetage est effectué soit à froid soit à chaud.

Façons de rivetage	Figure	
<p>1. Montage à froid Le serrage des pièces assemblées est faible. La liaison obtenue est dite « par obstacle ». Les rivets travaillent au cisaillement.</p>	<p>$d_1 \approx 1,05 d$</p>	
Montage	Figure	
<p>2. Montage à chaud Au cours du refroidissement, les rivets se contractent. Le serrage des pièces assemblées est important. La liaison obtenue est dite « par adhérence ». Les rivets sont sollicités à l'extension.</p>	<p>$d_1 \approx 1,01 d$</p>	

b) Types d'assemblages des tôles

Tableau I.5 Assemblage des tôles

Types d'assemblages des tôles	Figure
1/ A recouvrement	
2/ A couvre-joint simple	
3/ A couvre-joint double	

c) Emplacement des rivets

L'espace a entre deux rivets nécessite de faciliter le placement d'une bouterolle: $\geq d_{5,2a}$.

Le pas p est la distance entre deux rivets consécutifs (même ligne), pour un assemblage de:

- Résistance : $\ll d_{7p,3}$;
- Résistance et étanchéité : $\ll d_{5,3p,5,2}$.

L'espace entre le bord de la tôle et les rivets est de $2/p$.

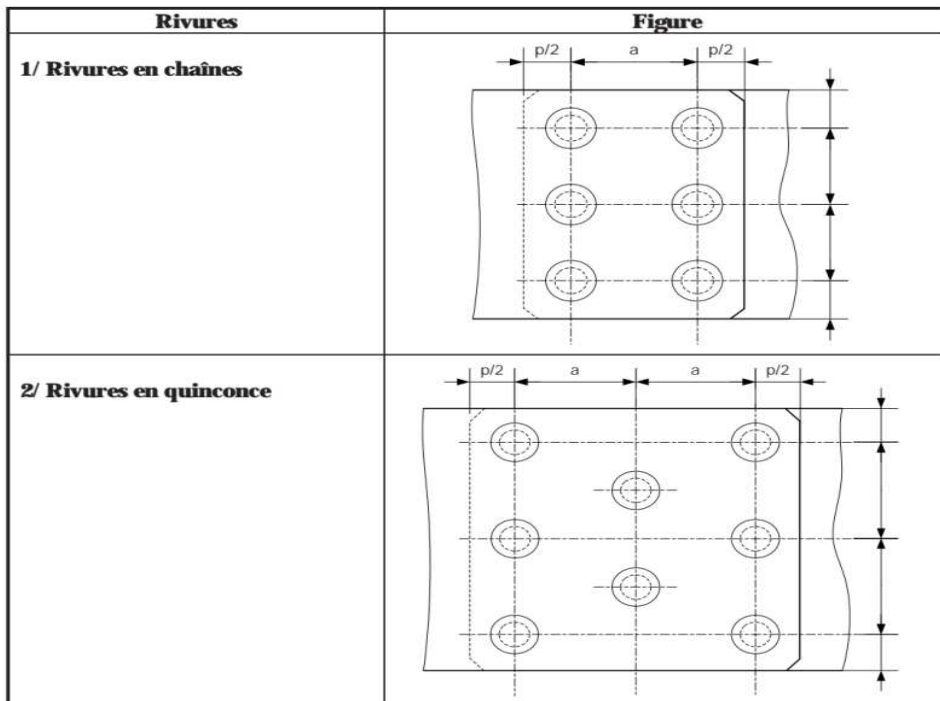


Fig I.37 Emplacement des rivets

d) Matériaux

Il est meilleur de choisir un matériau de même famille que celui des pièces à assembler, cela est pour éviter les phénomènes de corrosion. Les principaux métaux utilisés :

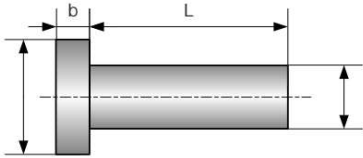
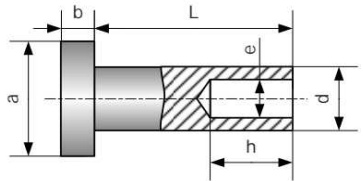
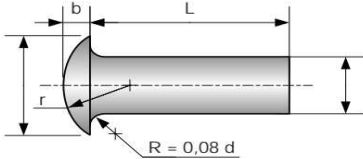
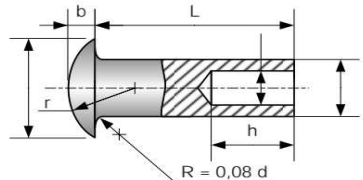
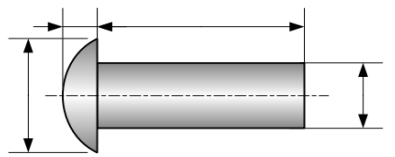
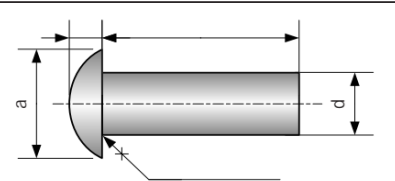
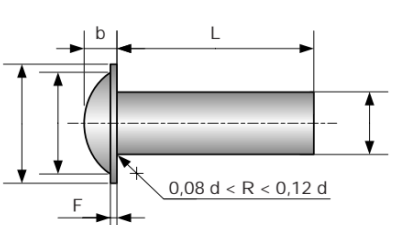
- les aciers de construction S235 et S275 ;
- les aciers inoxydables ;
- le Duralumin ;
- l'aluminium.

e) Longueurs L des rivets

2 - 2,5 - 3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 10 - 12 - 14 - 16 - 20 - 25 - 30 - 35 - 40 - 45 - 50 - 55 - 60 - 65 - 70 - 75 - 80 - 85 - 90 - 100 - 110 - 120 - 130 - 140 - 150 - 160 - 170 - 180 - 190 - 200 mm.

I.3.1.3 Différents rivets à tige cylindrique pleine

Tableau I.6 Différents rivets à tige cylindrique pleine

Rivets à tête cylindrique plate	Symboles	Figures
1/ A tête cylindrique plate	Symbole C Emploi général	
2/ A tête cylindrique plate et à tige forée	Symbole Cf L'extrémité favorise la formation de la rivure	
Rivets à tête goutte de suif	Symboles	Figures
1/ A tête goutte de suif	Symbole G Emploi général	
2/ A tête goutte de suif et à tige forée	Symbole Gf L'extrémité favorise la formation de la rivure	
Rivets à tête ronde	Symboles	Figures
1/ A tête ronde	Symbole R Emploi général	
2/ A tête ronde avec arrondi	Symbole R _a Emploi lorsque l'étanchéité est nécessaire	
3/ A tête ronde avec bavure et arrondi	Symbole R _b Emploi lorsque l'étanchéité est nécessaire	

Rivets à tête fraisée	Symboles	Figures
1/ A tête fraisée à 90°	Symbole F/90	
	Symbole F_f/90	
Rivets à tête fraisée	Symboles	Figures
2/ A tête fraisée bombée à 90°	Symbole FB/90	
	Symbole FB_f/90	

I.3.1.4 Détermination de la longueur des rivets

L est la longueur sous tête du rivet, il faut que cette longueur soit suffisante dans le but de pouvoir constituer la rivure, e_1 et e_2 sont les épaisseurs des tôles.

a. Cas d'une rivure ronde

$$L = 1.1(e_1 + e_2) + 1.5d \quad (I.8)$$

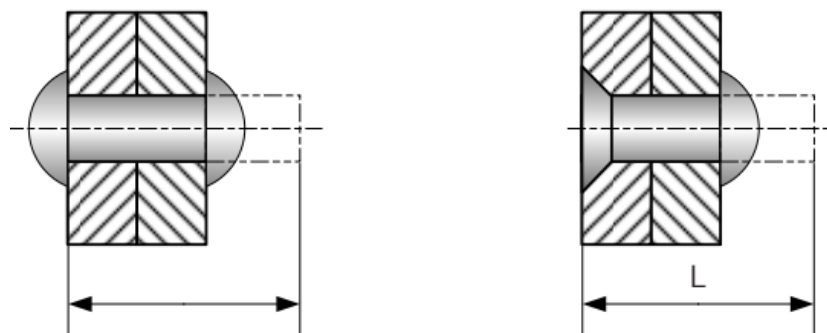


Fig I.38 longueur d'un rivet

b. Cas d'une rivure fraisée à 90° :

$$L = 1.1(e_1 + e_2) + 0.6d \quad (\text{I.9})$$

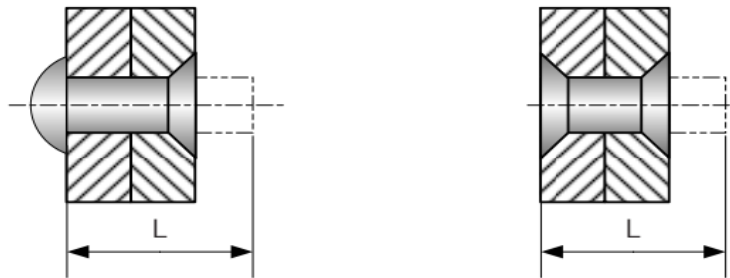


Fig I.39 Rivure fraisée

I.3.1.5 Détermination du diamètre

Même si le rivet est soumis à une traction, il est calculé pareillement comme s'il était soumis à un cisaillement. Le diamètre est calculé par (relation empirique) :

$$d = \frac{45.e}{15 + e} \quad (\text{I.10})$$

d : diamètre du rivet,

e : épaisseur de la tôle la plus épaisse à assembler.

I.3.1.6 Calcul des rivures

On suppose que :

- La charge est répartie uniformément entre les rivets,
- La force de frottement n'existe pas.

- Cisaillement du rivet :

L'effort qui s'exerce sur un rivet est défini par :

$$F_0 = \frac{F}{N} \quad (\text{I.11})$$

F_0 : force unitaire par rivet ;

F : la force exercée sur la rivure ;

N : nombre de rivet.

Pour un nombre z de sections cisillées, on aura :

$$\tau = \frac{F_0}{S} = \frac{F_0}{z \cdot \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau]_{cis} \quad (\text{I.12})$$

$$F_0 \leq z \frac{\pi d^2}{4} [\tau]_{cis}^r \quad (\text{I.13})$$

Le nombre de rivets est alors :

$$\tau = \frac{F_0}{S} \leq [\tau]_{cis}^r \Rightarrow F_0 \leq \frac{F/N}{z \cdot \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau]_{cis}^r \quad (\text{I.14})$$

$$\Rightarrow N \geq \frac{4F}{\pi z d^2 [\tau]_{cis}^r} \quad (\text{I.15})$$

- Le matage

Pour vérifier le rivet au matage :

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{comp} \Rightarrow \frac{F}{N d e_{min}} \leq [\sigma]_{comp} \quad (\text{I.16})$$

$$N \geq \frac{F}{d \cdot e_{min} \cdot [\sigma]_{comp}} \quad (\text{I.17})$$

On prend la plus grande valeur de N .

e_{min} : l'épaisseur minimale des éléments assemblés.

- Traction de la tôle

Lorsqu'une force est appliquée en traction sur une tôle de la rivure, la section la plus faible est située entre les rivets.

Pour vérifier la tôle sous traction,

$$\begin{aligned} \sigma &= \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{traction}^r \\ \Rightarrow \sigma &= \frac{F}{(b - Nd)e} \leq [\sigma]_{traction}^r \end{aligned} \quad (\text{I.18})$$

Où b est la largeur de la tôle,

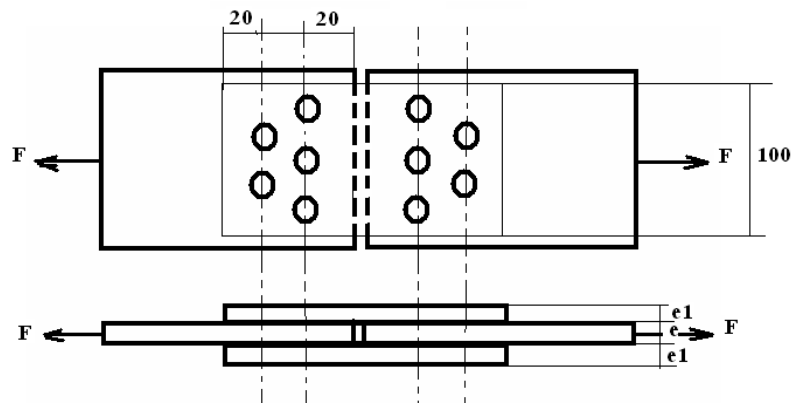
$[\sigma]_{traction}^r$ Contrainte admissible en traction de la tôle.

Exercice

Etant donné l'assemblage riveté à double couvre joint à deux rangées de rivets.

Sachant que : $[\tau]_{cis}^r = 120 \text{Mpa}$; $[\sigma]_{comp} = 200 \text{Mpa}$; $[\sigma]_{tr} = 180 \text{Mpa}$;

$d = 8 \text{mm}$; $e = 12 \text{mm}$; $e_1 = 10 \text{mm}$; $b = 100 \text{mm}$.



- Trouver la valeur de la charge admissible $[F]$ par :

1. Cisaillement du rivet ;
2. Matage du rivet ;
3. Arrachement de la tôle entre les rivets.

1-cisaillement du rivet :

$$F \leq zN \frac{\pi d^2}{4} [\tau]_{cis} \Rightarrow F \leq 2 \times 5 \frac{\pi (8)^2}{4} \cdot 120$$

$$\Rightarrow F \leq 60288N$$

2- matage du rivet :

$$\sigma = \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{comp} \Rightarrow \frac{F}{Nde_{min}} \leq [\sigma]_{comp}$$

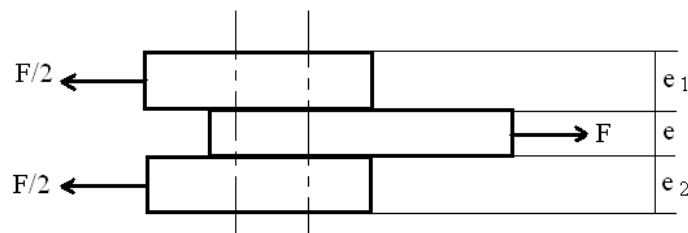
$$\Rightarrow F \leq Nde_{min} [\sigma]_{comp}$$

$2xe_1 > e$; donc on prend $e_{min} = 12mm$.

$$\Rightarrow F \leq 5 \times 8 \times 12 \times 200$$

$$\Rightarrow F \leq 96000N$$

3- L'arrachement de la tôle entre les rivets :



Tôle supérieure (ou inférieure) :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{traction}^T \\ \Rightarrow \frac{F/2}{(b-3d)e_1} &\leq [\sigma]_{traction}^T \\ \Rightarrow F &\leq 2 \times (b-3d)e_1 [\sigma]_{traction}^T \\ \Rightarrow F &\leq 2 \times (100-3(8)) \times 10 \times 180 \\ \Rightarrow F &\leq 273600N\end{aligned}$$

Tôle intermédiaire :

$$\begin{aligned}\sigma &= \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{traction}^T \Rightarrow \frac{F}{(b-3d)e} \leq [\sigma]_{traction}^T \Rightarrow F \leq (b-3d)e[\sigma]_{traction}^T \\ \Rightarrow F &\leq (100-3(8)) \times 12 \times 180 \\ \Rightarrow F &\leq 164160N\end{aligned}$$

Donc, la charge admissible est la plus petite en valeur :

$$F \leq 60288N.$$

I.3.2 La soudure

Pendant de longues années, le forgeage est l'unique procédé d'assemblage des métaux. Le soudage, premier procédé d'assemblage des aciers, nécessite une bonne connaissance du matériau. Il consiste à réaliser un cordon fondu liant les bords des pièces à assembler, cette technique d'assemblage garantit une continuité métallique de la pièce.

I.3.2.1 Définition de la soudabilité

On définit la soudabilité comme : « *Une propriété d'un matériau permettant de réaliser un joint continu par l'application d'un procédé adapté* ».

La soudure doit satisfaire aux exigences imposées.

- Il faut prendre en compte les diverses composantes du soudage : matériaux, procédés de soudage, construction.
- la soudabilité doit être défini en fonction des propriétés souhaités : comme la résistance et la corrosion.

Pour connaître la soudabilité des aciers, le carbone équivalent (CE) est utilisé, pour calculer le CE en utilise les équations montré dans le Tableau I.3.

Tableau I.7 Différentes expressions du CE

Désignations	Expressions du CE	Validité (% massique)
CE _{IIW} (par O'neill et Dearden)	$CE = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15}$	C > 0.18
P _{cm} (par Ito et Bessyo)	$P_{cm} = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn + Cu + Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{Ni}{60} + \frac{V}{10} + 5B$	C < 0.18

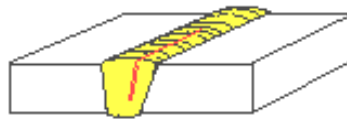
I.3.2.2 La zone affectée thermiquement (ZAT)

Cette zone est défini par les métallurgistes comme « *la zone de métal de base qui a eu la microstructure et les propriétés modifiées par soudage. La chaleur du procédé de soudage et le refroidissement causes des changements dans les alentours de la soudure* ».

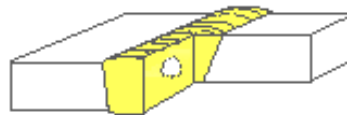
I.3.2.3 Les défauts de soudure

Les défauts de soudure sont groupés suivant la norme NF EN 26250.

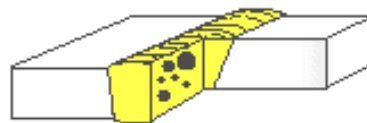
Premier groupe : Les fissures



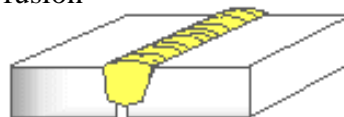
Deuxième groupe : Les cavités



Troisième groupe : Les inclusions solides



Quatrième Groupe : le manque de fusion



Cinquième groupe : les défauts de forme



Fig I.40 Défauts de soudures

I.3.2.4 Différentes techniques de soudures

a. Soudage par résistance (1886)

Le soudage par résistance électrique était utilisé dans le soudage bout à bout au début de son apparition. De nos jours, il est employé dans l'industrie, le secteur des véhicules et dans beaucoup d'autres domaines (soudage des tôles).

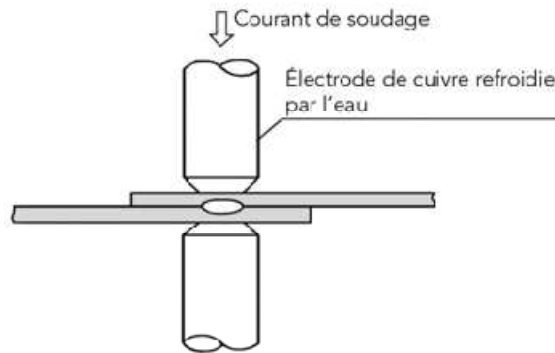
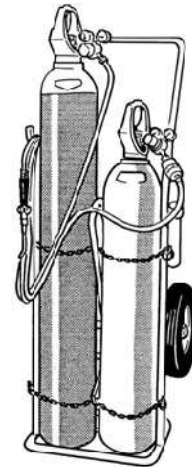


Fig I.41 Soudage par résistance

b. Soudage au gaz (1900)

Le mélange des gaz d'acétylène et d'oxygène nous permet d'atteindre jusqu'à de 3100 °C, au-dessus que les autres hydrocarbures gazeux. L'utilisation de la torche est devenue un outil indispensable pour couper ou souder les aciers.



c. Soudage à l'arc

Ce procédé a utilisé des électrodes en charbon au début. Ensuite, les électrodes en acier ont pris la place du charbon. Cette technique présentait des défauts de qualité. Une avancée considérable est atteinte après l'invention de l'électrode enrobée.

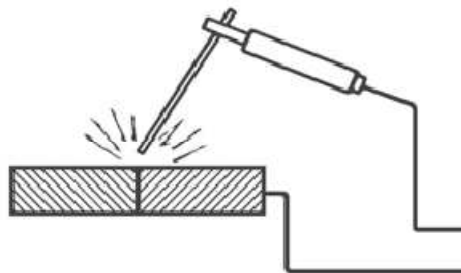


Fig I.42 Soudage à l'arc

d. soudage à l'arc submergé AS (1930)

De nouvelles techniques de soudages apparaissent à la fin des années 1930. Le soudage à l'arc utilisant une électrode fusible est substitué par le soudage à l'arc submergé par un fil-électrode, ce procédé est devenu automatique après. Son principe est de noyé l'arc dans une couche de flux granuleux.

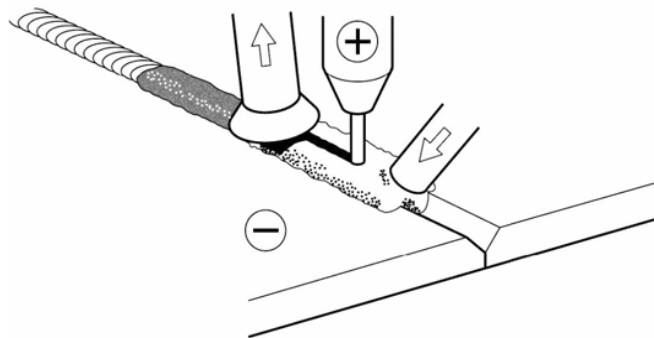


Fig I.43 soudage à l'arc submergé

e. Soudage Tungsten Inert Gas TIG (1940)

Pendant la guerre mondiale (1939-1945). Des expériences ont été effectuées au Etats-Unis pour protéger l'arc par des gaz inertes, puis, rapidement, les chercheurs ont aperçu que l'utilisation d'une électrode en tungstène permet l'amorçage de l'arc sans fusion de l'électrode, et par conséquent la soudure est réalisée sans un métal d'apport.

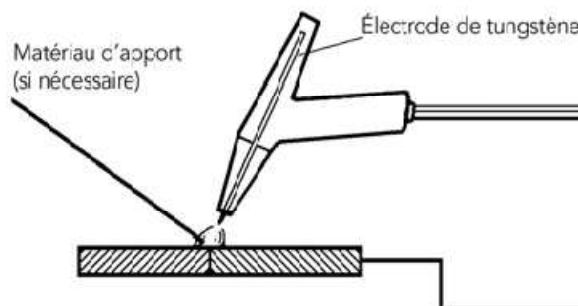


Fig I.44 Soudage Tungsten Inert Gas

f. Soudage Metal Inert Gas (MIG) / Metal Active Gas (MAG)

Le procédé « MIG » utilise principalement un gaz de protection inerte et un fil de métal d'apport comme électrode. Ce procédé, en premier lieu, a utilisé l'hélium ou l'argon comme des gaz de protection inertes. Puis, le CO₂ est utilisé.

Le procédé « MAG » utilise le gaz CO₂ à la place de l'argon ou l'hélium.

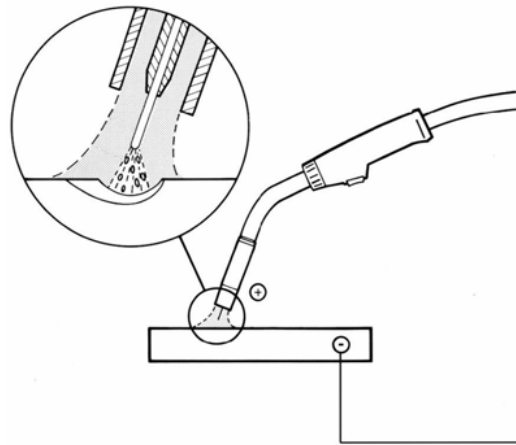


Fig I.45 Soudure Metal Active Gas

g. Soudure par plasma (1953)

Ce procédé de soudage produit une énergie plus concentrée, il en résulte des températures très élevées qui permettent d'augmenter la vitesse de jonction tout en diminuant l'apport de la chaleur.

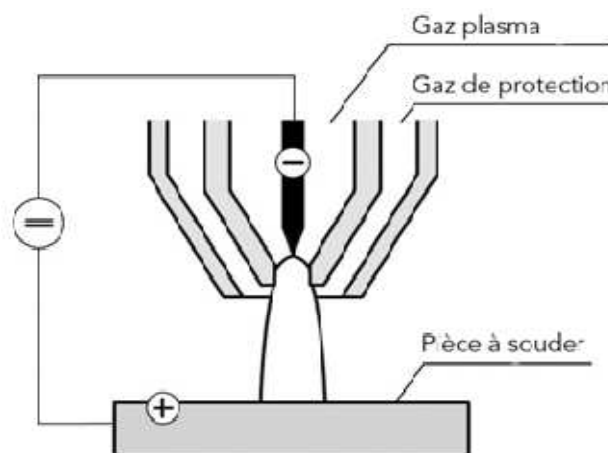


Fig I.46 Soudure par plasma

I.3.2.5 Types de soudures

Le choix du type de soudure dépend de :

- L'épaisseur du matériau ;
- Le procédé ;
- La nature.

L'objectif principal pour le choix du type de soudure est d'acquérir une excellente résistance mécanique et une meilleure qualité de soudure possible dans le but de limiter les coûts.

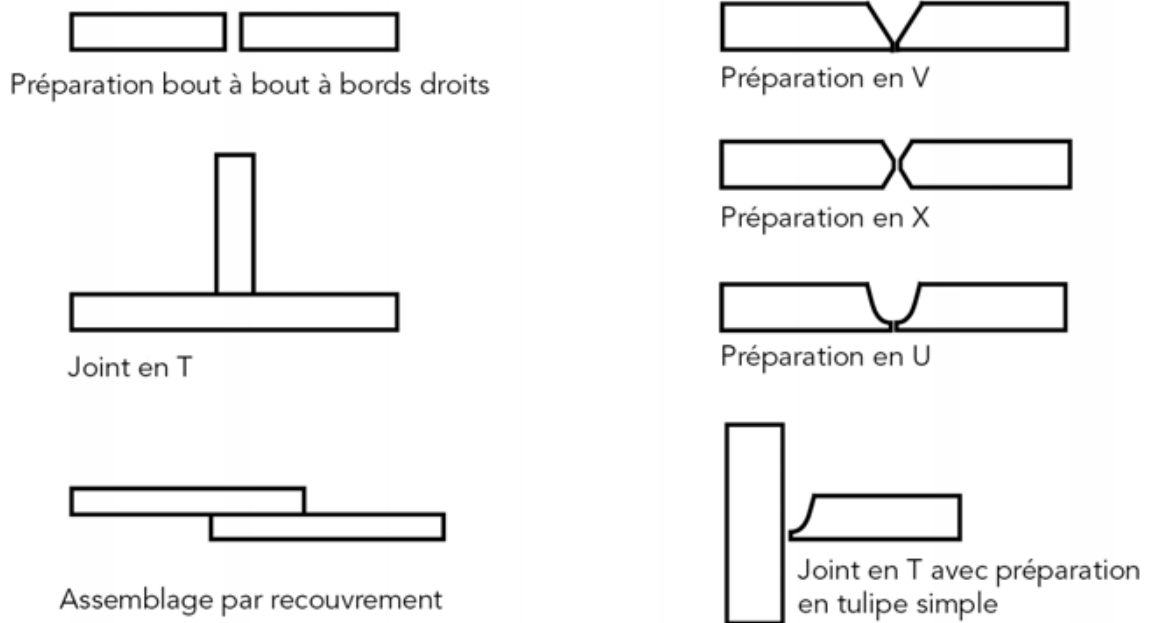


Fig I.47 Types de soudures

I.3.2.6 Calcul des soudures

Le calcul se fait supposant que :

- L'effort est uniformément réparti suivant la longueur du point.
- La contrainte est répartie suivant la section sollicitée.

a. Joint en bout

Une soudure en bout à bout est calculée soit à la traction, ou à la compression.

On a :

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{F}{e.b} \leq [\sigma]_{tr}^{cordon} \quad (I.19)$$

F : la force appliquée ;

S : la section ;

e : L'épaisseur ;

b : largeur de tôle ;

$[\sigma]_{tr}^{cordon}$: Contrainte admissible du cordon de soudure sous traction.

$[\sigma]_{tr}^t$: Contrainte admissible de la tôle.

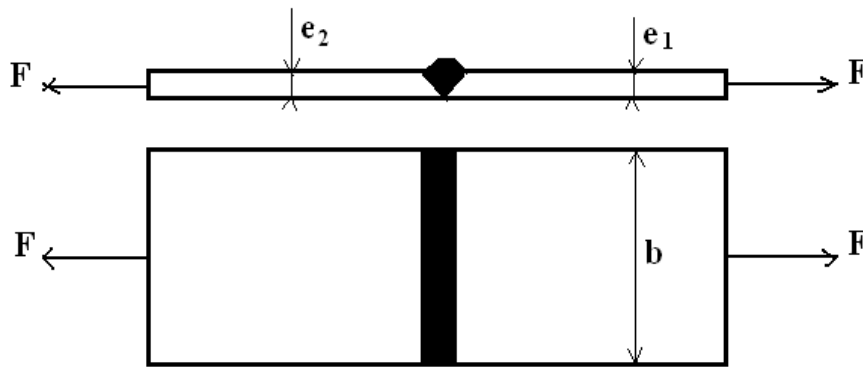


Fig I.48 Joint en bout

$$\frac{[\sigma]_{tr}^c}{[\sigma]_{tr}^t} = 0.5 - 1 \quad (\text{I.20})$$

On prend l'épaisseur le plus petit.

- Le cordon oblique

Pour avoir une égale résistance pour le joint considéré.

$$\sin\beta = \frac{b}{l}$$

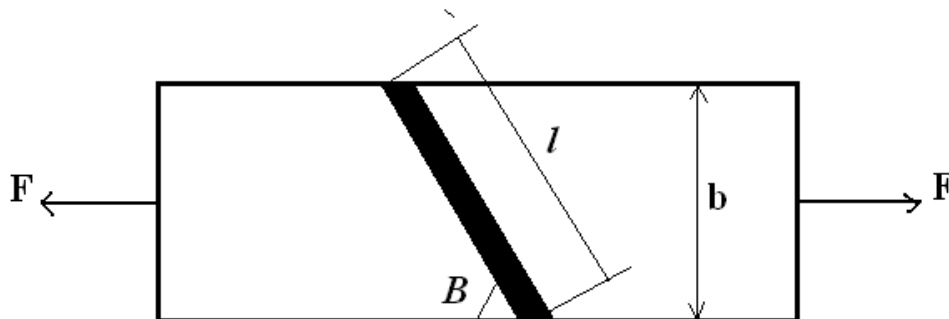


Fig I.49 cordon oblique

$$\sigma_c = \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{tr}^c \Rightarrow F \leq e.l.[\sigma]_{tr}^c \quad (\text{I.21})$$

$$\sigma_t = \frac{F}{S} \leq [\sigma]_{tr}^t \Rightarrow F \leq e.b.[\sigma]_{tr}^t \quad (\text{I.22})$$

Pour une égale de résistance ϑ entre la tôle et le cordon de soudure, il faut que :

$$\vartheta = \frac{e.l.[\sigma]_{tr}^c}{e.b.[\sigma]_{tr}^t} \quad (\text{I.23})$$

- Cas combiné

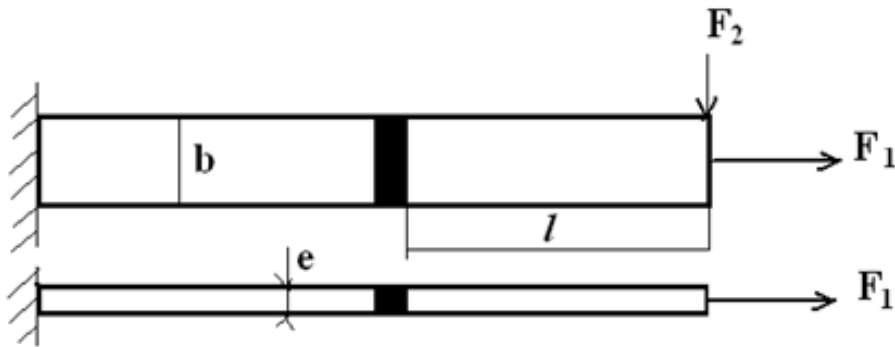


Fig I.50 Cas combiné

F_1 : Force de traction

F_2 : Force de flexion.

$$\sigma = \frac{F_1}{S} + \frac{M_{flexion}}{W_{flexion}} = \frac{F_1}{e.b} + \frac{F_2.l}{\frac{eb^3}{12} \cdot \frac{b}{2}} \quad (I.24)$$

$M_{flexion}$: Moment de flexion.

$W_{flexion}$: Module de résistance.

$$\sigma = \frac{F_1}{e.b} + \frac{6.F_2.l}{e.b^2} \leq [\sigma]_{tr}^c \quad (I.25)$$

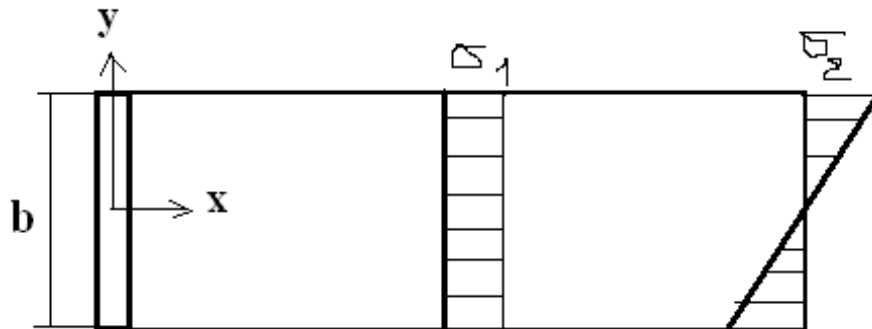


Fig I.51 Diagramme de contrainte

b. Soudure à clin ou à couvre joints

Ces types de soudure sont vérifier au cisaillement.

- Cas frontale

La hauteur pratique d'un cordon ayant la forme d'un triangle rectangle est :

$$h = a \sin 45^\circ \approx 0.7a$$

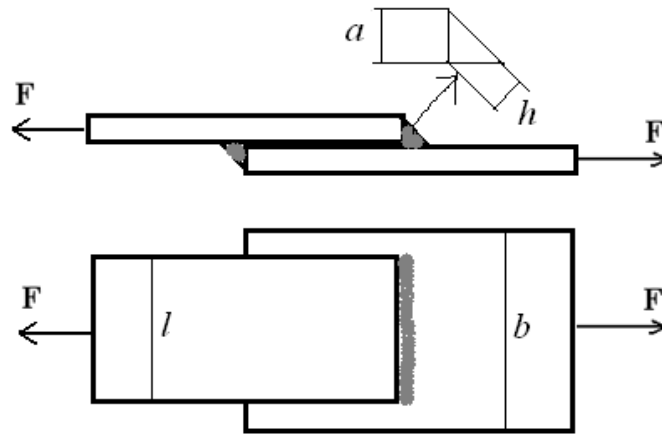


Fig I.51 Soudure à clin ou à couvre joints

$$\tau = \frac{F}{S} + \frac{F}{2.h.l} \leq [\tau]_{cis}^c \quad (I.26)$$

Pour une égale de résistance entre la tôle et le cordon de soudure, il faut que :

$$\vartheta = \frac{2 \times 0.7.a.l.[\tau]_{cis}^c}{e.b.[\sigma]_{tr}^t} \quad (I.27)$$

- Cas latérale

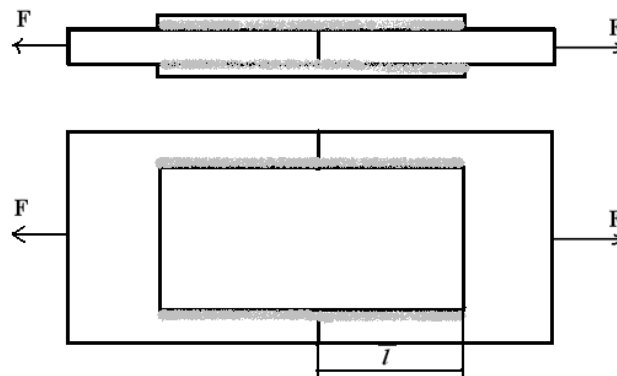
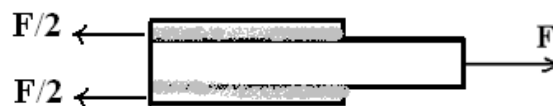


Fig I.52 Soudure à clin ou à couvre joints cas latérale

$$\tau_{cis} = \frac{F}{S} \leq [\tau]_{cis}^c \quad (I.28)$$



$$\tau_{cis} = \frac{F/2}{2 \times 0.7al} \leq [\tau]_{cis}^c \quad (I.29)$$

$$\tau_{cis} = \frac{F}{2.8al} \leq [\tau]_{cis}^c \quad (I.30)$$

- Cas combiné

$$\tau_{cis} = \frac{F}{0.7a \sum l} \leq [\tau]_{cis}^c \quad (I.31)$$

$\sum l$: est la longueur totale de toute la soudure.

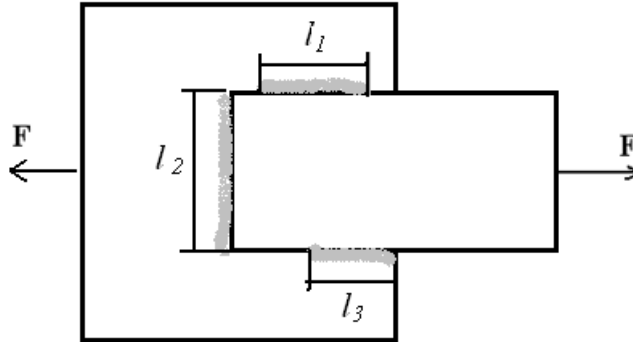


Fig I.54 Soudure à clin ou à couvre joints cas combiné

c. Soudure en T

Lorsque l'effort s'exerce perpendiculaire au plan du joint ou parallèle a ce joint, les soudures d'angle du joint en T sont vérifier respectivement comme les soudures frontales et latérales.

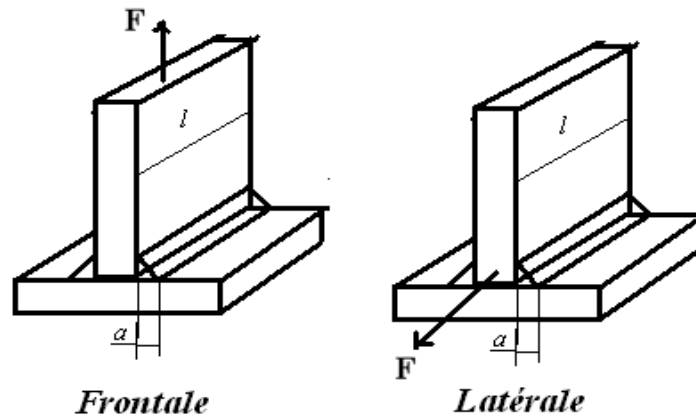


Fig I.55 Soudure en T

d. Soudure par points

Le calcul se fait au cisaillement comme pour les rivets.



Fig I.56 Soudure par points

$$\tau_{cis} = \frac{F}{n.z. \frac{\pi d^2}{4}} \leq [\tau]_{cis}^c \quad (\text{I.32})$$

Avec :

n : nombre de points de soudure.

z : sections cisailés.

e. Soudure cylindrique subissant une torsion

lorsque une tige cylindrique de diamètre d est soudée est sollicitée par un moment de torsion M_t , le moment de torsion est calculé :

$$M_t \leq \pi \times d \times 0.7 \times a \times [\tau]_{cis}^c \times \frac{d}{2} \quad (\text{I.33})$$

$$M_t \leq \pi \times d^2 \times 0.35 \times a \times [\tau]_{cis}^c \quad (\text{I.34})$$

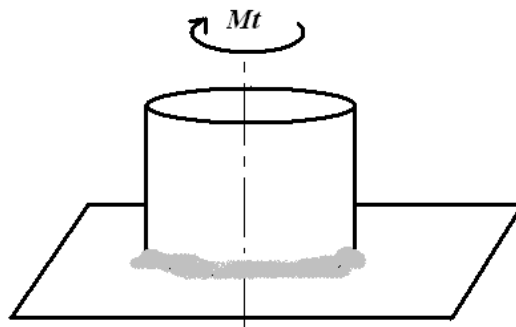


Fig I.57 Soudure cylindrique

I.3.3 Assemblage des pièces par montage à force (frettage)

L'assemblage par force est une technique basée sur l'idée de faire coïncé un alésage sur un arbre, cette adhérence est assurée par une pression résultant de l'interférence avant assemblage, le diamètre extérieur de l'arbre est légèrement supérieur que le diamètre intérieur de l'alésage (la tolérance).

Le serrage est réalisé par :

- Une presse ;
- Le chauffage du moyeu ou le refroidissement de l'arbre, ça permet de réaliser un montage sans effort.

Avantages

Les usinages sont limités, minimise les concentrations de contraintes, admet la transmission d'efforts importants.

Inconvénients

Le démontage est très difficile, parfois impossibles.

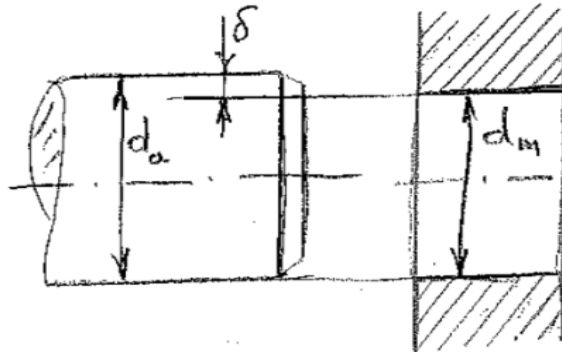


Fig I.58 Principe du frettage

Soit un moyeu de diamètre d_m inférieure au diamètre d_a de l'arbre et de l'interférence δ .
Après montage, le rayon de l'arbre diminué de $|u_a|$, alors le diamètre devient donc :

$$d = d_a - 2|u_a| \quad (\text{I.35})$$

I.3.3.1 Montage par échauffement du moyeu

Le chauffage du moyeu peut se faire par :

- L'eau bouillante (plus de 100°C) ;
- L'huile minérale bouillante (plus de 360°C) ;
- Au four (plus de 700°C).

Il existe un risque de changement de structure des matériaux chauffés, pour cela les températures sont limitées. Il peut avoir aussi des modifications dans la forme ou dans les dimensions de la pièce chauffée.

I.3.3.2 Montage par refroidissement de l'arbre

Le refroidissement de l'arbre peut se faire par :

- Congélateur (-20°C) ;
- La neige carbonique (-72°C) ;
- L'air liquide (-150°C),
- L'azote liquide (-192°C) (mêmes risques).

Dans le cas de l'azote liquide et l'air liquide, il existe un risque que le matériau devient fragile et aussi d'avoir une explosion, donc il est indispensable de faire des précautions (mettre des gants et des lunettes de sécurité).

Chapitre II Assemblage des polymères

II.1 Introduction

Pour réaliser des pièces en plastique, généralement on cherche à fabriquer un élément compliqué par une seule opération. Lorsqu'on fait un assemblage, on a pour but:

- La réduction des coûts d'outillage ;
- L'assemblage des éléments de produits longs d'extrusion ;
- Créer de nouvelles fonctions.

Il existe plusieurs techniques d'assemblage, soit des assemblages démontables ou des assemblages permanents (Tableau II.1).

Tableau II.1 Types d'assemblages des plastiques

Fonctions	Type d'assemblage	Polymères utilisables
<i>indémontables</i>	collage soudage rivetage	TD et certains TP TP uniquement TP surtout
<i>démontables</i>	vissage encliquetage	TP et TD TP seulement
TD : thermodurcissables et TP : thermoplastiques		

II.2. Collage

II.2.1 Avantages du collage

- la continuité du joint collé.
- dans la zone collée, les contraintes sont uniformes dans leurs distributions, le collage permet la conception de formes sans protubérance de fixations (comme les vis et les rivets) et sans discontinuité.
- L'apparition des ruptures par la fatigue est moins probable.
- Le collage ne requiert pas des températures élevées.
- grâce aux adhésifs, l'assemblage de forme complexe est réalisable.
- Les colles permettent l'assemblage de différents matériaux (par leur : composition, module d'élasticité, coefficients de dilatation thermique ou épaisseurs).

- Le joint adhésif est continu, il constitue un joint d'étanchéité.
- Il agit comme une barrière.
- un joint adhésif peut avoir de bonne propriété d'amortissement.
- L'assemblage par colle peut être combiné avec d'autres techniques d'assemblages (soudage par points ou rivets) dans le but d'augmenter la résistance finale.
- Des avantages économiques : une meilleure conception, assemblage plus facile, poids faible, durée de vie plus longue.

II.2.2 Limitations du collage

- Les adhésifs utilisés (polymères ou des résines synthétiques) ont les mêmes inconvénients que celles de cette classe de matériaux.
- Les colles présentent des résistances plus faibles que ceux des métaux.
- Lorsque la température est augmentée, l'adhésif perd de la résistance et les propriétés d'allongement du joint collé évoluent du domaine élastique au plastique.
- La résistance de l'adhésif dépend des propriétés du polymère utilisé et du milieu dans lequel ils se trouvent.
- Lors de la sélection d'adhésif, l'assemblage sera soumis à une exposition à des agents d'oxydation, des solvants, ...etc.
- Les joints assemblés nécessitent des fixations additionnelles limitées dans le temps,
- Les qualités du joint collé peuvent être affectées négativement lorsque, lors du collage, les surfaces de contact ne sont pas bien mouillées par l'adhésif.
- Si on cherche à garantir de bons résultats reproductibles, il est indispensable de mettre en place des procédures de contrôle.
- L'amélioration d'un joint mal conçu est souvent impossible.

II.2.3 Principaux adhésifs utilisés dans les assemblages

a) Classification suivant le modèle chimique

- **Produits naturels** : Colles animales; gommés naturelles ; amidon; bitumes ; dextrines.

- **Therm durcissables** : Acryliques anaérobies ; époxydes ; polyesters insaturés ; polyuréthanes ; mélamine-formol ; phénol-formol ; urée-formol.
- **Thermoplastiques** : Thermofusibles ; polyamides ; polyester saturé ; polychlorure de vinyle.
- **Élastomères et caoutchoucs synthétiques** : Caoutchouc chloré ; latex naturel ; butadiène-acrylonitrile ; silicones ; caoutchouc butyl ; polychloroprène (*Néoprène*);
- **Adhésifs inorganiques** : Ciments ; céramiques ; silicates.

Les colles à base de résines synthétiques se distribuent en deux catégories :

- Les therm durcissables : dont le durcissement correspond à une réaction chimique.
- Les thermoplastiques : correspond à un changement d'état physique (résultant de l'évaporation du solvant ou de la Solidification).

L'importance industrielle montre que seules les résines therm durcissables peuvent résister à des mises sous charges significatives.

b) Résines époxydes

Les résines époxydes sont les adhésifs structuraux les plus utilisés. Ils se composent d'un durcisseur et d'une résine époxyde. Ils forment des liaisons durables et extrêmement résistantes avec la majorité des matériaux. Le joint possède des résistances très élevées (en cisaillement, traction ainsi qu'en compression) lorsqu'il est complètement durci. L'épaisseur spécifique d'un joint de colle est de 5×10^{-2} à 3×10^{-2} mm ; certaines classes de matériaux peuvent être utilisées jusqu'à 1 mm d'épaisseur.

II.3 Le soudage

Le soudage des thermoplastiques se fait sur le ramollissement par chauffage de la couche superficielle des deux éléments à assembler dans le but de faciliter leur interpénétration pendant le refroidissement. La jonction se fait par deux types de soudures : la première est sans apport de matière, alors que la deuxième est avec apport de matière (Tableau II.2), ces types de soudures sont classés en fonction de l'épaisseur.

Tableau II.2 Classement des soudures en fonction de l'épaisseur

Types	Épaisseurs courantes	Nature du chauffage
sans apport	faibles (\approx mm)	effet Joule hautes fréquences ultrasons
avec apport	fortes (\approx cm)	air chaud (gaz ou électricité)

Les soudures peuvent être classées en fonction de l'apport de chaleur (Tableau II.3).

Tableau II.3 Classement des méthodes de soudage

Apport de chaleur	Types de soudures
direct	infrarouge : impulsion, miroir air chaud : chalumeau
indirect	hautes fréquences ultrasons

II.3.1 Soudage sans apport

II.3.1.1 Soudage thermique

Le soudage thermique peut être réalisé par plusieurs moyens :

a) Mâchoires chauffantes

Les parties qui vont être soudées sont serrées entre deux barreaux métalliques chauffés par impulsion (l'effet Joule), conduisant à une fusion locale du plastique. Le maintien sous pression pendant le refroidissement fixe les deux parties l'une à l'autre.

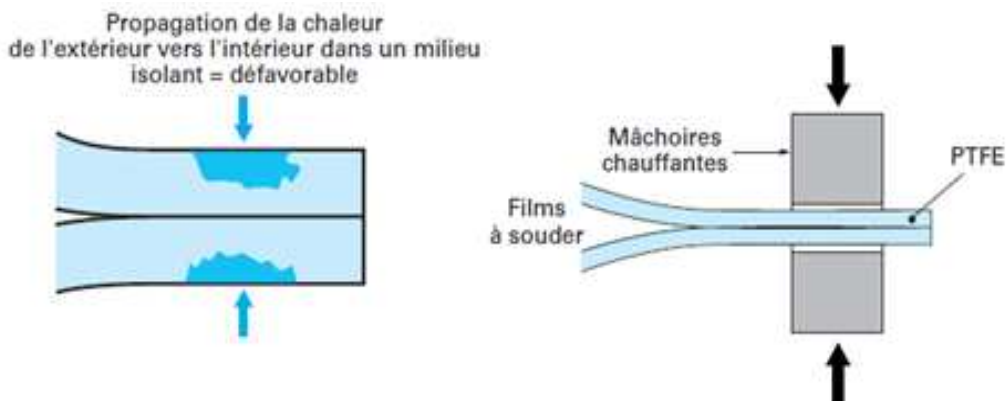


Fig II.1 Mâchoires chauffantes

b) Miroir

Les éléments à assembler sont appuyés jusqu'au ramollissement sur une plaque chauffante (miroir) puis raboutés l'un sur l'autre à l'aide d'un dispositif de guidage et refroidi in situ.

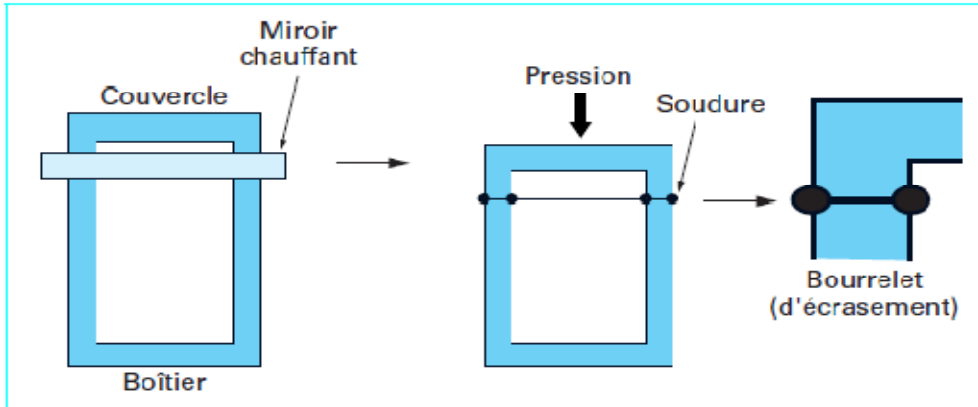


Fig II.2 Soudage au miroir

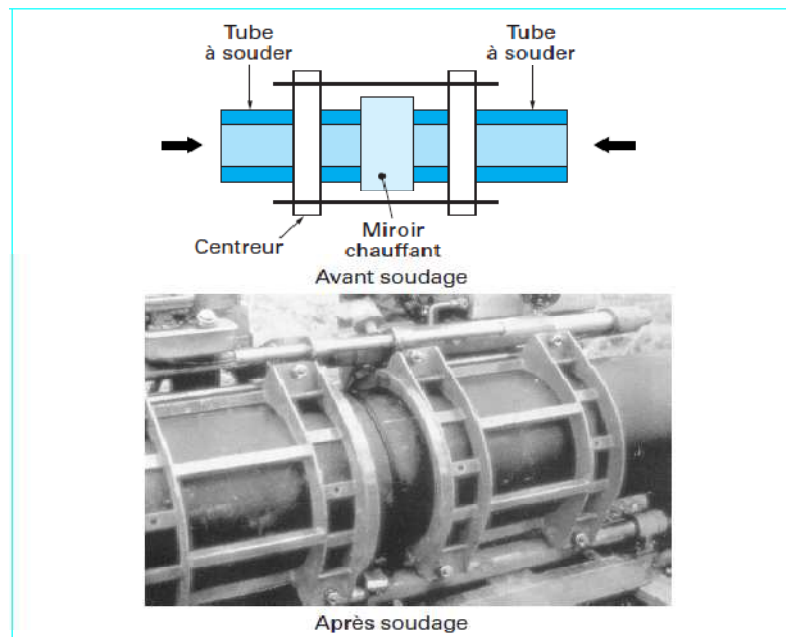


Fig II.3 Soudage au miroir bout à bout

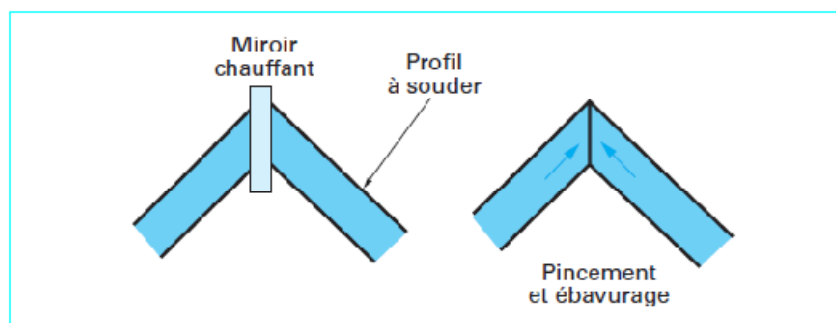


Fig II.4 Soudage au miroir de profils de fenêtre

c) Frottement

La friction des deux parties qu'on cherche à assembler provoque un échauffement. On procède :

- Par rotation pour des pièces de révolution d'épaisseur de 0,5 à 2 mm ;
- Par vibration angulaire pour des pièces asymétriques, longues et minces.

Comme précédemment pour le miroir, un pressage suivi d'un refroidissement fixe la soudure.

II.3.2 Soudage avec apport

Pratiquement à l'aide d'un chalumeau à air chaud (chauffage au gaz ou électrique), une baguette d'apport d'un même polymère sur les pièces à assembler qui ont été préalablement chanfreinées à cet effet. Des gros volumes de productions sont réalisés, les épaisseurs varient de quelques millimètres à quelques centimètres.

Il suffit de faire rouler une feuille en thermoplastique et de la souder bout à bout pour réaliser une jonction parfaite. La température du chalumeau est réglable entre 50 et 500°C.

II.4 Encliquetage

L'avantage de cette technique est d'aménager d'un système venant directement de moulage qui ne nécessite aucun élément supplémentaire pour procéder l'assemblage. L'application de ce type d'assemblage est utilisé dans les fixations rapides et économiques (les industries de très grandes séries (automobile, électroménager...)).

II.5 Bande « Velcro »

Le « Velcro » est un cas particulier de l'accrochage, il est rendu possible par l'utilisation de crochets en polyamide porté par un ruban. La fixation, qui demeure néanmoins souple, est assurée par un plaquage des deux rubans en opposition.

II.6 Vissage

Le filetage peut être réalisé directement sur une pièce moulée, ce qui conduit à un dévissage de l'empreinte du moule, par conséquence le cycle de fabrication est allongé.

Il est possible aussi de n'envisager qu'un trou cylindrique ou parallélépipédique dans la pièce, le montage d'une vis métallique permet la réalisation du filetage (autotaraudage).

Chapitre III Assemblage des céramiques

III.1 Introduction

Une céramique est dite technique lorsque ce matériau est destiné à des applications industrielles. L'assemblage de plusieurs pièces céramiques ensemble est rarement utilisé. Ces matériaux se prêtent mal à la soudure, il est difficile d'avoir des joints possédant les mêmes propriétés (mécaniques, thermiques et chimiques) que le matériau de base. De plus, comme les céramiques sont fragiles, la mise en forme par déformation ou l'usinage à l'état fini sont rarement utilisés (sauf dans le cas des verres)

III.2 Types des céramiques techniques

Les céramiques techniques existent en deux types:

- Les céramiques oxydes: elles se composent particulièrement d'oxydes des métaux comme l'alumine (oxyde d'aluminium) ou la zircone (oxyde de zirconium).
- Les céramiques non oxydes: on peut citer le nitrure d'aluminium, le carbure de silicium et le nitrure de silicium.

Tableau III.1 Propriétés mécaniques et physiques des céramiques.

La céramique	Masse Vol. (g/cm ³)	Temp. de fusion (°C)	Cond. Therm. (W/m.K)	Coeff. de dilat. liné. (10 ⁻⁶ /K)	Module de Young (GPa)	Résist. à la compr. (MPa)
Alumine (Al ₂ O ₃)	3.9	2050–2060	24–35	8–8.9	330–400	1750–3000
Zircone (ZrO ₂)	5.6	2680–2710	2–12	7–9	180–240	1650–3600
Carbure de silicium (SiC)	3.2	2700–2830	90–200	4.3–4.6	390–440	2000–3500
Nitrure de silicium (Si ₃ N ₄)	3.2	1890–1900	15–43	2.6–3.3	280–310	11000–15000
Nitrure de Bore (BN)	2.1	2900–3100	20–52	1–10	20–100	225–540

III.3 Propriétés des céramiques

Les céramiques sont en rivalité permanente avec les autres matériaux dans une majorité d'applications :

- **Tenue en température** : Beaucoup de céramiques combinent des propriétés réfractaires avec une bonne stabilité chimique, notamment en milieu oxydant : éléments exposés à de hautes températures, couches de protection thermique, etc.
- **Résistance au fluage** : A cause de leur structure, les céramiques souffrent moins du fluage que les métaux (les dislocations sont moins mobiles).
- **Résistance chimique** : En général, elle est plus grande que celle des métaux.
- **Dureté** : Généralement, la dureté des céramiques est élevée.
- **Isolation électrique** : Les verres et les céramiques sont d'excellents isolants électriques.

III.4 Assemblage mécanique

En raison de leurs fragilités, l'assemblage mécanique des matériaux céramiques est plus sensible que les autres classes de matériaux (polymères ou métaux). Pour réaliser un bon assemblage, il faut éviter les concentrations de contraintes et les contraintes parasites.

Cette classe de matériau fragile a un comportement à la rupture très différent en compression et en traction, contrairement à la limite d'élasticité des métaux : la résistance en traction est inférieure à celle en compression.

La composition des céramiques influence sur l'aptitude de collage.

III.4.1 Vissage

En raison de leur fragilité, La réalisation de pas de vis dans les céramiques est strictement déconseillée dans le cas où les charges sont élevées. De préférence, il faut réaliser de simples trous et utiliser des pièces métalliques ou polymères pour l'assemblage.

III.4.2 Collage et enrobage

Le collage est une technique très employée pour assembler et enrober des pièces en céramique (ou en verre).

Le collage se différencie par quelques avantages et défauts :

- **Mise en œuvre** : En fait bien mouillé les céramiques et les verres par les colles, la mise en œuvre est facile et nécessite un équipement simple.
- **Faibles températures** : Les températures de polymérisation aller de l'ambiante à environ 150°C, ce qui est réalisable avec d'autres pièces.
- **Faibles contraintes** : il existe des colles qui exécutent des très faibles contraintes sur les pièces. Cet aspect est essentiellement important dans le cas des produits comme les capteurs.
- **Protection chimique** : la tenue chimique de beaucoup de colles est bonne et peuvent être appliquées pour la protection des circuits électroniques.
- **La perméabilité** : pour garantir une protection contre les dégradations chimiques, la perméabilité peut être plutôt faible.
- **Stabilité dimensionnelle** : le comportement des colles est anélastique, ces assemblages ont des contraintes qui dérivent dans le temps.

III.4.3 Assemblages par soudage-diffusion

Le soudage – diffusion est une technique de soudage à l'état solide, ce procédé consiste à augmenter la température pour activer les phénomènes de diffusion, l'application d'une pression entre les pièces à assemblées conduit a une augmentation dans la surface de diffusion (déformation localisée).

L'installation utilisée pour ce type d'assemblage est constituée d'un système de chauffage par induction, d'une enceinte hermétique qui permet le contrôle de l'atmosphère et d'un vérin asservi qui permet de contrôler la pression de contact.

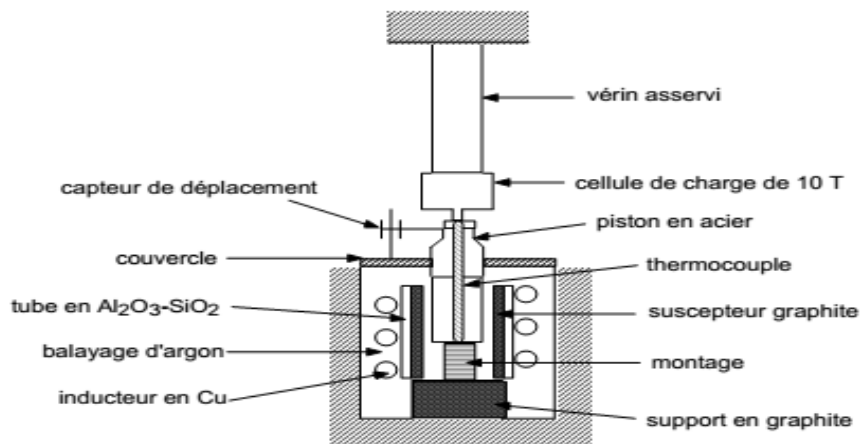


Fig III.1 Schéma de l'installation de soudage-diffusion.

III.4.4 Assemblages par brasage

La technique précédente nécessite des installations trop chères. Par contre, le procédé d'assemblage par brasage est simple, il utilise un four sous atmosphère contrôlée. Mais il nécessite une phase liquide, ce qui nécessite un bon chauffage (au delà des températures d'utilisation prévues des céramiques).

La réalisation d'assemblage par brasage inclut que :

- Le matériau utilisé dans la soudure conserve des propriétés mécaniques acceptables après que l'assemblage est réalisé.
- Il faut établir une liaison de nature chimique entre les matériaux à assembler et le matériau d'apport.
- Les surfaces à assembler doivent montrer un bon mouillage avec les matériaux d'apports.

III.4.5 Adhérence et compatibilité

L'adhésion est l'ensemble des réactions physico-chimiques qui conduit à la résistance contre une séparation de deux surfaces.

L'adhérence est la force à fournir pour la séparation de deux surfaces.

L'interface est défini comme la couche de séparation entre deux surfaces.

L'adhérence et l'adhésion sont des propriétés essentielles lors du collage.

L'interface est caractérisée par deux composantes:

- L'adhésion entre les structures et la colle.
- L'adhésion entre la colle et le matériau (céramique).

On distingue trois grands types de familles des colles:

- **Les colles sans potentiel adhésif:** elles nécessitent un conditionnement spécifique des surfaces et d'utilisé un système adhésif adapté et.
- **Les colles avec potentiel d'adhésion propre:** ces colles particulières possèdent un monomère actif dans leur composition qui permette de se passer d'un système adhésif, mais elle nécessite un conditionnement des surfaces.
- **Les colles auto adhésives:** ces colles sont différentes des autres parce qu'elles ne demandent aucun traitement préparatoire des surfaces (comme le ciment).

III.4.6 Brasage avec brasure métallique

Cette technique ne présente d'intérêt que si les assemblages obtenus conservent des bonnes propriétés des céramiques à chaud, en particulier en terme de tenue au fluage et de résistance à l'oxydation.

La technique d'assemblage d'une céramique à un métal n'est pas facile ou simple, la majorité des processus d'assemblage implique le chauffage des matériaux à assembler. Pendant le refroidissement, les défauts font une apparition puisque les modules élastiques et coefficients de dilatation thermique sont très différents. Cette différence conduit au développement des contraintes résiduelles, et par conséquent à la dégradation de la qualité des assemblages. Plusieurs techniques ont été développées pour l'assemblage des métaux aux céramiques, comme :

- la fixation mécanique
- l'assemblage indirect par le brasage ou
- l'assemblage direct par le soudage.

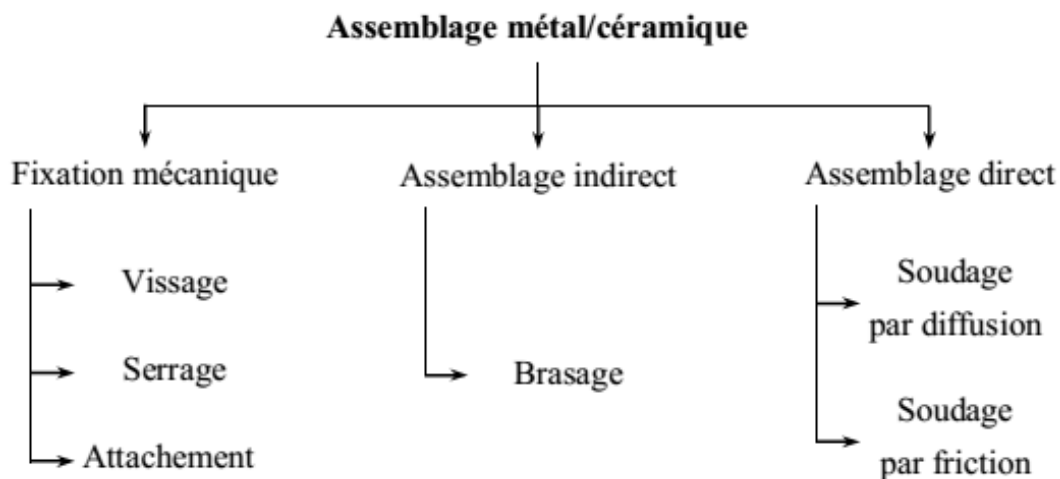


Fig III.2 Procédés d'assemblage métal/céramique.

Références bibliographiques

1. **J.F. Debongnie**, « *Conception et calcul des éléments de machines* », Liège, Belgium, ISBN 978-2-9601305-0-8, 2013.
2. **Union des professeurs de sciences et techniques industrielles des classes préparatoires aux grandes écoles**, « *Aide mémoire de dessin de construction* », Bréal Kosny, Rome, ISBN 2 85394 659 2, 1994.
3. **Maurice REYNE**, « *Procédés d'assemblage des plastiques* », Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, AM 3 755.
4. **Thomas Maeder**, « *Assemblage de matériaux céramiques* », LAUSANNE, Switzerland, 2010.
5. **Y. Xiong.**, « *Formulaire de mécanique : Pièces de constructions* », ÉDITIONS EYROLLES 61, bld Saint-Germain, Paris, ISBN : 978-2-212-12045-5, 2007.
6. **S. Bensaada, D. Feliachi**, « *Technologie : Première partie* », Office des publications universitaires, Alger, ISBN : 996101022-1.
7. **Frédéric Deschaux-Beaume**. « *Matériaux et assemblages hétérogènes : de l'élaboration à la caractérisation mécanique* ». Université Montpellier II - Sciences et Techniques du Languedoc, 2009. tel-00807735
8. **Alexandre Macario**. « *Assemblage des céramiques : analyse au travers de la littérature actuelle et d'un cas clinique* ». Médecine humaine et pathologie. 2016. dumas-01360326ff
9. **Paventhan, R., Lakshminarayanan, R., Balasubramanian, V.**, “*Prediction and Optimization of Friction Welding Parameters for Joining Aluminum Alloy and Stainless Steel*”. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011.21: p. 1480-1485.
10. **Dinaharan, I., Murugan, N., Thangarasu, A.**, “*Development of Empirical Relationships for Prediction of Mechanical and Wear Properties of AA6082 Aluminum Matrix Composites Produced using Friction Stir Processing*”. Engineering Science and Technology, an International Journal, 2016.19 : p. 1132-1144.
11. **Rajakumar, S., Balasubramanian, V.**, “*Microstructure and Mechanical Properties of Electrical Resistance Spot Welded Interstitial Free Steel Joints*”. Journal of Advanced Microscopy Research, 2015.10 : p. 146-154.
12. **Lakshminarayanan, A. K., Balasubramanian, V.**, “*Comparison of RSM with ANN in Predicting Tensile Strength of Friction Stir Welded AA7039 Aluminum Alloy Joints*”. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2009.19 : p. 9-18.
13. **FARES KHALFALLAH**, “*Soudage par friction de l'acier avec du céramique*”, thèse Doctorat en Sciences en : Génie Mécanique, Université Mohamed Khider-Biskra. 2020.
14. **G.R. Nicolet**, « *CONCEPTION ET CALCUL DES ÉLÉMENTS DE MACHINES* », VOLUME 1, Gaston Nicolet CH-1700 Fribourg, 2006.