

Chapitre 6 : Les Assemblages

6.1. Introduction

Les constructions métalliques sont un ensemble d'éléments barres (poteaux et poutres) qui sont assemblés entre eux pour former une ossature. De ce fait les assemblages jouent un rôle très important dans la résistance et la stabilité de ces constructions.

Un assemblage est un dispositif (moyen) de liaison qui permet de réunir et de solidariser plusieurs éléments métalliques entre eux, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations (N_{sd} , M_{sd} , V_{sd}) entre les éléments assemblés.



Fig.6.1. L'assemblage dans les constructions métalliques.

6.2. Diverses formes d'assemblage

Dans la plupart des constructions métalliques, les différents types d'assemblage que l'on rencontre sont représentés sur la figure suivante :

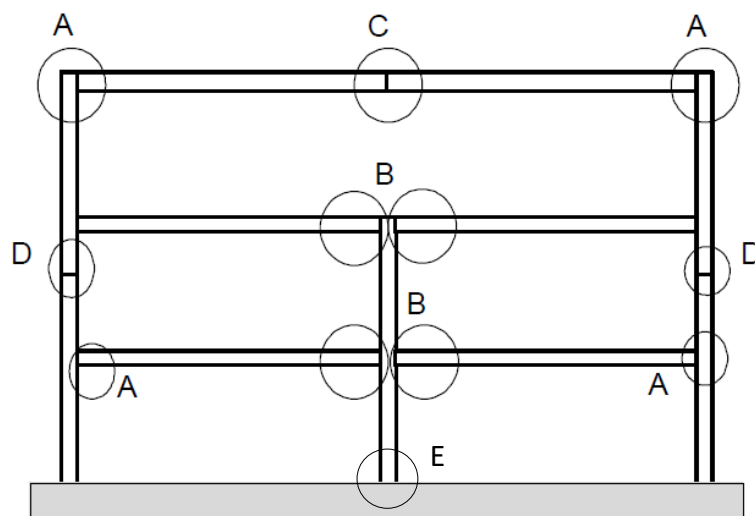


Fig.6.2. Les formes d'assemblage dans la CM.

Dans la figure 6.2 on retrouve les assemblages du type :

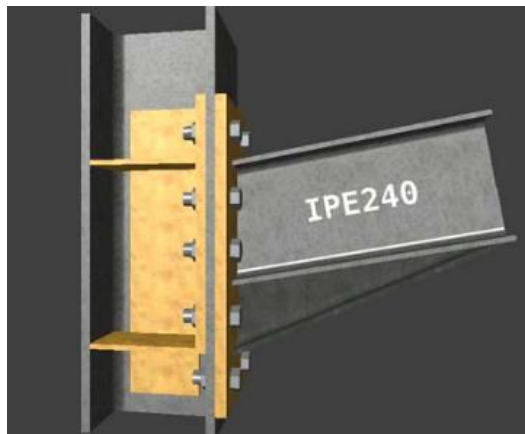
A: poutre-poteau de rive

B : poutre-poteau intermédiaire

C : continuité de poutres

D: continuité de poteaux

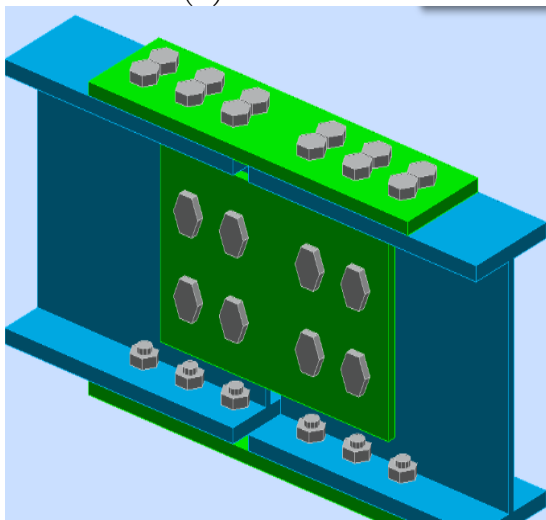
E : pied de poteau



(A)



(B)



(C)



(D)



(E)

Fig.6.3. Type d'assemblage.

6.3. Principaux modes (moyens) d'assemblages :

6.3.1. Le rivetage :

Le rivetage est la plus ancienne procédure d'assemblage utilisée. Cette technique de moins en moins utilisée, consiste à faire passer un rivet chauffé à travers un trou et forger l'autre partie débordante de la tige par pression ou martelage (par bouterolle), pour former une seconde tête de l'autre côté de l'assemblage.

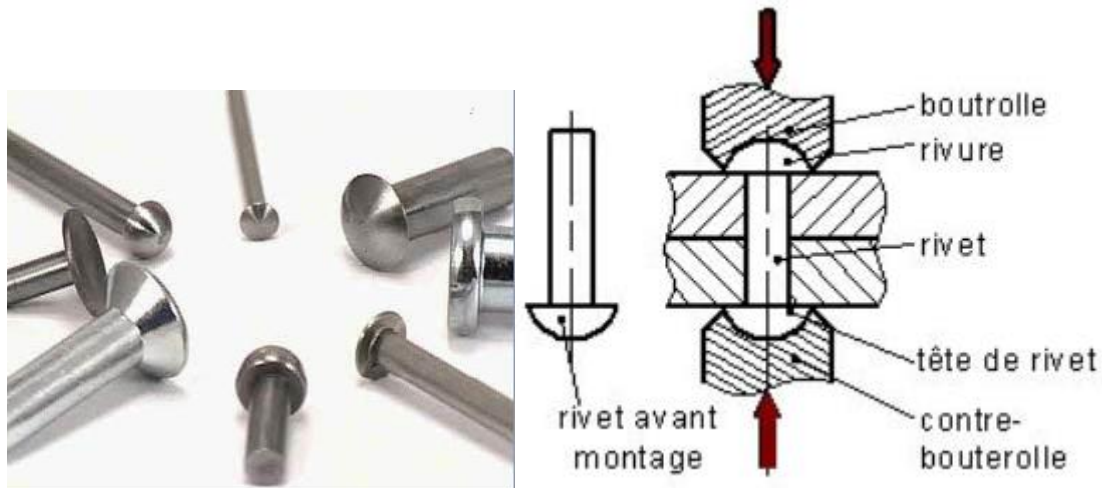


Fig.6.4. Le rivetage.

6.3.2. Le Boulonnage :

Le boulonnage est un procédé d'assemblage utilisé en charpente métallique. Il consiste à assembler des éléments moyennant des boulons posés dans des trous préalablement percés dans les pièces. Ces éléments d'attaches fonctionnent donc par leur corps pour résister aux sollicitation imposées.

On utilise dans ce cas soit :

- Des boulons ordinaires.
- Des boulons à haute résistance H.R.

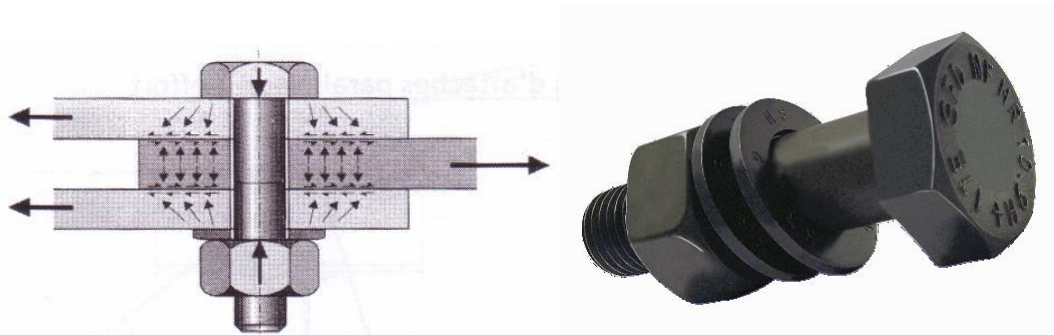


Fig.6.5. Boulonnage.

6.3.3. Le Soudage :

Par l'utilisation de cordons de soudure afin de réaliser l'assemblage.



Fig.6.6. Assemblage par soudure.

Le choix de type d'assemblage est dicté par des considérations techniques (fabrication, montage, transport, ...).

Remarque :

Les assemblages sont classés aussi en :

- Assemblage rigide ;
- Assemblage semi-rigide ;
- Assemblage « articulation ».

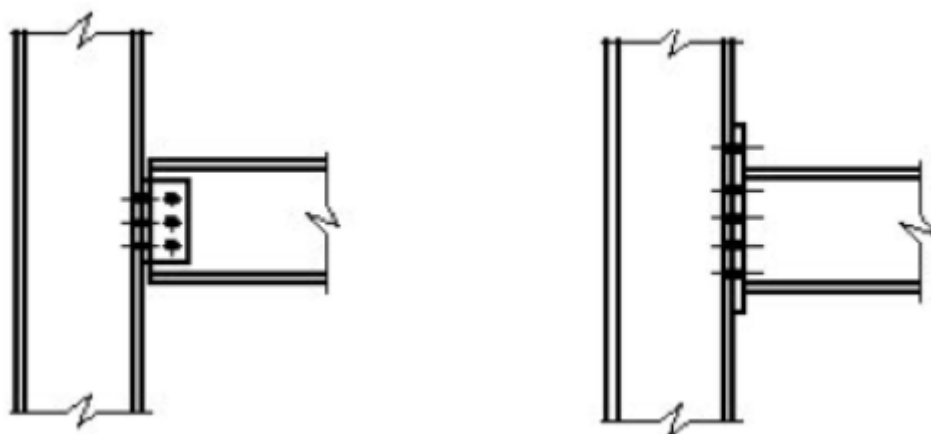


Fig.6.7. Réalisation d'un articulation/encastrement par l'assemblage.

6.4. Le Boulonnage Ordinaire « BO »

Les boulons normaux dite boulons ordinaires, sont prévus pour être mise en œuvre avec serrage simple, non contrôlé. Les assemblages par boulons ordinaires permettent de reprendre des efforts d'orientation quelconque par rapport à l'axe de tige. Il est d'usage d'envisager séparément les efforts parallèles et les efforts perpendiculaires à l'axe des tiges, qui correspondent à des modes de fonctionnement différents et requièrent des vérifications propres.

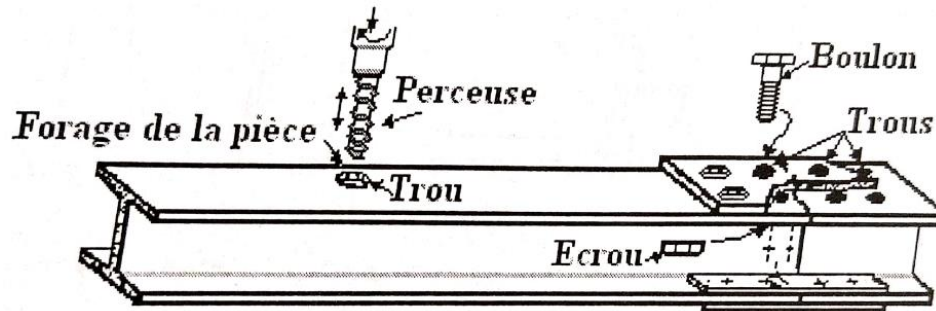


Fig.6.8. Perçages des trous et emplacement des boulons.

6.4.1. Caractéristiques géométriques des boulons:

Un boulon ordinaire est un ensemble constitué d'une tige ronde filetée pour fixer un écrou de forme hexagonale qui avec la tête du boulon assure le serrage des pièces assemblées. Une rondelle ronde peut être interposée sous l'écrou.

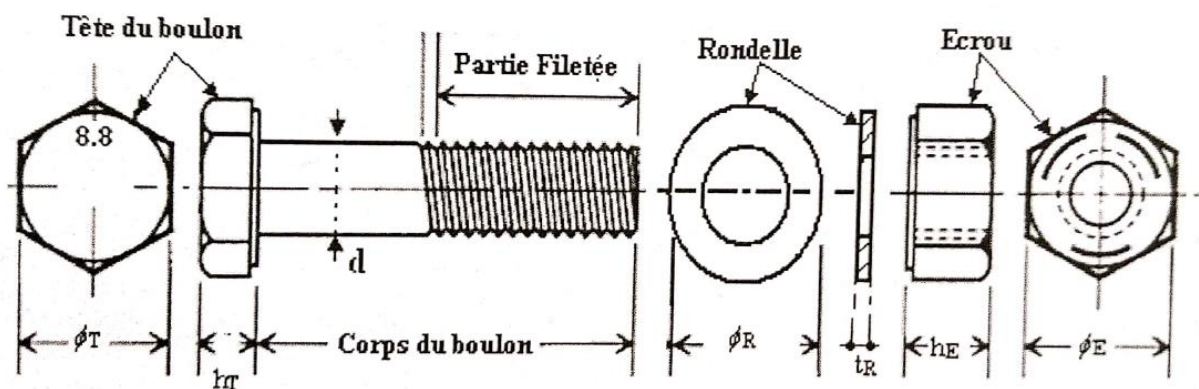


Fig.6.9. Constitutions d'un boulon ordinaire.

Les caractéristiques géométriques des boulons sont résumées dans le tableau 6.1.

La désignation d'un boulon se fait par le diamètre (d en mm) de la partie non filetée du corps du boulon précédé de la lettre majuscule (**M**). Par exemple, si $d = 18$ mm. La désignation est : **M18**.

Tableau 6.1. Caractéristiques géométriques des boulons

Désignation	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d (mm)	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
d ₀ (mm)	11	13	15	18	20	22	24	26	30	33
A (mm ²)	78.5	113	154	201	254	314	380	452	573	707
A _s (mm ²)	58	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561
d _m (mm)	18.3	20.5	23.7	24.6	29.1	32.4	34.5	38.8	44.2	49.6

d : diamètre de la partie lisse (non filetée) de la tige du boulon,
 d₀ : diamètre nominale du trou (tolérance normalisée),
 A : section nominale du boulon (dans la partie non filetée),
 A_s : section résistante de la partie filetée du boulon,
 d_m : diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit de la tête du boulon.

6.4.2. Caractéristiques mécaniques des boulons:

Les boulons sont produits en sept nuances d'aciers appelées (classe des boulons). Pour chaque classe on a une résistance limite élastique (f_{yb}) et une résistance ultime à la traction (f_{ub}). Une classe est définie par deux nombres (a.b) sachant que :

$$\begin{cases} f_{yb} = 10.a.b \\ f_{ub} = 100.a \end{cases} \quad (N/mm^2) \quad (6.1)$$

Tableau 6.2. caractéristiques mécaniques des boulons (f_{yb}, f_{ub})

Classe	a . b	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	$f_{yb}=a.b. 10$	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	$f_{ub}=a. 100$	400	400	500	500	600	800	1000

Les boulons de classe 8.8 et 10.9 sont appelés « boulons à haute résistance »

6.4.3. Dimensionnement des boulons ordinaires:

Les boulons résistent avec leurs corps pour transmettre l'ensemble des efforts d'une pièce à une autre. On peut résumer les sollicitations en trois cas :

- A. Le cisaillement
- B. La traction
- C. Les deux à la fois (cisaillement + Traction)

A. Boulons soumis à un effort de cisaillement:

Dans ce cas, il convient de vérifier :

- La Résistance au cisaillement des boulons
- La résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées.

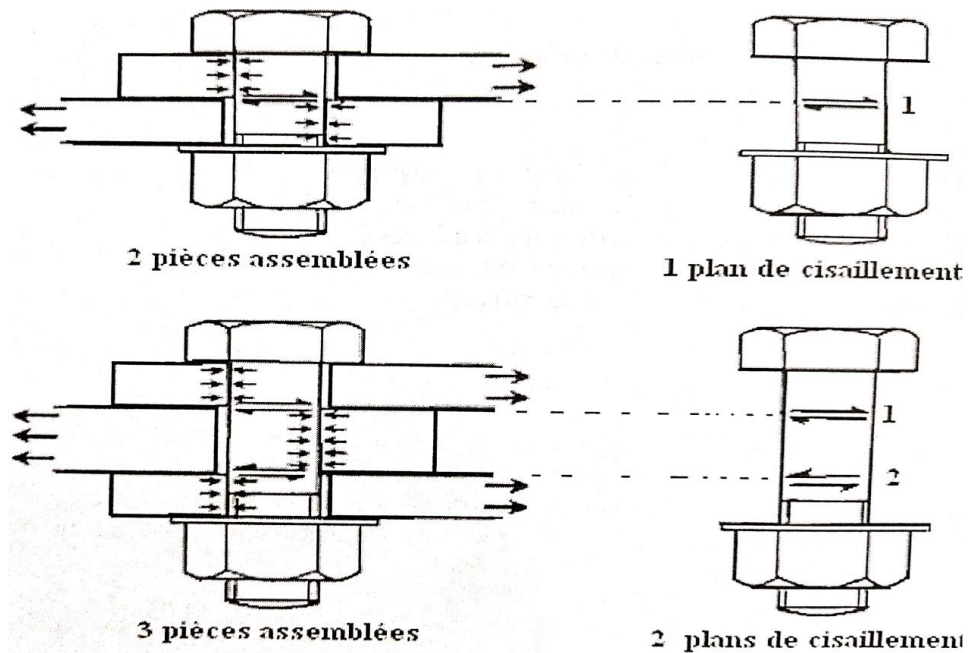


Fig. 6.10. Boulons soumis à un effort de cisaillement (un plan/ 2 plans).

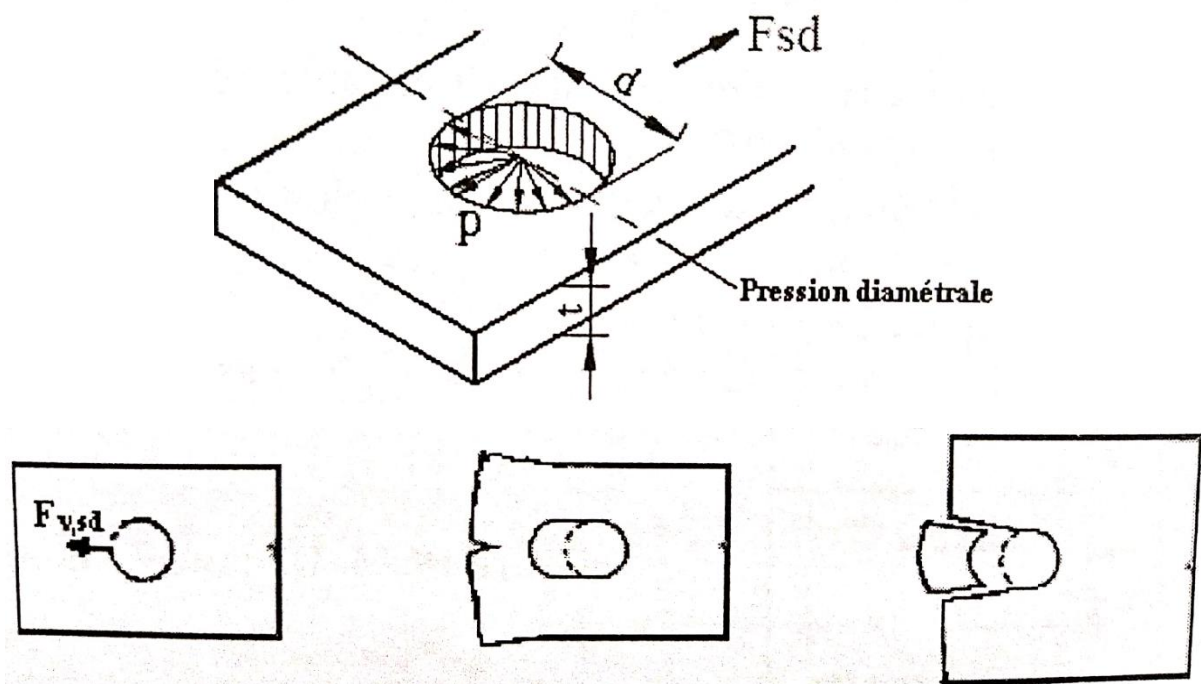


Fig. 6.11. Pression diamétrale sur une pièce assemblée.

A.1. Résistance des boulons au cisaillement :

L'effort de cisaillement de calcul revenant à chaque boulons $F_{v,Sd}$ doit rester inférieur ou égale à l'effort résistant de cisaillement de calcul $F_{v,Rd}$.

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd} \quad (6.2)$$

- Pour les boulons de classe **4.6, 5.6** et **8.8** :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (6.3)$$

- Pour les boulons de classe **4.8, 5.8, 6.8** et **10.9** :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (6.4)$$

- Si le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}} \quad (6.5)$$

Avec :

A_s : aire de la section résistante de la partie filetée du boulon

A : la section nominale de la partie non filetée du boulon

f_{ub} : résistance ultime à la traction de l'acier du boulon.

γ_{Mb} : coefficient partiel de sécurité $\gamma_{Mb} = 1.25$

Remarque :

Dans le cas d'assemblage de plusieurs pièces (>2) la résistance pour un boulon doit être multipliée par le nombre de plans de cisaillement.

A.2. Résistance des pièces assemblées à la pression diamétrale:

Cette vérification tient compte des dimensions géométriques des pièces assemblées aux voisinages des boulons :

$$F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd} \quad (6.6)$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} \quad (6.7)$$

$$\alpha = \min\left(\frac{e_1}{3 d_0}; \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right) \quad (6.8)$$

$F_{b,Rd}$: la résistance de la pièce à la pression diamétrale au bord d'un trou normalisé.

d : diamètre de la partie no filetée de la tige du boulon.

d_0 : diamètre nominal du trou

t : l'épaisseur de la pièce assemblée.

f_u : résistance ultime à la traction de l'acier de la pièce assemblée

e_1, p_1 : pour les dispositions constructives (figure 6.12)

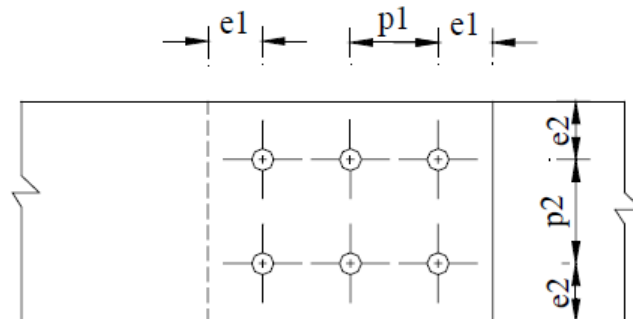


Fig. 6.12. Distances e_1 et p_1 .

Remarque :

Si les trous surdimensionnés sont utilisés, la valeur de $F_{b,Rd}$ serait multipliée par 0.8 si les trous sont oblongs et l'effort est perpendiculaire à la fente on prend $0.6 F_{b,Rd}$

A.3. Catégorie de l'assemblage :

L'assemblage par boulons ordinaires qui est dimensionné par rapport à l'effort de cisaillement ultime est la pression diamétrale est classé en **Catégorie A** par le CCM 97 (EC3). Les assemblages de cette catégorie sont appelés : Assemblages travaillent à la pression diamétrale.

B. Boulons soumis à un effort de traction:

Les boulons sont sollicités en traction si la sollicitation est parallèle à l'axe de la tige. Dans ce cas, il convient de vérifier :

- La résistance à la traction des boulons
- Le poinçonnement

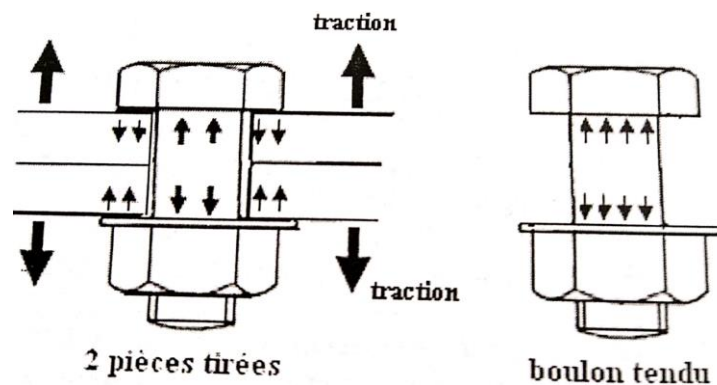


Fig. 6.13. Boulon soumis à un effort de Traction.

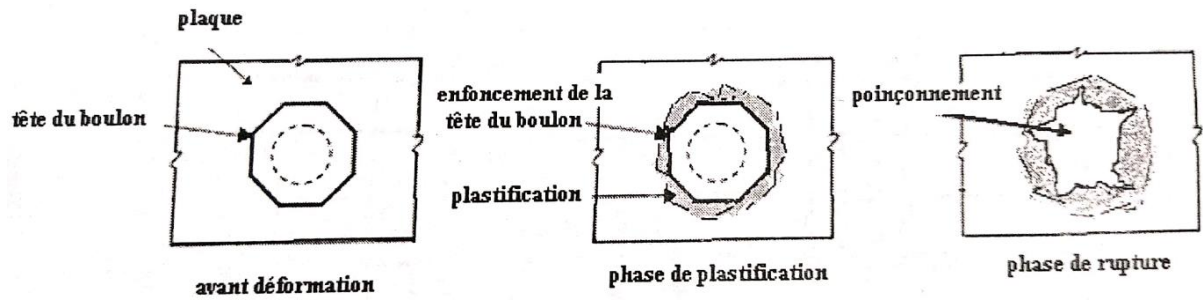


Fig. 6.14. Ruine des pièces par poinçonnement.

B.1. Résistance des boulons à la traction :

Pour un boulon tendu il faut que :

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \quad (6.9)$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad (6.10)$$

$\gamma_{Mb} = 1.5$ (Dans le cas où les boulons travaillant en traction) ;

A_s : la section résistante de la partie filetée du boulon ;

f_{ub} : la résistance ultime à la traction de l'acier du boulon.

B.2. Vérification du poinçonnement:

La vérification au poinçonnement exprime la résistance de la pièce sous la charge concentrée appliquée par la tête du boulon ou l'écrou. Elle est donnée par :

$$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd} \quad (6.11)$$

$$B_{p,Rd} = 0.6 \pi d_m t_p \frac{f_u}{\gamma_{Mb}} \quad (6.12)$$

$B_{p,Rd}$: la résistance au poinçonnement de la pièce.

$\gamma_{Mb} = 1.25$

d_m : diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le diamètre inscrit de la tête du boulon.

t_p : l'épaisseur de la pièce assemblée.

f_u : la résistance ultime à la traction de l'acier de la pièce assemblée.

B.3. Catégorie de l'assemblage:

Les assemblages en boulons ordinaire résistants à l'effort de traction et vérifiés au poinçonnement sont classés par le C.C.M 97 (EC3) en **Catégorie D**. cette catégorie désigne les assemblages par boulons tendus non précontraints.

C. Effort combiné entre la traction et le cisaillement :

Une sollicitation inclinée sur les pièces assemblées donne une intersection entre le cisaillement et la traction (figure suivante).

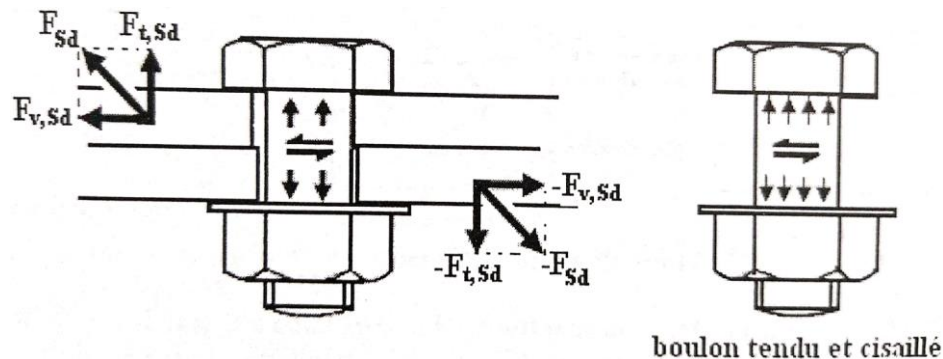


Fig.6.15. Un boulon tendu et cisailé.

C.1. Vérification d'un boulon soumis aux effets combinés:

Dans ce cas, le CCM97 (EC3) recommande de satisfaire les conditions suivantes :

- Le boulon aux effets combinés :

$$\frac{F_{t,sd}}{1.4 F_{t,Rd}} + \frac{F_{v,sd}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \quad (6.13)$$

- Le boulon tendu :

$$F_{t,sd} \leq F_{t,Rd} \quad (6.14)$$

- La pression diamétrale :

$$F_{v,sd} \leq F_{b,Rd} \quad (6.15)$$

- Le poinçonnement pour les boulons uniquement :

$$F_{t,sd} \leq B_{p,Rd} \quad (6.16)$$

6.4.4. Jeu dans les trous:

Les normes de jeu proposées par le CCM97 (EC3) sont pour les trous suivants :

- Trous normalisés : pour les Assemblages de toutes les catégories.
- Trous surdimensionnées : pour les assemblages des catégories A, B et C (Assemblages travaillants au cisaillement)
- Trous oblongs courts : pour les assemblages de catégorie A, B et C.
- Trous oblongs longs : pour les assemblages de catégorie A, B et C.

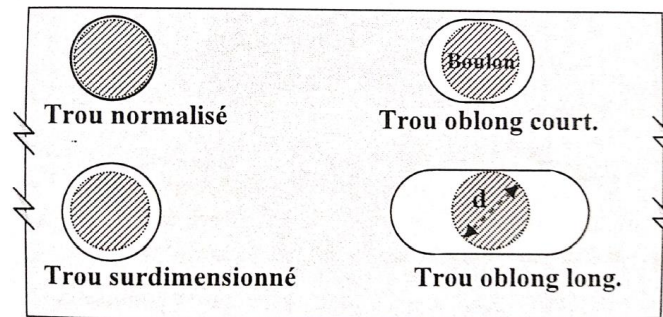


Fig.6.16. Types de trous pour un boulon.

Tableau 6.3. Normes des dimensions des trous de boulons (mm)

Boulon Trou	à/de M12	à/de M14	à/de M16	à/de M22	à/de M24	Au-delà M27
Normalisé « d ₀ »	d + 1		d + 2		d + 3	
Surdimensionné« d ₀ »	d + 3	d + 4			d + 6	d + 8
Oblong court	(d + 1) Par (d + 4)		(d + 2) Par (d + 6)		(d + 2) Par (d + 8)	(d + 3) Par (d + 10)
Oblong long	(d + 1) Par 2,5 .d		(d + 2) Par 2,5 .d ,			(d + 3) Par 2,5 .d
d : diamètre nominal du boulon en mm.						

Remarque :

Pour les assemblages longs de catégorie A, si la distance entre les centres des deux files de boulons d'extrémités est importante $L_j > 15 d$, il faut que:

$$F_{v, sd} \leq \beta_{Lf} F_{b, Rd} \quad (6.17)$$

Avec :

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200 d} \quad (0.75 \leq \beta_{Lf} \leq 1.0) \quad (6.18)$$

β_{Lf} : un coefficient minorateur.

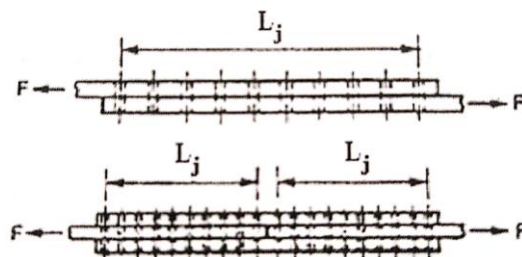


Fig. 6.17. Assemblages longs

6.5. Le Boulonnage haute résistance « H.R »

Un boulon H.R ou à haute résistance a le même aspect qu'un boulon ordinaire, fabriqué à partir d'un acier à **haute limite élastique**. Il comporte en plus une deuxième rondelle qui doit être incorporée au niveau de la tête du boulon pour éviter le poinçonnement des pièces assemblées (figure ci-dessous).

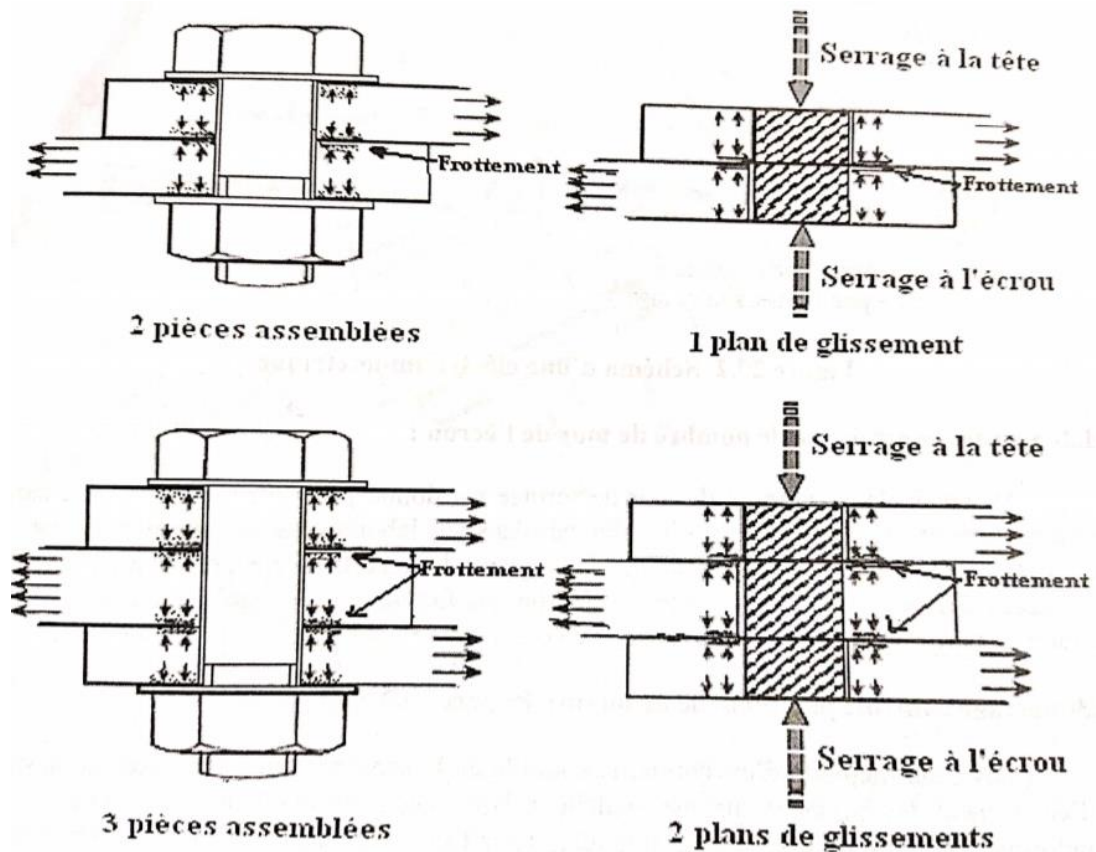


Fig. 6.18. Assemblages avec boulon H.R

6.5.1. Mode de fonctionnement d'un assemblage par boulonnage H.R:

Lors du boulonnage, le boulon est fortement serré, ce qui a pour effet de lui transmettre un effort de précontrainte qui va tendre la tige de boulon. Cette précontrainte agit perpendiculairement au plan de contact des pièces assemblées, elle développe par frottement mutuel des pièces, **une forte résistance à leur glissement relatif**.

Contrairement aux boulons ordinaires, les boulons H.R ne travaillent pas en cisaillement, mais transmettent les efforts par frottement ou par adhérence. On les appelle aussi des boulons précontraints ou à serrage contrôlé.

Les efforts qui seront transmis sont proportionnels :

- A la précontrainte
- A l'état de surface

Seules deux classes existent, **8.8 et 10.9** pour les boulons **H.R**.

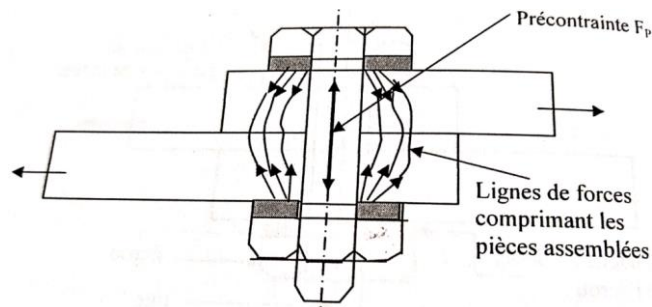


Fig. 6.19. Mode de fonctionnement d'un boulon H.R

6.5.2. Exécution d'un boulonnage H.R

La réalisation d'un serrage contrôlé aux chantiers peut être faite par plusieurs procédés, on cite :

- Serrage par clé dynamométrique :

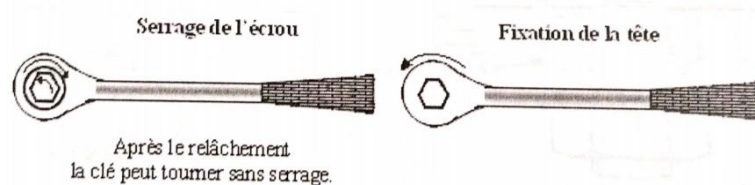


Fig.6.20. Une clé dynamométrique

- Serrage contrôlé par le nombre de tour de l'écrou
- Serrage contrôlé par rondelle de mesure

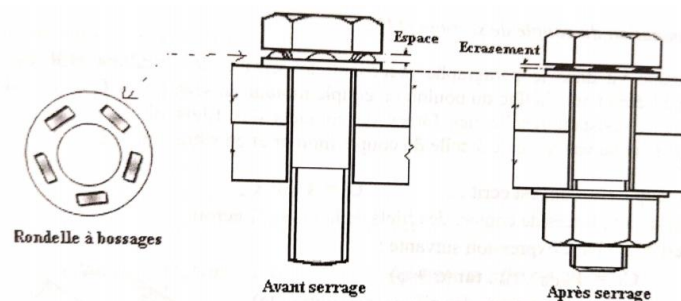


Fig.6.21. Serrage contrôlé par rondelle de mesure.

- Serrage contrôlé avec la gorge de rupture

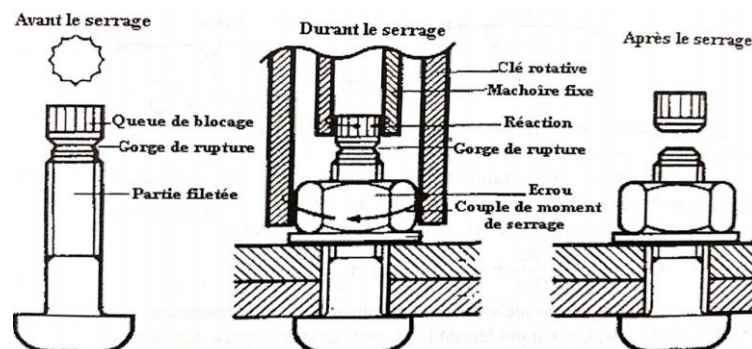


Fig.6.22. Serrage avec la gorge de rupture.

6.5.3. Résistance de l'assemblage H.R

Les boulons H.R résistent au :

- A- Glissement
- B- Traction
- C- Les deux à la fois (glissement + Traction)

A. Calcul des boulons H.R dans les assemblages résistant au glissement:

Le C.C.M 97 (EC 3) classe les assemblages résistants au glissement en deux catégories qui sont :

A.1. Assemblage catégorie B :

On doit vérifier que : (à l'ELS et ELU)

$$F_{v,Sd}^{ser} \leq F_{s,Rd}^{ser} \quad (6.19)$$

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd} \quad (6.20)$$

$$F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd} \quad (6.21)$$

A.2. Assemblage catégorie C :

On doit vérifier que : (à ELU)

$$F_{v,Sd} \leq F_{s,Rd} \quad (6.22)$$

$$F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd} \quad (6.23)$$

Pour les deux catégories B et C, $F_{s,Rd}$, est la résistance au glissement d'un boulon précontraint donnée par la formule suivante :

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu F_{p.cd}}{\gamma_{Ms}} \quad (6.24)$$

Avec :

$F_{p.cd}$: La force de précontrainte

$$F_{p.cd} = 0.7 f_{ub} A_s \quad (6.25)$$

A_s : la section résistante de la partie filetée du boulon

f_{ub} : la résistance ultime à la traction de l'acier du boulon H.R

n : le nombre de plan de frottement

k_s : coefficient fonction de la dimension des trous de perçage. (Tableau 6.4)

μ : coefficient de frottement dépend de la qualité de traitement des surfaces de contact entre les pièces assemblées. (Tableau 6.5)

γ_{Ms} : coefficient partiel de sécurité. (Tableau 6.6)

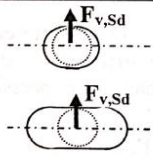
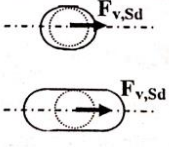
Tableau 6.4. les valeurs de coefficient k_s

Type de trous	k_s
Normalisés	1,0
Surdimensionnés ou oblongs courts	0,85
Oblongs longs	0,70

Tableau 6.5. Les valeurs de coefficient μ

Classe du traitement	Traitement de la surface de contact	μ
A	- Surfaces décapées par grenaillage ou sablage, avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes et sans piqûres de corrosion.	0,50
	- Surfaces décapées par grenaillage ou sablage et métallisées par projection d'aluminium.	
	- Surfaces décapées par grenaillage ou sablage et métallisées par projection d'un revêtement à base de zinc, garantissant un coefficient de frottement qui ne soit pas inférieur à 0,5.	
B	Surfaces décapées par grenaillage ou sablage et recouvertes d'une couche de peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80 μm .	0,40
C	- Surfaces nettoyées par brossage métallique ou à la flamme avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes.	0,30
D	- Surfaces non traitées.	0,20

Tableau 6.6. valeurs de γ_{Ms}

Coefficient partiel de sécurité		γ_{Ms}	
Catégorie d'assemblage		C	B
Etat limite de calcul		Ultime	Service
Type de trous et direction de la force.	Schéma	$\gamma_{Ms,ult}$	$\gamma_{Ms,ser}$
Normalisés		1,25	1,10
Oblongs courts ou longs avec effort $\perp$ l'axe de la fente.			
Surdimensionnés		1,40	-
Oblongs courts ou longs avec effort // l'axe de la fente.			

B. Calcul des boulons H.R dans les assemblages résistant à la traction:

La vérification devient :

$$F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \quad (6.26)$$

Et :

$$F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd} \quad (6.27)$$

Remarque :

Les assemblages en boulonnages H.R qui travaillent à la traction sont classés dans la **CATEGORIE E** par le C.C.M 97 (EC 3).

C. Traction et glissement combinés:

L'application d'un effort de traction sur les boulons d'un assemblage résistant au glissement va réduire la force de serrage. Environ 80% de l'effort de traction va se retranche de l'effort de précontraint. Cette force de traction va diminuer la résistance au glissement dans l'interface de contact.

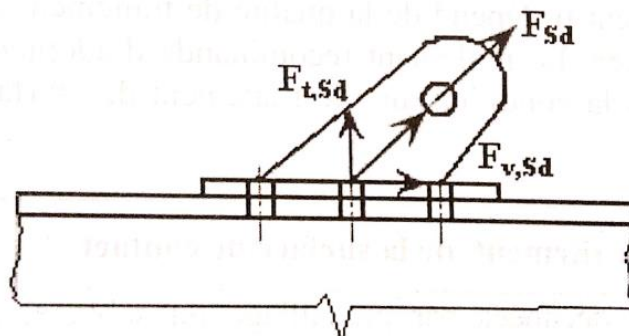


Fig. 6.23. Sollicitation combinée d'un système de boulonnage.

Le tableau suivant résume les vérifications nécessaires dans les deux catégories d'assemblages B et C.

Tableau 6.7. Vérification d'un boulonnage H.R résistant au glissement et traction

	Catégorie B	Catégorie C
$F_{s,Rd}$	$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{p,Cd} - 0,8 \cdot F_{t,sd,ser})}{\gamma_{Ms,ser}}$	$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{p,Cd} - 0,8 \cdot F_{t,sd})}{\gamma_{Ms,ult}}$
Vérifications	$F_{v,Sd,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd}$ $F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$	$F_{v,Sd} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd}$ $F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$