# COUR 1

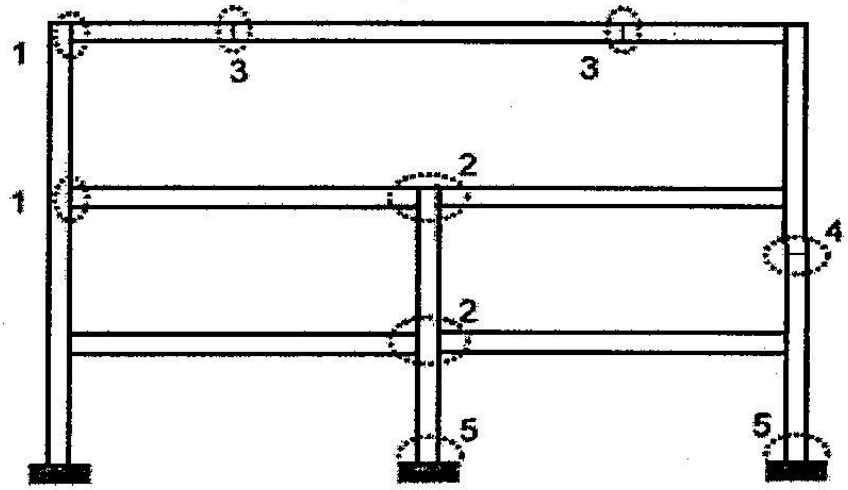
# Construction Métallique

Chapitre 1 : calcul des éléments d'assemblages.

# [redacted] : Le boulonnage ordinaire B.O

## *I – Introduction :*

Les assemblages sont des procédés d'attachements entre plusieurs éléments afin d'assurer la continuité de la structure dans les points assemblés [Figure 19.1]. Dans la charpente métallique, les moyens d'assemblages utilisés sont soit les assemblages boulonnés ou soudés. Les assemblages boulonnés peuvent êtres réalisés en rivets, en boulons ordinaires ou en boulons à haute résistance avec précontrainte. D'autres types de boulons peuvent être utilisés comme les boulons sertis appelés aussi rivelons, les axes d'articulations, les goujons filetés....




a) Configurations d'assemblage selon l'axe d'inertie maximale

Légende

1 Configuration unilatérale d'assemblage poutre-poteau

2 Configuration bilatérale d'assemblage poutre-poteau

3 Assemblage de continuité de poutre

4 Assemblage de continuité de poteau

5 Pied de poteau

**Figure 19.1 Différents type d'assemblage dans une structure métallique.**

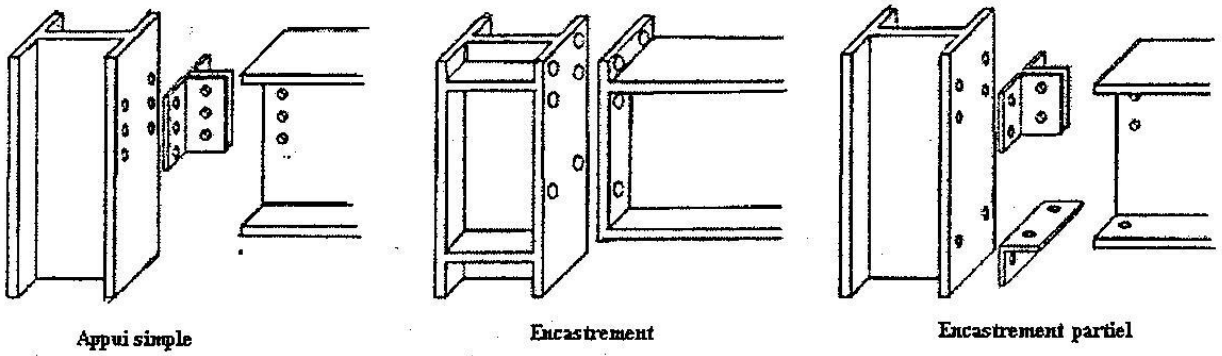



**Figure 19.2 Exemples d'assemblage poutre –poteau.**

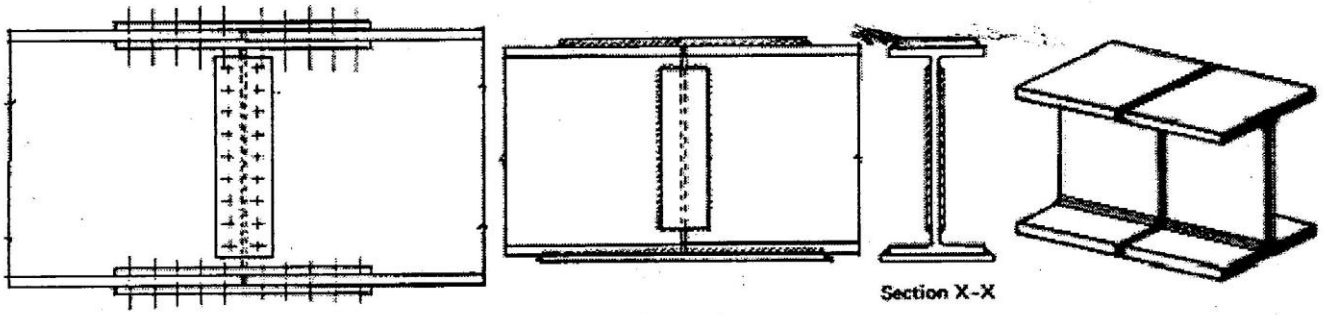



**Figure 19.3 Exemples d'assemblage de continuité de poutre.**

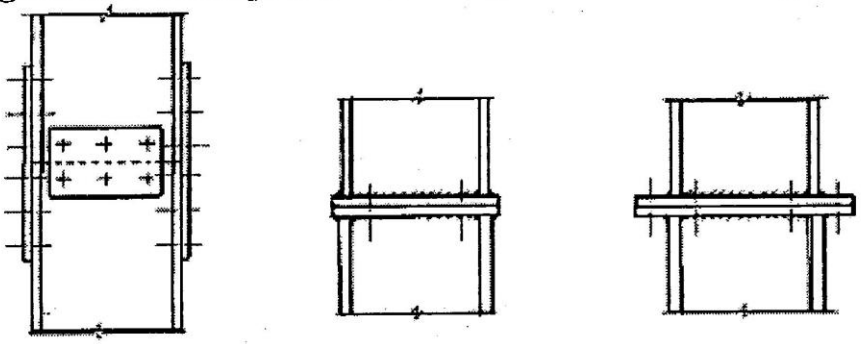



**Figure 19.4 Exemples d'assemblage de continuité de poteau.**

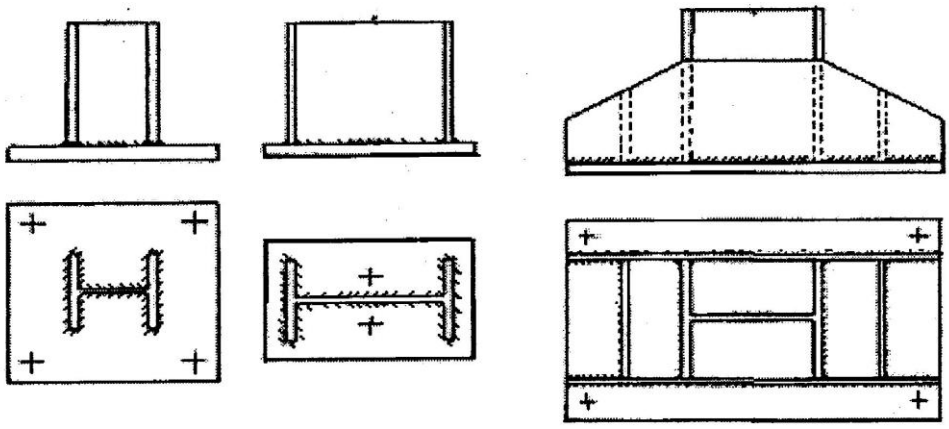


**Figure 19.5 Exemples d'assemblages en pieds de poteau.**

***II – 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 leurs corps pour résister aux sollicitations imposées.

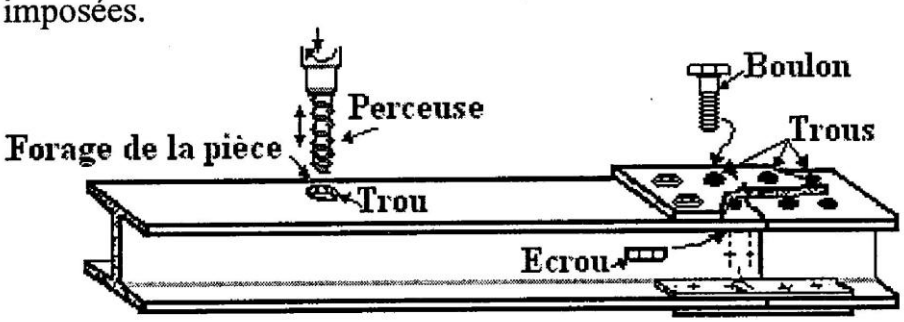



**Figure 19.6 Perçage des trous et emplacement des boulons.**

**II.1– Les boulons :** Les boulons sont constitués d'une barre ronde filetée pour fixer un écrou de forme hexagonale qui avec la tête du boulon assure le serrage des pièces assemblées. Une rondelle ronde ou carré, plane ou avec bossage peut être interposée sous l'écrou.

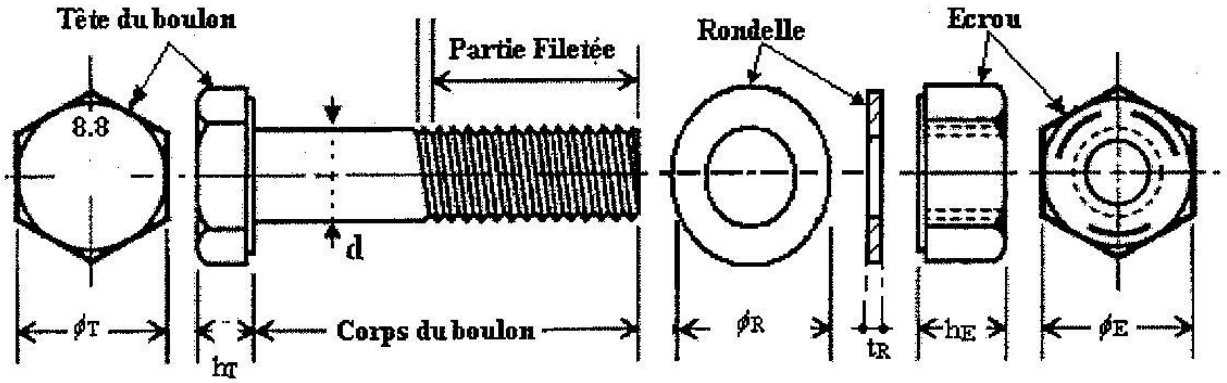



**Figure 19.7 Terminologie d'un boulon.**

**II-1–a- Caractéristiques géométriques des boulons :** Les caractéristiques géométriques des boulons qui sont indispensables pour concevoir, dimensionner et réaliser un boulonnage sont résumés dans le tableau suivant :

| Désignation | M8 | M10 | M12 | M14 | M16 | M18 | M20 | M22 | M24 | M27 | M30 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d (mm) | 8 | 10 | 12 | 14 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 27 | 30 |
| $d_0$ (mm) | 9 | 11 | 13 | 15 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 30 | 33 |
| A ($mm^2$) | 50,3 | 78,5 | 113 | 154 | 201 | 254 | 314 | 380 | 452 | 573 | 707 |
| $A_S$ ($mm^2$) | 36,6 | 58 | 84,3 | 115 | 157 | 192 | 245 | 303 | 353 | 459 | 561 |
| $\phi_R$ (mm) | 16 | 20 | 24 | 27 | 30 | 34 | 36 | 40 | 44 | 50 | 52 |
| $t_R$ (mm) | <3 | <3 | 3 | 3 | 3 | 3/4 | 4 | 4 | 4 | 4/5 | 5 |
| $d_m$ (mm) | 14 | 18,3 | 20,5 | 23,7 | 24,58 | 29,1 | 32,4 | 34,5 | 38,8 | 44,2 | 49,6 |
| $\phi_T$ (mm) (1) | 12/14 | 15/17 | 18/22 | 21/24 | 24/27 | 27/31 | 30/32 | 33/35 | 36/41 | 41/46 | 46/50 |
| $h_T$ (mm) | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 12 | 13 | 14 | 15 | 17 | 19 |
| $\phi_E$ (mm) | 12/14 | 15/17 | 18/22 | 21/24 | 24/27 | 27/31 | 30/32 | 33/35 | 36/41 | 41/46 | 46/50 |
| $h_E$ (mm) (2) | 7/7 | 9/9 | 10,8/11 | 12,6/13 | 14,8/15 | 16,2/17 | 18/18 | 20/20 | 21,5/22 | 24,3/25 | 25,6/27 |
| $\phi_{clé}$ (mm) | 21 | 27 | 31 | 51 | 51 | 51 | 58 | 58 | 58 | 58 | 58 |
| Tôle usuelle (mm) | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 10,14 | >14 | - | - |
| Cornière usuelle (mm) | 30 | 35 | 40 | 50 | 60 | 70 | 80 | 120 | >120 | - | - |
| (1): La deuxième valeur concerne les boulons de classe 10.9 . | | | | | | | | | | | |
| (2): La deuxième valeur concerne les boulons de classe 8.8 et 10.9 . | | | | | | | | | | | |

**Tableau 19.1 Caractéristiques géométriques d'un boulon [22].**

**d :** diamètre de la partie non filetée de la tige.

$\mathbf{d_0}$ **:** diamètre nominal du trou.

**A :** la section nominale du boulon (la partie non filetée).

$\mathbf{A_s}$ **:** la section résistante de la partie filetée du boulon.

$\phi_R$ **:** diamètre de la rondelle.

$t_R$ **:** l'épaisseur de la rondelle.

$\mathbf{d_m}$ **:** diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit de la tête du boulon.

$\phi_T$ **:** diamètre circonscrit de la tête du boulon.

$h_T$ **:** la hauteur de la tête du boulon.

$\phi_E$ **:** diamètre extérieur de l'écrou.

$h_E$ **:** la hauteur de l'écrou.

$\phi_{clé}$ **:** diamètre de la clé pour tourner et serrer l'écrou.

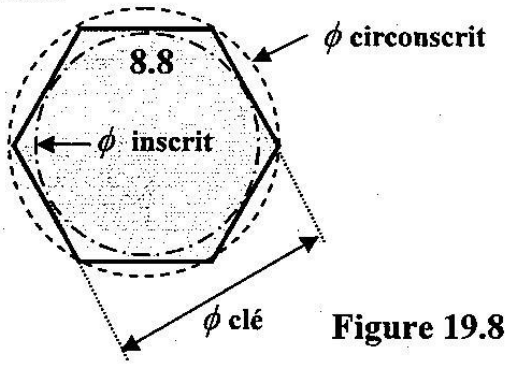



**Figure 19.8**

**II-1–b- Caractéristiques mécaniques des boulons:** Les boulons sont produits en sept nuances d'aciers appelées classe de boulon. Chaque classe donne une résistance à la limite élastique $f_{yb}$ et une résistance ultime à la traction $f_{ub}$. Les boulons de classes **8.8** et **10.9** sont appelés boulons à haute résistance (**H.R**).

| Classe | Classe : a . b | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 10.9 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $f_{yb}$ (N/mm²) | $f_{yb}$ = a . b . 10 | 240 | 320 | 300 | 400 | 480 | 640 | 900 |
| $f_{ub}$ (N/mm²) | $f_{ub}$ = a . 100 | 400 | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 1000 |

**Tableau 19.2 Classes de boulons et valeurs de $f_{yb}$ et $f_{ub}$ .**

**II.2– Les rivets :** Le rivetage est la plus ancienne procédure d'assemblage utilisée. Cette technique de moins en moins utilisée, consiste a 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 second tête de l'autre coté de l'assemblage.

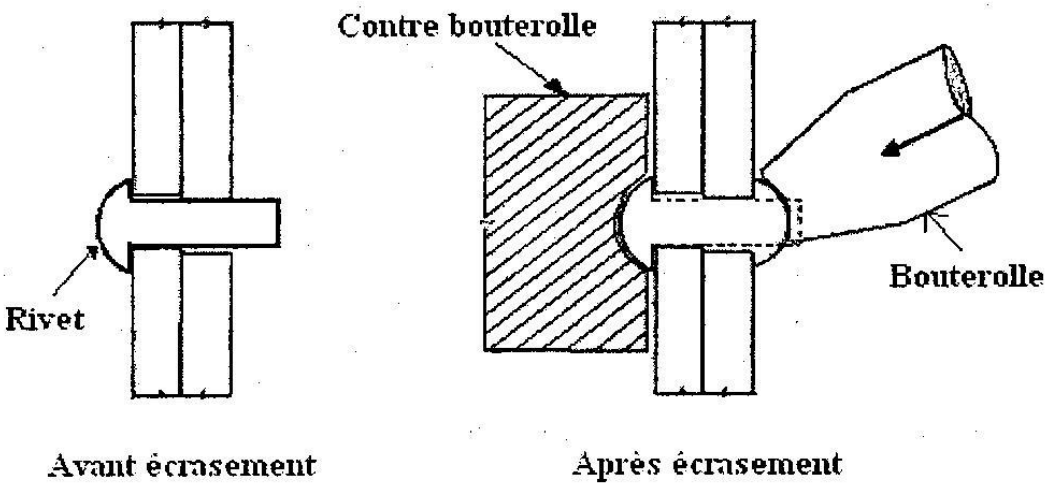



**Figure 19.9 Exécution de la pose d'un rivet.**

- **Caractéristiques géométriques et mécaniques des rivets:** De même que pour les boulons, les caractéristiques géométriques et mécaniques des rivets sont indispensables pour réaliser des assemblages avec eux. La gamme des diamètres des rivets varie de 2 mm à plus de 24 mm, mais les diamètres utilisés dans les structures métalliques dépassent 8 mm. Dans ce qui suit, nous allons citer quelques types de rivets et leurs caractéristiques, en fonction de la forme de leurs têtes.

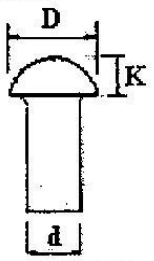
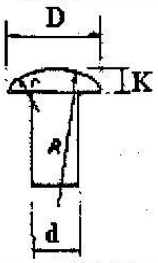
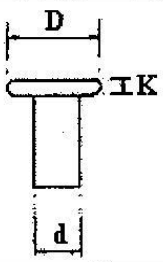
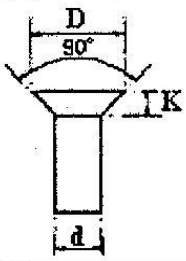
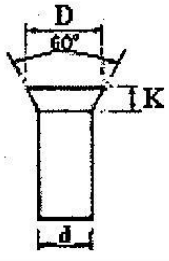
| Rivet | | à tête ronde | à tête de goutte | à tête plate | à tête fraisée | à tête fraisée |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Valeur de | Formage à |  |  |  |  |  |
| D | Froid | 1,75 . d | 2 . d | 2 . d | 2 . d | 1,5 . d |
| | Chaud | 1,6 . d | | | | |
| K | Froid | 0,6 . d | 0,4 . d | 0,25 . d | 0,5 . d | 0,43. d |
| | Chaud | 0,65 . d | | | | |
| R | - | - | 3 . d | - | - | - |
| r | - | - | 0,6 .d | - | - | - |

**Tableau 19.3 Caractéristiques géométriques de quelques rivets.**

Dans les normes de référence groupe 6, l'Eurocode donne pour les différentes nuances d'aciers constituant les rivets, la résistance à la limite élastique $f_{yr}$ et une résistance ultime à la traction $f_{ur}$.

**II.3– Les boulons sertis « Rivelons »:** Les boulons sertis sont des éléments d'attaches constitués d'une tige à tête et une bague dite de sertissage. La tige est divisée en deux parties filetées par une section affaiblie nommée gorge de rupture. Après la pose de la tige dans le trou des pièces à assembler la bague est vissée manuellement dans le filetage de la seconde partie appelée tige de sertissage [Figure 19.10]. Par la suite, un pistolet est utilisé pour le serrage s'appuyant sur le filetage de la tige de préhension, il va enfoncer la bague jusqu'à ce qu'elle se bloque contre la pièce assemblée. En continuant le serrage par le pistolet, la tige est de plus en plus tendue et par conséquent la bague est proportionnellement comprimée par la bouterolle du pistolet d'une part et la butée de la pièce de l'autre. Sous cette compression, la bague s'écrase est se sertie dans le trou d'assemblage et les rainures de la seconde partie de la tige (rainures de sertissage). L'effort de traction dans la tige continue de croître au cours du serrage, cette dernière va casser au niveau de la gorge de rupture. Les pièces sont donc serrées entre la tête et la bague et sont ainsi assemblées [Figure 19.11].

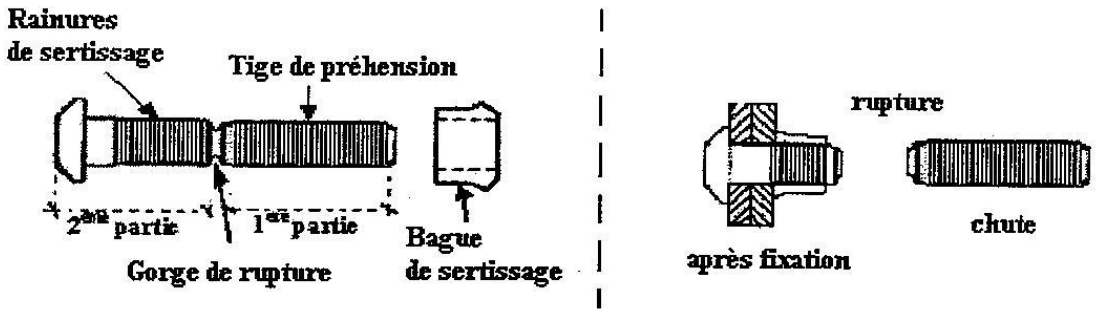



**Figure 19.10 Description d'un boulon serti.**

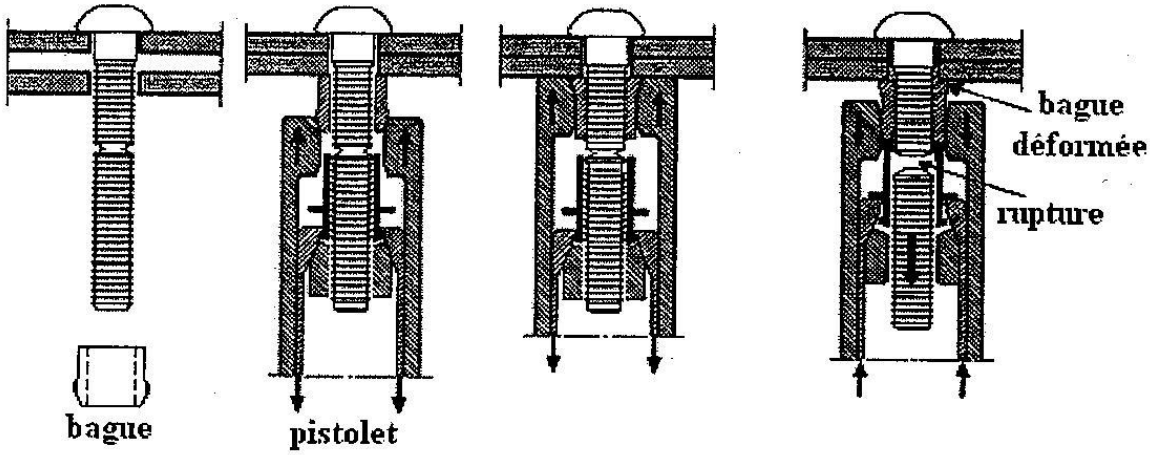



**Figure 19.11 Mise en place d'un boulon serti [15].**

- **Caractéristiques géométriques et mécaniques des boulons sertis :** En suivant les directives du centre national de recherche appliquée en génie parasismique Algérien, nous allons citer trois types de boulons sertis :

| Boulon serti | R . 80 | | R. 100 | | C – 50 - L | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Forme de tête | RC.80 | RF.80 | RC.100 | RF.100 | C-50-LR-BR | C-50-L90 BR |
| | cylindrique | Fraisée | cylindrique | Fraisée | cylindrique | Fraisée |
| $f_u$ (N/mm²) | 800 | | 900 ÷ 1150 | | 900 ÷ 1150 | |
| $f_y$ (N/mm²) | 600 | | 800 | | 800 | |
| $\varepsilon_r$ % (rupture) | 12 | | 10 | | 10 | |
| Marquage en tête | - | | 100 T | | 3 traits | |

**Tableau 19.4 Caractéristiques mécaniques des boulons sertis produits par la société 'SAINT SHAMOND GRANAT' [4].**

### *II – Mécanismes de fonctionnements d'un boulonnage ordinaire:*

pour assurer la continuité dans un assemblage par boulonnage ordinaire, les boulons résistent avec leurs corps pour transmettre l'ensemble des efforts d'une pièce à une autre. On peut résumer les sollicitations des boulons en trois cas; le cisaillement, la traction ou les deux à la fois.

**III.1- Le cisaillement:** Travaillant comme une butée entre les pièces, la tige du boulon est **cisaillée** dans les plans des interfaces de frôlement entre les pièces [Figure 19.12]. Des contraintes normales sont crées au niveau des points de contacts entre les plaques assemblées et le boulon; ces contraintes sont appelées **pressions diamétrales** [Figure 19.13], d'où la nécessité de vérifier que les épaisseurs des pièces assemblées suffisent pour résister à ces contraintes planes [Figure 19.14]. Le nombre des plans de contacts influe sur la résistance du boulon [Figure 19.12], car en augmentant, il multiplie le nombre des sections résistantes de la tige.

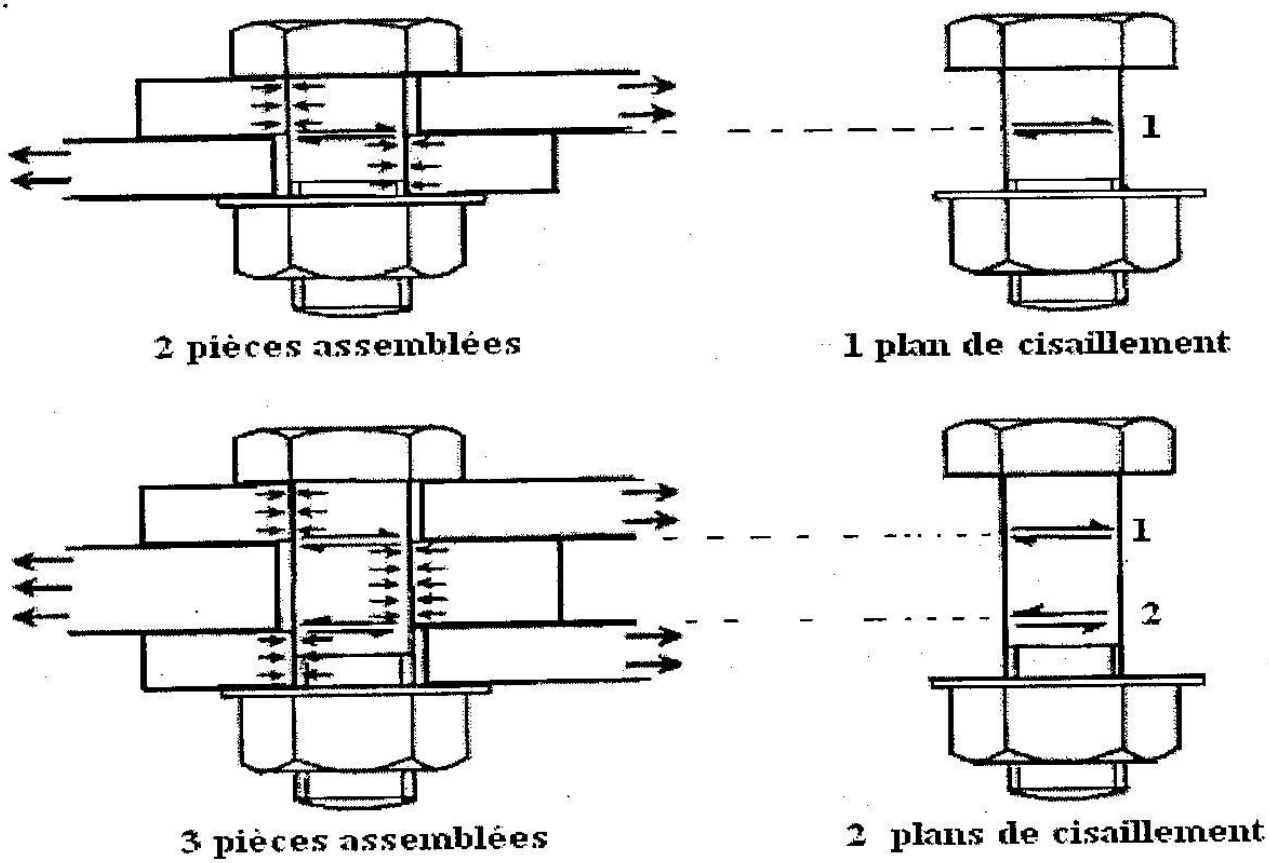



**Figure 19.12 Fonctionnement et nombre de plan de cisaillement dans un boulon.**

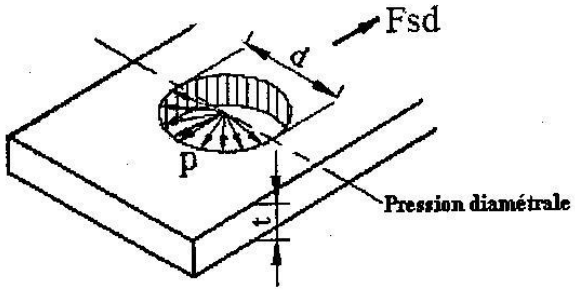



**Figure 19.13 La pression diamétrale sur une pièce assemblée.**

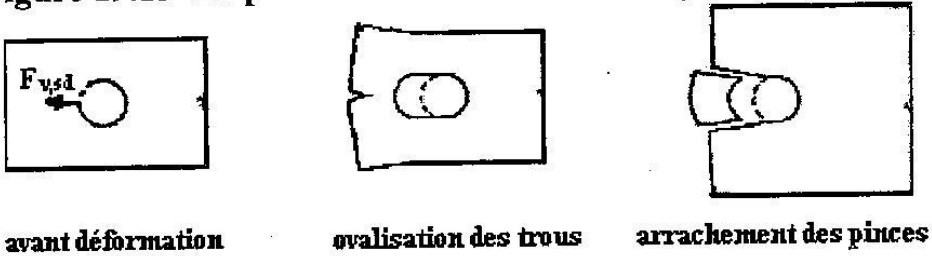



**Figure 19.14 Mode de ruine des pièces par pression diamétrale.**

**III–1-a- Résistance du boulon au cisaillement :** La résistance au cisaillement d'un boulon $F_{v,Rd}$ est donnée en fonction de sa classe avec la valeur ultime de l'acier. Pour un plan de cisaillement, il faut que :

$$F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$$

- Pour les classes 4.6 , 5.6 , 6.6 et 8.8 : $F_{v,Rd} = \dfrac{0,6 . f_{ub} . A_s}{\gamma_{Mb}}$
- Pour les classes 4.8 , 5.8 , 6.8 et 10.9 : $F_{v,Rd} = \dfrac{0,5 . f_{ub} . A_s}{\gamma_{Mb}}$
- Si le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon :

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 . f_{ub} . A}{\gamma_{Mb}}$$

- $\gamma_{Mb} = 1,25$ . (Coefficient partiel de sécurité de boulonnage)
- $A_s$ : la section résistante de la partie filetée du boulon.
- A : la section nominale du boulon (la partie non filetée).
- $f_{ub}$ : la résistance ultime à la traction de l'acier du boulon.

**Pour les rivets :** $F_{v,Sd} \leq F_{v,Rd}$

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 . f_{ur} . A_0}{\gamma_{Mb}} \quad ; \quad \gamma_{Mb} = 1,25 .$$

- $A_0$ : la section nominale du rivet.
- $f_{ur}$ : la résistance ultime à la traction de l'acier du rivet.

**III–1-b- Vérification de la pression diamétrale :** Cette vérification tient compte des dimensions géométriques des pièces assemblées aux voisinages du boulon ou **du rivet** :

$$F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd}$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2,5 . \alpha . f_u . d . t}{\gamma_{Mb}} \quad ; \quad \gamma_{Mb} = 1,25$$

avec $\alpha = \min \left( \dfrac{e_1}{3d_0} ; \dfrac{p_1}{3d_0} - \dfrac{1}{4} ; \dfrac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right)$.

- $F_{b,Rd}$ : la résistance de la pièce à la pression diamétrale au bord d'un trou normalisé [Figure 19.19].
- d : diamètre de la partie non filetée de la tige du boulon.
- $d_0$ : diamètre nominal du trou.
- t : l'épaisseur de la pièce assemblée.
- $f_u$ : la résistance ultime à la traction de l'acier de la pièce assemblée.
- $e_1$ ; $p_1$ : [figure 19.15], pour les dispositions constructives [Chapitre 7].

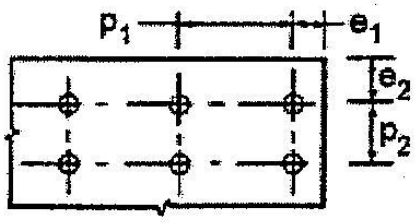



**Figure 19.15 Distances : $e_1$ , $p_1$.**

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 **$0,6.F_{b,Rd}$** .

**III–1-c- Catégorie de l'assemblage :** Ce type d'assemblage réalisé par des boulons ordinaires et dimensionné par rapport à l'effort de cisaillement ultime et la pression diamétrale est classé en **Catégorie A** par le C.C.M.97 (Eurocode 3). Les assemblages de cette catégorie sont appelés; assemblage travaillant à la pression diamétrale.

**III.2- La traction :** Si la sollicitation est parallèle à l'axe de la tige du boulon, ce dernier est simplement sollicité en **traction** [Figure 19.16]. Des contraintes de **poinçonnement** des pièces assemblées apparaissent au niveau des aires de contacts entre la plaque et la tête du boulon d'un coté et l'autre plaque et l'écrou de l'autre.

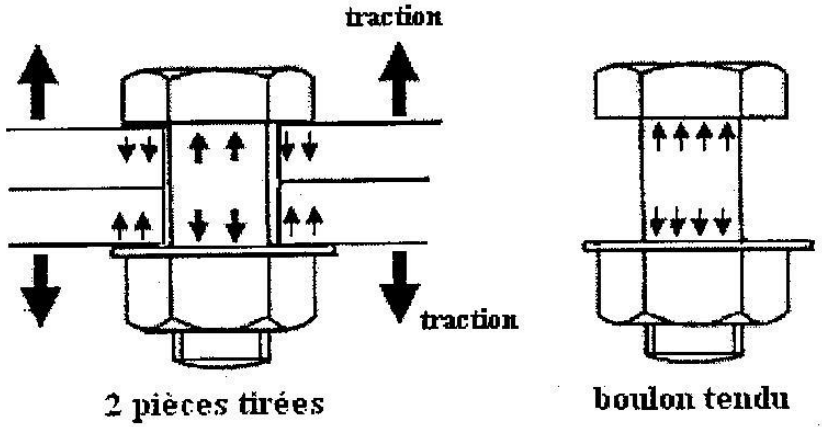



**Figure 19.16 Un boulon tendu.**

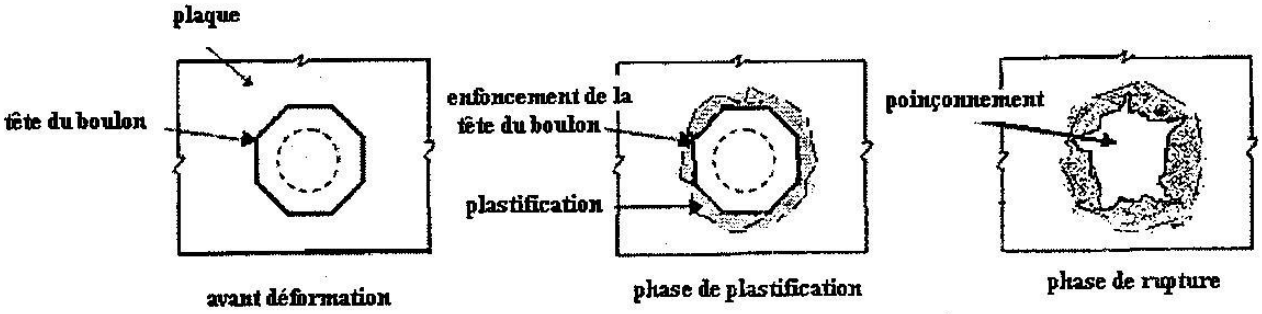



**Figure 19.17 Mode de ruine des pièces par poinçonnement.**

**III–2-a- Résistance d'un boulon à la traction :** La résistance à la traction d'un boulon $\mathbf{F_{t,Rd}}$ est calculée avec sa section, en fonction de sa classe. Pour un boulon tendu il faut que : $\mathbf{F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}}$

$$\mathbf{F_{t,Rd}} = \frac{0{,}9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

- $\gamma_{Mb} = 1{,}5$ (particulièrement pour les boulons travaillants en traction le coefficient partiel de sécurité $\gamma_{Mb}$ est pris égal à 1,5 )
- $A_s$ : la section résistante de la partie filetée du boulon.
- $f_{ub}$ : la résistance ultime à la traction de l'acier du boulon.

**Pour les rivets :** $\mathbf{F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}}$

$$\mathbf{F_{t,Rd}} = \frac{0{,}6 \cdot f_{ur} \cdot A_0}{\gamma_{Mb}} \quad ; \quad \gamma_{Mb} = 1{,}5 .$$

- $A_0$ : la section nominale du rivet.
- $f_{ur}$ : la résistance ultime à la traction de l'acier du rivet.

**III–2-b- 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 : $\mathbf{F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}}$

$$\mathbf{B_{p,Rd}} = 0{,}6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot \frac{f_u}{\gamma_{Mb}}$$

- $B_{p,Rd}$ : 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 [Tableau 19.1].
- $t_p$ : l'épaisseur de la pièce assemblée.
- $f_u$ : la résistance ultime à la traction de l'acier de la pièce assemblée.

***Remarque :*** Cette vérification est sans objet pour les rivets.

**III–2-c- Catégorie de l'assemblage:** les assemblages en boulons ordinaires résistants à l'effort de traction et vérifiés au poinçonnement sont classés par le C.C.M.97 (Eurocode 3) en **Catégorie D**. Cette catégorie désigne les assemblages par boulons tendus non précontraints.

**III.3- Effort combiné entre la traction et le cisaillement :** Une sollicitation inclinée sur les pièces assemblées donne une interaction entre le cisaillement et la traction dans le boulon ou **le rivet** d'assemblage.

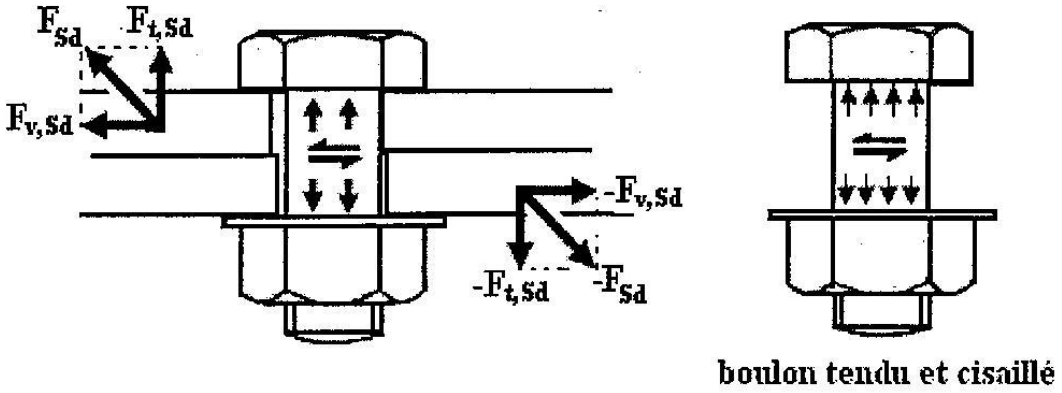



**Figure 19.18 Sollicitation d'un boulon tendu et cisaillé.**

- **Vérification d'un boulon soumis aux effets combinés :** Pour les boulons ou les rivets, le C.C.M.97 (Eurocode 3) recommande de satisfaire les conditions suivantes :

- le boulon aux effets combinés : $\dfrac{F_{t,Sd}}{1{,}4 \cdot F_{t,Rd}} + \dfrac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \leq 1$
- le boulon tendu : $\mathbf{F_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}}$
- la pression diamétrale : $\mathbf{F_{v,Sd} \leq F_{b,Rd}}$
- le poinçonnement pour les boulons uniquement $\mathbf{F_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}}$

(La vérification des boulons tendus est exigée à part, car dans la combinaison enveloppe entre $\mathbf{F_{v,Sd}}$ et $\mathbf{F_{t,Sd}}$ cette dernière est divisée sur **1,4** « minimisée » )

*IV– Jeu dans les trous pour boulons ou rivets :*

Les trous de boulons sont réalisés par poinçonnage et alésage ou par forage [Figure 19.6]. Ils ont été normalisés par le règlement suivant le diamètre nominal du boulon utilisé et le type du trou prévu. Les normes de jeu sont proposées par le C.C.M.97 (EC 3) pour les trous suivants:

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

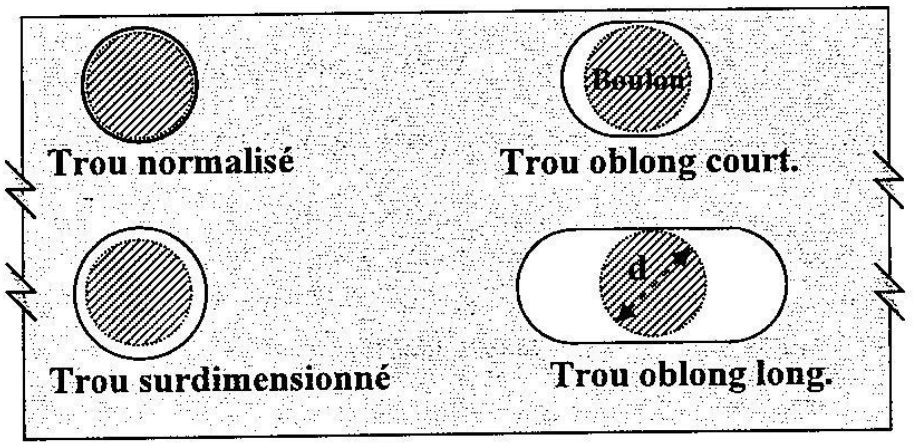



**Figure 19.19 Différents types de trous pour un boulon M12.**

| Trou \ Boulon | 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. | | | | | | |

**Tableau 19.5 Normes des dimensions des trous de boulons en ( mm ).**

**Le positionnement des trous** doit prémunir les pièces assemblées contre la corrosion et le voilement local. Il doit, aussi, être conforme aux valeurs limites des différents espacements $e_1$, $e_2$, $p_1$ et $p_2$ qui sont définies dans les **chapitres 7 et 8**.

### *V– Assemblages longs de catégorie A :*

Pour les assemblages longs, lorsque la distance entre les centres des deux files de boulons d'extrémités est importante, notamment lorsqu'elle dépasse **15.d** ; la résistance des boulons au cisaillement diminue. Cette réduction de la résistance est exprimée par un coefficient minorateur $\beta_{Lf}$ donné par :

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \qquad \text{avec} \qquad 0{,}75 \leq \beta_{Lf} \leq 1{,}0.$$

Autrement écrit :

$$\text{Pour} \quad L_j > 15.d \quad \Rightarrow \quad \mathbf{F_{v,Sd} \leq \beta_{Lf} \cdot F_{v,Rd}}$$

$L_j$ : la distance entre les deux boulons extrêmes prise dans le sens de l'effort de cisaillement [Figure 19.20].

Cette réduction est valable uniquement pour la résistance au cisaillement des assemblages de catégorie A et ne s'applique ni sur la vérification de la pression diamétrale de cette dernière ni sur les autres catégories d'assemblages.

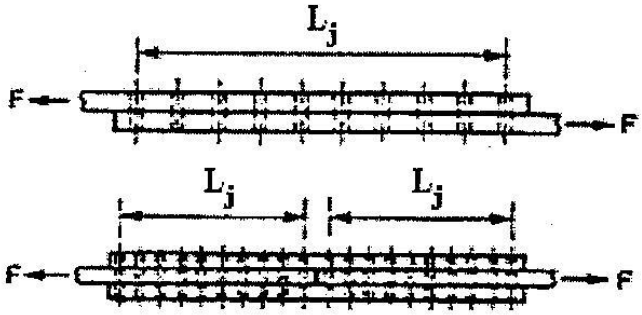



**Figure 19.20 Assemblages longs.**

### *Application 01 : Assemblage catégorie A de 2 pièces*

Soit un assemblage par boulonnage ordinaire entre deux pièces tendues. Il est constitué de **5 boulons** de classe **8.8** et transmet un effort $N_{sd}$ **= 550 KN** entre les deux plats dont chacun a une épaisseur **t = 15 mm.**

La nuance d'acier des plats est **S235**.

1° De quelle catégorie est cet assemblage ?
2° Calculez le diamètre nécessaire des boulons ?
3° Vérifiez la pression diamétrale dans les pièces assemblées ?
4° Vérifiez la conformité au C.C.M.97 de la disposition des boulons si les pièces assemblées sont protégées contre les effets extérieurs ?