

Chapitre III: Les Assemblages

Chapitre III: Les Assemblages

III.1 Assemblage par boulons

III.1.1 Généralités

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 ce type de construction.

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 (Nsd, Msd, Vsd) entre les éléments assemblés sans générer de sollicitations parasites, notamment de torsion. Une structure métallique est composée de pièces individuelles assemblées entre elles, on distingue les assemblages suivants :

- Bout à bout : deux traverses d'un portique
- Concourantes : traverse-montant, attaches poutre / poteau, treillis et systèmes réticulés.

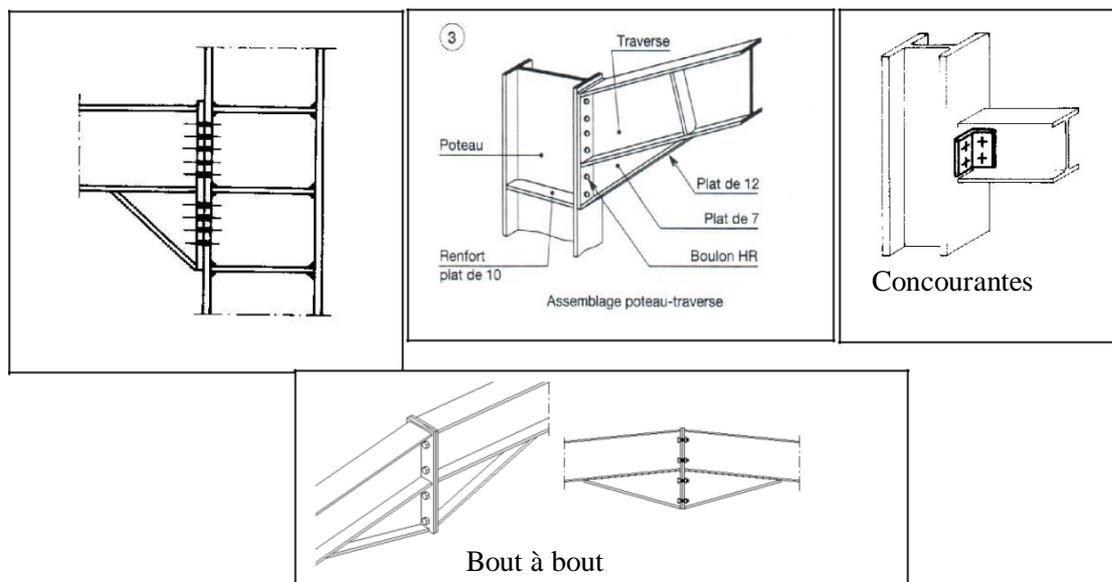


Figure III.1: Assemblages Bout à bout et Concourantes [2]

III.1.2 Types et fonctionnement d'un assemblage

On dispose de trois types d'assemblages :

- L'assemblage riveté
- L'assemblage boulonné par boulons ordinaires ou par boulons HR ou BP
- L'assemblage soudé.

Ces trois types d'assemblages correspondent à deux types de fonctionnement distincts :

Obstacle et /ou adhérence.

Chapitre III: Les Assemblages

□ **Fonctionnement par obstacle** : C'est le cas des boulons ordinaires dont les tiges reprennent les efforts tranchants et le fonctionnement est en cisaillement.

□ **Fonctionnement par adhérence** : Dans ce cas, la transmission des efforts s'opère par adhérence des surfaces des pièces en contact. Cela concerne le soudage, le collage, le boulonnage par boulons HR.

□ **Fonctionnement mixte** : C'est le cas du rivetage, à savoir que les rivets assurent la transmission des efforts par adhérence des pièces jusqu'à une certaine limite, qui lorsqu'elle est dépassée, fait intervenir les rivets par obstacle, au cisaillement. L'assemblage par boulons HR permet de reprendre l'effort de traction et l'effort tranchant.

Un assemblage peut être souple ou rigide. L'assemblage souple doit permettre la transmission d'un effort normal, d'un effort tranchant. L'assemblage rigide permet de transmettre toutes les sollicitations (M, N, V).

III.1.3 Définition et rôle d'un assemblage

La caractéristique essentielle des constructions métalliques est d'être composée d'un ensemble d'éléments barres (**poteaux- poutres**) constitués de profilés laminés ou soudés souvent en forme de (**I** ou de **H**) qu'il faut assembler entre eux pour constituer l'ossature.

Les liaisons entre ces différents éléments représentent ce qu'on appelle communément les assemblages. Ces derniers constituent des composants spécifiques à la construction métallique, ils jouent un rôle très important, on peut les définir comme organes de liaison qui permettent de réunir et de solidariser plusieurs éléments entre eux, on assure la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les éléments assemblés, sans générer d'efforts parasites.

Un assemblage mal conçu, mal calculé ou mal réalisé peut conduire à l'effondrement de la structure. De ce fait la conception et le calcul des assemblages est d'une importance capitale.

III.1.4 Différentes formes d'assemblage rencontrées en C.M.

Dans les ossatures des bâtiments métalliques, les éléments structuraux sont reliés par des assemblages. Suivant la nature des éléments assemblés, on distingue (Figure III.2) entre autres :

- Les assemblages poutre- poutre (B)
- Les assemblages poutre- poteau (A)
- Les assemblages de continuité(C)
- Les assemblages dans un système en treillis «un nœud» (E)
- Les assemblages poteau- fondation « pied de poteau » (D)

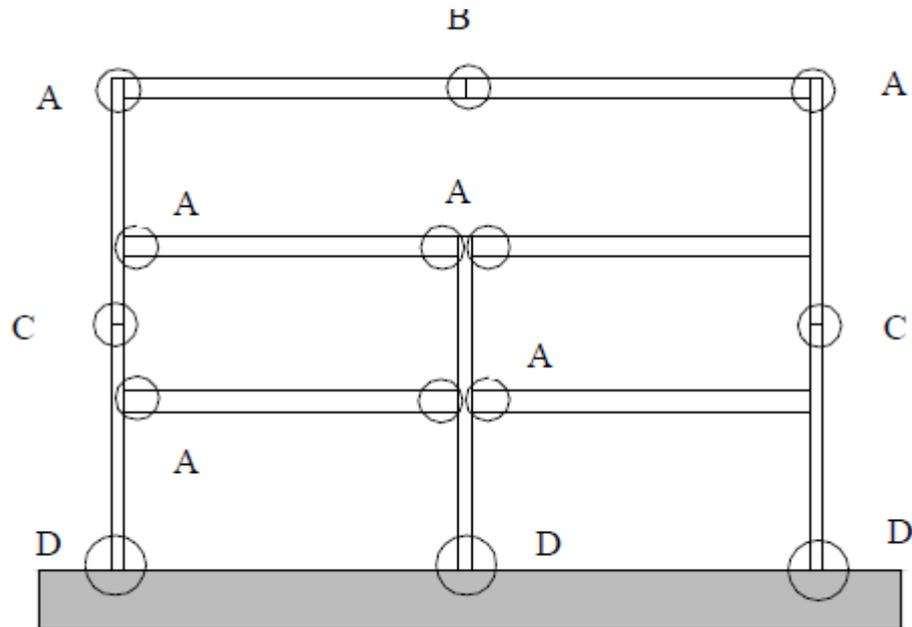


Figure III.2: Différents des types d'assemblages dans une ossature de bâtiment [13]

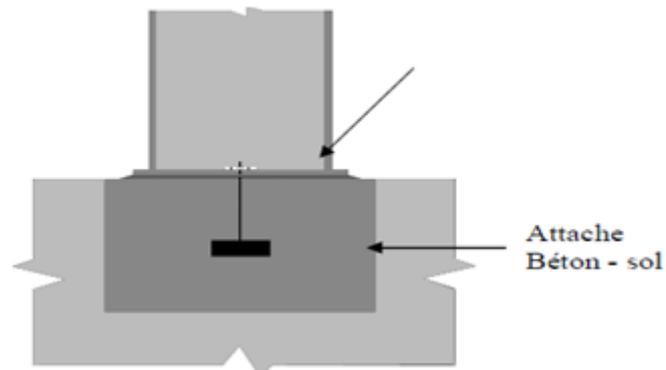


Figure III.3: Attache dans une base de poteau (D) [13]

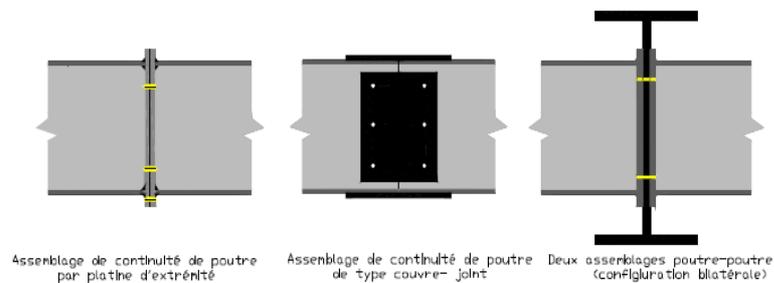


Figure III.4: Assemblage poutre-poutre (B) [13]

Chapitre III: Les Assemblages

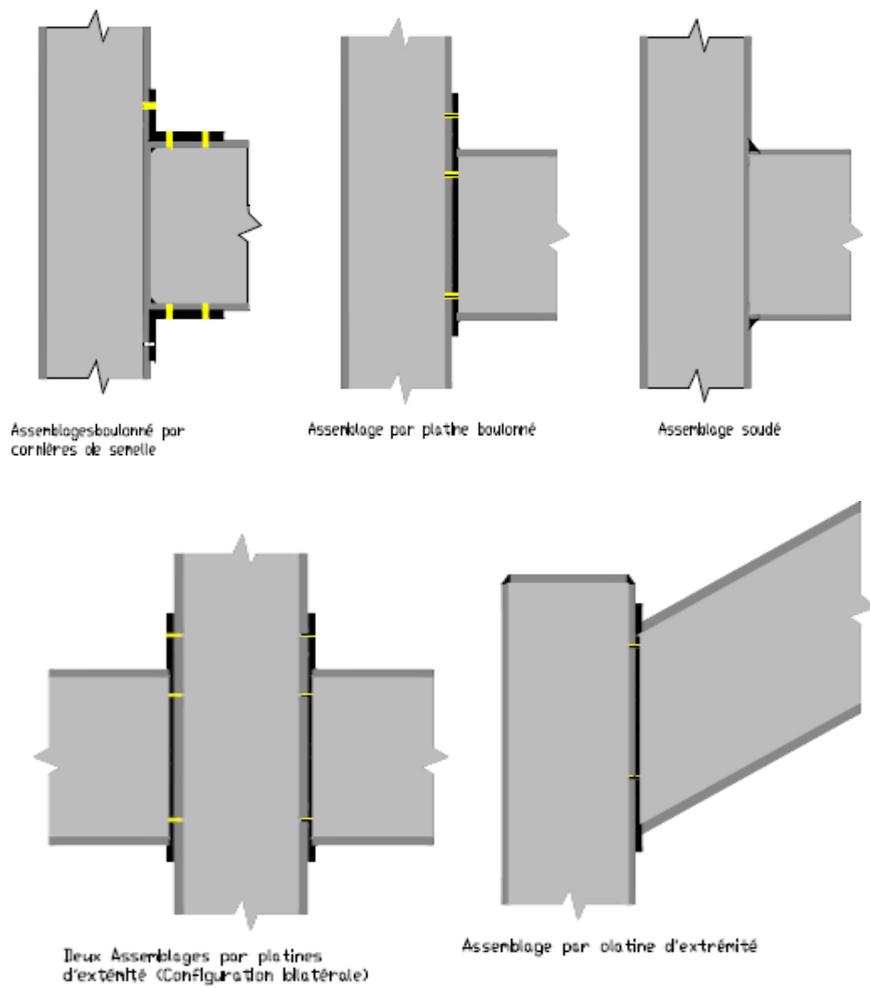


Figure III.5: Assemblage poteau-poutre (A) [13]

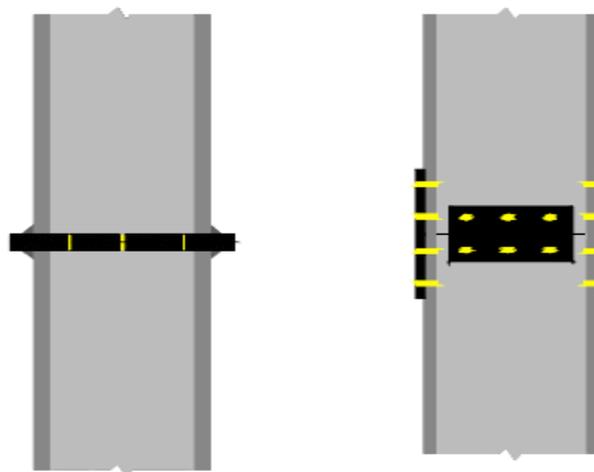
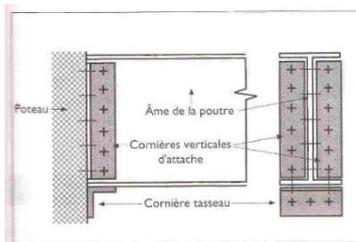
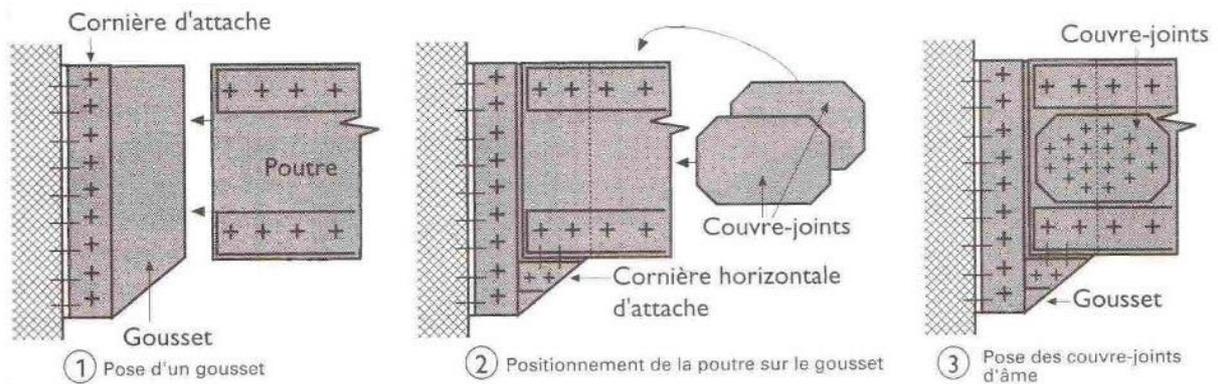


Figure III.6: Assemblage poteau-poteau (C) [13]

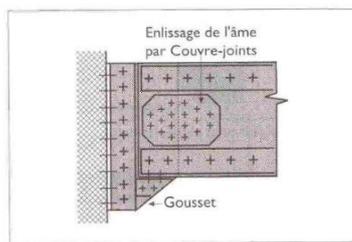
Chapitre III: Les Assemblages

III.1.5 Assemblages dans une ferme ou dans une poutre reconstituée

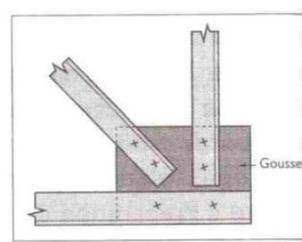
Les éléments d'une ferme seront assemblés généralement par des goussets. Les goussets sont disposés entre les cornières doubles, l'ensemble est boulonné (figure III.7). On peut dans certains cas (cornières avec ailes larges) ne pas utiliser des goussets. La ferme ou la poutre reconstituée est fixée sur le poteau par des éléments en cornières double fixées sur un gousset l'ensemble est fixé par double couvre joints.



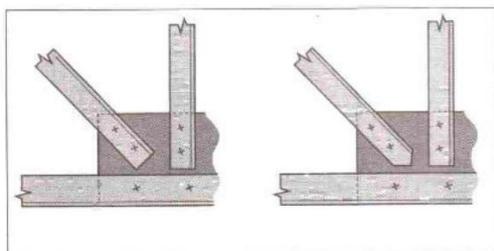
5. Assemblage avec tasseau simple.



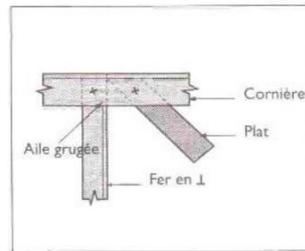
6. Assemblage avec gousset vertical.



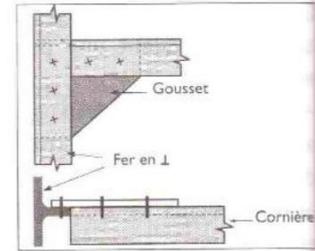
16. Avec gousset.



17. Bord chanfreiné et ailes mouchées.



18. Sans gousset.



19. Avec gousset.

Figure III.7: Assemblages dans une ferme ou dans une poutre reconstituée [11]

Chapitre III: Les Assemblages

La fixation sur faitage peut être réalisée par utilisation d'une âme et des brides ou cornières les brides seront fixées d'une part sur l'âme et d'autre part sur les éléments de la ferme (Figure III.8)

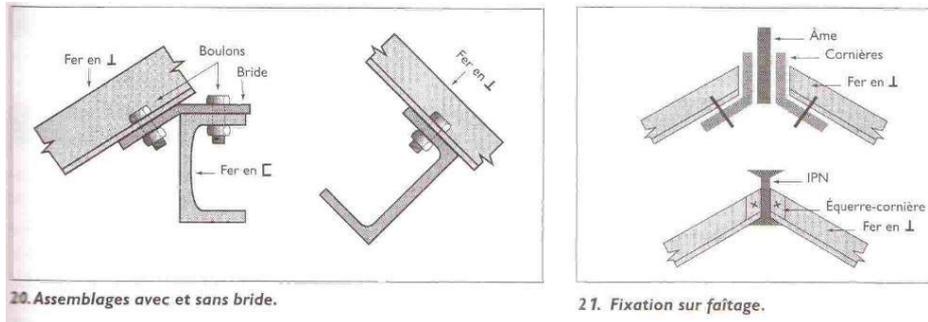


Figure III.8: Assemblages avec et sans bride et fixation sur faitage [11].

III.1.6 Modes d'assemblages

Les différentes formes d'assemblages ci-dessus mentionnés sont généralement réalisées par les principaux modes d'assemblages suivants :

III.1.6.1 Le rivetage

Les rivets ont été le premier moyen d'assemblage utilisé en construction métallique. Actuellement, l'emploi des rivets est limité et on leur préfère, dans la plupart des pays industrialisés, les boulons et la soudure. On les rencontre donc essentiellement dans des structures anciennes, datant du début de ce siècle. Leur diamètre varie généralement de 10 à 28mm. (Figure III.9)

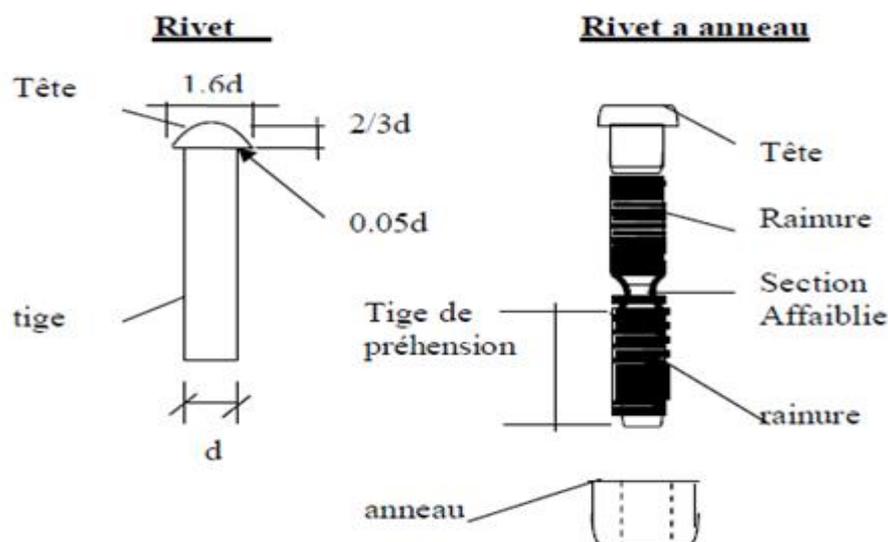


Figure III.9: Rivet et rivet à anneau [7]

Chapitre III: Les Assemblages

III.1.6.1.1 Calcul des assemblages rivés

Le rivet est une pièce métallique constituée d'un corps (le collet) et d'une tête qui est mise en place dans un percement et dont l'extrémité est ensuite matée du côté opposé à la tête afin de relier deux pièces ayant un contact plan. Aujourd'hui, le rivetage n'est plus utilisé en dehors de la restauration des ouvrages anciens ou dans le cadre d'une utilisation à des fins esthétiques.

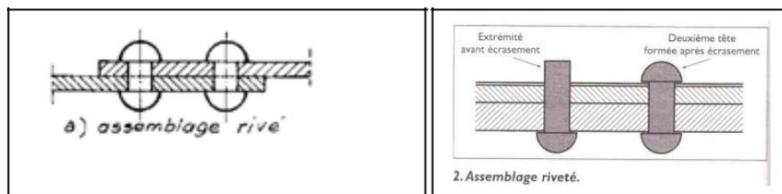


Figure III.10: Assemblage rivé [11]

NOMENCLATURE DES RIVETS R

∅	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	7	8	9	10	12	14
A	3,5	4,5	5,5	6,5	7	8	9	10	11	14	14	16	17	21	24
B	1,5	2	2,5	2,5	3	3,5	4	4	4,5	5	5,5	6	7	8	10

3. Rivets courants.

Le rivet travaille principalement au cisaillement la section du rivet doit satisfaire la condition :

$$V_1 = V/n \leq 0.58 \times A \times F_y \quad \text{tel que : } A = \pi \cdot \Phi^2 / 4$$

Le rivet est cisailé sur une seule face.

III.1.6.2 Le boulonnage

Les caractéristiques des différents types d'aciers utilisés pour les boulons présentes les valeurs de la limite d'élasticité f_y et de la résistance à la traction f_{ub} des quatre classes de qualité d'aciers utilisés pour les boulons (la signification des chiffres pour définir la classe de qualité est donnée au paragraphe (III.1.6.2.3).

III.1.6.2.1 Dispositions constructives

Les assemblages constituent des zones particulières plus fragiles que les zones courantes des pièces, car les sections sont réduites du fait des perçages (ou par perte de résistance de l'acier due à l'échauffement lors du soudage). En outre, les assemblages sont soumis à des sollicitations qui peuvent s'inverser et les contraintes peuvent changer de sens (une poutre de

Chapitre III: Les Assemblages

charpente peut fléchir dans le sens positif sous charge de neige et dans le sens négatif sous soulèvement par le vent). C'est pourquoi il faut être particulièrement vigilant dans la conception et le calcul des assemblages, afin de se prémunir contre tout risque de rupture brutale. Il faut assurer, au travers de l'assemblage la transmission parfaite des forces, afin de ne pas créer d'effort ou de moments secondaires parasites. Pour cela, quelques précautions élémentaires sont à prendre :

Il faut proscrire tout assemblage par recouvrement simple (schéma en haut de la figure suivante) et utiliser un assemblage symétrique par double couvre-joint (schéma en bas de la même figure).

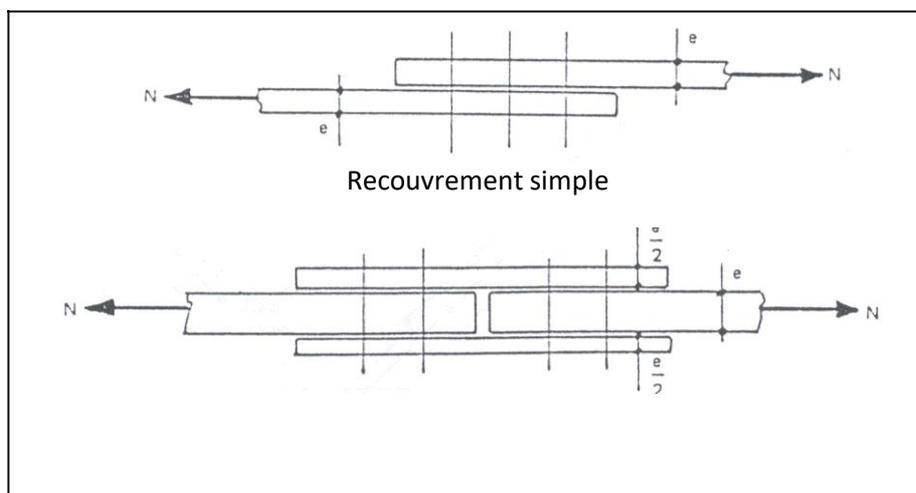


Figure III.11: Assemblage par recouvrement simple et symétrique par double couvre-joint [11]

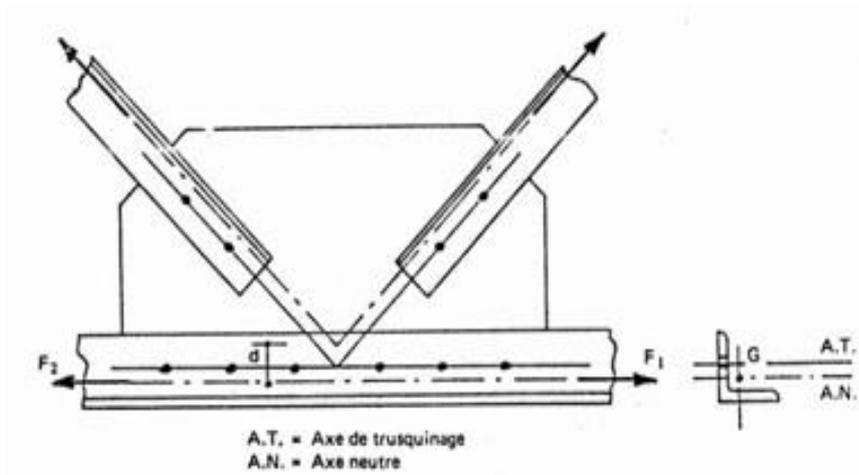
En effet, dans le cas de la figure ci-dessus, la dissymétrie crée un moment de flexion parasite et l'assemblage se déforme, comme le montre la figure suivante.

La contrainte maximale de traction vaut, pour une largeur b de tôle : $\sigma = N/S + M.V/I$

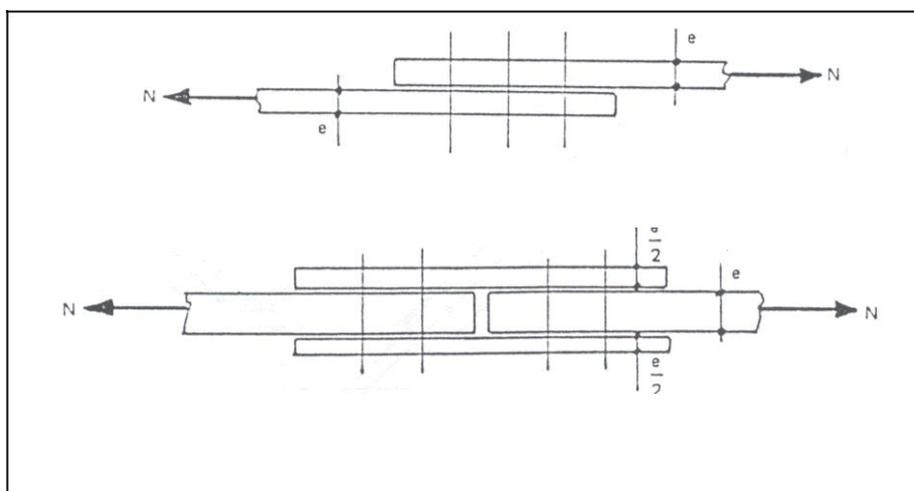
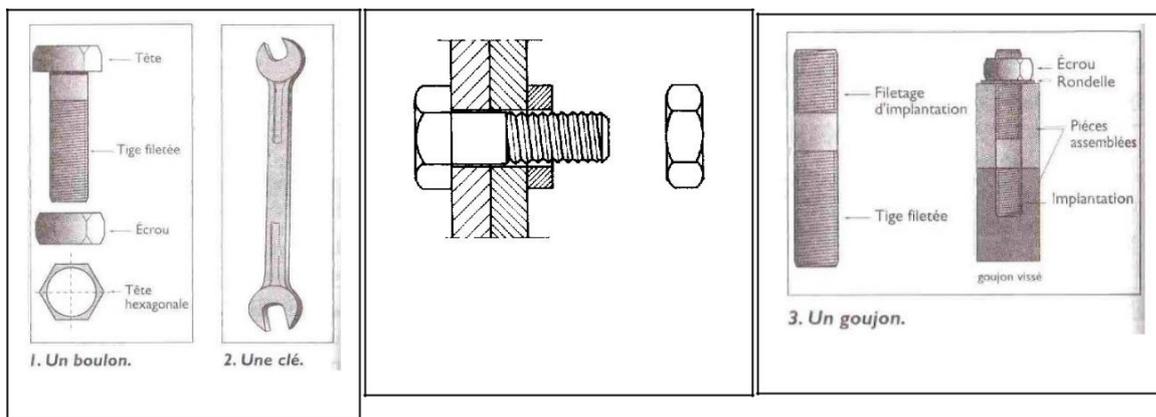
Si $S = b.e$; $M = N \times e$ et $I = b.e^2/6$. La valeur de la contrainte est donc : $\sigma = 7.N/b.e$

La contrainte augmente considérablement et les têtes de boulons risquent l'arrachement. Il faut par ailleurs s'assurer que les axes neutres des barres soient concourants aux nœuds des treillis, dans les systèmes réticulés. Ce n'est souvent pas le cas pour les treillis réalisés en cornières.

Chapitre III: Les Assemblages

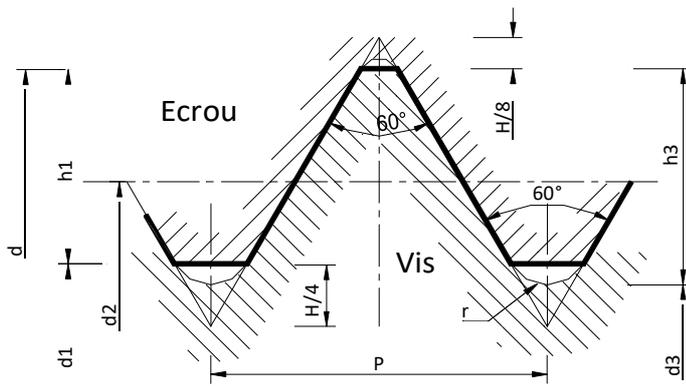


Les assemblages par boulons ordinaires peuvent être sollicités au cisaillement, à la traction ou simultanément à la traction et au cisaillement.



Chapitre III: Les Assemblages

III.1.6.2.2 Caractéristiques géométriques



Vis + écrou = boulon

P: Pas

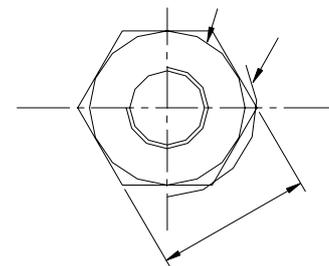
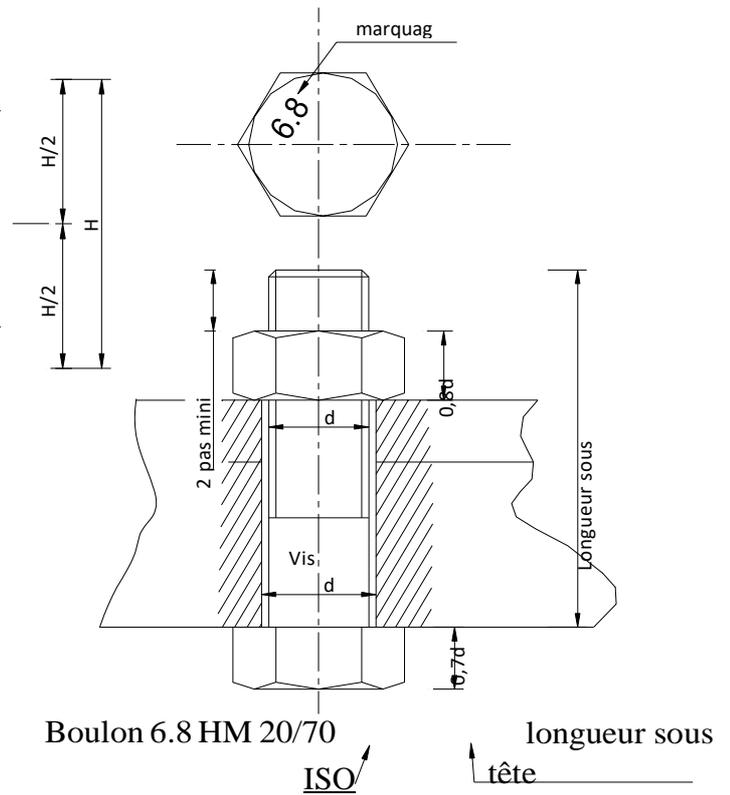
d: diamètre nominal

$d1 = d - 1,0825 P$

$d2 = d - 0,6495 P$

$d3 = d - 1,2268 P$

$r = 0,1443 P$



Diamètre des trous d_o Diamètre du boulon d

d	d_o
M 12, 14	$d+1$
M 16 à 24	$d+2$
>M 27	$d+3$

Chapitre III: Les Assemblages

Diamètre nominal d	Pas P	Clef	Diamètre du noyau de la vis d3	Diamètre intérieur de l'écrou d1	Diamètre de la rondelle	Section résistante As	Diamètre moyen dm	Tôle usuelle	Cornière usuelle
8	1.25	13	6.466	6.647	16	36.6	14	2	30
10	1.5	17	8.160	8.376	20	58.0	18.3	3	35
12	1.75	19	9.853	10.106	24	84.3	20.5	4	40
14	2	22	11.546	11.835	27	115	23.7	5	50
16	2	24	13.546	13.835	30	157	24.58	6	60
18	2.5	27	14.933	15.294	34	192	29.1	7	70
20	2.5	30	16.933	17.294	36	245	32.4	8	80
22	2.5	32	18.933	19.294	40	303	34.5	10.14	120
24	3	36	20.319	20.752	44	353	38.8	>14	>120
27	3	41	23.319	23.752	50	459	44.2	-	-
30	3.5	46	25.706	26.211	52	561	49.6	-	-
33	3.5	50	28.706	29.211		694		-	-
36	4		31.093	31.670		817		-	-

Chapitre III: Les Assemblages

III.1.6.2.3 Caractéristiques mécaniques des boulons

L'EC3 n'autorise que sept classes mécaniques de boulons. Temporairement, en France subsiste la classe 6.6.

Les caractéristiques mécaniques des boulons nécessaires sont :

f_{yb} : limite d'élasticité

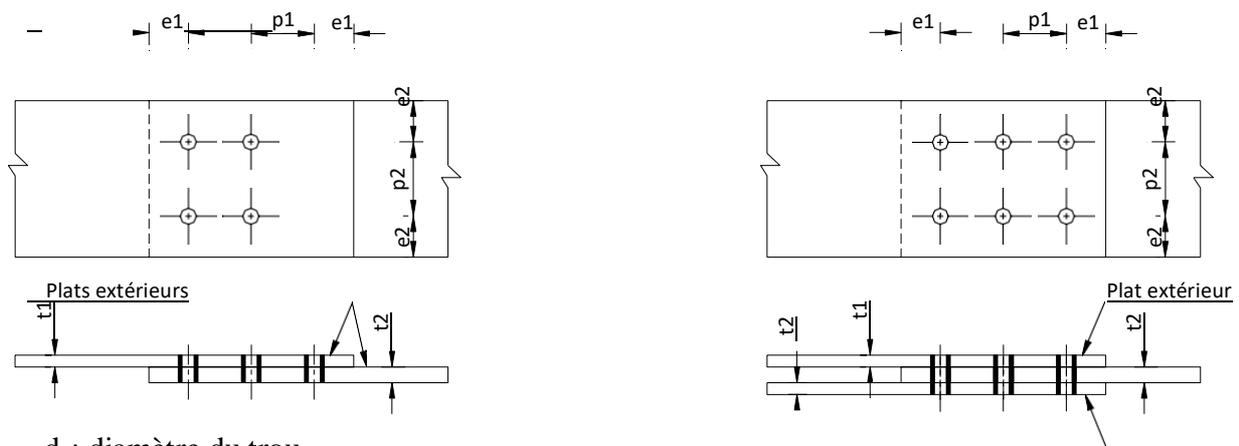
f_{ub} : résistance à la traction

Classe	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9	6.6
f_{yb} (Mpa)	320	300	400	480	640	900	360
f_{ub} (Mpa)	400	500	500	600	800	1000	600

Pour une classe XY donnée, $f_{yb} = 10 XY$, $f_{ub} = 100X$.

Les boulons de classe 8.8 et 10.9 sont appelés boulons à Haute Résistance (ou boulons HR), ce sont les seuls autorisés pour les assemblages par boulons précontraints.

III.1.6.2.4 Dispositions constructives réglementaires



d_0 : diamètre du trou

t: épaisseur du plat extérieur le plus mince (min de t_1 ou t_2)

$1,2d_0$ ($1,5 d_0$ pour serrage contrôlé)	“Pince longitudinale e_1 ”	maxi (12t ou 150 mm)
$1,5 d_0$	“Pince transversale e_2 ”	maxi (12t ou 150 mm)
$2,2 d_0$	“entraxe p_1 (cas général)”	mini (14t ou 200 mm)
$2,2 d_0$	“entraxe p_1 (file intérieure, élément tendu)”	mini (28t ou 400 mm)
$3 d_0$	“entraxe p_2 ”	mini (14t ou 200 mm)

Chapitre III: Les Assemblages

La valeur minimale de e_1 doit être augmentée s'il est nécessaire d'obtenir une résistance adéquate à la pression diamétrale.

Si intempéries ou risques de corrosion : $e_1 \leq 40\text{mm} + 4t$

$e_2 \leq 40\text{mm} + 4t$

III.1.6.2.5 Résistance de calcul des boulons

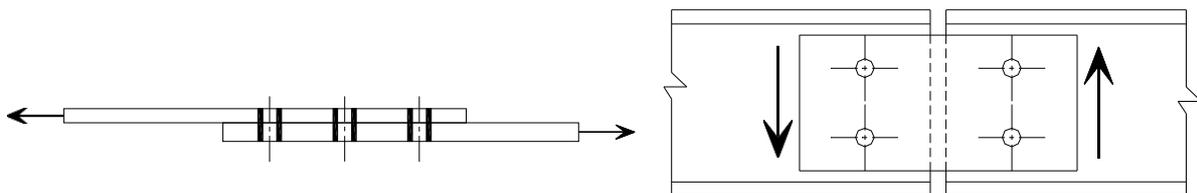
γ_{Mb} : Coefficient partiel de sécurité sur l'acier

$\gamma_{Mb} = 1.50$ pour la résistance de boulons sollicités en traction

$\gamma_{Mb} = 1.25$ dans les autres cas (cisaillement, cisaillement par poinçonnement de la tête du boulon et de l'écrou, ..)

III.1.6.3 Assemblage par boulons obstacles (boulons ordinaires)

Le mode de transmission de charge d'une pièce à une autre se fait à travers la tige du boulon, qui joue le rôle d'obstacle entre les pièces assemblées, d'où son travail au cisaillement. L'assemblage permet un déplacement relatif de pièces (pour rentrer en contact avec la tige du boulon) dès la première mise en charge puis à chaque retournement d'effort.



L'effort est perpendiculaire à l'axe des boulons Les boulons sont cisailés

Le boulon joue le rôle de butée. Il exerce une réaction sur les pièces assemblées : pression diamétrale.

III.1.6.3.1 Résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement

La résistance dépend entre autre de la position du plan de cisaillement.

Si le plan de cisaillement passe par la partie fileté du boulon :

Pour les classes de boulons 4.6, 5.6, 6.6, 8.8 la résistance d'un boulon est :

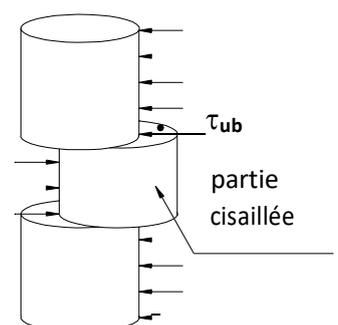
$$F_{v,Rd} = 0.6 m f_{ub} A_s / \gamma_{Mb} \text{ avec } \gamma_{Mb} = 1.25$$

Pour les classes de boulons 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9. La résistance est :

$$F_{v,Rd} = 0.5 m f_{ub} A_s / \gamma_{Mb} \text{ avec } \gamma_{Mb} = 1.25$$

Si le plan de cisaillement passe par la partie non fileté

du boulon: $F_{v,Rd} = 0.6 f_{ub} A / \gamma_{Mb} \text{ avec } \gamma_{Mb} = 1.25$



Chapitre III: Les Assemblages

III.1.6.3.2 Résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées :

Au contact du boulon avec la pièce, celui-ci exerce sur cette dernière une pression (principe d'action et de réaction) pour laquelle la pièce doit avoir une résistance suffisante, afin d'éviter une ovalisation des trous et des déchirures des pinces. La résistance est :

$$F_b, R_d = 2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{Mb}$$

Avec α mini de : $\{ e_1/3d_0 ; p_1/3d_0 - 1 / 4 ; f_{ub}/f_u \text{ ou } 1 \}$

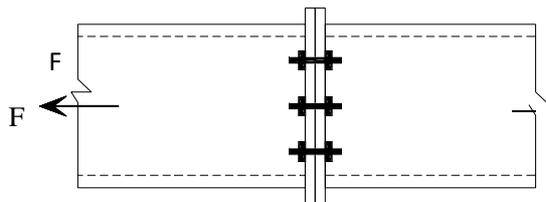
Avec :

- d diamètre du boulon
- d₀ diamètre du trou
- t épaisseur de la pièce
- e₁ pince longitudinale
- p₁ Entraxe des boulons
- f_{ub} Résistance à la traction des boulons
- f_u Résistance à la traction de la pièce assemblée

Résistance à la traction des pièces

Acier	S235	S275	S355
f _u en Mpa	360	430	510

III.1.6.3.3 Résistance des boulons en traction



Il y a 2 modes de ruine possible

Rupture du boulon

Poinçonnement des plaques en contact avec la tête du boulon

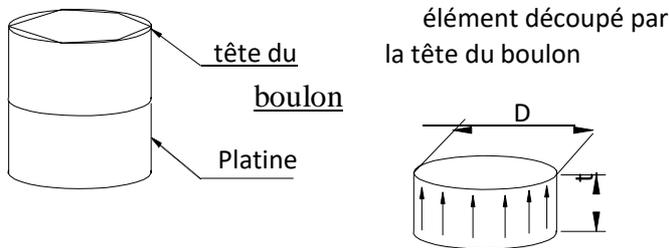
Soit A_s la section la plus faible du boulon (suivant les cas, section résistante ou section à fond de filet). L'effort de traction résistant est de A_s f_{ub} après de nombreux essais, cette valeur est minorée par un coefficient 0.9 et on applique un coefficient de sécurité sur l'acier.

$$F_{t,Rd} = 0.9 A_s f_{ub} / \gamma_{Mb} \quad \text{avec } \gamma_{Mb} = 1.5$$

Chapitre III: Les Assemblages

III.1.6.3.4 Résistance au poinçonnement de la pièce (B_{pRd})

Si les boulons sont beaucoup plus résistants que les plaques, la tête de vis ou l'écrou peut poinçonner les pièces.



Pour qu'il n'y ait pas découpe de la plaque, il suffit que τ_u (contrainte de résistance au cisaillement) à la périphérie du cylindre puisse s'opposer à l'action du boulon sur la plaque

$$\tau_u = 0.6 f_u \quad \text{aire du cylindre}$$

$$\pi D t$$

L'effort résistant au cisaillement :

$$V_{aut} : 0.6 \pi D t f_u$$

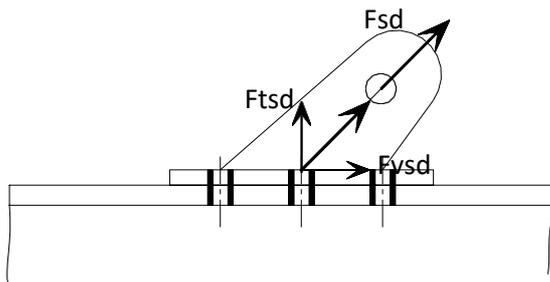
Réglementairement :

$$B_{pRd} = 0.6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{Mb} \quad \text{avec } \gamma_{Mb} = 1.25 \quad \text{Avec :}$$

T_p : épaisseur de la plaque sous la tête du boulon ou de l'écrou

D_m : diamètre moyen de la tête du boulon ou de l'écrou .

III.1.6.3.5 Boulons soumis à des efforts combinés de traction et de cisaillement



Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement et de traction doivent, en outre, satisfaire à la condition suivante :

$$F_{v.Sd} / F_{v.Rd} + F_{t.Sd} / 1.4 F_{t.Rd} \leq 1$$

$F_{t.Sd}$: Effort de traction appliqué

$F_{t.Rd}$: Effort de traction résistant

$F_{v.Sd}$: Effort de cisaillement appliqué

$F_{v.Rd}$: Effort de cisaillement résistant

La vérification à la pression diamétrale et au poinçonnement doivent être faite avec les efforts respectifs de cisaillement et de traction.

III.1.6.4 Assemblage par boulons à serrage contrôlé Boulons précontraints

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. L'acier de l'écrou et de la rondelle doit être identique à celui du boulon.

III.1.6.4.1 Principe de fonctionnement d'un assemblage par boulon 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 du boulon. Cette précontrainte agit perpendiculairement au plans 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 HR 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.

Plusieurs paramètres interviennent dans la résistance de l'assemblage :

- La force de précontrainte
- L'état de surface des pièces en contact
- La forme et les dimensions du trou
- Le nombre de plan de contact

La force de précontrainte

La force de précontrainte est la force normale au plan de cisaillement créée par le serrage du boulon. C'est aussi par principe d'action et de réaction l'effort de traction qui règne dans la vis du boulon. Valeur réglementaire de la force de précontrainte F_{pCd}

$$F_{pCd} = 0.7 f_{ub} A_s$$

L'intérêt est d'avoir une résistance à la traction f_{ub} la plus élevée possible. C'est pourquoi seuls les boulons de classe 8.8 et 10.9 sont autorisés pour les assemblages par boulons précontraints.

Mise en œuvre de la force de précontrainte

Le serrage des boulons précontraints est une opération délicate sur le chantier. En effet un excès de précontrainte peut s'avérer aussi préjudiciable qu'un manque de précontrainte.

Trois méthodes sont actuellement utilisées :

- Le contrôle du couple de serrage
- La méthode du « tour d'écrou »
- L'utilisation de rondelles de mesures

✚ L'état de surface des pièces en contact

La transmission d'un effort perpendiculaire à l'axe du boulon repose sur le frottement à l'interface des pièces. L'état de surface des pièces en contact est donc un paramètre fondamental.

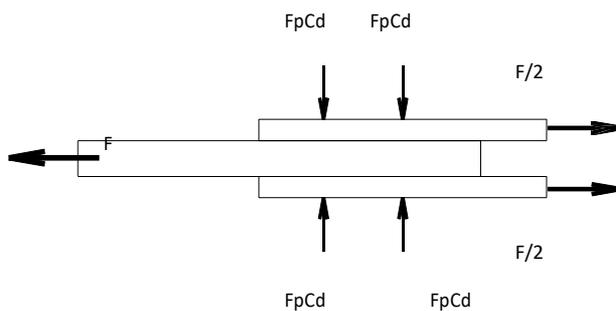
L'effort transmis peut varier de 1 à 2.5 en fonction de l'état de surface, donc du type de traitement de surface des pièces. Seuls quatre types de traitement de surface ont été retenus, qualifiés et quantifiés réglementairement.

✚ La forme et la dimension des trous

Les boulons sont toujours montés avec un jeu. Plus le jeu est grand, plus la surface de frottement est faible donc plus la résistance de l'assemblage est faible.

Un coefficient de forme sera donc introduit réglementairement pour quantifier cette influence dans le calcul de la résistance de l'assemblage.

III.1.6.4.1.1 Résistance au glissement d'un boulon précontraint



Chapitre III: Les Assemblages

La résistance de calcul au glissement d'un boulon précontraint HR (Haute Résistance) sera égale :

$$F_s.R_d = k_s m \mu F_{pCd} / \gamma_{Ms}$$

Avec :

k_s Coefficient de forme des trous

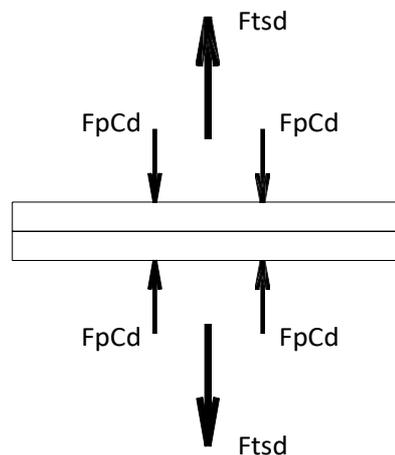
m Nombre de surfaces d'adhérence

μ Coefficient de frottement, F_{pCd} effort de précontrainte

	trou nominal	trou surdimensionné	trou oblong
k_s	1	0.85	0.7
$\gamma_{Ms,ser}$ ELS	1.20	1.20	1.20
$\gamma_{Ms,ult}$ ELU	1.10	1.25	1.25

Classe de surface	μ coefficient de frottement	état de surface
A	0.5	Grenailé ou sablé
B	0.4	Grenailé, sablé et peint
C	0.3	Brossé
D	0.2	Non traité

II.1.6.4.1.2 Résistance à la traction d'un boulon précontraint



Un boulon précontraint est déjà, sous l'action de la force de précontrainte, tendu à environ 70% de sa résistance à la traction. Si on ne raisonne que sur les efforts, on pourrait penser qu'un boulon précontraint n'est capable d'équilibrer qu'un effort de traction égal à 30% de sa résistance à la traction.

Ce raisonnement est faux car il ne prend pas en compte le comportement global du système

Chapitre III: Les Assemblages

boulons plus plaques. L'analyse doit se faire en tenant compte de la relation contraintes-déformations du système plaques- boulon.

Pour qu'il n'y ait pas décollement des pièces, il faut que l'effort de traction appliqué par boulon soit inférieur à l'effort de précontrainte, soit :

$$F_{t,Sd} \leq F_{pCd}$$

III.1.6.4.1.3 Boulons soumis à des efforts combinés de traction et de cisaillement

Assemblage résistant au glissement à l'ELS :

$$F_{s,Rd,ser} = k_s \mu n (F_{p,Csd} - 0.8 F_{t,sd, ser}) / \gamma M_{s,ser}$$

Assemblage résistant au glissement à l'ELU:

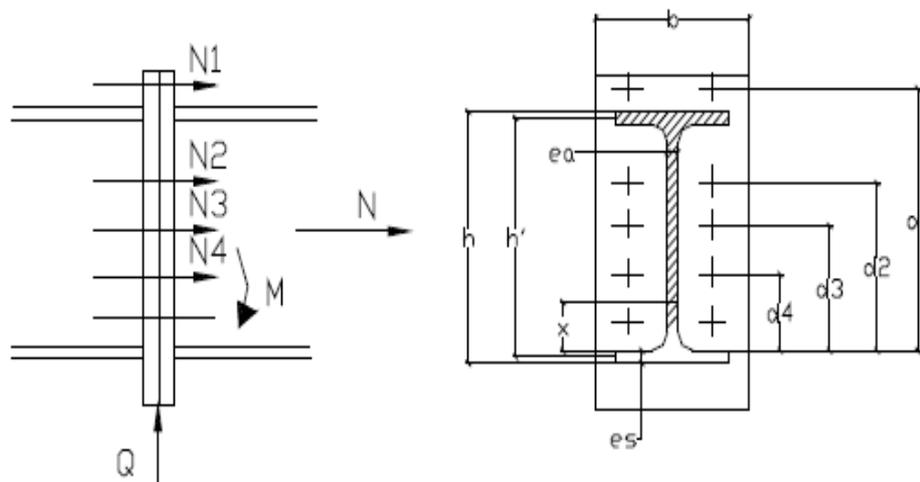
$$F_{s,Rd} = k_s \mu n (F_{p,Csd} - 0.8 F_{t,sd}) / \gamma M_{s,ult}$$

Avec : $F_{p,Csd}$ effort de précontrainte.

$F_{t,sd}$: effort de traction à l'ELU.

$F_{t,sd, ser}$: effort de traction à l'ELS.

III.1.6.4.1.4 Assemblages par platines sollicités par un moment fléchissant, un effort tranchant



Les boulons inférieurs sont tendus, tous les boulons sont soumis au cisaillement.

Chapitre III: Les Assemblages

✚ Résistance de l'assemblage à l'effort tranchant V

Il faut vérifier que l'effort appliqué V_1 à un boulon reste inférieur à l'effort admissible F_s par boulon et par plan de glissement :

$$V_1 = V / n \leq F_s \cdot R_d = k_s m \mu F_p C_d / \gamma M_s$$

n: nombre de boulons.

✚ Résistance de l'assemblage au moment fléchissant

Le moment résistant M_R de l'assemblage est obtenu par la somme des produits des efforts de traction dans les boulons situés dans la zone tendue par la distance des boulons respectifs à la face intérieure de la semelle comprimée:

$$M_R = N_1 \cdot d_1 + N_2 \cdot d_2 + \dots + N_i \cdot d_i = \sum N_i \cdot d_i$$

Soit n' le nombre de files verticales de boulons nous aurons :

$$M_R = [N \cdot d_{11} + N \cdot d_{22} + N \cdot d_{33} + \dots + N \cdot d_{ii}] \cdot n' = n' \cdot N / d_1 \cdot [d_{11}^2 + d_{22}^2 + d_{33}^2 + \dots + d_{ii}^2]$$

$$D'où : N = M_R \cdot d_{11} / \sum d_{ii}^2$$

$$\text{Soit : } N_i = M_R \cdot d_{ii} / \sum d_{ii}^2 \leq n' \cdot F_p \cdot c_d$$

n' : étant le nombre de boulons par rangée

La zone tendue est déterminée par : $x = t_f \sqrt{b} / t_w$

Ac : aire de la section de la zone comprimée : $A_c = t_f [b + \sqrt{b} \cdot t_w]$

L'effort total de compression et l'effort de traction total dans la zone comprimée de l'assemblage soient égaux et opposés : $\sum N_i \leq N_c = A_c \cdot f_y$

III.2 Les Assemblages Soudés

III.2.1 Introduction

Le soudage est un procédé qui permet d'assembler des pièces par liaison intime de la matière, obtenue par fusion ou plastification. Le soudage présente, par rapport au boulonnage, plusieurs avantages :

- Il assure la continuité de matière, et, de ce fait, garantit une bonne transmission des sollicitations ;

- Il dispense de pièces secondaires (goussets, attaches, etc...) ;
- Il est de moindre encombrement et plus esthétique que le boulonnage.

En revanche, il présente divers inconvénients :

- Le métal de base doit être soudable ;
- Le contrôle des soudures est nécessaire et onéreux ;
- Le contrôle des soudeurs est aléatoire ;
- Le soudage exige une main-d'œuvre qualifiée et un matériel spécifique.

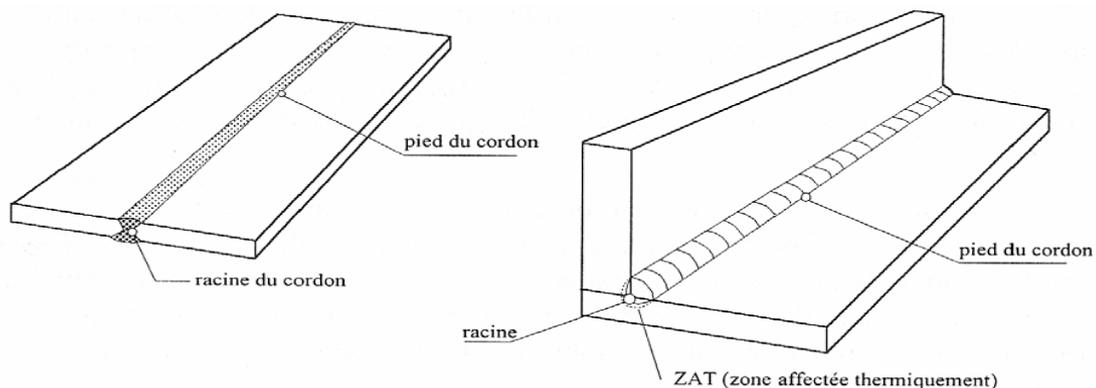


Figure III. 12 : Liaison de deux pièces par soudage[3]

III.2.2 Procédés De Soudage

On peut citer :

- procédé par pression ;
- procédé par résistance électrique ;
- procédé par friction ;
- procédé chimique au chalumeau oxyacétylénique ;
- procédé au LAZER ;
- procédé par bombardement électronique ;
- procédé à l'arc au PLAZMA ;
- procédé à l'arc électrique.

Chapitre III: Les Assemblages

III.2.2.1 Procédé chimique au chalumeau oxyacétylénique

Il utilise la combustion d'oxygène et d'acétylène, à une température d'environ 3000°C, le métal d'apport étant fourni par des baguettes d'acier fusibles, ce procédé est peu utilisé en construction métallique, car il est plus onéreux que les procédés à l'arc pour des sections d'acier épaisses.

III.2.2.2 Procédés à l'arc électrique

Ce sont les procédés les plus couramment utilisés en construction métallique.

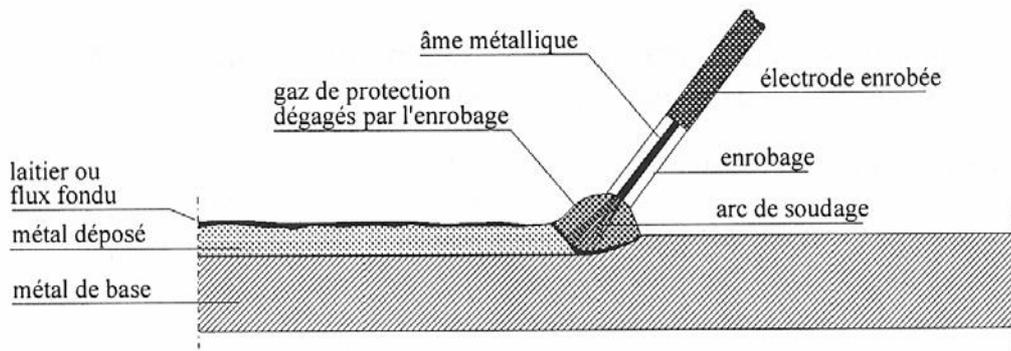


Figure III. 13 : Principe de soudage à l'arc [3]

III.2.2.2.1 Procédés à électrode non fusible (TIG)

L'arc est produit entre une électrode de tungstène non fusible et les pièces, sous jet d'ARGON, qui est un gaz inerte. Le métal d'apport est obtenu par fusion d'une baguette indépendante. En atelier, ce procédé est semi-automatique ou automatique.

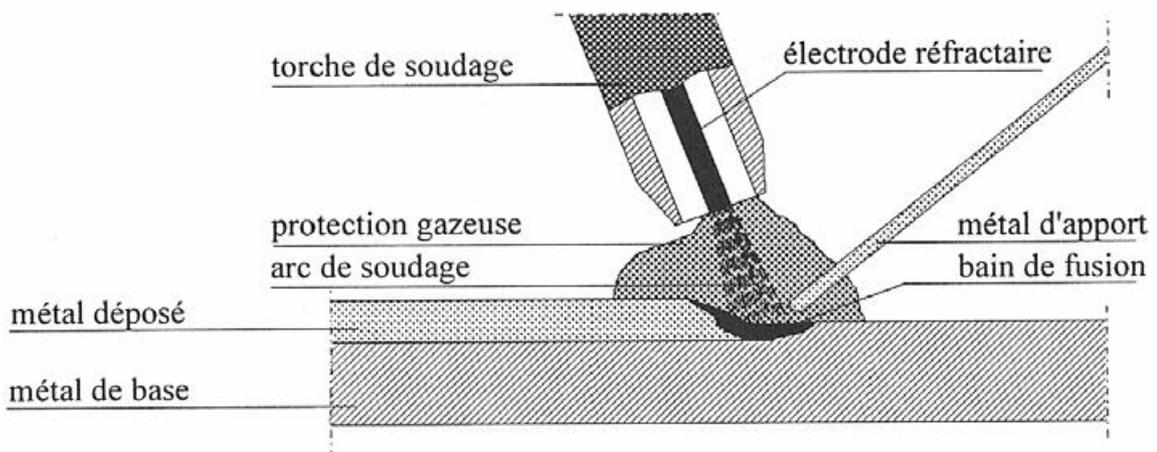


Figure III.14 : Soudage sous flux gazeux – Procédé TIG [3]

III.2.2.2 Procédés à électrodes fusibles

Un arc électrique est créé entre une électrode fusible (cathode) et les pièces à souder (anode), grâce à un générateur de courant, alternatif ou continu, de faible voltage, mais de fort ampérage (de 50 à 600 ampères).

Les particules fondues de la cathode sont projetées sur l'anode, au travers de l'arc, et se déposent. Il suffit alors de déplacer la cathode le long du joint d'assemblage pour constituer un cordon continu de soudure.

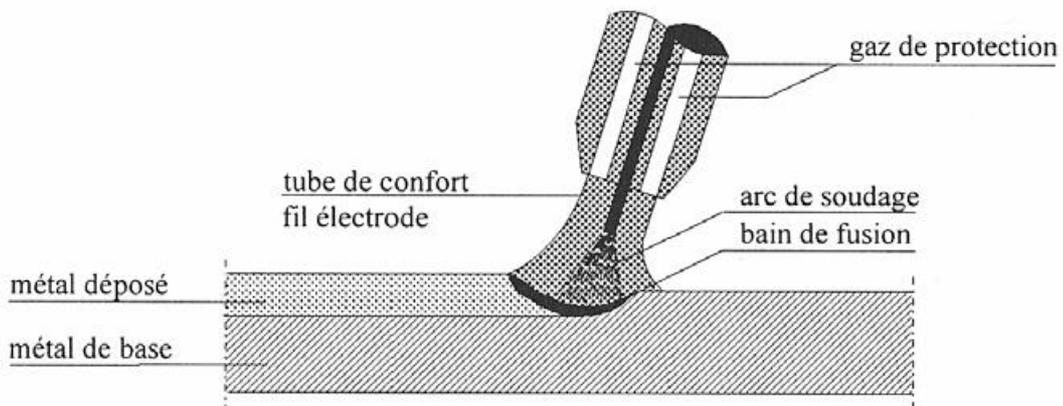


Figure III.15 : Soudage sous flux gazeux [3]

La protection vis-à-vis de l'atmosphère ambiante est obtenue par un gaz insufflé dans une buse concentrique à l'électrode. Si le gaz est inerte, il s'agit du procédé MIG. Pour un gaz actif, c'est le procédé MAG.

III.2.3 Dispositions constructives

III.2.3.1 Définitions de la gorge des cordons d'angle

III.2.3.1.1 Soudures bout à bout

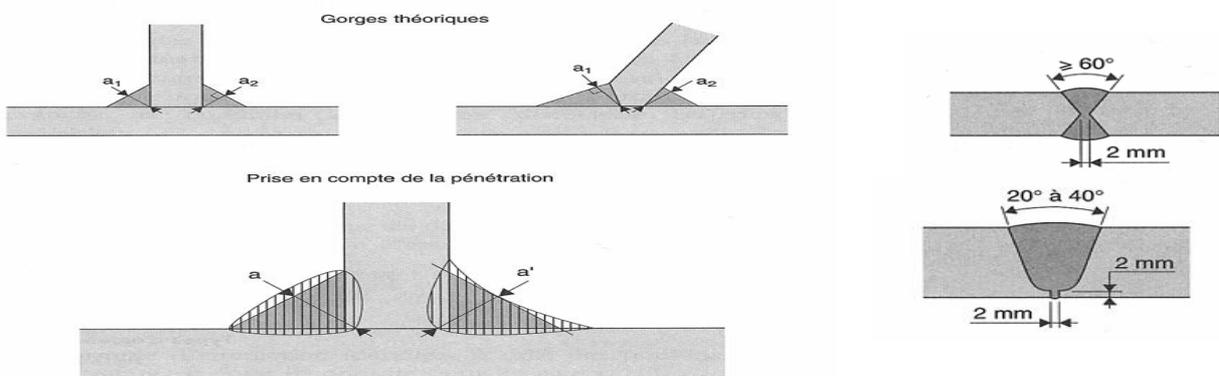


Figure III.16: Soudures bout à bout [3]

III.2.3.1.2 Soudures d'angle

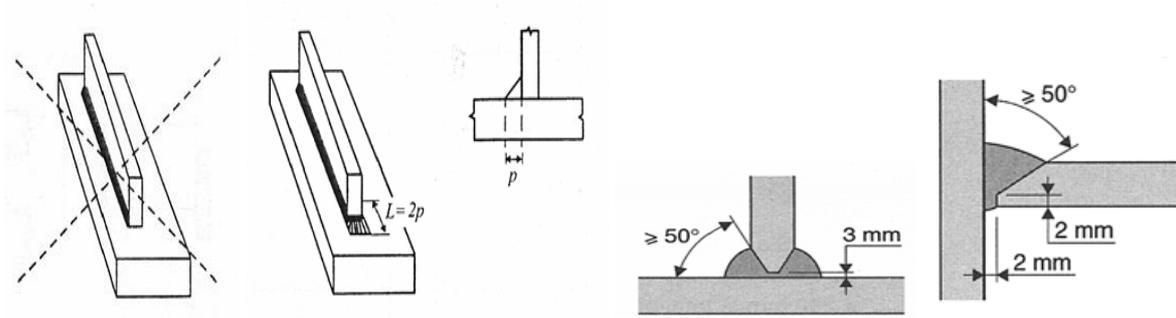


Figure III.17: Soudures d'angle [3]

Il convient de ne pas arrêter les soudures d'angle aux extrémités des éléments assemblés. Elles doivent contourner les coins des assemblages sans interruption, en gardant leur dimension sur une longueur égale à deux fois le pied du cordon, à tous les endroits où ce retour est possible dans un même plan.

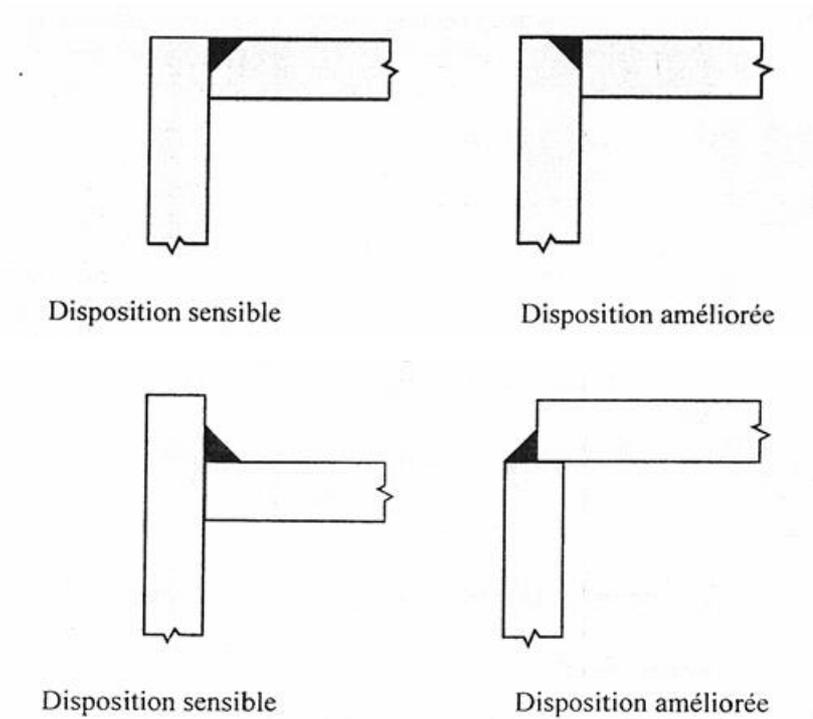
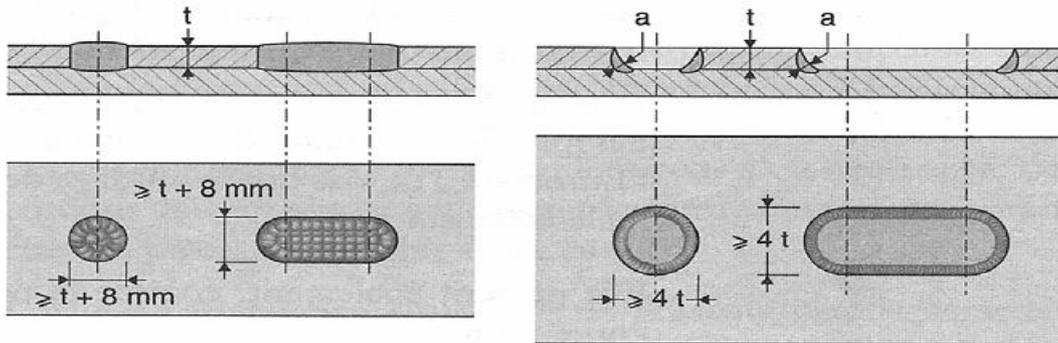


Figure III.18: Dispositions constructives évitant l'arrachement lamellaire [11]

III.2.3.1.3 Autres types de liaisons soudées



Soudures bouchons

Soudures en entaille

III.2.4 Précautions constructives

Le soudage de l'acier exige des températures élevées qui vont provoquer une dilatation locale des pièces. Lors du refroidissement de la zone du cordon de soudure, le retrait va :

1. soit provoquer des déformations dans les pièces, si ces dernières sont librement dilatables.
2. soit générer des contraintes internes dans les pièces, si ces dernières sont bridées.

Dans le premier cas, pour remédier aux déformations, il est possible :

- soit de donner aux pièces des déformations initiales inverses, qui compenseront les déformations en retrait ;
- soit de redresser les pièces à froid, sous presse ;
- soit d'effectuer les cordons par tronçons discontinus et espacés dans le temps ;

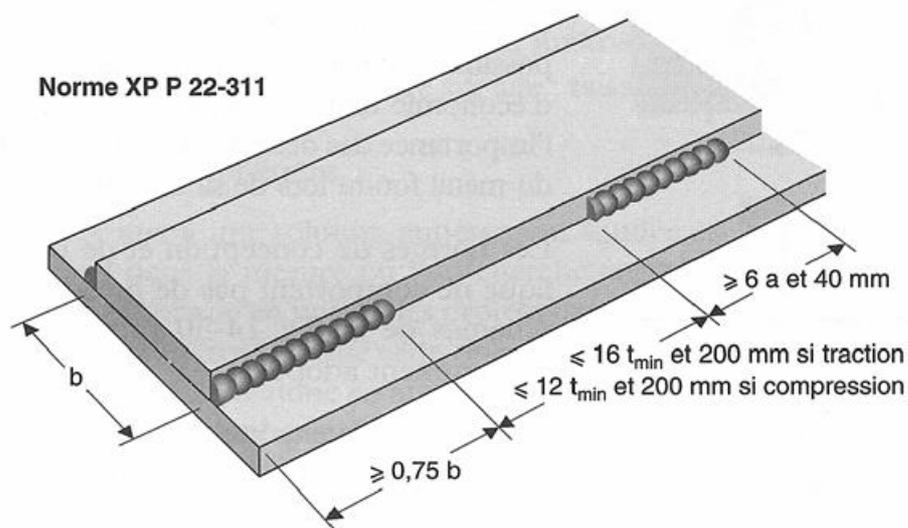


Figure III.19: Cordons discontinus [11]

Chapitre III: Les Assemblages

Soit de préchauffer les pièces pour éviter un refroidissement brusque.

Dans le second cas, pour limiter les contraintes internes, il est possible :

- soit d'assouplir le bridage, ce qui autorisera de faibles déformations, acceptable ;
- soit de post chauffer les pièces.

Quelques autres précautions élémentaires doivent être prises :

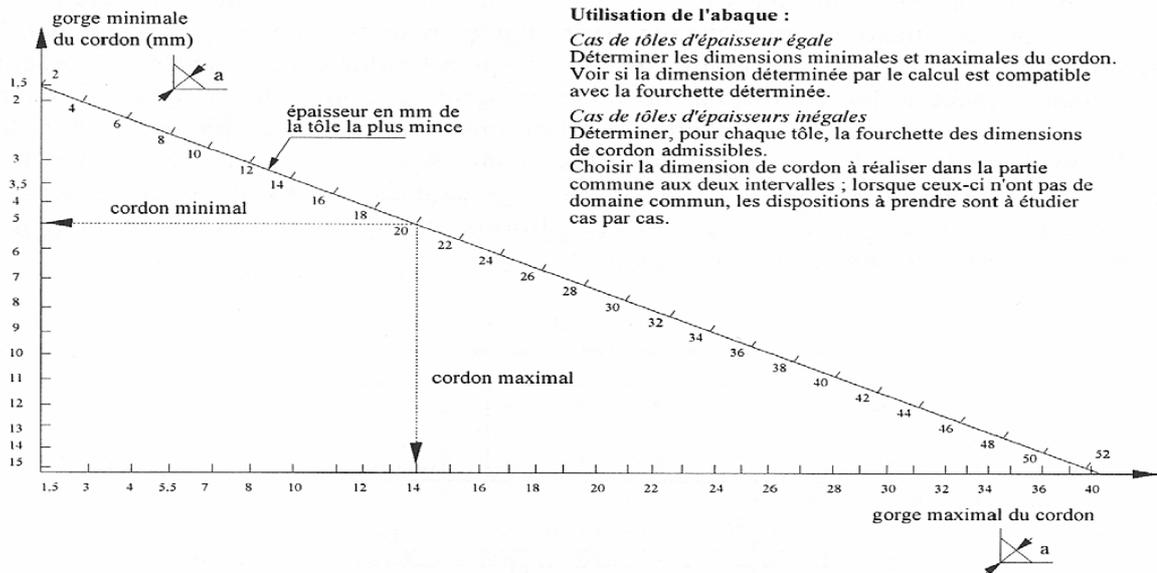
- éviter l'assemblage de pièces de trop grande différence d'épaisseur, car il y a risque de déformation de la pièce la plus mince et risque de fissuration du cordon de soudure au refroidissement.

- Eviter les assemblages par soudure pour des pièces d'épaisseur supérieure à 30mm.
- Réaliser des cordons de diamètre supérieur à 4 mm et de longueur supérieure à 50mm.
- Veiller à une bonne corrélation entre l'épaisseur du cordon et l'épaisseur de la plus faible des pièces à assembler.

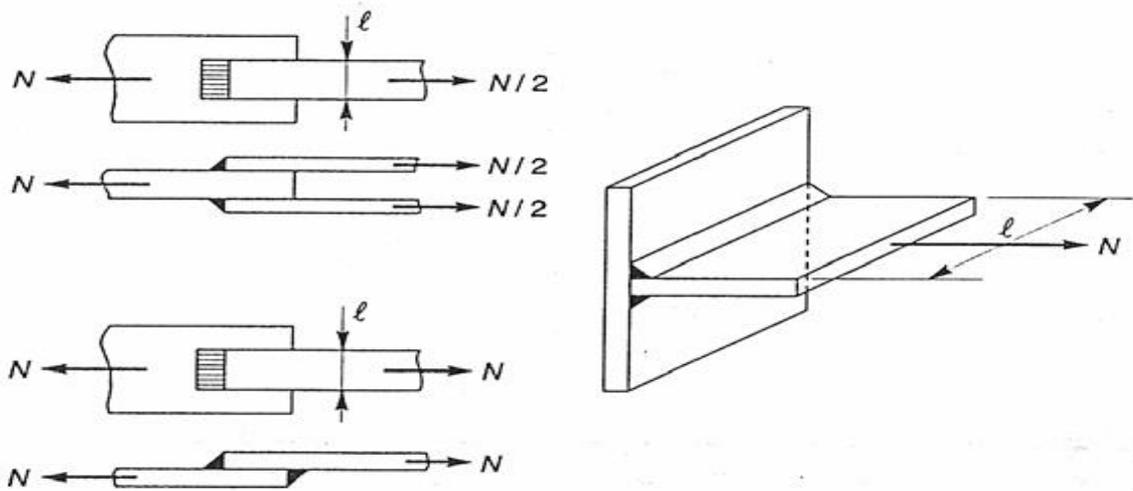
III.2.5 Calcul des cordons de soudure

Les soudures bout à bout ne se calculent pas.

III.2.5.1 Pré dimensionnement de la gorge



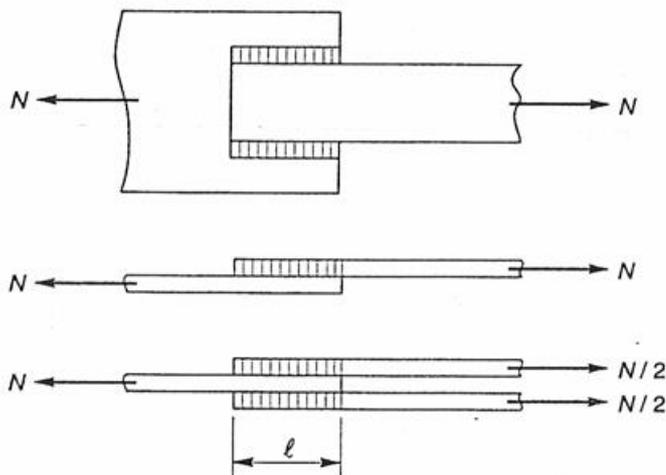
III.2.5.1.1 Cordons frontaux



- Assemblage par cordons frontaux

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N\sqrt{2}}{f_u}$$

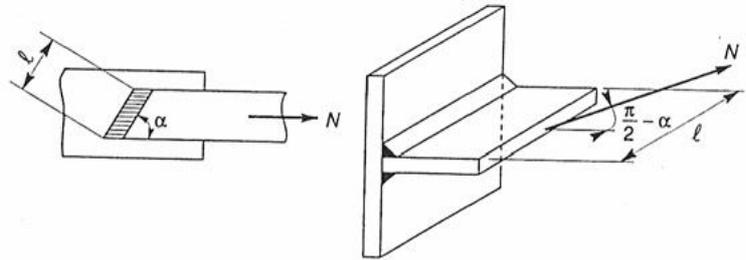
III.2.5.1.2 Cordons latéraux



- Assemblage par cordons latéraux

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N\sqrt{3}}{f_u}$$

III.2.5.1.3 Cordons obliques



$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}}{f_u}$$

Notations

a : épaisseur utile ou gorge, distance minimale de la racine à la surface du cordon ;

l : longueur utile du cordon ;

N : effort pondéré appliqué à chaque cordon, supposé centré au milieu de la longueur du cordon ;

Les coefficients β_w et γ_{Mw} variables selon la nuance d'acier :

Nuances d'acier		γ_{Mw}	β_w	$\beta_w \cdot \gamma_{Mw}$
f_y	f_u			
235 MPa	360 MPa	1.25	0.80	1.00
275 MPa	430 MPa	1.30	0.85	1.10
355 MPa	510 MPa	1.35	0.90	1.20

III.2.6 Exercices d'application

EXERCICE 1:

Soit un assemblage par boulonnage ordinaire entre deux cornières L80×80×8 sur un gousset e=8mm de classe 8.8 et transmet un effort Nsd= 440 KN, Øb=16mm, S235, m= 2.

1/Calculer le nombre de boulons nécessaires

Solution exercice n01:

Les boulons ordinaires travaillent aux cisaillements, on a deux plans de cisaillement

Pour la classe de boulons 8.8 la résistance d'un boulon est :

$$F_{v,Rd} = 0.6 m f_{ub} A_s / \gamma_{Mb} \text{ avec } \gamma_{Mb} = 1.25$$

$$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 157 / 1.25 = 121000N$$

Nombre de boulons nécessaires pour l'assemblage:

$$n = F / F_{v,Rd} = 440 / 121 = 3.66 \text{ donc on prend } n=4 \text{ boulons}$$

vérification de la pression diamétrale

$$F_b, Rd = 2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{Mb}$$

$$F_b, Rd = 2,5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 17,8 / 1,25 = 98000N$$

Et on a $440/4 = 110KN > 98KN$ (CNV)

Donc on réduit la classe de l'acier tout en gardant le diamètre des boulons classe 6.8 et Øb=16mm

$$F_{v,Rd} = 0.5 \cdot 2 \cdot 600 \cdot 157 / 1.25 = 75,36KN$$

$$n = F / F_{v,Rd} = 440 / 75,36 = 5,83 \text{ donc on prend } n=6 \text{ boulons}$$

$$440/6 = 73,33KN < 98KN \text{ (CV)}$$

EXERCICE 2:

Soit un boulon Ø20 non précontraint de classe 10.9 sollicité à la traction par un effort F dont la valeur de calcul pour la vérification de la sécurité structurale correspond à 50% de sa résistance en traction.

1/ Déterminer la valeur de calcul de l'effort à la traction Ft,rd.

2/ Déterminer la valeur de calcul de l'effort de cisaillement Fv,rd.

3/ Déterminer la valeur de calcul des efforts combinés (traction-cisaillement) Fv,sd.

Solution exercice n02:

Les boulons ordinaires travaillent à l'effet combinés de traction et de cisaillement

1/ $F_{t,Rd}$ (résistance en traction du boulon)

$$F_{t,Rd} = 0.9 A_s f_{ub} / \gamma_{Mb} \quad \text{avec } \gamma_{Mb} = 1.5$$

$$F_{t,Rd} = 0.9 \cdot 245 \cdot 1000 / 1.5 = 147000 \text{ N}$$

2/ $F_{v,Rd}$ (résistance au cisaillement du boulon)

$$F_{v,Rd} = 0.5 m f_{ub} A_s / \gamma_{Mb} \quad \text{avec } \gamma_{Mb} = 1.25$$

$$F_{v,Rd} = 0.5 \cdot 1 \cdot 1000 \cdot 245 / 1.25 = 98000 \text{ N}$$

3/ $F_{v,sd}$ efforts combinés (traction-cisaillement)

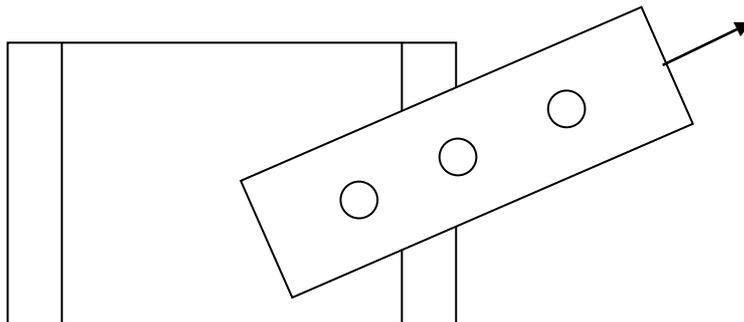
$$F_{v,sd} / F_{v,Rd} + F_{t,sd} / 1.4 F_{t,Rd} \leq 1$$

$$\text{Donc } F_{t,sd} = 50\% F_{t,Rd} = 73,5 \text{ Kn}$$

$$\text{Et on a } F_{v,sd} = 63 \text{ Kn}$$

EXERCICE 3:

Soit l'attache d'une palée de stabilité sur un gousset d'épaisseur 8mm en acier S235, sollicité par un effort extérieur $F_{sd} = 630 \text{ KN}$. Déterminer le nombre de boulons ordinaires nécessaires à l'assemblage, sachant que les boulons sont de la classe 8.8 et 18 de diamètre, deux plans de cisaillement, $A_s = 192 \text{ mm}^2$, $f_u = 360 \text{ MPa}$, $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$.



Solution exercice n03:

Les boulons ordinaires travaillent aux cisaillements, on a deux plans de cisaillement

Pour les classes de boulons 4.6, 5.6, 6.6, 8.8 la résistance d'un boulon est :

$$F_{v,Rd} = 0.6 m f_{ub} A_s / \gamma_{Mb} \quad \text{avec } \gamma_{Mb} = 1.25$$

$$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 192 / 1.25 = 147456 \text{ N}$$

Nombre de boulons nécessaires pour l'assemblage:

$$n = F / F_{v,Rd} = 630 / 148 = 4.25 \text{ donc on prend } n=4 \text{ boulons}$$

vérification de la pression diamétrale

$$F_b, R_d = 2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{Mb}$$

$$F_b, R_d = 2,5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 19,8 / 1,25 = 109440 \text{ N}$$

$$\text{Et on a } 630 / 4 = 157,5 \text{ kN} > 109,44 \text{ kN (CNV)}$$

La pression diamétrale est très importante, on peut opter pour l'une des solutions suivantes:

Première solution: on réduit le diamètre à 14mm tout en gardant la classe des boulons

$$F_{v,Rd} = 0,6 \cdot 2 \cdot 800 \cdot 115 / 1,25 = 88,320 \text{ kN}$$

$$n = F / F_{v,Rd} = 630 / 88,320 = 7,13 \text{ donc on prend } n=6 \text{ boulons}$$

Vérification de la pression diamétrale

$$F_b, R_d = 2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{Mb} = 86,40 \text{ kN}$$

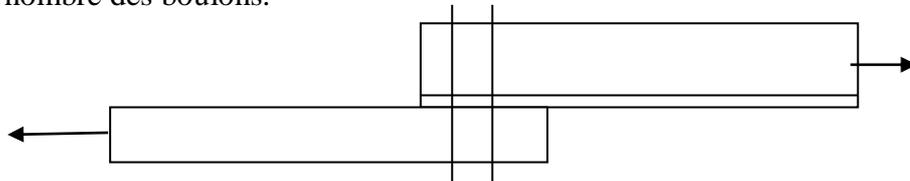
$$630 / 7 = 90 \text{ kN} > 86,40 \text{ kN (CNV) la pression diamétrale reste encore très importante}$$

Deuxième solution: on réduit la classe de l'acier tout en gardant le diamètre des boulons

EXERCICE 4:

Considérons la configuration (a) d'assemblage d'une cornière L50×50×5 sur un gousset d'épaisseur 8mm ; des boulons ordinaires classe 8.8 avec un diamètre Ø14 acier S235, section brute $A_b=478 \text{ mm}^2$,

1/Déterminer le nombre des boulons.



Considérons la même configuration (a) d'assemblage étudiée en 1 dans lequel les boulons ordinaires classe 8.8 sont remplacés par des boulons HR 10.9.

2/ Déterminer le nombre des boulons pour un coefficient de frottement $\mu=0,45$ et Trou surdimensionné. ELU.

Solution exercice n04:

1/ Les boulons ordinaires travaillent au cisaillement, on a un plan de cisaillement

Pour les classes de boulons 4.6, 5.6, 6.6, 8.8 la résistance d'un boulon est :

$$F_{v,Rd} = 0.6 m f_{ub} A_s / \gamma_{Mb} \text{ avec } \gamma_{Mb} = 1.25$$

$$F_{v,Rd} = 0.6 \cdot 1 \cdot 800 \cdot 115 / 1.25 = 44160 \text{ N}$$

Nombre de boulons nécessaires pour l'assemblage:

$$n = F / F_{v,Rd}$$

Calcul de l'effort de traction F:

$$\sigma = F/A \leq [\sigma]$$

Donc $F = A \cdot [\sigma] = 478 \cdot 235 = 112330 \text{ N}$ donc on a

$112330 / 44160 = 2.54$ donc on prend $n = 3$ boulons

vérification de la pression diamétrale

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{Mb}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 15,5 / 1,25 = 54000 \text{ N}$$

Et on a $112,33 / 3 = 37,44 \text{ KN} < 54 \text{ KN (CV)}$

2/ La résistance de calcul au glissement d'un boulon précontraint HR (Haute Résistance) sera égale :

$$F_{s,Rd} = k_s m \mu F_p C_d / \gamma_{Ms}$$

Donc $K_s = 0.85$ avec $\gamma_{Ms,ult} \text{ ELU} = 1.25$

$$F_{pCd} = 0.7 f_{ub} A_s = 0.7 \times 800 \times 115 = 64400 \text{ N}$$

$$F_{s,Rd} = k_s m \mu F_p C_d / \gamma_{Ms} = 0.85 \cdot 1 \cdot 0.45 \cdot 64400 / 1.25 = 19706.4 \text{ N}$$

Nombre de boulons nécessaires pour l'assemblage:

$$n = F / F_{s,Rd} = 5.70 \text{ donc on prend } n = 6 \text{ boulons}$$

vérification de la pression diamétrale

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot \alpha \cdot f_u \cdot d \cdot t / \gamma_{Mb}$$

$$F_{b,Rd} = 2,5 \cdot 1 \cdot 360 \cdot 16,5 / 1,25 = 57600 \text{ N}$$

Et on a $112,33 / 6 = 18,72 \text{ KN} < 57,6 \text{ KN (CV)}$