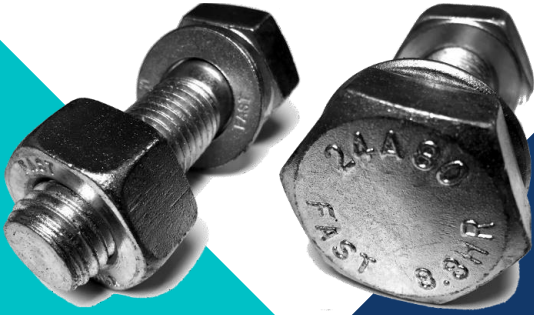


Les Assemblages Boulonnés



Support de cours

Structures métalliques 1

Master 1 / CMM

Université de Batna 2

Département de génie civil

Introduction :

La construction métallique utilise principalement les moyens d'assemblages traditionnels que sont le boulonnage et le soudage. Si le rivetage a été le premier procédé mis en œuvre dans le passé, il n'est pratiquement plus utilisé aujourd'hui sauf dans de très rares cas (par exemple la réhabilitation d'ouvrages anciens).

Un assemblage est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces, sans générer de sollicitation parasite notamment de torsion.

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

Un appui simple ne doit transmettre qu'une action ponctuelle et il doit permettre une libre rotation et une liberté de mouvement dans une direction ou dans un plan. Une rotule ne doit pas transmettre de moment. Elle doit permettre une libre rotation de l'assemblage. Un encastrement doit pouvoir transmettre un effort normal, un effort tranchant et un moment fléchissant. Il ne doit exister aucune liberté de mouvement relatif entre deux barres considérées comme encastrees.

En réalité, selon le cas, un assemblage n'est ni une articulation parfaite, ni un encastrement parfait. Une articulation transmettra un moment résiduel qu'il faudra limiter au maximum et un encastrement permettra une légère rotation entre les deux barres qu'il faudra aussi limiter. Généralement, on peut néanmoins considérer :

- qu'un assemblage par cornière d'âme comme celui de la *(figure 1.a)* est une articulation.
- qu'un assemblage par platine d'about de forte épaisseur soudée sur l'âme et les ailes avec raidisseurs est un encastrement ou assemblage rigide *(figure 1.b)*.

D'autres assemblages qui ne se comportent ni comme une articulation, ni comme un encastrement, sont définis comme « semi-rigides » mais dans ce cas, il faut faire intervenir leur courbe de réponse moment-rotation dans l'analyse des structures.

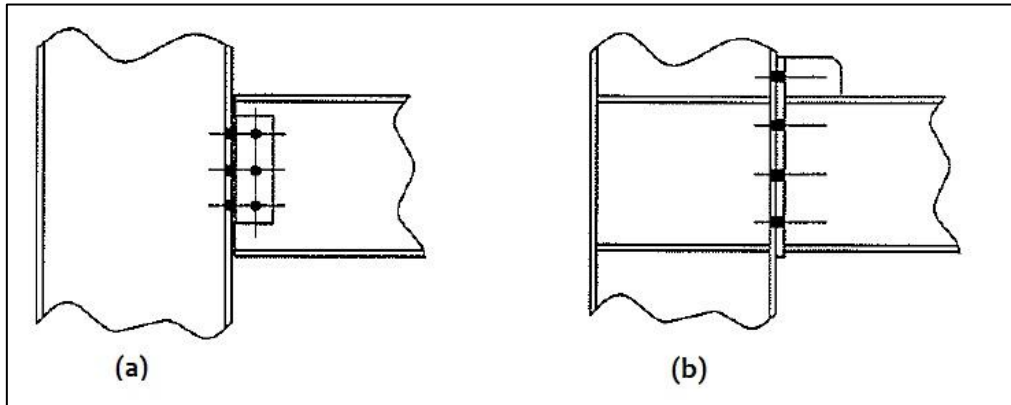


Figure 1 : a) assemblage articulé b) assemblage rigide

La ruine d'un assemblage peut provenir :

- d'un dépassement des valeurs maximales des efforts à transmettre ou d'une mauvaise évaluation de ces efforts,
- de phénomènes de fatigue sous sollicitations alternées (changement du signe des efforts) .

Dans ce chapitre, on s'intéressera aux assemblages simples qui correspondent aux attaches de base faisant intervenir les moyens d'assemblages classiques (boulons ordinaires et boulons précontraints).

➤ **Les assemblages boulonnés :**

Un boulon traditionnel (*figure 2*) est un ensemble constitué d'une vis, d'un écrou et, le cas échéant, d'une ou deux rondelles. En construction métallique, les têtes de vis sont généralement de forme hexagonale.

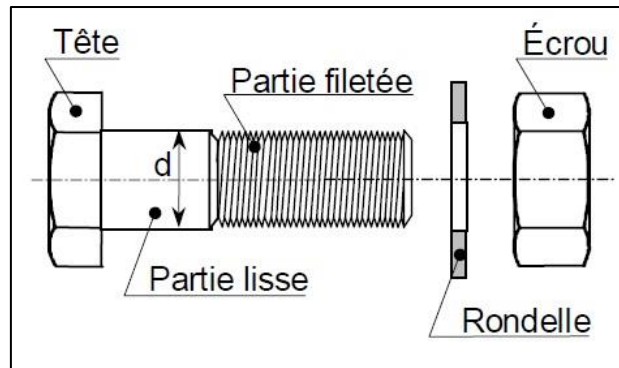
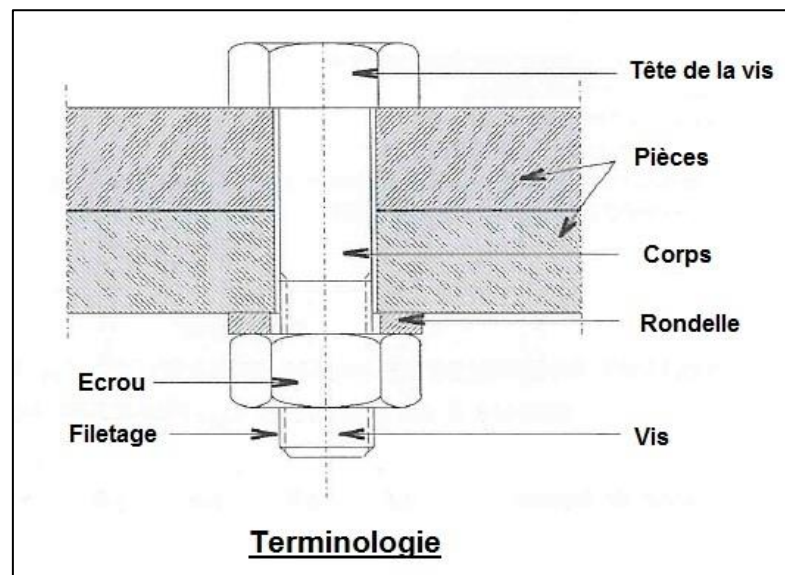


Figure 2. Constituants d'un boulon

Du fait de sa simplicité de pose et des possibilités de réglage qu'il autorise, le boulonnage est un moyen d'assemblage très utilisé.

Les boulons traditionnels peuvent être classés selon leur mode de mise en œuvre qui conditionne également le mode de transmission des efforts. On distingue **les boulons ordinaires**, mis en place par un serrage sans spécification particulière, et **les boulons précontraints** pour lesquels le serrage est contrôlé.

- **Assemblage par boulons ordinaires :**



Les boulons ordinaires sont par principe, des boulons non précontraints. Les caractéristiques mécaniques de ces boulons, nécessaires aux calculs, sont la limite d'élasticité f_{yb} et la résistance à la traction f_{ub} . Sept classes de boulons peuvent être utilisées et sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Classe de boulons	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (MPa)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (MPa)	400	400	500	500	600	800	1000

La classe de qualité est telle que le premier nombre représente 1/100 de la limite de rupture f_{ub} et que le produit des deux nombres est égal à 1/10 de la limite d'élasticité f_{yb} ; ces deux quantités étant exprimées en MPa.

A titre d'exemple, un boulon de classe 6.8 possède une limite d'élasticité $f_{yb} = 6 \times 8 \times 10 = 480$ MPa et une résistance à la traction ultime $f_{ub} = 6 \times 100 = 600$ MPa .

Plusieurs caractéristiques dimensionnelles sont indispensables à la conception et la vérification des assemblages boulonnés. Pour les diamètres les plus utilisés, les caractéristiques principales sont données dans le tableau suivant :

Désignations	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d	12	14	16	18	20	22	24	27	30
d_0 trou normal	13	15	18	20	22	24	26	30	33
A	113	154	201	254	314	380	452	573	707
A_s	84,3	115	157	192	245	303	353	459	561
Ø rondelle	24	27	30	34	37	40	44	50	52
d_m	19,39	22,63	25,86	29,09	32,32	36,63	38,79	44,17	49,56

d diamètre nominal du boulon (celui de la partie non fileté)

d_0 diamètre du trou normal

A aire de la section de la tige lisse du boulon

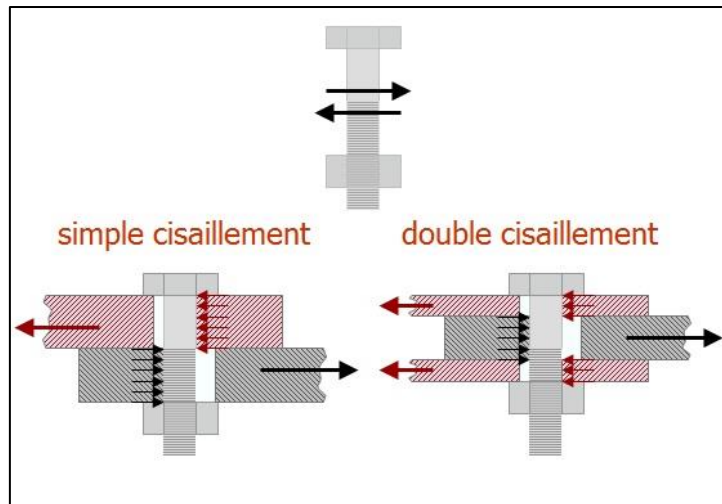
A_s section résistante de la partie fileté

d_m diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit à la tête du boulon

NB : seuls les boulons de classes 8.8 et 10.9 peuvent être utilisés comme boulons précontraints à haute résistance pour la construction.

➤ **Base de calcul :**

❖ **Calcul des boulons au cisaillement :**



Dans le cas des pièces assemblées par des boulons ordinaires, ces dernières sont supposées pouvoir glisser pour venir en contact avec les tiges. L'effort appliqué est perpendiculaire à l'axe des boulons qui supportent une pression latérale dans les zones de contact. Les tiges sont alors cisillées au droit des surfaces de glissement.

Les pièces impriment une contrainte de cisaillement aux boulons. Le boulon jouant le rôle de butée produit, par réaction, une contrainte normale sur la surface des trous dans les pièces avec lesquelles il sont en contact. Cette contrainte est appelée *pression diamétrale*.

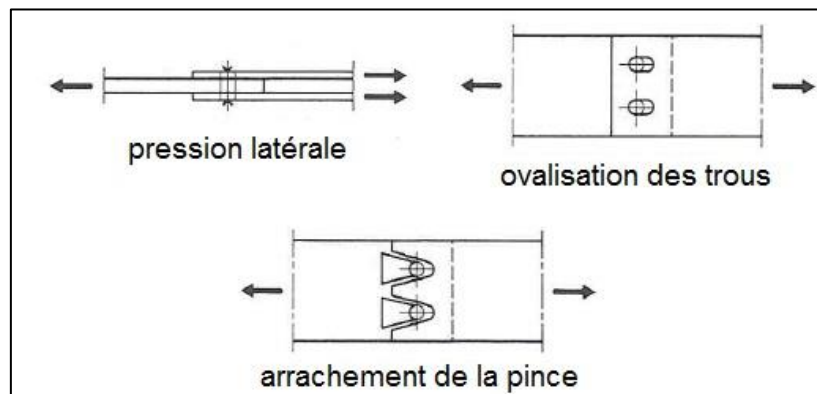


Figure 3 : Pression diamétrale dans un assemblage boulonné

-Si le plan de cisaillement passe par la partie fileté du boulon, la résistance au cisaillement par plan de cisaillement est :

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

Avec :

$\alpha_v = 0,6$ pour les classes 4.6, 5.6 et 8.8.

$\alpha_v = 0,5$ pour les classes 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9.

γ_{M2} : Coefficient partiel de sécurité égal à 1.25

-Si le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon, la résistance au cisaillement par plan de cisaillement est :

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}$$

❖ Calcul du boulon à la pression diamétrale :

La résistance de calcul à la pression diamétrale d'un boulon est donnée par :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_v \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}}$$

Avec :

$$\alpha_v = \min\left(\frac{e_1}{3d_0}; \frac{P_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1\right)$$

$$k_1 = \min\left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{P_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right)$$

d : diamètre nominal du boulon.

d_0 : diamètre du trou.

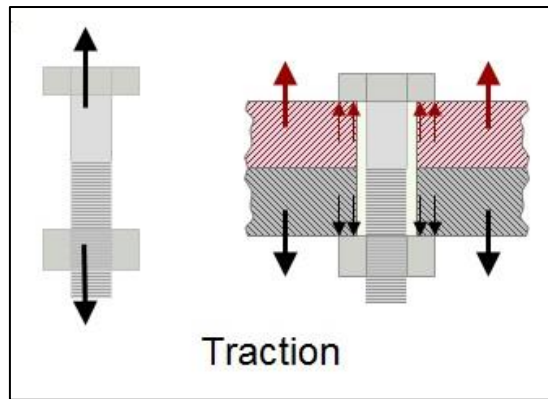
e_1 : pince longitudinale.

P_1 : distance entre 2 boulons successifs dans le sens de l'effort.

f_u : résistance à la traction du plat.

t : épaisseur du plat le plus mince.

❖ Calcul des boulons a la traction :



La résistance de calcul à la traction d'un boulon s'exprime par :

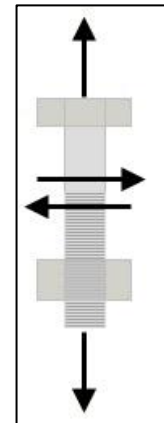
$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

γ_{M2} : Coefficient partiel de sécurité égal à 1,25

❖ **Calcul des boulons sollicités simultanément au cisaillement et à la traction :**

Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement F_v et de traction F_t , doivent satisfaire la condition suivantes :

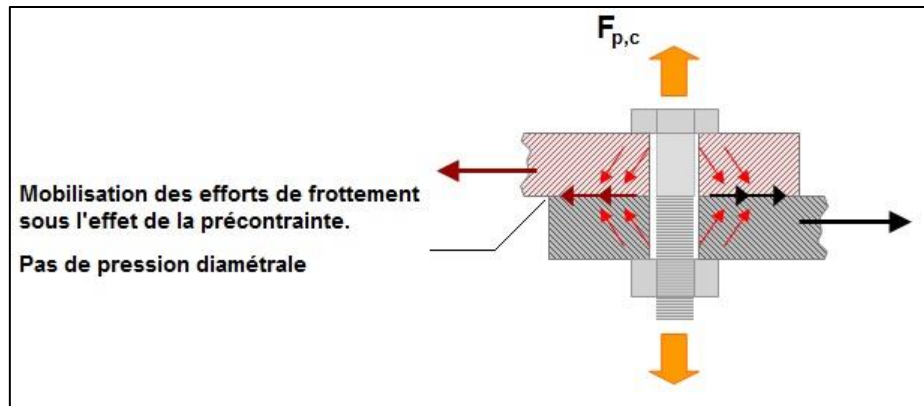
$$\frac{F_v}{F_{v,Rd}} + \frac{F_t}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1,0$$



• **Assemblage par boulons précontraints (HR) :**

Bien que présentant le même aspect qu'un boulon ordinaire, un boulon HR (haute résistance) est constitué d'acier à haute limite élastique de classe **8.8** ou **10.9** et comporte une rondelle incorporée à la tête. Lors du boulonnage, il est serré fortement, ce qui a pour effet de lui communiquer un effort de précontrainte, qui agit parallèlement à l'axe du boulon. Cette précontrainte développe, par frottement mutuel des pièces, une forte résistance à leur glissement relatif.

Contrairement aux boulons ordinaires, les boulons HR ne travaillent pas au cisaillement, mais transmettent les efforts par frottement.



Cependant, dans certains cas, les tiges peuvent venir au contact des pièces, soit en raison d'un mauvais montage, soit accidentellement par glissement des pièces (coefficient de frottement μ insuffisant ou bien effort tangent excessif). Dans ces cas, les boulons HR vont fonctionner au cisaillement.

❖ Résistance au glissement des boulons HR :

La résistance de calcul au glissement d'un boulon précontraint vaut :

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,c}}{\gamma_{M3}}$$

Avec :

n : nombre de surface de frottement.

γ_{M3} : Coefficient de sécurité égal à 1.25 pour l'ELU et à 1.10 pour l'ELS.

$F_{p,c,d}$: Force de précontrainte qui s'exprime par : $F_{p,c} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$

k_s : coefficient fonction de la dimension du trou de pressage donné dans le tableau suivant :

Description	k_s
Boulons utilisés dans des trous normaux.	1,0
Boulons utilisés soit dans des trous surdimensionnés soit dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,85
Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,7
Boulons utilisés dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,76
Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,63

- $k_s = 1.0$ pour les trous à tolérances normales, à savoir :

1 mm pour les boulons $\phi 12$ et $\phi 14$

2 mm pour les boulons $\phi 16$ à $\phi 24$

3 mm pour les boulons $\phi 27$ et plus

μ : coefficient de frottement qui prend les valeurs :

- $\mu = 0.50$ pour les surfaces décapées par grenailage ou sablage puis métallisées par projection d'aluminium ou d'un revêtement à base de zinc.
- $\mu = 0.40$ pour les surfaces décapées par grenailage ou sablage et recouvertes d'une couche de peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80 μm
- $\mu = 0.30$ pour les surfaces nettoyées à la flamme ou par brosse à la brosse métallique avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes.
- $\mu = 0.20$ pour les surfaces non traitées.

❖ **Résistance des boulons HR à la traction :**

Dans le cas d'un effort parallèle à l'axe des boulons, un assemblage par boulons HR est tel que les pièces restent en contact tant que l'effort appliqué ne dépasse pas l'effort de précontrainte.

❖ **Résistance des boulons HR sollicités simultanément au cisaillement et à la traction :**

Dans ce cas, l'effort est décomposé en un effort perpendiculaire et un effort parallèle à l'axe du boulon. Ce dernier tend à diminuer la pression exercée sur les pièces assemblées, il convient donc de prendre la résistance au glissement par boulon égale à la valeur suivante:

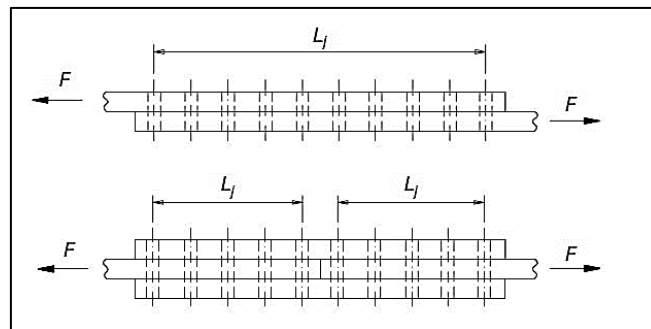
$$F_{S,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{p,C} - 0,8 F_t)}{\gamma_{M3}}$$

Effet de la longueur de l'assemblage :

L'étude des assemblages sollicités au cisaillement a mis en évidence l'influence de la longueur de l'assemblage sur la charge de ruine. Les plus grandes déformations se situent aux extrémités de l'assemblage ; les boulons des extrémités sont donc plus sollicités que les boulons centraux. Tous les boulons d'un assemblage sollicité en cisaillement ne transmettent pas la même charge.

Lors de la vérification d'un assemblage dont la distance entre le premier et le dernier boulon d'une tôle dépasse 15 fois le diamètre d du boulon, la résistance de calcul au cisaillement $F_{V,Rd}$ de tous les éléments d'attache doit être réduite en la multipliant par un coefficient réducteur β_{Lf} donné par :

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \quad \text{Avec : } 0.75 \leq \beta_{Lf} \leq 1.0$$



Résistance des éléments avec trous de fixation :

Pour pouvoir utiliser des attaches avec boulons, des trous doivent être prévus dans les éléments à assembler. Or, la présence d'un trou réduit la section brute de la section d'origine. Les points suivants, liés aux effets des trous, sont discutés ci-dessous :

- L'aire nette ;

- La résistance à la traction des plats avec trous de fixation ;
- La résistance à la traction des cornières avec trous de fixation ;
- Cisaillement de bloc.

Aire nette :

Pour la conception de sections ou de plats soumis à la traction, l'influence des trous doit être prise en compte. La section critique est appelée aire nette A_{net} . Cette dernière est déterminée en réduisant la section transversale brute par la surface de tous les trous et autres ouvertures dans une ligne de rupture. Pour l'élément illustré dans la figure 4, l'aire nette vaut :

$$A_{net} = bt - d_0t$$

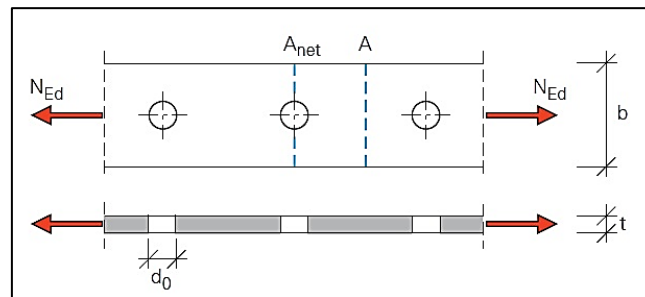


Figure 4 : traction d'un élément avec trous de fixation.

Avec :

b : largeur du plat

t : épaisseur du plat

d_0 : diamètre du trou.

Lorsque les trous de boulon sont décalés, comme dans la figure 5, une coupe en zigzag (ligne de rupture 1) peut être critique en plus de la coupe transversale perpendiculaire à l'axe de l'élément (ligne de rupture 2).

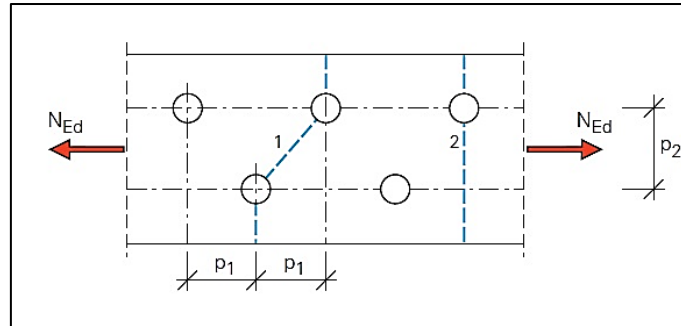


Figure 5 : traction d'un élément avec trous de fixation décalés.

Pour une coupe en zigzag, l'aire nette est calculée comme suit :

$$A_{net} = \left(b - nd_0 + \sum \frac{S_i^2}{4P_i} \right) \cdot t$$

Avec :

n : nombre de trous traversés par la ligne de rupture.

S : espacement entre deux trous successifs sur la ligne de rupture dans le sens de l'effort (dénomé P_1 dans la figure 5).

P : espacement entre deux trous successifs sur la ligne de rupture dans le sens perpendiculaire à l'effort (dénomé P_2 dans la figure 5).

Résistance à la traction des plats avec trous de fixation:

La résistance d'un élément tendu est calculée selon l'hypothèse de la plastification de la section entière. La résistance de calcul pour un élément tendu est généralement prise égale à la plus petite des deux valeurs suivantes: la plastification de la section brute ou la rupture de la section nette.

❖ Plastification de la section brute $N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$

❖ Rupture de la section nette $N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$

Où :

A : représente l'aire brute de la section transversale.

A_{net} : représente l'aire nette de la section transversale.

f_y : représente la limite élastique de l'acier.

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

Pour les assemblages utilisant des boulons précontraints, la résistance plastique de calcul de la section nette ($N_{net,Rd}$) est limitée à la plastification au niveau de la section nette :

$$N_{t,Rd} = N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{M0}}$$

La résistance de calcul à la traction ($N_{t,Rd}$) est donc prise égale à la plus petite valeur donnée par les 3 relations précédentes. Cette résistance sera comparée à la valeur de calcul de l'effort de traction appliquée (N_{Sd}).

$$N_{t,Rd} = \min(N_{pl,Rd} ; N_{u,Rd} ; N_{net,Rd})$$

Résistance à la traction des cornières avec trous de fixation:

En général, les cornières sont connectées à une seule aile (figure 6). Il en résulte une répartition complexe des contraintes dans l'assemblage, car l'effort de traction dans la section transversale totale doit être transférée uniquement par l'aile connectée. Des tests ont montré que, dans ce cas, une partie de la section peut se déchirer, bien avant que la section nette ne cède.

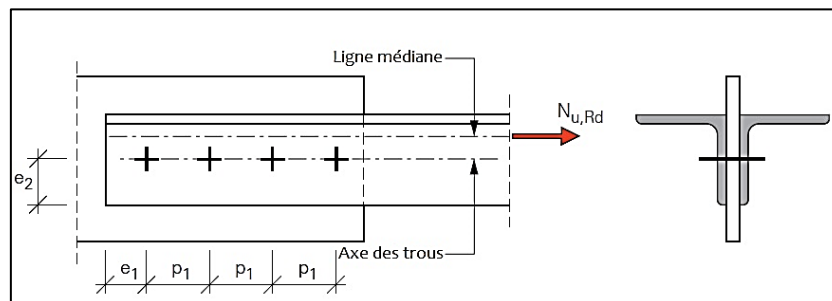


Figure 6 : cornières connectées par une seule aile.

La valeur de calcul de la résistance à la traction $N_{u,Rd}$ dépend du nombre de boulons, de l'espacement p_1 et de la distance au bord (pinçe) e_2 . Pour un assemblage avec un seul boulon, l'équation suivante s'applique :

$$N_{u,Rd} = \frac{2(e_2 - 0,5d_0) t f_u}{\gamma_{M2}}$$

Pour les assemblages de cornières avec deux boulons ou plus dans une aile, un facteur de réduction β est introduit. Cette réduction doit être appliquée à la résistance axiale de calcul

de la section nette. La valeur de β dépend du nombre de boulons et de leur espacement P_1 .

La résistance de calcul ($N_{u,Rd}$) se calcul comme suit :

❖ Cas de 2 boulons :

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

❖ Cas de 3 boulons ou plus :

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

Les valeurs de β_2 (deux boulons) et de β_3 (trois boulons ou plus) en fonction de P_1/d_0 sont données dans la figure 7.

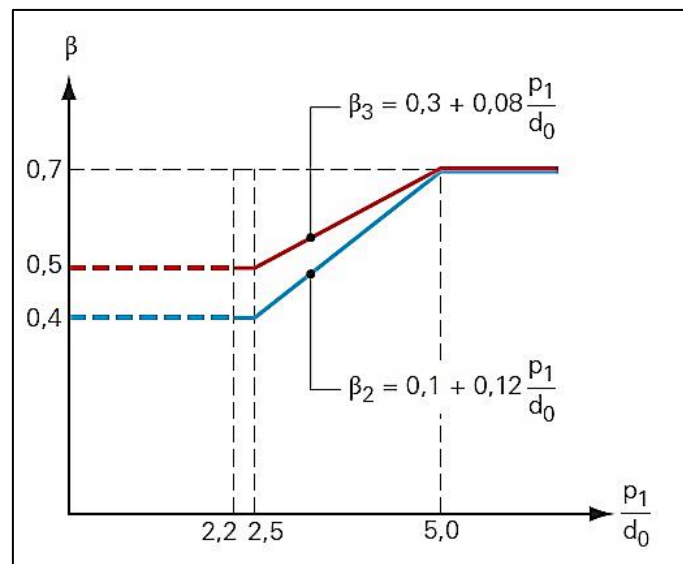


Figure 7 : Facteurs de réduction β_2 et β_3 .

Cisaillement de bloc :

En plus du contrôle de la résistance à la traction de la section nette et de la section brute, il faut également vérifier l'arrachement d'un groupe de boulons (cisaillement de bloc). Le cisaillement de bloc se caractérise par la combinaison d'une rupture en cisaillement, le long de la ligne de cisaillement d'une rangée de trous dans la direction de l'effort, accompagnée d'une rupture en tension au niveau de la rangée de trous perpendiculaire à la direction de l'effort (figure 8).

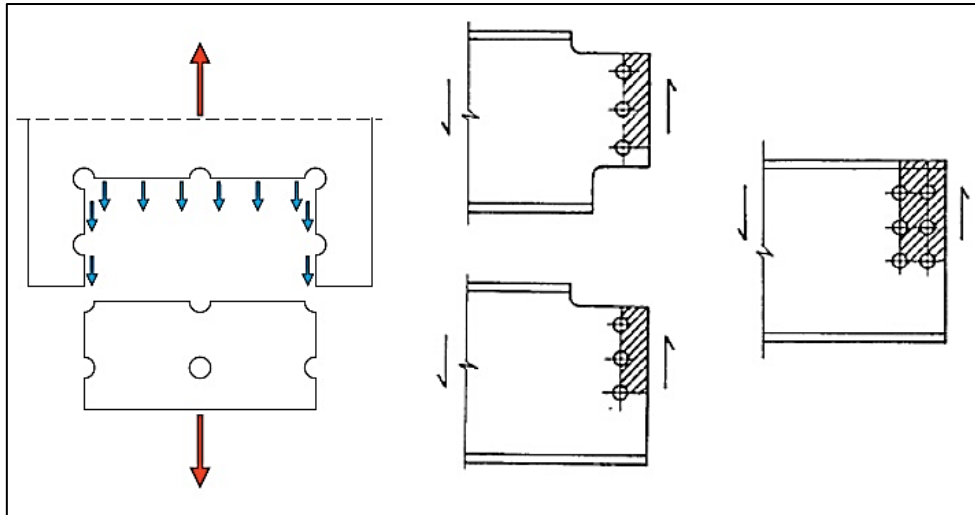


Figure 8 : Cisaillement de bloc.

Pour un groupe de boulons symétrique soumis à un chargement centré, la résistance de calcul au cisaillement de bloc, $V_{\text{eff},1,\text{Rd}}$ est donnée par :

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}\sqrt{3}}$$

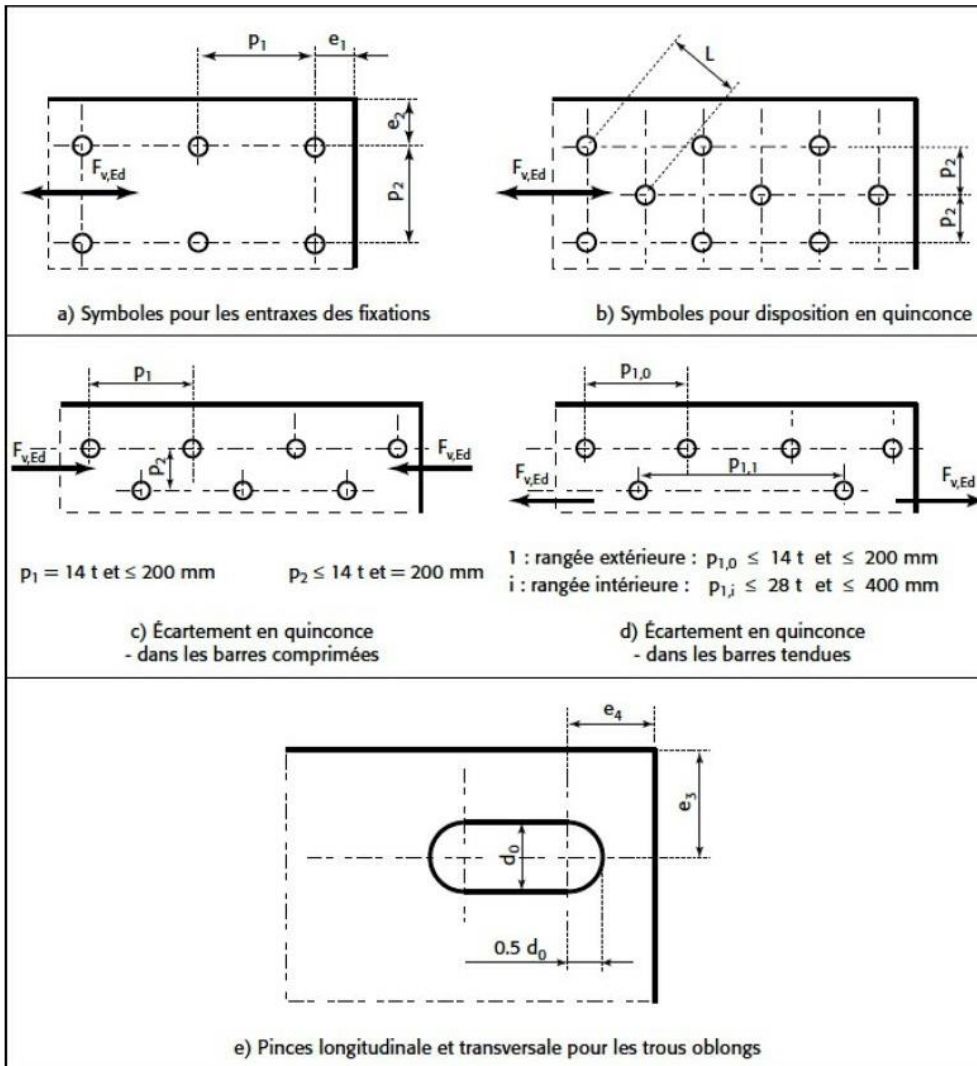
A_{nt} : est l'aire nette soumise à la traction ;

A_{nv} : est l'aire nette soumise au cisaillement.

Lorsque le mode d'arrachement n'est pas symétrique, ou lorsque le groupe de boulons est soumis à un chargement excentré, la résistance de calcul au cisaillement de bloc, $V_{\text{eff},2,\text{Rd}}$ est donnée par :

$$V_{\text{eff},2,\text{Rd}} = \frac{0,5 f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M0}\sqrt{3}}$$

Dispositions constructives :



Distances et entraxes	Minimum	Maximum ^{1) 2) 3)}	
		Structures réalisées en aciers conformes à l'EN 10025 à l'exception des aciers conformes à l'EN 10025-5	
Voir figure 3.1		Acier exposé aux intempéries ou autres influences corrosives	Acier non exposé aux intempéries ou autres influences corrosives
		Pince longitudinale e_1	$1,2 d_0$
Pince transversale e_2	$1,2 d_0$	$4 t + 40 \text{ mm}$	
Distance e_3 pour les trous oblongs	$1,5 d_0$ ⁴⁾		
Distance e_4 pour les trous oblongs	$1,5 d_0$ ⁴⁾		
Entraxe p_1	$2,2 d_0$	Minimum de $14 t$ ou 200 mm	Minimum de $14 t$ ou 200 mm
Entraxe $p_{1,0}$		Minimum de $14 t$ ou 200 mm	
Entraxe $p_{1,i}$		Minimum de $28 t$ ou 400 mm	
Entraxe p_2 ⁵⁾	$2,4 d_0$	Minimum de $14 t$ ou 200 mm	Minimum de $14 t$ ou 200 mm

Les conditions maximales ont pour but d'éviter la corrosion entre les pièces assemblées et le voilement local ainsi qu'à faciliter la mise en place des boulons.