

Chapitre 2 : Les assemblages boulonnés

1- Généralités :

1.1- Positionnement des boulons

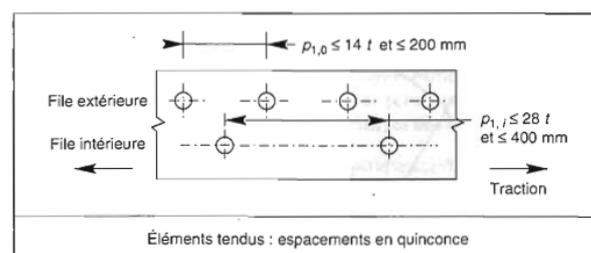
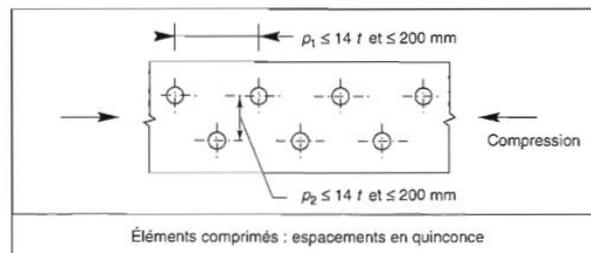
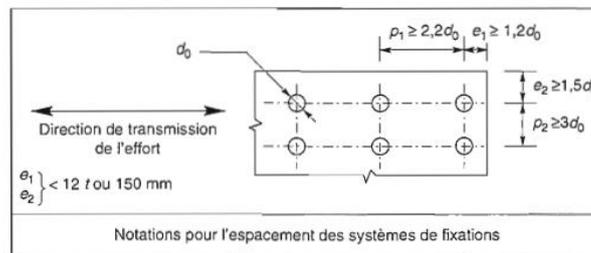
Les distances entre axes des boulons ainsi qu'entre axes des boulons et bords des pièces sont limitées par :

Des valeurs minimales :

- Pour faciliter la mise en place des boulons
- Pour permettre le passage des clés
- Pour éviter le déchirement des tôles

Des valeurs maximales :

- Pour conserver un bon contact entre les pièces assemblées
- Pour éviter des assemblages trop longs



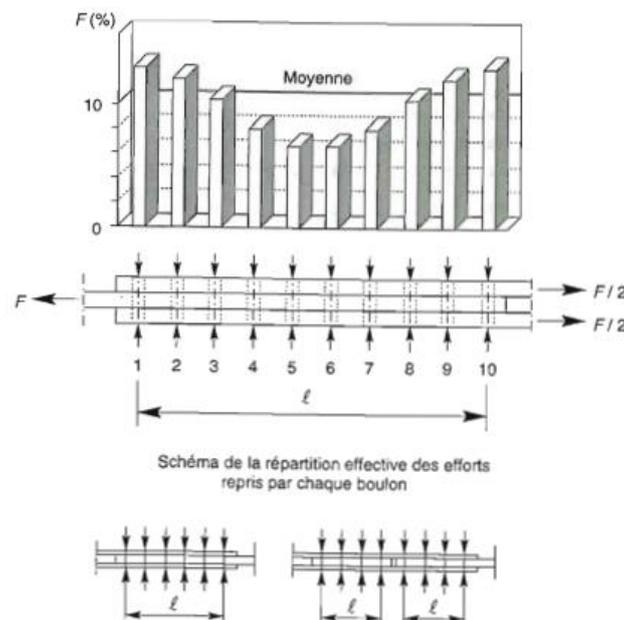
1.2- Effet de la longueur de l'assemblage

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 au **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'un tôle dépasse 15 fois le diamètre d** du boulon, on tiendra compte de ce phénomène en multipliant la résistance ultime théorique par **un facteur de réduction β** donnée par :

$$\beta = 1 - \frac{(l - 15d)}{200d} \text{ avec } 0.75 \leq \beta \leq 1$$

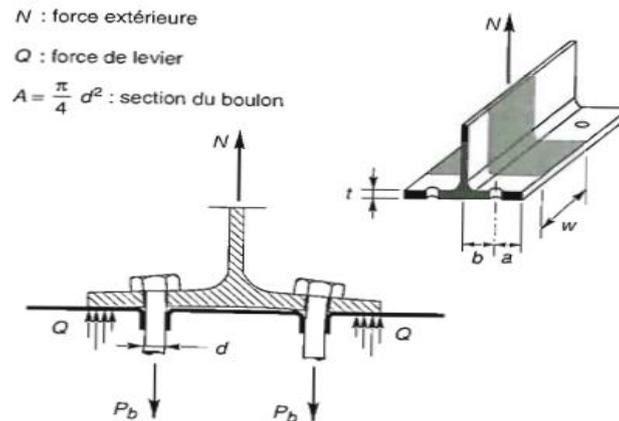


1.3. Effet de levier :

Un assemblage réalisé avec des **tôles d'épaisseur insuffisante, se déforme**. Cette déformation conduit à **une augmentation de l'effort** dans le boulon, due à la force Q , appelée *force de levier*.

Cette force supplémentaire Q peut provoquer une rupture prématurée des boulons. Une **estimation de la force de levier** peut être trouvée avec la formule suivante :

$$Q = \left\{ \frac{0.5 - \left(\frac{wt^4}{30ab^2A} \right)}{\frac{a}{b} \left[\left(\frac{a}{3b} \right) + 1 \right] + \frac{wt^4}{6ab^2A}} \right\} \frac{N}{2}$$



1-4 Section nette-Ligne de rupture :

a) Résistance de la section transversale :

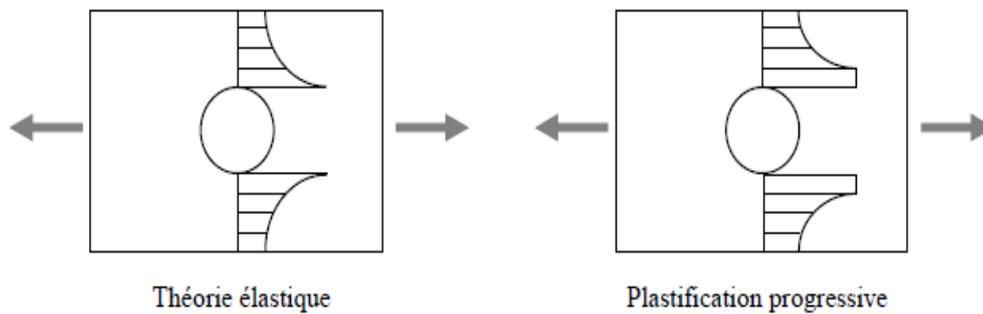
La valeur de calcul de l'effort de traction N_{Ed} dans chaque section transversale doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1$$

Pour une qui ne comporte aucun trou, la valeur du calcul de la résistance à la traction $N_{t,Rd}$ est la valeur de calcul de la résistance plastique de la section transversale brute :

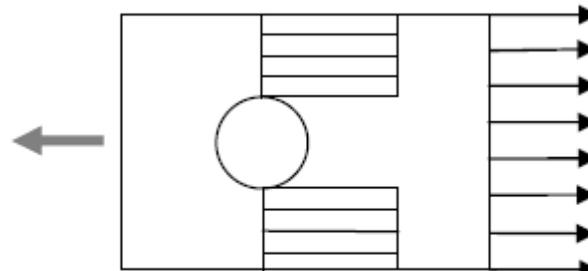
$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$$

Pour une section qui comporte des trous (assemblages boulonnés), la résistance de la section est affaiblie par la réduction de l'aire de section transversale due à la présence des trous (**aire nette**) et une vérification supplémentaire est exigée. Bien que les trous induisent des **concentrations de contraintes** lorsqu'on est dans le domaine élastique, une **plastification progressive** apparaît dans la section affaiblie dès que l'effort augmente.



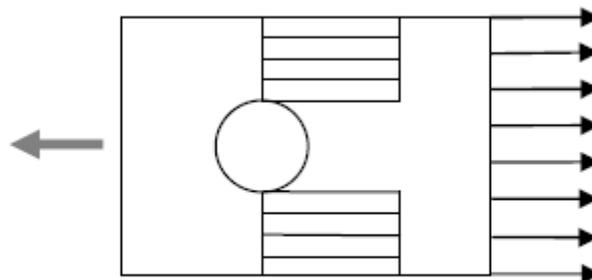
La **ductilité de l'acier** permet de supposer, qu'à l'**état limite ultime**, la **répartition des contraintes dans les sections nette et brute** est représentée par l'un des cas suivants :

- si les trous **sont peu nombreux ou de dimensions réduites**, la limite élastique sera atteinte dans la section brute avant que la limite de rupture ne soit atteinte dans la section réduite (par « déformations excessives ») :



$$\underline{1^{er} \text{ cas}} : \sigma_{A_{nette}} < f_u \quad \sigma_{A_{brute}} = f_y$$

- si les trous **sont plus nombreux ou de dimensions importantes**, la limite de rupture sera atteinte dans la section réduite avant que la limite élastique ne soit atteinte dans la section brute (par « rupture à caractère fragile ») :



$$\underline{2^{e} \text{ cas}} : \sigma_{A_{nette}} = f_u \quad \sigma_{A_{brute}} < f_y$$

En conséquence, pour une section qui comporte des trous, la valeur de calcul de la résistance à la traction $N_{t,Rd}$ doit être prise comme étant la plus petite des deux valeurs suivantes :

a) La valeur de calcul de la résistance plastique de la section transversale brute :

$$N_{pl.Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}}$$

b) La valeur de calcul de la résistance ultime de la section transversale nette :

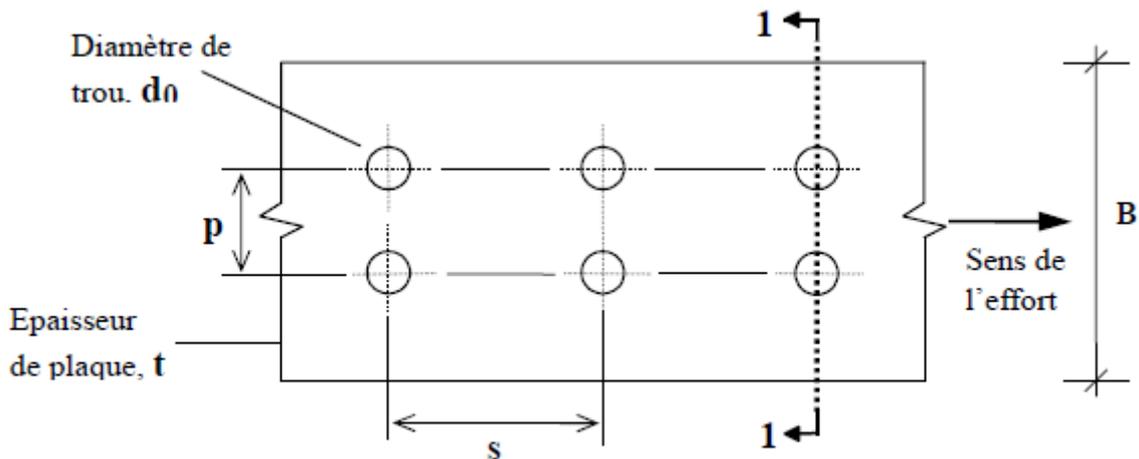
$$N_{u.Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

b) Détermination de l'aire nette :

L'aire nette d'une section transversale est l'aire brute diminuée des trous de fixation et autres ouvertures. Pour chaque trou de fixation, la déduction est l'aire de section transversale brute du trou ($d_0.t$).

Lorsque les trous sont alignés transversalement, l'aire totale à déduire de toute section transversale perpendiculaire à l'axe de l'élément (1-1) est la somme maximale des aires de section des trous.

Exemple pour deux files de trous alignés :



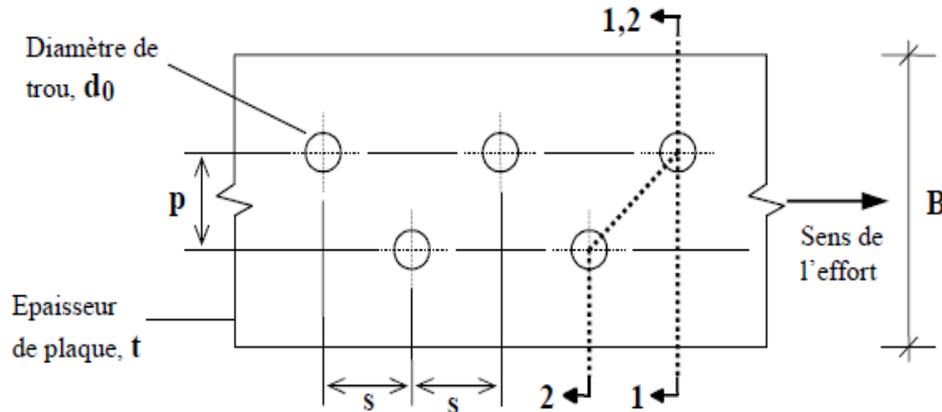
Sur la section 1-1 : Aire nette = $A_{net} = (B.t - 2d_0.t)$

Lorsque les fixations sont en quinconce, l'aire totale à déduire est la plus grande des deux valeurs suivantes :

- l'aire du ou des trous traversant une section transversale perpendiculaire (1-1),
- la somme des aires de tous les trous en ligne diagonale ou brisée (2-2) quelconque traversant l'élément, dont on déduit la quantité $\frac{s^2 t}{4p}$ pour chaque intervalle dans la chaîne des trous

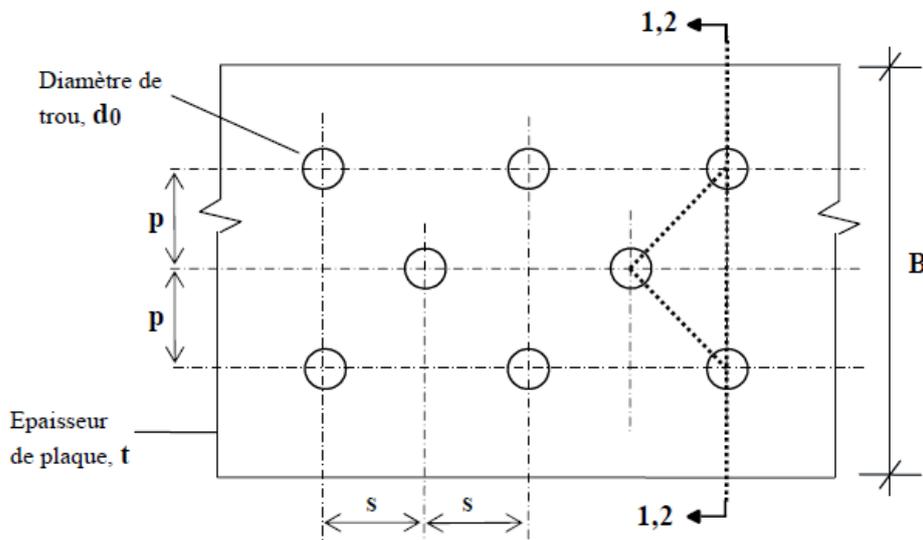
(voir figure ci-après). Cette réduction permet de tenir compte que le long des parties inclinées des lignes, il n'existe pas un état de contrainte de traction pure.

Exemple pour deux files de trous en quinconce :



Aire nette = A_{net} = la plus petite des deux suivantes : - sur la section 1-1 : $(B.t - d_0.t)$
 - sur la section 2-2 : $[B.t - (2d_0.t - \frac{s^2 t}{4p})]$

Exemple pour trois files de trous en quinconce :



Aire nette = A_{net} = la plus petite des deux suivantes : - sur la section 1-1 : $(B.t - 2d_0.t)$
 - sur la section 2-2 : $[B.t - (3d_0.t - 2\frac{s^2 t}{4p})]$

2. Dimensionnement des boulons ordinaires :

2.1. Coefficients partiels de sécurité :

- Résistance des boulons au cisaillement :

$$\gamma_{Mb} = 1.25$$

- Résistance des boulons à la traction :

$$\gamma_{Mb} = 1.50$$

2.2. Assemblages sollicités au cisaillement :

Dans ce cas, il convient de vérifier :

- D'une part, la résistance au cisaillement des boulons
- D'autre part, sa résistance à la pression diamétrale des pièces.

2.2.1. Résistance des boulons au cisaillement (par plan de cisaillement)

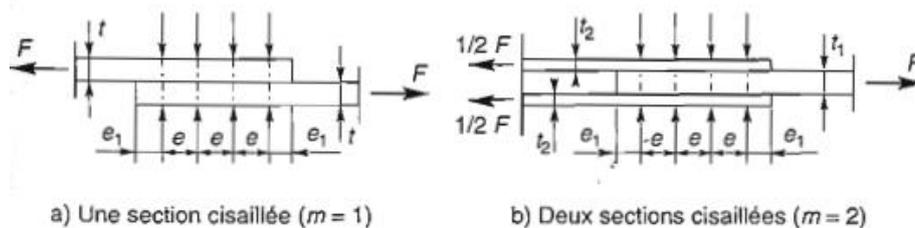
- Pour les classes de qualité 4.6, 5.6 et 8.8 :

$$F_v = 0.6 \times f_{ub} \times \frac{A_b}{\gamma_{Mb}}$$

- Pour les classes de qualité 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 :

$$F_v = 0.5 \times f_{ub} \times \frac{A_b}{\gamma_{Mb}}$$

A_b = aire de la section brute du boulon si le plan de cisaillement passe par la partie non fileté du boulon.



2.2.2. Résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées :

$$F_B = 2.5 \times \alpha \times f_u \times d \times \frac{t}{\gamma_{Mb}}$$

Où α est la plus petite des valeurs suivantes :

$$\frac{l_1}{3d_0}, \frac{P_1}{3d_0} - \frac{1}{4}, \frac{f_{ub}}{f_u}, 1$$

2.3. Assemblages sollicités à la traction :

La résistance en traction des boulons vaut :

$$F_T = 0.9 \cdot f_{ub} \frac{A_s}{\gamma_{Mb}}$$

A_s : aire de la section résistance en traction du boulon si le plan de cisaillement passe par la partie non fileté du boulon.

2.4. Assemblages sollicités simultanément au cisaillement et à la traction :

Les boulons soumis à des efforts combinés de cisaillement V et de traction T, doivent satisfaire aux conditions suivantes :

$$\frac{V}{F_v} + \frac{T}{1.4F_T} \leq 1$$

2.5. Valeurs de la section résistante A des boulons :

Diamètre Nominal du boulon d (mm)	14	16	18	20	22	24	27	30
Section résistante A (mm²)	115	157	192	245	303	353	459	561

2.6. Caractéristiques mécaniques des boulons selon leur classe d'acier :

Valeurs de la limite d'élasticité f_{yb} et de la résistance à la traction f_{ub} des boulons							
Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (N/mm ²)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (N/mm ²)	400	400	500	500	600	800	1000

3. Dimensionnement des boulons précontraints :

3.1. Principe :

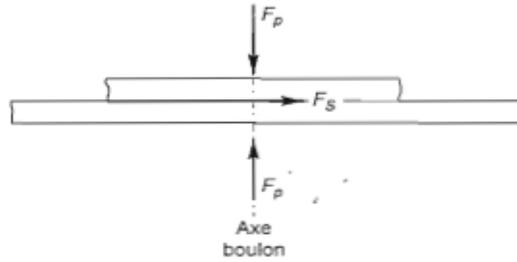
Bien que présentant le même aspect qu'un boulon ordinaire, un boulon HR (haute résistance) est **constitué d'acier à haute limite élastique** et comporte **une rondelle incorporée à la tête**. Lors du boulonnage, il est **serré fortement**, ce qui a pour effet de lui communiquer **un effort de précontrainte**, qui agit **parallèlement à l'axe du boulon**, donc perpendiculairement **aux plans de contact des pièces** (c'est pourquoi les boulons HR sont aussi appelés boulons précontraints).

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**. Le coefficient de frottement μ des pièces en contact joue donc un rôle prépondérant.

Si F_p est l'effort de précontrainte axial dans un boulon et F_s l'effort de cisaillement transmis par l'assemblage et sollicitant ledit boulon, il faut **vérifier que l'interface des pièces en contact puisse transmettre l'effort tangent**, sans glissement, soit :

$$F_s \leq \mu F_p$$



Les boulons HR **n'étant pas conçus pour fonctionner en obstacle (au cisaillement), leurs tiges ne sont théoriquement pas en contact avec les sections** droites des perçages des pièces assemblées.

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.

3.2. Précautions constructives :

Un bon assemblage par boulons HR exige que **des précautions élémentaires** soient prises, notamment :

- **La tête du boulon ne doit pas poinçonner** les pièces assemblées (d'où l'interposition d'une rondelle).
- **La force de précontrainte doit bien être appliquée à sa valeur de calcul** (d'où l'importance du couple de serrage et la nécessité des clés dynamométriques ou pneumatiques).
- **Le coefficient de frottement μ doit correspondre à sa valeur de calcul. Cela nécessite une préparation des surfaces**, par brossage ou grenaillage, pour éliminer toute trace de rouille ou de calamine, de graisse, etc.

$\mu = 0.50$ pour les surfaces de la classe A

$\mu = 0.40$ pour les surfaces de la classe B

$\mu = 0.30$ pour les surfaces de la classe C

$\mu = 0.20$ pour les surfaces de la classe D

Classe A :

- Surfaces décapées par grenaillage ou sablage, avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes et sans piqûres de corrosion
- Surfaces décapées par grenaillage ou sablage et métallisées par projection d'aluminium

- Surfaces décapées par grenailage ou sablage et métallisées par projection d'un revêtement à base de zinc, garanti d'assurer un coefficient de glissement qui ne soit pas inférieur à 0.5

Classe B :

- Surfaces décapées par grenailage ou sablage et recouvertes d'une couche de peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80 μm

Classe C :

- Surfaces nettoyées par brossage métallique ou à la flamme avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes.

Classe D :

Surfaces non traitées.

Remarque :

Le serrage doit être effectué progressivement, dans un ordre préétabli, afin de **ne pas déformer les platines** d'appui et préserver leur planéité. C'est pourquoi les boulons HR ont une troisième appellation de « boulons à serrage contrôlé ».

3.3. Caractéristiques mécaniques des boulons :

Il existe deux classes de boulons HR, définies en fonctions de leur contrainte limite d'élasticité f_{yb} et de leur contrainte de rupture f_{ub} :

- Les boulons HR 1 ou HR 10.9,
- Les boulons HR 2 ou HR 8.8

Le premier chiffre correspond à $f_{ub}/100$ et le second chiffre correspond à $10 f_{yb}/f_{ub}$, soit :

Repère	Appellation	f_{ub} (MPa)	f_{yb} (MPa)	$\Delta L/L$ (%)
HR 1	HR 10.9	1000	900	≥ 8
HR 2	HR 8.8	800	640	≥ 12

3.4. Assemblages résistant au glissement :

La résistance au glissement F_s d'un boulon HR précontraint vaut :

$$F_s = k_s \cdot m \cdot \mu \cdot \frac{F_p}{\gamma_{MS}}$$

Avec :

- F_p est la force de précontrainte
- μ est le coefficient de frottement des pièces

- m est le nombre d'interfaces de frottement
- k_s est un coefficient fonction de la dimension des trous de perçage et vaut :

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

- 1 mm pour les boulons $\varnothing 12$ et $\varnothing 14$
- 2 mm pour les boulons $\varnothing 16$ à $\varnothing 24$
- 3 mm pour les boulons $\varnothing 27$ et plus

$k_s = 0.85$ pour les trous circulaires surdimensionnés et pour les trous oblongs courts.

$k_s = 0.7$ pour les trous oblongs longs.

γ_{MS} est le coefficient partiel de sécurité qui vaut :

- à l'ELU :

$\gamma_{MS} = 1.25$ pour les trous à tolérances normales, ainsi que pour les trous oblongs dont le grand axe est perpendiculaire à l'axe de l'effort .

$\gamma_{MS} = 1.40$ pour les trous surdimensionnés, ainsi que pour les trous oblongs dont le grand axe est parallèle à l'axe de l'effort

- à l'ELS :

$\gamma_{MS} = 1.10$ pour les trous à tolérances normales, ainsi que pour les trous oblongs dont le grand axe est perpendiculaire à l'axe de l'effort.

L'effort de précontrainte :

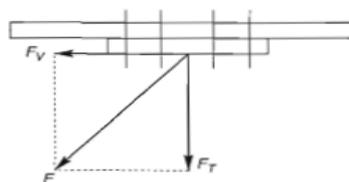
L'effort de précontrainte autorisé dans les boulons vaut :

$$F_p = 0.7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

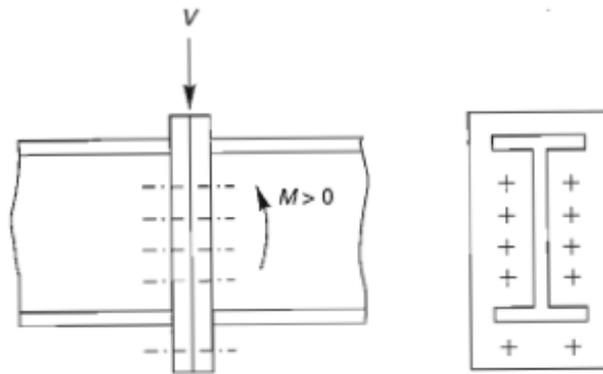
3.5. Assemblages sollicités simultanément au cisaillement et à la traction

Si un assemblage résistant au glissement est soumis à un effort de traction F_t concomitant avec un effort de cisaillement F_v , qui tend à provoquer le glissement, la résistance au glissement par boulon doit être calculée selon la formule suivante :

$$F_v \leq F_s = k_s \cdot m \cdot \mu (F_p - 0.8 \cdot F_T) / \gamma_{MS}$$



3.6. Assemblage par platines sollicités par un moment fléchissant et un effort tranchant



3.6.1. Résistance de l'assemblage à l'effort tranchant V :

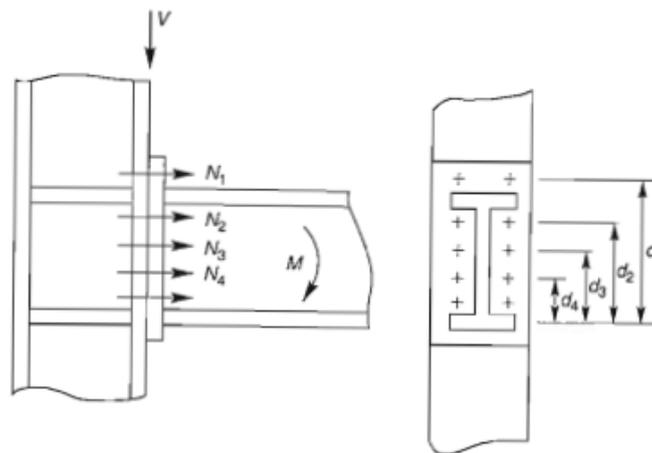
Il faut vérifier que l'effort de cisaillement V_1 par boulon soit tel que :

$$V_1 = \frac{V}{n} \leq F_s = k_s \cdot m \cdot \mu \cdot \frac{F_p}{\gamma_{MS}}$$

3.6.2. 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 rangées de boulons situés dans la zone tendue par leurs distances respectives au centre de résistance de la zone comprimée (c'est-à-dire l'axe neutre de la semelle comprimée)

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

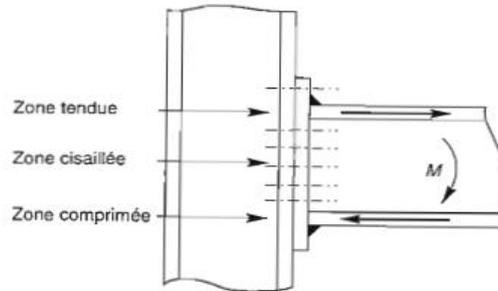


$$D'où : N_1 = \frac{M_R \cdot d_1}{\sum d_i^2},$$

$$\text{soit } N_i = \frac{M_R \cdot d_i}{\sum d_i^2} \leq n \cdot F_p$$

Il convient parallèlement de vérifier la résistance de l'âme du poteau :

- Dans la zone tendue
- Dans la zone comprimée
- Dans la zone cisailée



a) Résistance de l'âme du poteau dans la zone tendue

$$F_t = f_y \cdot t_{wc} \cdot b_{eff} / \gamma_{M0}$$

Avec :

t_{wc} : épaisseur âme poteau

$b_{eff} = p$: entraxe rangées boulons

b) Résistance de l'âme du poteau dans la zone comprimée :

1- Ame non raidie :

$$F_c = f_y \cdot t_{wc} \left(1.25 - 0.5 \gamma_{M0} \frac{\sigma_n}{f_y} \right) \frac{b_{eff}}{\gamma_{M0}}$$

Avec :

σ_n : Contrainte normale de compression dans l'âme du poteau due à l'effort de compression et au moment fléchissant.

$$b_{eff} = t_{fb} + 2t_p + 5(t_{fc} + r_c)$$

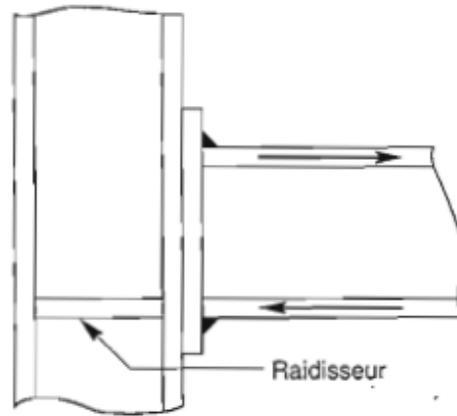
t_{fb} : épaisseur semelle poutre.

t_p : épaisseur platine extrémité

t_{fc} : épaisseur semelle poteau

r_c : rayon de raccordement âme/semelle du poteau

Âme raidie : aucune vérification n'est nécessaire dès lors que les raidisseurs ont une épaisseur égale à celle des semelles de la poutre



c) Résistance de l'âme du poteau dans la zone cisillée (âme non raidie)

$$V_r = 0.58f_y \cdot h \cdot t_{wc} / \gamma_{M0}$$

Si la résistance s'avère insuffisante, il faut raidir l'âme, soit par une fourrure d'âme, soit par des raidisseurs diagonaux.

