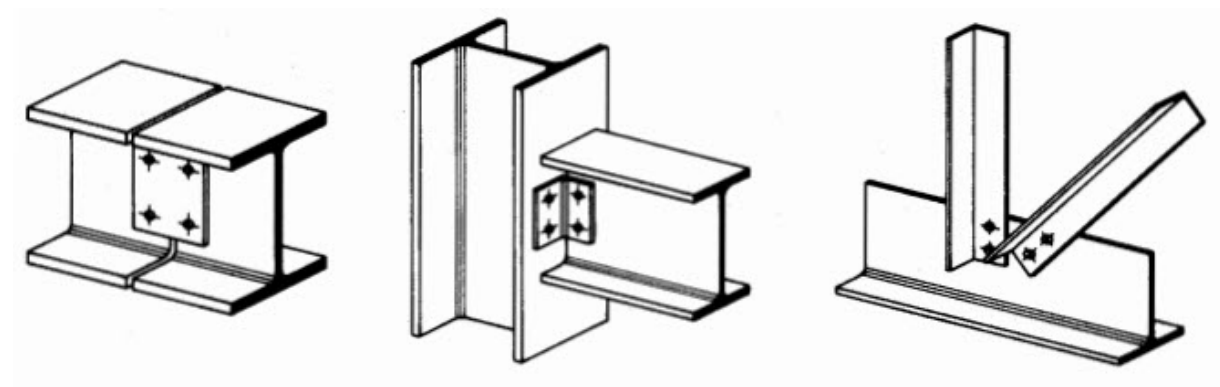


# CHAPITRE 5

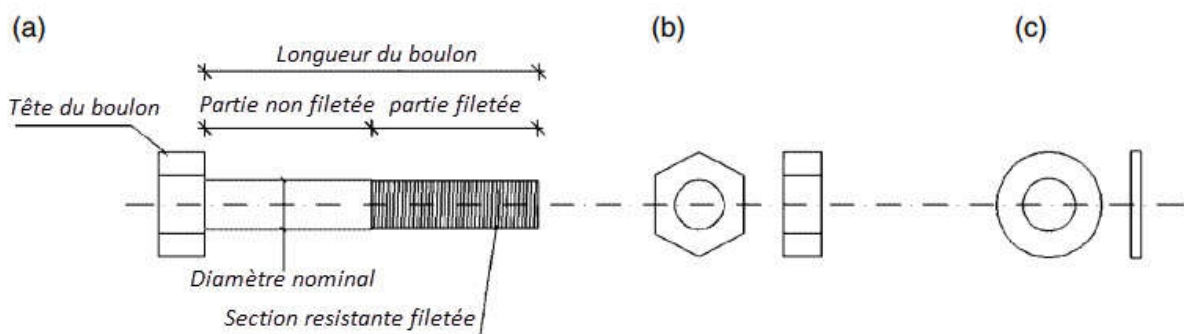
## Les assemblages boulonnés

### 5.1 Introduction



**Figure 5.1** Exemples d'assemblages boulonnés

Les attaches mécaniques sont généralement réalisées au moyen de boulons, chevilles et rivets (figure 5.1), qui permettent le montage du squelette de l'ossature dans des délais très courts, surtout lorsqu'on le compare à celui qui est nécessaire lorsque des soudures sur site sont utilisées. Les attaches mécaniques les plus courantes sont celles qui utilisent des boulons. Elles sont généralement composées de (Figure 5.2) :



**Figure 5.2** Exemples de boulons (a), écrous (b) et rondelles (c).

- Un boulon, c'est-à-dire un goujon métallique avec une tête (généralement hexagonale) et une tige partiellement ou totalement filetée (figure 5.2a). Le diamètre du boulon

pour les applications structurelles varie entre 12 et 36 mm, conformément à la norme européenne (EC 03) ;

- Un écrou (généralement hexagonal, figure 5.2b) ;
- Une ou plusieurs rondelles (généralement rondes, figure 5.2c), si nécessaire.

Là où des vibrations peuvent se produire et où l'écrou peut se desserrer, des contre-écrous ou des rondelles élastiques peuvent être utilisés efficacement.

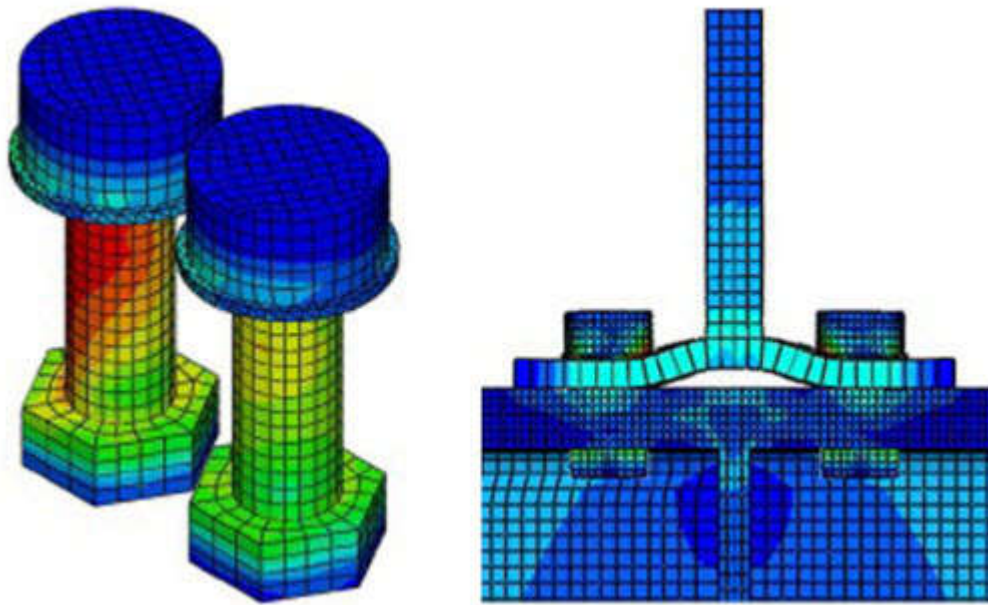
En ce qui concerne les nuances d'acier des boulons, comme mentionné au chapitre 1, divers composants en acier sont disponibles avec différentes nuances d'acier. Les concepts de base concernant les approches de calcul pour les assemblages boulonnés sont présentés ici dans ce chapitre.

## 5.2 Résistance des assemblages boulonnés

La résistance nominale des assemblages boulonnés est généralement évaluée par des approches conventionnelles qui, au moyen de formules appropriées, permettent une interprétation du comportement réel des assemblages et de la distribution des contraintes.

Dans de nombreux cas, en fait, il est impossible de déterminer la distribution effective des contraintes dans un assemblage, en raison de la grande variabilité des paramètres géométriques et mécaniques influençant la réponse de l'assemblage et, par conséquent, une hypothèse réaliste des forces internes en équilibre avec les forces externes sur l'assemblage, semble adéquate dans de nombreux cas pour des raisons de design. Malgré le fait qu'aujourd'hui les capacités raffinées des logiciels d'analyse par éléments finis permettent de développer des modèles avancés des assemblages pour simuler la réponse des principaux composants des assemblages (Figure 5.3), Le calcul des assemblages est généralement basé sur des modèles simplifiés qui, dans de nombreux cas, ne nécessitent que des calculs manuels. Ces modèles sont basés sur le premier principe élémentaire de la théorie de l'analyse limite (soit disant appelé théorème statique ou théorème sur la limite inférieure des charges limites) :

*...toute distribution des forces, dans laquelle toutes les forces internes (dans ce cas, les forces des boulons) sont en équilibre avec les forces externes de telle sorte que nulle part la résistance de charge interne (la résistance nominale des boulons) n'est dépassée, donne une limite inférieure à la résistance nominale de l'assemblage.*



**Figure 5.3** Modèle d'éléments finis pour les joints poutre-poteau.

La distribution des forces dans l'assemblage peut donc être déterminée arbitrairement de la manière la plus rationnelle qui soit, à condition que cela soit possible :

- les forces internes supposées sont équilibrées avec les forces et moments de calcul appliqués ;
- chaque partie de l'assemblage est capable de résister aux forces et aux moments appliqués ;
- les déformations imposées par la distribution choisie se situent à l'intérieur de la capacité de déformation des attaches, des soudures et des autres parties clés de l'assemblage.

Chaque boulon est généralement modélisé comme masse ponctuelle, en référence à son centroïde. Une distribution uniforme des contraintes est prise en compte le long des trous et la déformation des plaques ainsi que la concentration des contraintes en correspondance des trous, due à l'état pluri-axial des contraintes, sont généralement négligées.

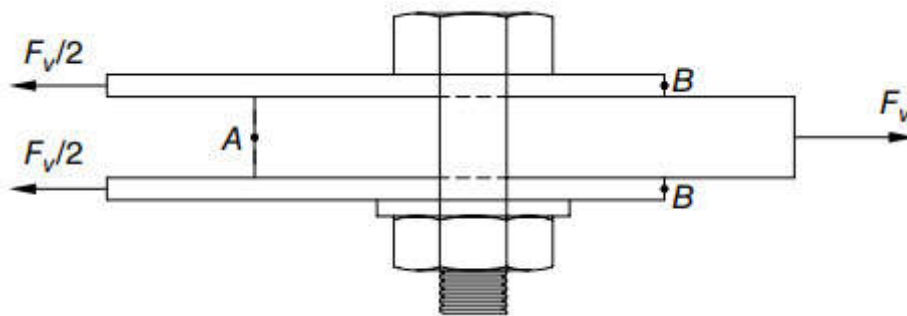
Les assemblages peuvent être classés en fonction des charges agissant comme suit :

- ▮ Assemblages soumis au cisaillement ;
- ▮ Assemblage soumis à la traction ;
- ▮ Assemblages soumis simultanément à la traction et au cisaillement.

### 5.2.1 Assemblages soumis au cisaillement

Un assemblage est affecté par le cisaillement lorsque les plaques assemblées par des boulons sont chargées par des forces parallèles aux plans de contact. Le cas de base présenté à la figure 5.4 se rapporte à un assemblage soumis à une force externe  $F_v$ , qui est appliquée à une plaque et elle est transmise aux deux autres plaques par un boulon reliant les trois plaques ensemble. Le boulon peut être considéré comme une poutre simplement supportée et chargée à son milieu. Les plaques extérieures sont considérées comme des appuis tandis que la plaque centrale charge la structure. On peut distinguer deux plans de cisaillement, chacun d'eux étant associé à la surface commune de deux plaques contiguës.

Différentes réponses sont attendues, en fonction de deux modes différents de transfert de la charge de cisaillement, qui permettent de faire la distinction entre les assemblages de contact et les assemblages résistants au glissement (anti-glissant).



**Figure 5.4** Assemblage typique en cisaillement.

#### 5.2.1.1 Assemblages de contact (ordinaire)

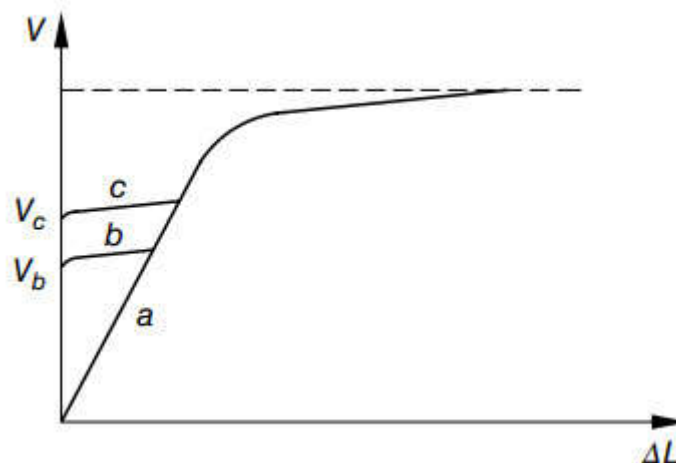
Il est nécessaire que les plaques soient assemblées l'une à l'autre pour obtenir un contact ferme et qu'aucun serrage du boulon ne soit requis. En se référant à la figure 5.4, il convient de noter que lorsque la charge augmente, la tige du boulon entre en contact avec la surface des plaques perforées, ce qui provoque l'étalement de la plasticité dans la zone de contact en raison du diamètre du trou supérieur à celui du boulon. En augmentant la charge, l'extension de la partie de la plaque en contact avec la tige du boulon dans la plage plastique augmente également. Du point de vue du design, ces effets sont négligés, la plasticité étant située dans une partie très limitée de l'assemblage, sans aucune influence sur les performances globales de l'assemblage.

Dans la phase de pré-dimensionnement, ou lors de l'utilisation de la méthode de calcul des contraintes admissibles, les effets des forces transférées entre les boulons et les plaques peuvent être évalués directement sur la base de la contrainte tangentielle ( $\tau$ ) agissant sur chaque plan de cisaillement, qui est évalué en fonction de la surface efficace du boulon dans ce plan. La force agissante ( $V$ ) peut être transmise par la zone non filetée ( $A$ ) ou la zone filetée ( $A_{res}$ ) et donc ( $\tau$ ) peut être exprimée en :

$$\tau = \frac{V}{n.A_{res}} \quad 5.1a$$

$$\tau = \frac{V}{n.A} \quad 5.1b$$

Où  $V$  est la force de cisaillement totale sur les boulons et  $n$  est le nombre de plans de cisaillement (plans de contact).

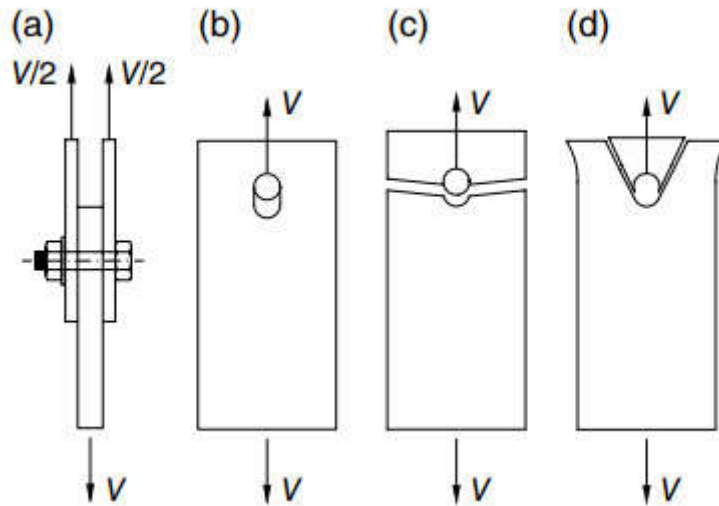


**Figure 5.5** Influence du degré de serrage sur le comportement des assemblages boulonnés :

Relation entre la charge appliquée et le déplacement relatif des plaques à la figure 5.4.

La courbe (a) de la figure 5.5 présente la réponse de l'assemblage en fonction de la relation entre la force de cisaillement appliquée,  $V$ , et le déplacement relatif,  $\Delta L$ , entre les points **A** et **B** - (figure 5.4) dans deux plaques adjacentes qui sont assemblées. La réponse est linéaire dans la première branche jusqu'à ce que l'écoulement des composants soit atteint. La rupture de l'assemblage par cisaillement peut être due à l'un des mécanismes suivants :

- Rupture du boulon (Figure 5.6a)
- Rupture de plaque par pression diamétrale (Figure 5.6b)
- Rupture par traction de la plaque (Figure 5.6c)
- Rupture par cisaillement de la plaque (Figure 5.6d).



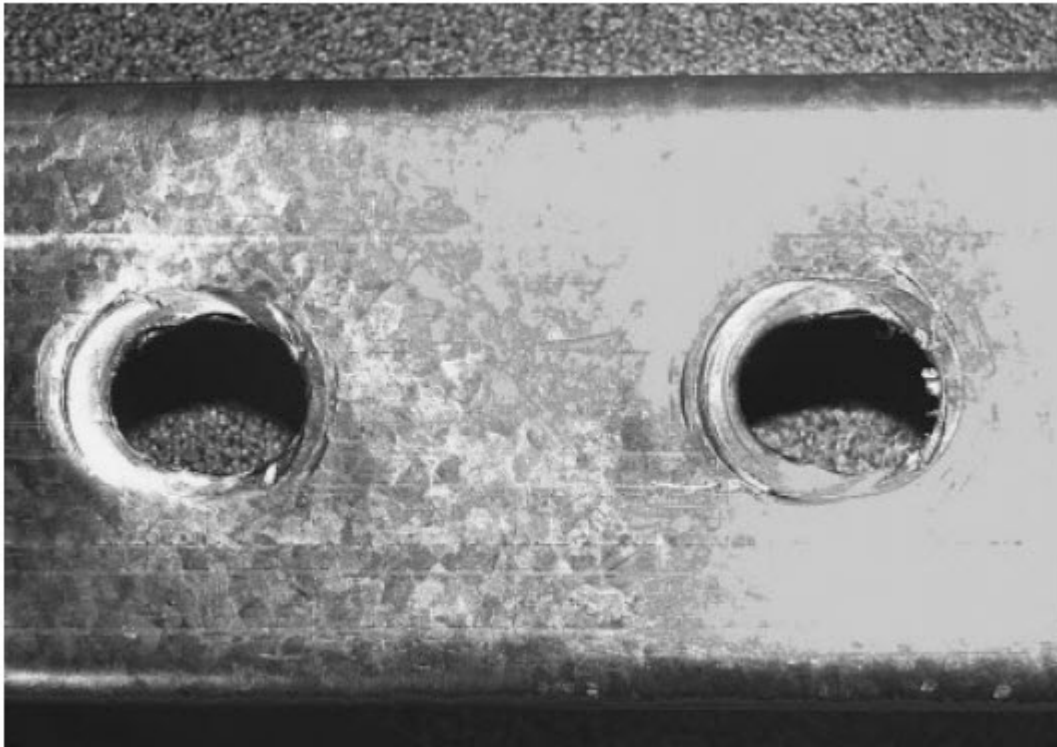
**Figure 5.6** Modes de ruptures typiques d'un assemblage par cisaillement : rupture du boulon (a), rupture de plaque par pressions diamétrale (b), rupture par traction de la plaque (c) et rupture par cisaillement de la plaque (d).

Dans la figure 5.7, la rupture typique par pression diamétrale (bearing failure) est présentée. En raison de la difficulté d'évaluer correctement la distribution réelle de la pression diamétrale, une valeur conventionnelle a été supposée. En particulier, la pression de contact (pression diamétrale) entre le boulon et la plaque peut être évaluée approximativement par rapport à la valeur moyenne de la contrainte de contact,  $\sigma_{bear}$  :

$$\sigma_{bear} = \frac{V}{t.d} \quad 5.2$$

Où  $V$  est la force de cisaillement agissant par plan de cisaillement,  $t$  est l'épaisseur minimale des plaques assemblées et  $d$  est le diamètre du boulon.

En ce qui concerne la résistance conventionnelle à la pression diamétrale, une valeur de calcul est considérée, qui est basée sur la résistance de la plaque augmentée de manière appropriée pour tenir compte des avantages associés à la distribution spatiale complexe des contraintes le long du trou.



**Figure 5.7** Déformation typique des trous due à une pression diamétrale.

#### **5.2.1.2 Assemblage anti-glissant ou assemblage avec joints précontraints**

La précontrainte des boulons peut être explicitement exigée pour la résistance au glissement, les assemblages sismiques, la résistance à la fatigue, pour des fins d'exécution ou comme mesure de qualité (par exemple, pour la durabilité). Le serrage implique l'application d'un moment de torsion sur le boulon avant l'application des forces extérieures. Ceci produit un raccourcissement de la plaque assemblée et un allongement de la tige du boulon. Seulement une partie du moment de torsion appliqué pour serrer le boulon est absorbée par frottement entre la plaque et le boulon d'un côté, et la plaque et l'écrou de l'autre côté de l'attache mécanique. Le reste du moment de torsion est supporté par la tige du boulon. Ainsi, une fois le boulon serré, le joint est chargé par des contraintes auto-équilibrées associées au boulon en traction et à la compression dans les plaques et à la torsion du boulon et au frottement plaque / boulon. Le serrage augmente les performances du joint, principalement en ce qui concerne les états limites d'aptitude au service. En outre, il convient de noter que :

- dans les joints de cisaillement, le serrage empêche le glissement de la plaque et, par conséquent, les tassements inélastiques dans la structure ;
- dans les joints de traction, le serrage empêche la séparation des plaques (ce qui réduit les risques de corrosion) et améliore considérablement la résistance à la fatigue.



Toutefois, le serrage ne doit pas dépasser une certaine limite, afin d'éviter d'atteindre la capacité ultime commune.

En ce qui concerne les courbes (b) et (c) de la figure 5.5, quatre branches différentes peuvent être identifiées :

- 1) La charge augmente depuis zéro mais aucun déplacement relatif n'est observé ; La transmission de force est due au frottement entre les plaques jusqu'à ce que la limite de frottement du joint soit atteinte, ce qui dépend du degré de précontrainte. La courbe (c) est liée à un assemblage avec un degré de précontrainte supérieur à celui du cas (b) ;
- 2) Pour un niveau de cisaillement égal à la limite du frottement, le glissement se produit soudainement en raison du jeu du trou de boulon et il s'arrête lorsque le boulon de la tige est en contact avec les trous des plaques. Pendant cette phase, la charge appliquée est pratiquement constante, coïncidant avec la charge limite de frottement ;
- 3) Après le contact, la relation  $V-AL$  coïncide avec celle de l'assemblage par contact (courbe (a)). La réponse est pratiquement linéaire jusqu'à ce que la limite élastique de l'assemblage soit atteinte dans les plaques assemblées ou dans le boulon ;
- 4) Enfin, dans le domaine du plastique, une déformation importante se manifeste en cas d'augmentation modérée de la charge jusqu'à ce que la charge de rupture de l'assemblage soit atteinte.

Des joints anti-glissants sont nécessaires lorsqu'il s'agit d'éviter des tassements inélastiques des assemblages afin de réduire la déformabilité de la structure ou pour répondre à certaines exigences fonctionnelles. La valeur de la force à laquelle le glissement se produit dépend du serrage du boulon, du traitement de surface et du nombre de surfaces en contact ( $n_f$ ). Dans le cas d'un assemblage avec un seul boulon, la valeur maximale de la force transmise par frottement,  $F_{Lim}$ , peut être estimée comme :

$$F_{Lim} = n_f \cdot \mu \cdot N_s \quad 5.3$$

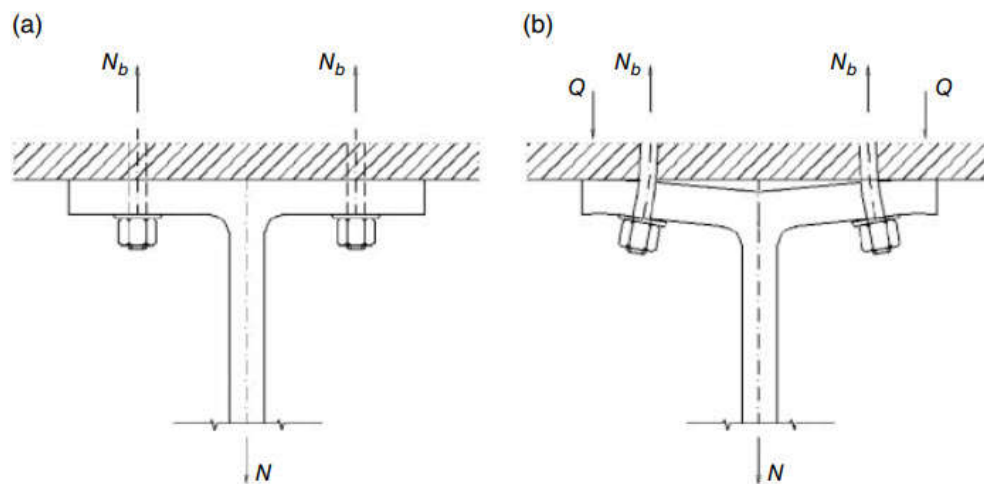
où  $\mu$  est le coefficient de frottement.

### 5.2.2 Assemblages en traction

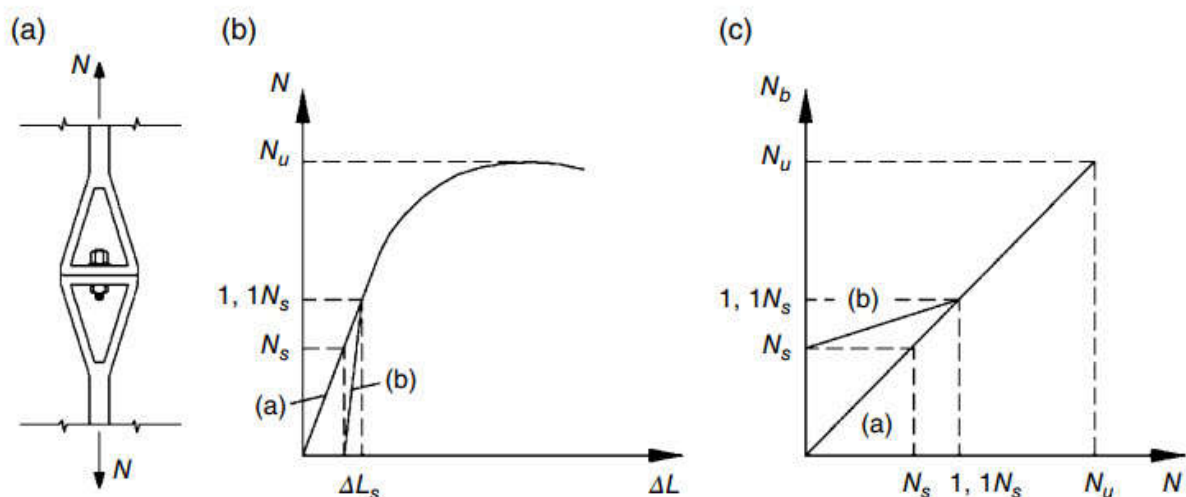
La traction se produit lorsque les plaques assemblées par des boulons sont sollicitées par une force normale au plan de contact, c'est-à-dire parallèle à l'axe du boulon. Comme dans le cas d'un assemblage de contact, la réponse d'un assemblage en traction est assez difficile à



prévoir. Afin d'analyser ce problème d'un point de vue qualitatif, une brève discussion est proposée en se référant à un cas très simple d'un assemblage par traction illustré à la figure 5.8. Si la semelle est suffisamment rigide, sa déformation peut être ignorée et les boulons peuvent être considérés comme étant en traction pure (cas (a)) et la rupture du joint peut être due à une rupture des boulons. Dans le cas contraire, si la semelle est plus souple, la présence de forces d'arrachement,  $Q$ , qui dépendent de la rigidité des semelles et des boulons ainsi que de la charge appliquée, augmente la valeur de la charge axiale transmise par les boulons. La rupture de l'assemblage peut être due aux boulons, à la semelle ou aux deux composants.



**Figure 5.8** Influence de la rigidité de la plaque et des boulons du mécanisme de transfert de force : plaque rigide et boulons flexibles (a) ou plaque flexible et boulons rigides (b).



**Figure 5.9** Assemblage en traction (a) : relation (b) entre la force de traction appliquée ( $N$ ) et l'allongement de la tige du boulon ( $\Delta L$ ) et relation (c) entre la force de traction appliquée ( $N$ ) et la charge axiale sur la tige du boulon ( $N_b$ )

Afin de mieux comprendre les effets de serrage, on peut se référer à la réponse de l'assemblage sous traction présentée à la figure 5.9a, qui est réalisée par un boulon. La figure 5.9b présente deux relations typiques entre la charge externe appliquée  $N$  à l'assemblage et l'allongement du boulon  $\Delta L$ , qui sont liées au cas d'un boulon non serré (**courbe a**) et un boulon serré (**courbe b**).

De plus, la charge externe  $N$  appliquée est représentée graphiquement par rapport à la force axiale agissant sur la tige du boulon  $N_b$  sur la figure 5.9c. On peut noter que :

- Dans le cas d'un boulon non serré (**courbe a**), lorsque  $N$  augmente,  $N_b$  augmente également d'une valeur égale (figure 5.9c) et une fois la limite élastique atteinte, la réponse est dans la plage plastique jusqu'à ce que la rupture soit atteinte à un niveau de charge égal à  $N_u$ .
- Dans le cas d'un boulon serré (**courbe b**), en l'absence de force extérieure, la force de traction de serrage  $N_s$  provoque un allongement de la tige  $\Delta L_s$ . Comme la charge externe  $N$  est appliquée et augmente, la force de traction  $N_b$  dans la tige augmente très lentement (Figure 5.9b), en raison du fait que  $N$  est principalement transféré par décompression des plaques. Pour une valeur de  $N$  légèrement supérieure à  $N_s$  (environ  $1,1 N_s$ ), la séparation des plaques interviendra, la charge est transférée par le boulon et la charge ultime  $N_u$  est indépendante des effets du serrage.

En cas d'application d'une force de traction sur le centroïde des boulons, on suppose que la charge de calcul est équilibrée par des forces égales sur chaque boulon. Dans le cas contraire, si un moment de flexion se produit également, l'évaluation des forces du boulon est généralement basée sur l'hypothèse d'une plaque rigide.

### 5.2.3 Assemblage en cisaillement et en traction

Les approches précédemment introduites pour le cas d'une force de cisaillement unique et d'une force de traction unique sur l'assemblage peuvent être combinées pour être utilisées dans le cas plus général du cisaillement et de la traction. Dans de nombreux cas pratiques, la traction et le cisaillement agissent simultanément sur les boulons. En fonction des différents états limites, différentes formules d'interaction ont été définies qui peuvent être appliquées pour évaluer la résistance des boulons.

Dans le cas de boulons précontraints, la charge de glissement est réduite par la présence d'une charge axiale. En ce qui concerne la résistance ultime, un domaine simplifié est utilisé pour le

calcul sous traction axiale et cisaillement combinés sur la tige. De plus amples détails sur les exigences en matière de vérification sont présentés dans les parties suivantes (ci-dessous), conformément aux dispositions européennes en matière de calcul.

### **5.3 Calcul des assemblages boulonnés conformément aux normes EC 03**

On présente d'abord les principaux critères associés aux techniques d'assemblage. Une brève description des critères de vérification structurelle conformément à la norme européenne est donnée ci-après.

#### **5.3.1 Norme européenne pour les assemblages d'attaches**

Une attention particulière doit être portée aux techniques de montage des assemblages boulonnés sur site. A cet effet, il convient de noter que le chapitre 8 (Attaches mécaniques) de la norme EN 1090-2 (Exécution des structures métalliques et des structures en aluminium - Partie 2 : Exigences techniques pour les structures métalliques) traite les attaches mécaniques et fournit des informations importantes et utiles, dont certaines sont résumées ci-dessous :

##### **5.3.1.1 Jeu pour boulons**

La définition du diamètre nominal du trou combiné au diamètre nominal du boulon à utiliser dans le trou déterminera si le trou est "normal" ou "surdimensionné". Les termes " court " et " long " utilisés pour les trous oblongs désignent les deux types de trous utilisés pour la conception structurelle des boulons précontraints. Ces termes peuvent également être utilisés pour désigner les jeux pour les boulons non précontraints.

La norme EN 1993-1-8 ne donne aucune indication sur le jeu nominal pour boulons, qui sont indiqués dans le tableau 5.1 et sont directement dérivés de la norme EN 1090-2, où ce sujet est abordé.

En ce qui concerne le positionnement des trous pour les attaches, le minimal et maximal des entraxes et des pinces longitudinales et transversales sont indiqués au tableau 5.2, qui renvoie aux symboles présentés à la figure 5.10.

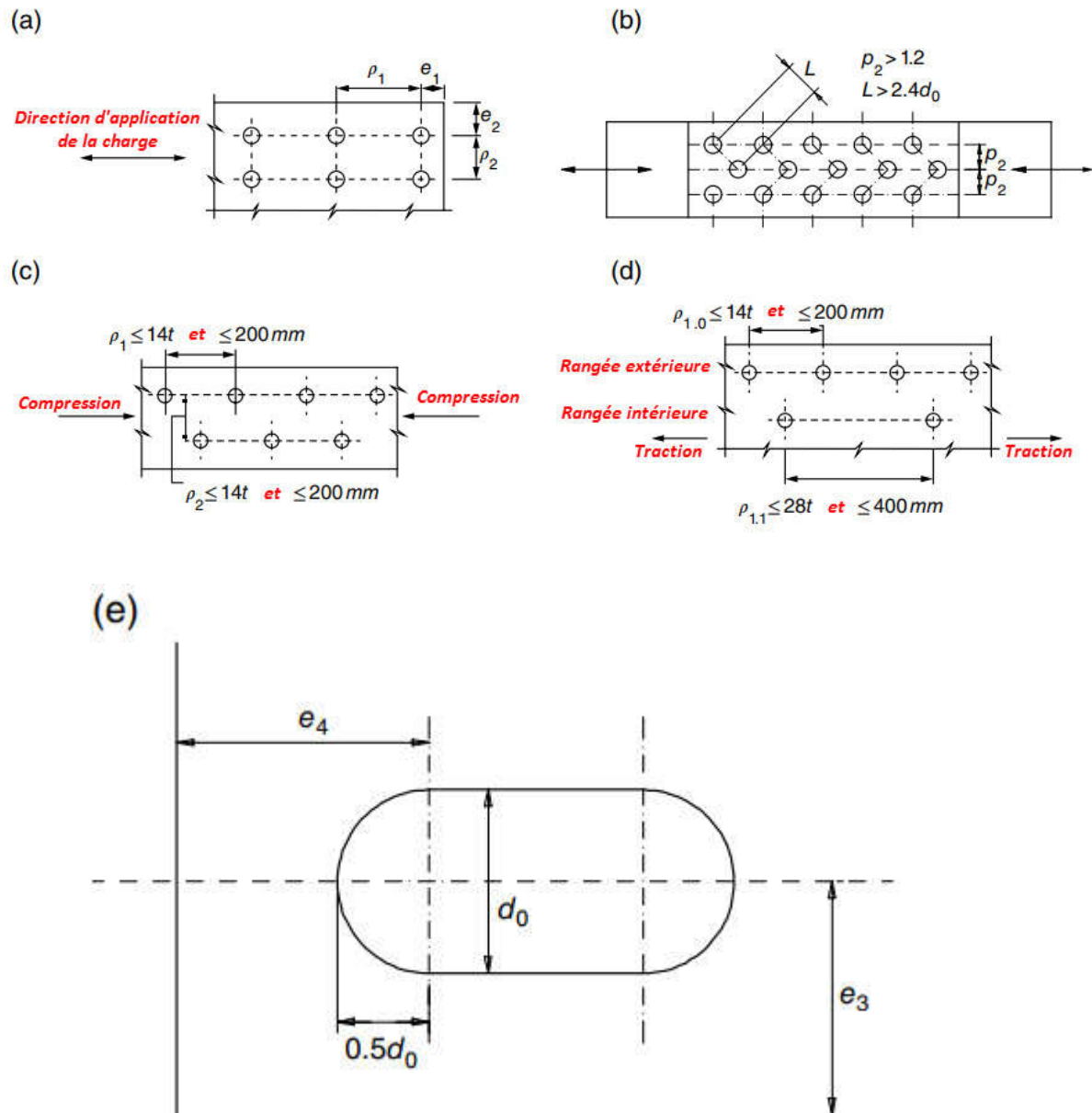
Type de trous	Diamètre nominal du boulon $d$ (mm)							
	12	14	16	18	20	22	24	$\geq 27$
Trous ronds normaux	1		2					3
Trous ronds surdimensionnés	3		4				6	8
Trous oblongs courts (sur la longueur)	4		6				8	10
Trous oblongs longs (sur la longueur)	1.5 d							

**Tableau 5.1** Jeu nominal des boulons (valeurs en millimètres)**5.3.1.2 Distances nominales des pinces et des entraxes**

Pinces et entraxes	Minimum	Maximum		
		Structures en aciers conformes à la norme EN 10025 à l'exception des aciers conformes à la norme EN 10025-5		Structures en aciers conformes à la norme EN 10025-5
		Acier exposé aux intempéries ou à d'autres influences corrosives	Acier non exposé aux intempéries ou à d'autres influences corrosives	Acier utilisé non protégé
Pince $e_1$	$1.2 d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$	---	$\geq 8t \text{ et } \leq 125 \text{ mm}$
Pince $e_2$	$1.2 d_0$	$4t + 40 \text{ mm}$	---	$\geq 8t \text{ et } \leq 125 \text{ mm}$
Pince $e_3$ dans les trous oblongs	$1.5 d_0$	---	---	---
Pince $e_4$ dans les trous oblongs	$1.5 d_0$	---	---	---
Entraxe $P_1$	$2.2 d_0$	$\leq 14t \text{ et } \leq 200 \text{ mm}$	$\leq 14t \text{ et } \leq 200 \text{ mm}$	$\leq 14t_{\min} \text{ et } \leq 175 \text{ mm}$
Entraxe $P_{1,0}$	---	$\leq 14t \text{ et } \leq 200 \text{ mm}$	---	---
Entraxe $P_{1,i}$	---	$\leq 28t \text{ et } \leq 200 \text{ mm}$	---	---
Entraxe $P_2$	$2.4 d_0$	$\leq 14t \text{ et } \leq 200 \text{ mm}$	$\leq 14t \text{ et } \leq 200 \text{ mm}$	$\leq 14t_{\min} \text{ et } \leq 175 \text{ mm}$

$t$  est l'épaisseur de la partie extérieure assemblée la plus mince.

**Tableau 5.2** Minimal et maximal des pinces et entraxes (en millimètres).



**Figure 5.10** Symboles pour les pincés et les entraxes des trous conformément à la norme En 1993-1-8 : (a) trous normaux, (b) trous en quinconce, (c) trous en quinconce pour éléments de compression, (d) élément de traction et (e) trous oblongs.

### 5.3.2 Vérifications structurales selon l'EC 03

La partie 1-8 de l'Eurocode 3, c'est-à-dire la norme EN 1993-1-8 (Conception des charpentes en acier - Partie 1-8 : Conception des assemblages) traite des assemblages qui sont divisés en deux groupes selon le type de charge : assemblages en cisaillement et assemblages sous traction.

### 5.3.2.1 Caractéristiques mécaniques de base de boulons

Les nuances de boulons indiquées dans le tableau 5.3 sont communément utilisées dans les assemblages en acier. Toutes ces nuances de boulons sont généralement utilisées dans les assemblages soumis à des forces et moments statiques. Pour les assemblages soumis au séisme ou à la fatigue par frottement, il convient d'utiliser des boulons à haute résistance tels que les nuances 8.8 et 10.9 en raison de leur résistance élevée à la fatigue et de leurs caractéristiques de déformation limitées.

Les valeurs de la limite d'élasticité  $f_{yb}$  et de la résistance à la traction  $f_{ub}$  des boulons sont indiquées au tableau 5.3.

Type de boulons	Précontraints						
	Ordinaires						
Nuance du boulon (Classe du boulon)	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

**Tableau 5.3** Propriétés mécaniques de base des boulons de structure

Pour une classe **X.Y** donnée,  $f_{yb} = 10 \cdot X \cdot Y$  et  $f_{ub} = 100 \cdot X$

#### Exemple :

Un boulon de classe **6.8**, donc :  $f_{yb} = 10 \times 6 \times 8 = 480$  (MPa) et  $f_{ub} = 100 \times 6 = 600$  (MPa)

### 5.3.3 Assemblages de contact (**Boulons ordinaires**)

#### 5.3.3.1 Assemblages sollicités à la traction :

La résistance à la traction par boulon aux états limites ultimes,  $F_{t,Rd}$ , est définie comme suit :

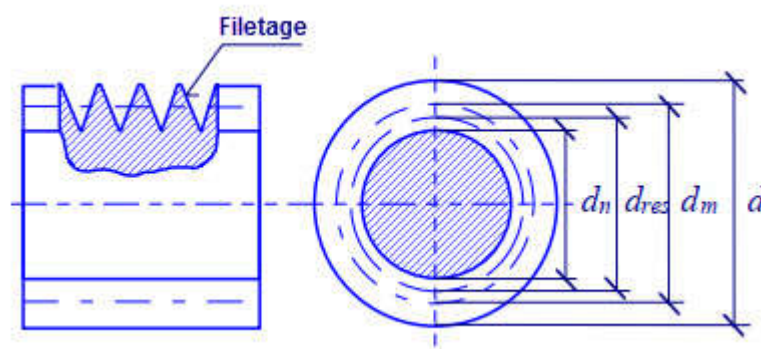
$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad 5.4$$

Où  $k_2$  représente le type de boulons ( $k_2 = 0,63$  pour les boulons à tête fraisée, si non  **$k_2 = 0,9$** ),  $A_s$  est la section filetée du boulon,  $f_{ub}$  est la résistance ultime en traction et  $\gamma_{M2}$  est le coefficient de sécurité ( $\gamma_{M2} = 1.25$ ). Les boulons à tête fraisée doivent avoir des dimensions et une géométrie conforme à leurs normes de référence, sinon la résistance à la traction doit être ajustée en conséquence.

La section la plus faible d'un boulon est sa partie filetée. La résistance du boulon est généralement calculée en utilisant la "**section de résistance à la traction**" (aussi appelée "**section résistante**") définie par le diamètre moyen du noyau de la tige  $d_n$  et le diamètre "moyen"  $d_m$ , comme indiqué à la figure 5.11.

$$d_{res} = \frac{d_n + d_m}{2} \quad 5.5$$

Les dimensions des boulons sont définies en fonction de leur diamètre nominal, de la longueur sous la tête et de la longueur du filetage.



**Figure 5.11** Section transversale d'un boulon et sa section résistante [Ballio, Mazzolani, 1983]

Diamètre nominal du boulon $d$ (mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
Section résistante $A_s$ (mm <sup>2</sup> )	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561

$d$  : diamètre de la partie non filetée du boulon ;

$A_s$  : section résistante de la partie filetée.

La résistance au poinçonnement  $B_{p,Rd}$  de la plaque est définie comme suit :

$$B_{p,Rd} = \frac{0.6 \cdot \pi \cdot d_{min} \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad 5.6$$

Où  $f_u$  et  $t_p$  sont respectivement la résistance ultime à la traction et l'épaisseur de la plaque, et  $d_{min}$  est le minimum entre le diamètre de l'écrou et la valeur moyenne de la tête du boulon.



### 5.3.3.2 Assemblages sollicités au cisaillement

Deux différents cas sont distingués, suivant la partie du boulon soumise à la force de cisaillement :

- a) si le plan de cisaillement passe à travers la partie fileté du boulon ( $A_s$  est la zone fileté du boulon) la résistance au cisaillement d'un boulon par plan de cisaillement,  $F_{v,Rd}$ , est :

**Pour les classes 4.6, 5.6 et 8.8 :**

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad 5.7a$$

**Pour les classes 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 :**

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} \quad 5.7b$$

- b) si le plan de cisaillement passe à travers la partie non fileté du boulon ( $A$  est la section transversale brute du boulon), la résistance au cisaillement,  $F_{v,Rd}$ , est :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}} \quad 5.7c$$

Où,  $\gamma_{M2} = 1.25$ .

### 5.3.3.3 Assemblages sollicités simultanément au cisaillement et à la traction

Si le boulon est soumis simultanément à un cisaillement,  $F_{v,Ed}$  et à une traction,  $F_{t,Ed}$ , la résistance du boulon est définie comme :

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1 \quad 5.8$$

où  $F_{v,Rd}$  et  $F_{t,Rd}$ , sont respectivement la résistance au cisaillement nominale par boulon (Eq. (5.7a-c)), et la résistance à la traction nominale par boulon (Eq. (5.5)).

### 5.3.3.4 Résistance à la pression diamétrale des pièces assemblées

La résistance à la pression diamétrale par boulon,  $F_{b,Rd}$ , est :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \quad 5.9$$

où  $d$  est le diamètre du boulon,  $t$  et  $f_u$  sont l'épaisseur et la résistance ultime de la plaque, respectivement,  $\gamma_{M2} = 1.25$  est le facteur de sécurité du matériau et les termes  $k_1$  et  $\alpha_b$  dépendent des matériaux et de la géométrie de l'assemblage.

En particulier, conformément aux symboles présentés à la figure 5.9, ces termes sont présentés comme suit :

**Dans le cas de boulons dans la direction de la charge :**

■ Pour boulons de rive :

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{e_1}{3d_0}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1.0 \right\} \quad 5.10a$$

■ Pour les boulons internes :

$$\alpha_b = \min \left\{ \frac{P_1}{3d_0} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1.0 \right\} \quad 5.10b$$

Où,  $f_{ub}$  et  $d_0$  sont respectivement la résistance ultime du boulon et le diamètre du trou.

**Dans le cas de boulons perpendiculaires à la direction de la charge :**

■ Pour boulons de rive :

$$k_1 = \min \left\{ \frac{2.8 e_2}{d_0} - 1.7; 2.5 \right\} \quad 5.11a$$

■ Pour les boulons internes :

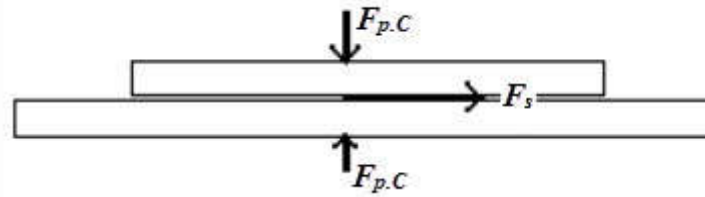
$$k_1 = \min \left\{ \frac{1.4 P_2}{d_0} - 1.7; 2.5 \right\} \quad 5.11a$$

Où,  $d_0$  est le diamètre du trou,  $e_1$ ,  $e_2$  sont respectivement la pince longitudinale et transversale, également pour  $P_1$ ,  $P_2$  sont respectivement l'entraxe longitudinal et transversal.

**5.3.4 Assemblage anti-glissant (Boulons à haute résistance)**

Si  $F_{p.c}$  est l'effort de précontrainte axial dans un boulon et  $F_s$  l'effort de cisaillement transmis par l'assemblage et sollicitant le dit boulon, il faut vérifier que l'interface des pièces en contact puisse transmettre l'effort tangent, sans glissement, soit :

$$F_s \leq \mu \cdot F_{p.c} \quad 5.12$$



**Figure 5.12** Fonctionnement d'un boulon HR

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

- ◆ Les boulons HR 8.8
- ◆ Les boulons HR 10.9

Le premier chiffre correspond à  $f_{ub} / 100$

Le second chiffre correspond à  $10 f_{yb} / f_{ub}$

#### 5.3.4.1 Assemblage résistant au glissement

Dans le cas d'un assemblage anti-glissant, la résistance nominale au glissement,  $F_{s,Rd}$ , d'un boulon précontraint de classe **8.8** ou **10.9** est :

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot m \cdot \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p.c} \quad 5.12a$$

La force de précontrainte nominale  $F_{p.c}$ , à utiliser dans l'équation (5.12a) est définie comme suit :

$$F_{p.c} = 0.7 f_{ub} \cdot A_s \quad 5.12b$$

Où,  $m$  est le nombre d'interface de frottement,  $\mu$  est le coefficient de frottement,  $\gamma_{M3} = 1.25$  est un coefficient de sécurité et le coefficient  $k_s$  prend en compte le type de trous et assume les valeurs suivantes :

- $k_s = 1$  pour les boulons dans des trous normaux ;
- $k_s = 0,85$  pour les boulons dans des trous surdimensionnés ou dans des trous oblongs courts dont l'axe de la rainure est perpendiculaire à la direction du transfert de charge ;

- $k_s = 0,7$  pour les boulons dans les trous oblongs avec l'axe de la rainure perpendiculaire à la direction de transfert de la charge ;
- $k_s = 0,76$  pour les boulons dans des trous oblongs courts dont l'axe de la rainure est parallèle à la direction de transfert de la charge ;
- $k_s = 0,63$  pour les boulons dans des trous oblongs longs avec l'axe de la rainure parallèle à la direction de transfert de charge.

A partir de la norme EN 1090-2, en l'absence de données expérimentales, les traitements de surface qui peuvent être supposés fournir le coefficient de glissement minimum selon la classe spécifiée de la surface de frottement sont :

Classe	Coefficient de frottement	Nature de la surface
Classe –A–	$\mu = 0.5$	Surfaces sablées avec de la grenaille ou du sable sans rouille, non piquées ;
Classe –B–	$\mu = 0.4$	Surfaces sablées avec de la grenaille ou du sable : a) métallisé par pulvérisation avec un produit à base d'aluminium ou de zinc ; b) avec une peinture au silicate de zinc-alcalin d'une épaisseur de 50 à 80 $\mu m$
Classe –C–	$\mu = 0.3$	Surfaces nettoyées par brossage au fil métallique ou nettoyage à la flamme, avec élimination de la rouille détachée.
Classe –D–	$\mu = 0.2$	Surfaces telles que laminées.

#### 5.3.4.2 Assemblage résistant à une action combinée de traction et du cisaillement

Pour les assemblages anti-glissant soumis à une force de traction de calcul ( $F_{t,Ed}$  ou  $F_{t,Ed,ser}$ ) et à une force de cisaillement de calcul ( $F_{v,Ed}$  ou  $F_{v,Ed,ser}$ ), la résistance nominale par boulon doit être réduite conformément aux règles ci-dessous :

- Assemblage anti-glissant à l'état limite de service (catégorie B) :

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{p,c} - 0.8 F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3,ser}} \quad 5.13a$$

- Assemblage anti-glissant à l'état limite ultime (catégorie C)

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot (F_{p,c} - 0.8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}} \quad 5.13b$$

$\gamma_{M3}$  est le coefficient partiel de sécurité qui dépend de l'état limite examiné et de l'orientation du trou de perçage.

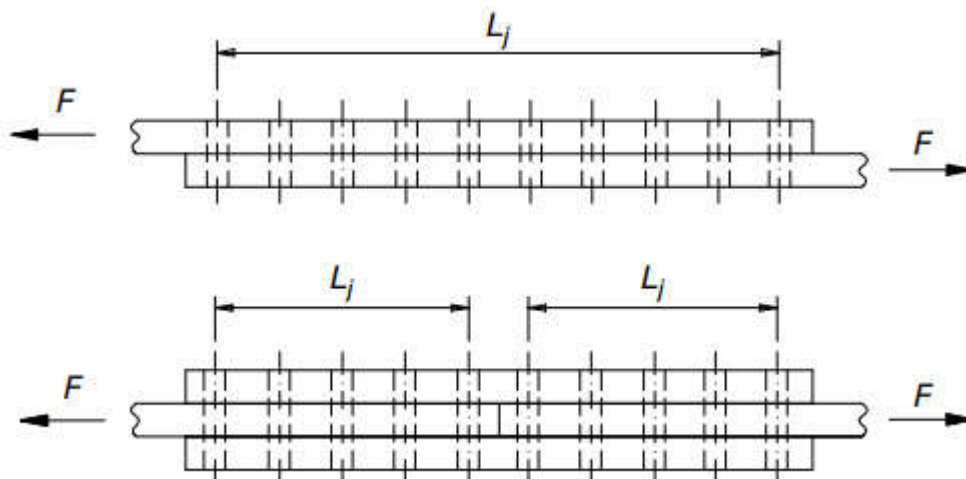
- $\gamma_{M3}=1.40$  pour l'état limite ultime des boulons placés dans des trous surdimensionnés ou oblongs parallèles à l'axe de l'effort à transmettre.
- $\gamma_{M3}=1.25$  pour l'état limite ultime des boulons placés dans des trous normaux ou oblongs perpendiculaire à l'axe de l'effort à transmettre.
- $\gamma_{M3}=1.10$  pour l'état limite de service des boulons placés dans des trous normaux ou oblongs perpendiculaire à l'axe de l'effort à transmettre.

### 5.3.5 Assemblage longs

Lorsque la distance  $L_j$  entre les centres des attaches d'extrémité dans un assemblage, mesurée dans la direction de transmission des forces (figure 5.13), est supérieure à  $15d$ , la résistance au cisaillement nominale  $F_{v,Rd}$  de toutes les attaches doit être réduite en la multipliant par un facteur de réduction défini comme :

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \quad 5.14$$

Avec la limitation  $\beta_{Lf} \leq 1.0$  et  $\beta_{Lf} \geq 0.75$ .



**Figure 5.13** Exemples d'assemblages longs