

8 Boulons



8.1 Introduction

Les moyens d'assemblage tels que les soudures ou les boulons permettent de relier entre elles les pièces élémentaires, de formes diverses, constituant une charpente métallique. Les assemblages boulonnés (fig. 8.1) représentent ainsi une composante essentielle de toute structure et méritent de ce fait une attention particulière.

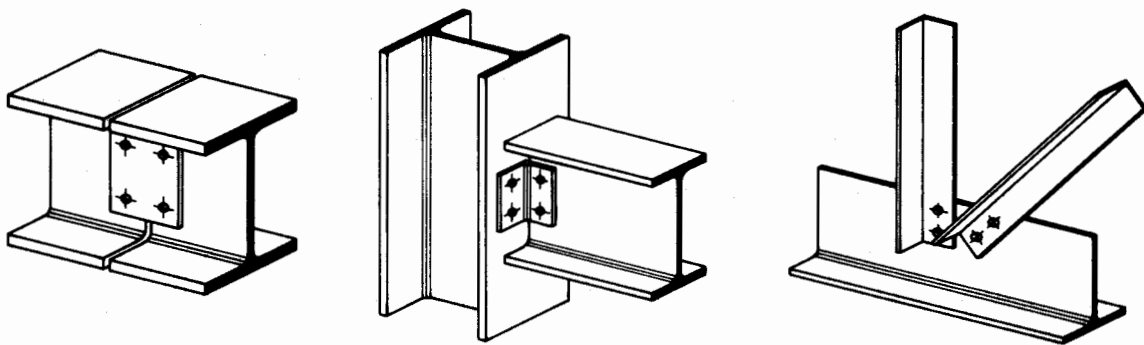


Fig. 8.1 Exemples d'assemblages boulonnés.


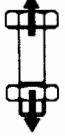


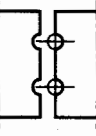
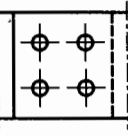
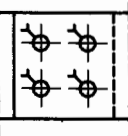
La connaissance des caractéristiques des moyens d'assemblages est indispensable pour choisir le type le mieux adapté à une structure, ainsi que pour imaginer des assemblages simples, facilement réalisables et par conséquent économiques. Ce chapitre est donc, avec celui relatif aux soudures (chap. 7), un des chapitres fondamentaux de ce volume.

Le but de ce chapitre est de traiter plus particulièrement de la conception et de la résistance des moyens d'assemblage boulonnés utilisés pour réaliser des assemblages boulonnés dans les charpentes métalliques. La description des moyens d'assemblage boulonnés, l'analyse de leur comportement ainsi que les méthodes de calcul à utiliser sont données dans ce chapitre qui est structuré comme suit :

- Section 8.2. Rappel des principes de dimensionnement applicables aux boulons.
- Section 8.3. Présentation des différents types de boulons et de rivets, de leurs méthodes de mise en place ainsi que des dispositions pratiques de construction dont il s'agit de tenir compte.
- Section 8.4. Etude du mode de transmission des efforts dans un assemblage boulonné, ainsi que de la résistance des boulons soumis à un effort de cisaillement, à un effort de traction ou à une interaction d'efforts.
- Section 8.5. Détermination de la résistance des pièces assemblées, pour lesquelles la pression latérale et la rupture des sections brutes et nettes doivent être vérifiées.
- Sections 8.6 et 8.7. Etude du principe de vérification d'un assemblage boulonné, selon qu'il est réalisé avec des boulons non précontraints (sect. 8.6) ou précontraints (sect. 8.7).

Le tableau 8.2 montre dans quelles parties de ce chapitre les différentes vérifications relatives aux assemblages boulonnés sont traitées.

Tableau 8.2 Vérifications à effectuer pour le dimensionnement des boulons.

Boulons			Pièces assemblées		Assemblage	
Cisaillement	Traction	Interaction	Pression latérale	Section nette / brute	Non précontraint	Précontraint
						
§ 8.4.2	§ 8.4.3	§ 8.4.4	§ 8.5.1	§ 8.5.2	Sect. 8.6	Sect. 8.7

8.2 Principes de dimensionnement

8.2.1 Sécurité structurale

La sécurité structurale des boulons peut être vérifiée, tout comme celle des soudures (chap. 7), selon le principe de base exprimé par (2.13) :

$$S_d \leq \frac{R}{\gamma_R} \quad (8.1)$$

S_d : valeur de dimensionnement de l'effort
 R : résistance ultime
 γ_R : facteur de résistance

Pour les assemblages boulonnés, on peut en général exprimer les efforts et la résistance en tant que force dans un boulon ou dans les pièces assemblées. Nous verrons dans les différentes sections de ce chapitre qu'il peut s'agir d'un effort de cisaillement ou de traction, d'une pression latérale ou d'un effort normal dans une section. Tout comme pour les soudures, il est essentiel que cette force soit déterminée sur la base d'une modélisation de la transmission d'effort correspondant au comportement physique de l'assemblage.

Il faut encore préciser que la résistance ultime des assemblages soudés ou boulonnés est établie de façon à ce que toute ruine prématurée dans les assemblages soit exclue (§ 2.6.3). La résistance ultime des boulons et des pièces assemblées doit donc contenir une réserve (en l'occurrence le facteur γ_M introduit dans (2.33)) permettant de satisfaire cette exigence.

8.2.2 Aptitude au service

Pour certaines constructions, les mouvements relatifs des pièces assemblées sont à proscrire. Cela concerne par exemple les constructions qui doivent garder une géométrie exacte (antennes et radars, par exemple) ou les structures soumises à ces charges variables répétées (charges de trafic par exemple) qui pourraient subir un mouvement alterné dans les assemblages, entraînant une diminution de la résistance par fatigue des éléments. Pour éviter ces mouvements relatifs, plusieurs mesures sont possibles :

- Concevoir des assemblages boulonnés avec des trous ajustés (§ 8.3.1). On prêtera alors une attention particulière aux tolérances de fabrication et de montage.

- Utiliser des boulons précontraints pour que les assemblages travaillent par frottement (sect. 8.7). Dans de tels cas, aucun glissement n'est admis sous l'effet des charges de service S_{ser} .
- Concevoir des assemblages soudés (chap. 7).

8.2.3 Résistance à la fatigue

Il est nécessaire de tenir compte de l'influence des phénomènes de fatigue dans les ouvrages ou parties d'ouvrages sollicités par des charges variables répétées (chap. 13). En ce qui concerne plus particulièrement les moyens d'assemblage boulonnés, il faut savoir que la résistance à la fatigue d'un boulon tendu est beaucoup plus faible (à cause des concentrations de contraintes au droit du filetage) que celle d'une tige métallique de surface lisse. Il est donc nécessaire de vérifier soigneusement la résistance à la fatigue des boulons soumis à un effort de traction : ceux-ci doivent absolument être précontraints, de façon à diminuer la différence de contrainte appliquée (§ 8.7.5).

Précisons également que toute soudure sur des boulons à haute résistance (§ 8.3.1) est à proscrire : cela crée en effet des entailles d'où une fissure de fatigue peut se propager, créant ainsi un grand danger de rupture fragile, à cause de la faible ductilité des aciers pour boulons à haute résistance (§ 3.4.2).

8.2.4 Assurance de qualité

Comme pour l'acier des profilés laminés, l'acier des boulons est contrôlé lors de leur production : il n'est donc pas nécessaire de vérifier si le comportement de l'acier des boulons est satisfaisant. Divers contrôles sont cependant nécessaires pour s'assurer que les boulons utilisés sont conformes à ce qui a été projeté. Parmi les éléments à contrôler, citons :

- le diamètre des boulons, qui doit être conforme à ce qui a été prévu lors du dimensionnement;
- la longueur des boulons, importante pour l'épaisseur de serrage, et qui doit correspondre à ce qui a été commandé;
- la qualité d'acier, qui doit être conforme à celle dont il a été tenu compte dans le dimensionnement; les boulons à haute résistance doivent par ailleurs avoir une inscription indiquant leur qualité d'acier;
- la garniture (écrou et rondelles), qui doit être compatible (dimension et classe de qualité) avec les boulons;
- la mise en place des boulons, qui doit se faire en plaquant bien les pièces assemblées les unes contre les autres;
- l'éventuel effort de précontrainte appliqué à des boulons à haute résistance, qui doit se faire de façon à pouvoir garantir que la précontrainte souhaitée a effectivement été atteinte (§ 8.3.2).

8.3 Boulons et rivets

8.3.1 Types et symboles

Boulons

Les caractéristiques des différents types d'aciers utilisés pour les boulons sont présentées au paragraphe 3.4.2. Pour mémoire, le tableau 8.3 rappelle les valeurs de la limite d'élasticité f_{yB} et de la résistance à la traction f_{uB} des quatre classes de qualité d'acier utilisées pour les boulons (la signification des chiffres utilisés pour définir la classe de qualité est donnée au paragraphe 3.4.2).

Tableau 8.3 Caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons.

Boulons	Classe de qualité	f_{yB} [N/mm ²]	f_{uB} [N/mm ²]
de charpente	4.6	240	400
	5.6	300	500
à haute résistance	8.8	640	800
	10.9	900	1000

Le tableau 8.3 montre également que l'on distingue deux types de boulons, qui se différencient par leurs caractéristiques mécaniques plus ou moins élevées :

- les boulons de charpente métallique (aciers 4.6 et 5.6),
- les boulons à haute résistance (aciers 8.8 et 10.9).

Les boulons de charpente métallique s'emploient couramment pour réaliser les assemblages faiblement sollicités des halles et des bâtiments. Les boulons à haute résistance s'utilisent en général pour les assemblages de ponts, ainsi que pour les assemblages fortement sollicités ou soumis à des effets dynamiques. Seuls les boulons à haute résistance peuvent être précontraints (sect. 8.7). Sur le marché suisse, les boulons de charpente métallique sont en acier 4.6, alors que les boulons à haute résistance sont en acier 10.9. Les autres types d'acier ne sont utilisés qu'exceptionnellement.

L'Eurocode 3 (§ 3.3.2.1) ajoute les classes de qualité 4.8, 5.8 et 6.8 à celles données dans le tableau 8.3 et utilise la notion de boulon ordinaire à la place de boulon de charpente.

Dans la suite de ce chapitre, nous parlerons de **boulons à haute résistance** pour désigner les boulons à haute résistance non précontraints, et de **boulons précontraints** pour les boulons à haute résistance précontraints.

Quel que soit le type de boulons, le jeu normal entre la tige du boulon et le trou des pièces à assembler est fixé à 2 mm pour les diamètres de boulons d inférieurs ou égaux à 24 mm, et à 3 mm pour les diamètres de boulons égaux ou supérieurs à 27 mm. Le diamètre d_o du trou vaut donc :

- $d_o = d + 2$ mm pour $d \leq 24$ mm,
- $d_o = d + 3$ mm pour $d \geq 27$ mm.

L'Eurocode 3 (§ 7.5.2) propose les mêmes diamètres de trous, sauf pour les diamètres de boulons $d \leq 14$ mm, pour lesquels $d_o = d + 1$ mm.

Dans certains cas, un jeu plus petit peut être exigé. On parle de **boulons ajustés** lorsque le jeu est de 0.3 mm seulement. L'emploi de boulons ajustés offre l'avantage de créer des assemblages avec un mouvement relatif possible très petit, donc des structures très peu déformables. Cependant, la réalisation des trous doit être précise, ce qui augmente sensiblement le coût de ce type d'assemblage. On n'utilisera de ce fait les boulons ajustés qu'en cas de nécessité absolue.

La figure 8.4 montre les différentes parties composant un boulon de charpente et un boulon à haute résistance. Ces derniers se distinguent des boulons de charpente métallique par l'inscription de la classe de qualité de l'acier du boulon sur leur tête et leurs rondelles, ces dernières étant également moins épaisses. Les dimensions des boulons disponibles sur le marché suisse se trouvent dans les tables SZS C5.

Il faut toujours prévoir une rondelle sous la partie qui sera tournée lors de la mise en place du boulon (en général l'écrou, parfois la tête, souvent les deux). Pour placer des boulons dans les ailes des profilés

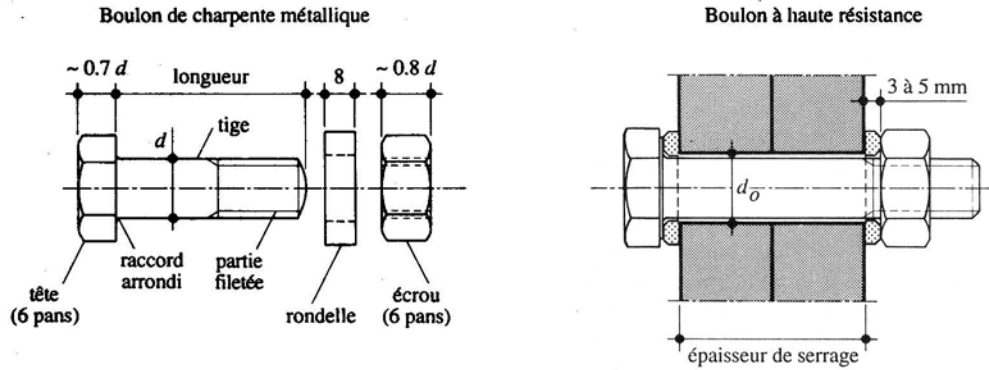


Fig. 8.4 Boulon de charpente et boulon à haute résistance.

en double té à ailes étroites (INP) et en U avec ailes inclinées (UNP), il existe des cales obliques qui permettent de compenser l'inclinaison de la face intérieure des ailes et d'offrir ainsi deux surfaces parallèles pour le serrage.

Le tableau 8.5 donne les principales caractéristiques et symboles des boulons normalisés les plus utilisés. Les tables SZS C5 fournissent davantage d'informations à ce sujet.

Tableau 8.5 Caractéristiques et symboles des boulons.

	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
Diamètre de la tige d [mm]	12	16	20	24	27
Diamètre du trou d_o [mm]	14	18	22	26	30
Section de la tige A [mm ²]	113	201	314	452	573
Section résistante A_s [mm ²]	84	157	245	353	459
Symbole boulon de charpente					
Symbole HR non précontraint					
Symbole HR précontraint					

Concernant les types de boulons, il est utile de donner les précisions suivantes :

- En Suisse, les boulons et leur garniture (rondelles + écrou) sont généralement zingués à chaud par le fournisseur. Il existe cependant également des boulons noirs qui n'ont pas subi ce traitement : ils ont les mêmes caractéristiques que ceux qui sont zingués à chaud, à l'exception du couple de serrage à appliquer en cas de précontrainte (§ 8.3.2).
- Les boulons ne sont filetés que sur une partie de la longueur de leur tige. On commande ainsi leur longueur en fonction de l'épaisseur de serrage désirée.
- Il existe également des boulons de diamètres inférieurs ou supérieurs à ceux donnés dans le tableau 8.5 : il ne sont cependant utilisés que dans des cas spéciaux.

- Des boulons en acier inoxydable existent également. Ils s'utilisent pour l'assemblage de structures réalisées avec des éléments en acier inoxydable (§ 3.3.1). Leurs caractéristiques sont fournies par les fabricants.

La pratique et la normalisation européenne n'est pas uniforme et peut parfois être différente des habitudes suisses, notamment dans les domaines suivants :

- sauf indications spéciales, des rondelles ne sont pas nécessaires pour les boulons non précontraints (quelle que soit leur classe de qualité), et une seule rondelle placée sous la partie du boulon tournée lors de la mise en précontrainte (si possible l'écrou) est suffisante [8.1];
- une tendance se précise pour utiliser des boulons filetés sur toute la longueur de leur tige, afin de simplifier la gestion du stock de boulons.

Rivets

Les rivets (fig. 8.6) 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 existantes, datant du début de ce siècle. Leur diamètre varie généralement de 10 à 28 mm. Quelques précisions concernant le type d'acier des rivets sont données au paragraphe 3.4.1 et dans la référence [8.2].

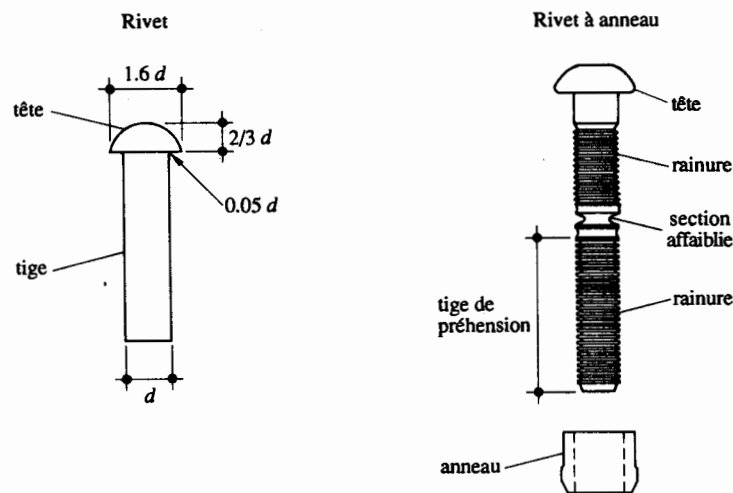


Fig. 8.6 Rivet et rivet à anneau.

Rivets à anneau

Les rivets à anneau (rivelons) sont des éléments de connexion mécanique qui tiennent à la fois du rivet (dans la mesure où il a une même forme de tête et qu'il introduit une force de précontrainte) et du boulon (car une partie de sa tige est rainurée). La figure 8.6 en montre les principales caractéristiques : la tige se compose de deux parties rainurées (et non pas filetées), séparées par une portion de tige dont la section est affaiblie. L'acier des rivets à anneau est un acier à haute résistance de type 8.8 (§ 3.4.2).

8.3.2 Mise en place

Boulons non précontraints

La mise en place des boulons non précontraints (boulons de charpente ou à haute résistance) au moyen d'une clé ne nécessite pas d'explications particulières. Il faut toutefois veiller à ce que les pièces assemblées soient bien mises en contact.

Boulons précontraints

Pour les boulons à haute résistance, l'acier employé permet de les précontraindre en les serrant très fortement. Ce serrage provoque une forte pression sur les pièces assemblées, autour des boulons. Cette pression empêche un glissement relatif des pièces assemblées : on parle alors d'assemblage précontraint (sect. 8.7). La mise en précontrainte, obtenue de préférence par serrage des écrous, exige un contrôle soigneux de ce serrage. Il existe principalement deux méthodes de contrôle :

- La première méthode consiste à mesurer le couple de serrage appliqué à l'écrou pour obtenir la précontrainte nécessaire. Ce couple est obtenu au moyen d'une clé dynamométrique manuelle ou d'une clé à chocs pneumatique ou électrique, qui se déclenche lorsque le couple nécessaire est atteint.
- La deuxième méthode est un procédé dit combiné, consistant à appliquer à l'écrou environ 75 % du couple nécessaire pour obtenir la précontrainte requise, puis à donner à l'écrou un quart de tour supplémentaire.

La norme européenne prEN 1990-1 [8.1] définit les conditions de mise en œuvre des boulons à serrage contrôlé; quatre méthodes, dont celles décrites ci-dessus, sont indiquées dans cette norme.

Concernant les boulons précontraints, il est utile de donner les précisions suivantes :

- à cause d'une différence de frottement entre l'écrou et le filetage, le couple de serrage à appliquer aux boulons noirs est supérieur d'environ 30 % à celui nécessaire pour les boulons zingués à chaud lubrifiés avec un produit à base de molybdène;
- une réutilisation des boulons précontraints mis en tension avec le procédé combiné n'est pas possible, car leur serrage provoque une plastification de leur section.

Nous citerons également deux procédés particuliers permettant un contrôle de la précontrainte appliquée aux boulons, même s'ils ne sont pas encore utilisés couramment en Suisse :

- les boulons TC (pour *Torque Control*) sont conçus de façon à ce que leur tige se casse lorsque le couple de serrage nécessaire est atteint; le contrôle du serrage se fait donc sur la base d'un principe analogue à celui des rivets à anneau, sauf que la rupture de la tige a lieu par torsion et non pas par traction;
- les rondelles de précontrainte LIW (*Load Indicator Washer*) se différencient des rondelles courantes par des bosselages qui s'écrasent partiellement lors de la mise en tension du boulon; une mesure de la hauteur de ces bosselages (analogue à la mesure de l'écartement des bougies de voitures) après la mise en tension du boulon permet de vérifier si la précontrainte nécessaire a bien été appliquée.

Rivets

Les rivets bruts (fig. 8.6) sont des pièces métalliques formées d'une tige cylindrique et d'une tête ronde. Lors de la pose (fig. 8.7), les rivets sont chauffés puis introduits dans les trous des pièces à

assembler. La partie du rivet dépassant les pièces est refoulée de manière à remplir le trou et à former la deuxième tête. La tige empêche ainsi le glissement relatif des éléments assemblés et assure la transmission des efforts, tandis que les têtes tiennent la tige en place.

Comme l'acier des rivets est porté à environ 1000 °C lors de la mise en place des rivets, son refroidissement peut créer une précontrainte qui peut donner à l'assemblage riveté une résistance au glissement semblable à celle obtenue avec des boulons précontraints (sect. 8.7).

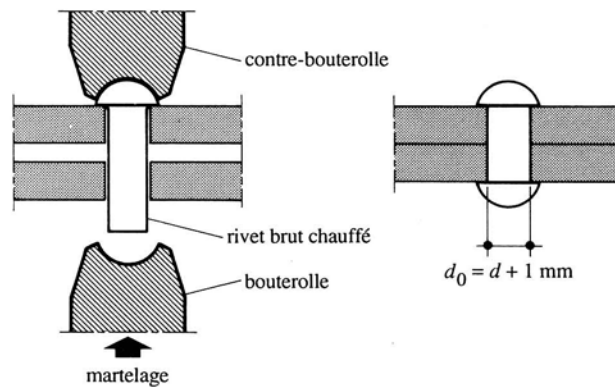


Fig. 8.7 Pose d'un rivet.

Rivets à anneau

La mise en place des rivets à anneau (fig. 8.8) s'effectue au moyen d'un pistolet hydraulique. Ce pistolet prend appui sur le second élément rainuré du rivet et presse l'anneau contre les pièces à assembler. L'anneau se déforme et vient remplir les rainures du premier élément. La tige du rivet, fortement tendue, se rompt alors au droit de la section affaiblie pour un effort de traction déterminé par l'aire de cette section. Cette mise en place provoque une forte compression des pièces autour du rivet : par conséquent, ce type d'assemblage possède des caractéristiques analogues à celles des assemblages par boulons précontraints.

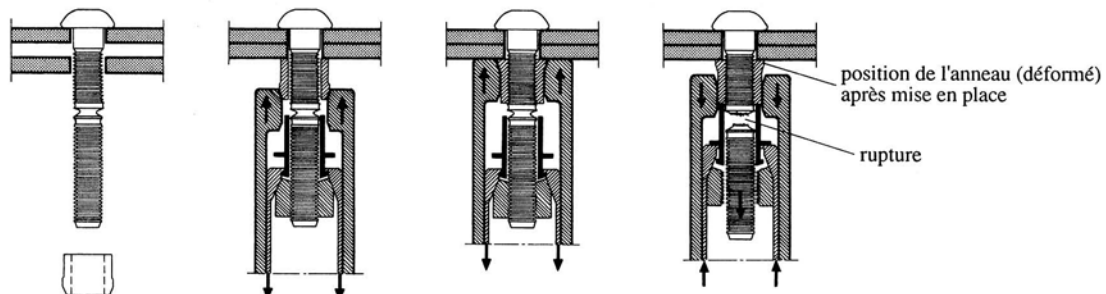


Fig. 8.8 Mise en place d'un rivet à anneau.

8.3.3 Dispositions pratiques de construction

Certaines mesures constructives sont à respecter pour que les assemblages boulonnés puissent être facilement réalisés et pour qu'ils puissent assurer pleinement leur rôle d'élément de liaison. Il s'agit notamment de choisir un diamètre de boulon bien adapté à l'épaisseur des pièces à assembler, ainsi que de disposer les boulons de façon adéquate.

Diamètre des boulons

Pour des raisons pratiques, on évitera la mise en œuvre dans un même assemblage de boulons de diamètres différents, tandis que l'utilisation de boulons de même diamètre mais de classe de qualité différente est carrément proscrite.

Le choix du diamètre des boulons se fera en déterminant leur résistance ou celle des pièces assemblées sur la base d'une bonne estimation des efforts à transmettre. Comme le diamètre d des boulons et l'épaisseur t des pièces à assembler ne sont pas totalement indépendants, le domaine d'utilisation des différents types de boulons est à peu près le suivant (entre parenthèses les diamètres utilisés moins couramment) :

- $t < 10$ mm : $d = (12), 16$ mm,
- $10 \text{ mm} \leq t \leq 25$ mm : $d = 16, 20, 24$ mm,
- $t > 25$ mm : $d = 24, (27), (30)$ mm.

Disposition des boulons

Les distances entre les axes des boulons (entraxe p) ainsi qu'entre les axes des boulons et les bords de la pièce (pince e) (fig. 8.9) doivent être comprises entre certaines limites pour les raisons suivantes :

- *valeurs minimales*; pour permettre la mise en place des boulons (outillage) et pour éviter la rupture de la tôle lorsque la pince est trop faible;
- *valeurs maximales*; pour qu'il existe toujours un contact entre les pièces de l'assemblage (corrosion) et pour éviter de réaliser des assemblages trop longs (§ 8.6.2).

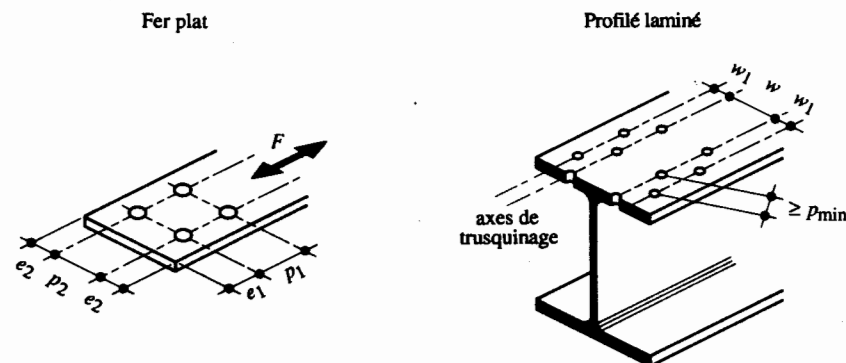


Fig. 8.9 Désignation des entraxes et des pinces en fonction de la direction de l'effort.

Le tableau 8.10 donne des indications sur les valeurs usuelles (entraxe $p_1 \approx 3d$ et pince $e_1 \approx 2d$) et minimales ($e_1 \approx 1.4d$) à donner à l'entraxe des boulons et à la pince. Il faut de plus tenir compte des exigences particulières pour la mise en œuvre, ou autrement dit prévoir une place suffisante pour manoeuvrer les clés de serrage manuelles ou pneumatiques (voir pour cela les tables SZS C5).

Pour les profilés laminés, la disposition des trous est fixée sur les axes de trusquinage (fig. 8.9). On trouve la position de ces axes correspondant aux divers profilés dans les tables SZS C5.

Tableau 8.10 Entraxes des boulons et pincés.

Boulons	Valeurs usuelles [mm]			Valeurs minimales [mm]		
	p_1, p_2	e_1	e_2	p_1, p_2	e_1	e_2
M 12	40	25	20	35	20	15
M 16	50	35	25	40	25	20
M 20	60	40	30	45	30	25
M 24	70	50	40	55	35	30
M 27	80	55	45	65	40	35

L'Eurocode 3 (§ 6.5.1) donne les valeurs minimales suivantes (d_o est le diamètre du trou) :
 $e_1 = 1.2 d_o$, $e_2 = 1.5 d_o$, $p_1 = 2.2 d_o$ et $p_2 = 3.0 d_o$.

Exemple 8.1 Dispositions pratiques de construction

Soit une diagonale en acier Fe E 235 d'une poutre à treillis, dont l'assemblage avec la membrure est exécutée au moyen de quatre boulons M 24 en acier 4.6.

En dehors de toute considération de résistance, déterminer les principales dimensions de l'assemblage nécessaire dans les cas où la diagonale est un fer plat ou une cornière LNP 100 · 10 (fig. 8.11).

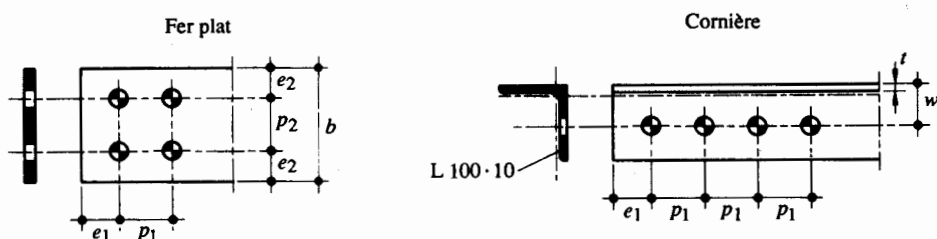


Fig. 8.11 Dispositions pratiques de construction.

Fer plat

Pour des boulons M 24, on peut par exemple choisir une épaisseur $t = 15$ mm. Quant à la largeur minimale du fer plat et la disposition longitudinale des boulons, elles seront établies en tenant compte des valeurs usuelles pour les pincés et les entraxes données dans le tableau 8.10. Pour les pincés, on a $e_1 = 50$ mm et $e_2 = 40$ mm alors que pour les entraxes on trouve $p_1 = p_2 = 70$ mm. La largeur minimale de la section vaut donc : $b = p_2 + 2e_2 = 150$ mm.

· En consultant les tables SZS C5, on constate que le fer plat correspondant aux dimensions déterminées ci-dessus est disponible directement du stock et on choisit par conséquent un fer plat FLA 150 · 15.

Cornière LNP 100 · 10

La position de l'axe de trusquinage donnée par les tables SZS C5 correspond à $w_1 = 55$ mm. On peut contrôler dans les tables SZS C5 que les boulons M 24 choisis peuvent effectivement être utilisés avec ce profilé. Quant à la disposition des boulons dans le sens longitudinal, elle se fera sur la base des mêmes critères adoptés précédemment, à savoir avec $p_1 = 70$ mm et $e_1 = 50$ mm.

Il s'agit également de vérifier que l'on dispose d'un dégagement suffisant pour le serrage des boulons au moyen d'une clé pneumatique. Dans le cas présent, on constate qu'un tel serrage est effectivement possible :

$$w_1 - t = 55 \text{ mm} - 10 \text{ mm} = 45 \text{ mm} \geq b_{\min} = 40 \text{ mm} \text{ (donné par les tables SZS C5).}$$

8.4 Résistance des boulons

Les rivets à anneau et les rivets ne sont plus mentionnés dans la suite de ce chapitre, qui traite exclusivement de la résistance des boulons. On apportera cependant à leur sujet les précisions suivantes :

- les rivets à anneau peuvent être considérés comme des boulons constitués d'un acier à haute résistance qui correspond à une classe de qualité 8.8 (§ 3.4.2); ils ne doivent cependant pas être utilisés en traction, car leur ruine se produit par rupture de l'anneau et non par rupture de la tige;
- les rivets présentent, en cisaillement, un comportement similaire à celui des boulons; quelques indications concernant leur résistance peuvent être trouvées dans [8.2].

L'Eurocode 3 (§ 6.5.6) donne pour les rivets des indications pour le calcul de la résistance au cisaillement, à la pression latérale et à la traction.

8.4.1 Mode de transmission des forces

Le joint boulonné représenté à la figure 8.12 montre que ce sont les boulons qui assurent la transmission des efforts à l'intérieur de l'assemblage. Les boulons sont de ce fait sollicités par une *pression latérale* transmise par contact avec les tôles, qui les fléchit et les cisaille.

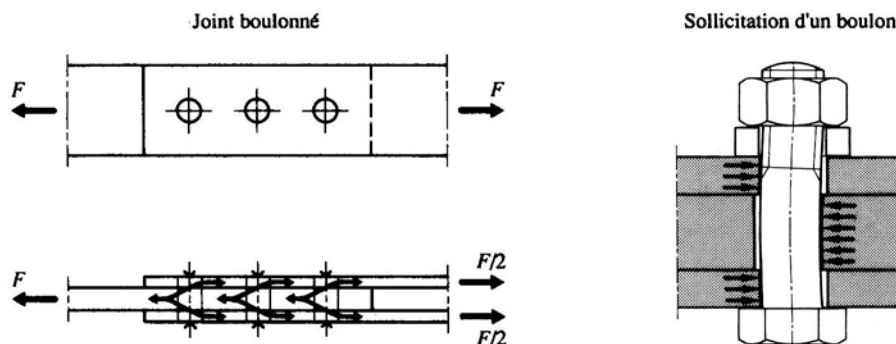


Fig. 8.12 Transmission des forces.

Pour autant que les pièces assemblées soient plaquées les unes contre les autres, on peut négliger la flexion de la tige des boulons. Il ne reste ainsi à vérifier que les deux phénomènes suivants :

- le cisaillement des boulons (§ 8.4.2),
- la pression latérale sur les pièces assemblées (§ 8.5.1), l'acier de ces dernières ayant en général une résistance moins élevée que celle de l'acier des boulons.

8.4.2 Résistance à un effort de cisaillement

La résistance ultime au cisaillement d'une section cisailée d'un boulon est directement proportionnelle à son aire. Dans l'assemblage de la figure 8.13, les boulons sont cisailés selon deux surfaces, qui peuvent se situer, selon la longueur du filetage du boulon, soit dans la section de la tige ($A = \pi d^2/4$), soit dans la section du filetage. Dans ce dernier cas, la section à introduire dans le calcul est la section résistante A_s , qui correspond à la section d'un cylindre équivalent qui offre la même résistance à la rupture que la partie filetée du boulon. Les valeurs numériques de la section résistante des boulons sont données dans le tableau 8.5 ainsi que dans les tables SZS C5.

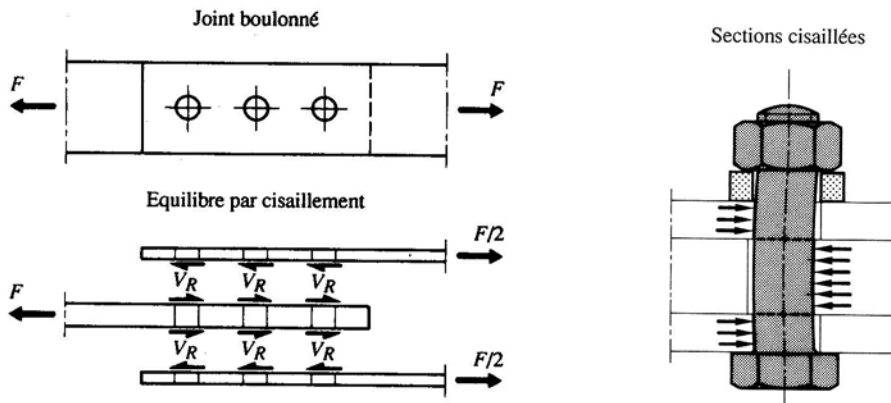


Fig. 8.13 Cisaillement des boulons.

La résistance ultime au cisaillement d'une section cisailée d'un boulon, précontraint ou non, est donnée par les relations suivantes, selon que le cisaillement se fait respectivement dans la tige ou dans le filetage :

$$V_R = \frac{1}{\gamma_M} \tau_{uB} A \quad (8.2 a)$$

$$V_R = \frac{1}{\gamma_M} \tau_{uB} A_s \quad (8.2 b)$$

- V_R : résistance ultime au cisaillement d'une section d'un boulon
 τ_{uB} : contrainte ultime de cisaillement de l'acier du boulon
 A : aire de la section de la tige du boulon ($A = \pi d^2/4$) (tab. 8.5)
 A_s : aire de la section résistante (tab. 8.5)
 γ_M : marge supplémentaire pour la résistance des moyens d'assemblage ($\gamma_M = 1.25$)

où la contrainte ultime de cisaillement de l'acier du boulon vaut environ :

$$\tau_{uB} = \frac{f_{uB}}{\sqrt{3}} \quad (8.3)$$

f_{uB} : valeur de calcul de la résistance à la traction de l'acier du boulon (tab. 8.3)

Les relations (8.2 a) et (8.3) permettent d'exprimer la résistance ultime V_R d'une section cisailée dans la tige d'un boulon par la relation suivante (arrondie pour le dimensionnement), valable quelle que soit la classe de qualité de son acier :

$$V_R = 0.5 f_{uB} A \quad (8.4)$$

Si la section cisailée se trouve dans la zone du *filetage*, il suffit de remplacer dans (8.4) la section A de la tige du boulon par la section résistante A_s . Pour les boulons en acier 10.9, la norme SIA 161 impose cependant encore une réduction de la résistance au cisaillement au 80 % de cette valeur. On a ainsi :

$$\text{aciers 4.6, 5.6 et 8.8 :} \quad V_R = 0.5 f_{uB} A_s \quad (8.5 \text{ a})$$

$$\text{acier 10.9 :} \quad V_R = 0.4 f_{uB} A_s \quad (8.5 \text{ b})$$

Les valeurs de la résistance ultime V_R d'une section cisailée (on parle alors de section simple) dans la tige d'un boulon sont données dans le tableau 8.32(a), qui regroupe les différentes valeurs de résistance des boulons de charpente et à haute résistance. Elles se trouvent également dans les tables SZS C5.

Pour les aciers avec une haute limite d'élasticité, certaines normes donnent une valeur de résistance ultime légèrement différente de celle donnée par les relations ci-dessus. Cette différence s'explique par la variation du rapport f_{yB}/f_{uB} qui a comme conséquence une légère modification du comportement à la ruine des boulons.

L'Eurocode 3 (§ 6.5.5) donne les résistances de calcul suivantes pour une section cisailée dans la tige d'un boulon, quelle que soit la classe de qualité de l'acier :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} A}{\gamma_{Mb}}$$

$F_{v,Rd}$: résistance de calcul au cisaillement d'une section cisailée

f_{ub} : valeur de calcul de la résistance à la traction de l'acier du boulon (correspond à f_{uB})

A : aire de la section de la tige du boulon

γ_{Mb} : facteur de résistance pour les assemblages boulonnés ($\gamma_{Mb} = \gamma_{M2} = 1.25$)

Si la section cisailée se trouve dans la zone du *filetage*, les valeurs suivantes sont données selon la classe de qualité de l'acier des boulons :

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad \text{pour les classes de qualité 4.6, 5.6 et 8.8}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}} \quad \text{pour les classes de qualité 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9}$$

A_s : aire de la section résistante

En comparant $F_{v,Rd}$ avec les «valeurs de dimensionnement» obtenues avec la norme SIA 161 (V_R/γ_R), on constate que cette dernière prescrit des valeurs de résistance inférieures à celles de l'Eurocode de 5 % pour une section cisailée dans la tige et de 9 % pour une section cisailée dans le filetage.

8.4.3 Résistance à un effort de traction

Dans les assemblages sollicités en traction, comme par exemple l'attache en traction de la figure 8.14(a), les forces se transmettent d'un élément à l'autre directement par l'intermédiaire des boulons. La résistance ultime de ces assemblages dépend de la résistance à la traction f_{uB} de l'acier des boulons.

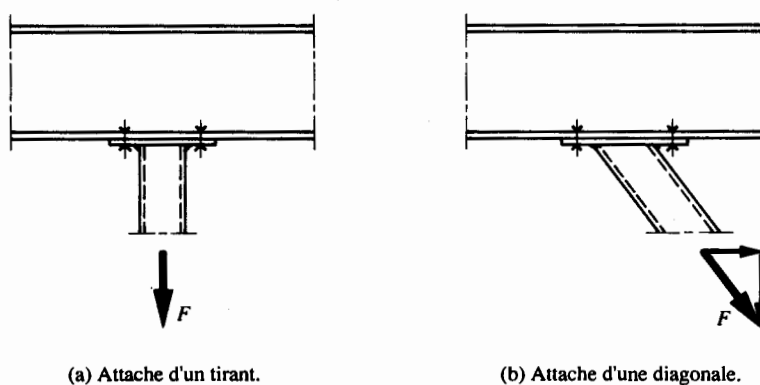


Fig. 8.14 Assemblages sollicités à la traction et à la traction avec cisaillement.

La résistance ultime à la traction d'un boulon est donnée par les relations suivantes, selon que le boulon est précontraint ou non :

$$\text{boulon précontraint :} \quad T_R = \frac{1}{\gamma_M} f_{uB} A_s \quad (8.6a)$$

$$\text{boulon non précontraint :} \quad T_R = 0.75 \frac{1}{\gamma_M} f_{uB} A_s \quad (8.6b)$$

T_R : résistance ultime à la traction

f_{uB} : valeur de calcul de la résistance à la traction de l'acier du boulon (tab. 8.3)

A_s : aire de la section résistante du boulon

γ_M : marge supplémentaire pour la résistance des moyens d'assemblage ($\gamma_M = 1.25$)

Le facteur 0.75 qui multiplie la résistance théorique $f_{uB} A_s$ d'un boulon non précontraint tient compte d'une sensibilité très prononcée de ce type de boulons vis-à-vis des sollicitations variables répétées conduisant à une fissuration par fatigue (§ 8.7.5). La mise en précontrainte d'un boulon constitue de plus un contrôle implicite de la qualité du boulon, qui justifie également une résistance ultime supérieure pour un boulon précontraint. L'utilisation de boulons précontraints est de ce fait fortement recommandée s'ils sont soumis à des charges de traction, et même obligatoire s'ils sont sollicités par des charges de fatigue (§ 8.7.5).

Sur la base de (8.6 a), la résistance ultime à la traction d'un *boulon précontraint* vaut donc :

$$\text{boulon précontraint :} \quad T_R = 0.8 f_{uB} A_s \quad (8.7)$$

Les valeurs de la résistance ultime à la traction selon (8.7) sont données dans le tableau 8.32(b). Elles se trouvent également dans les tables SZS C5.

L'Eurocode 3 (§ 6.5.5) donne la relation suivante pour la résistance à la traction des boulons :

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 f_{ub} A_s}{\gamma_{Mb}}$$

ce qui correspond (avec $\gamma_{Mb} = \gamma_{M2} = 1.25$) à 1 % près à la « valeur de dimensionnement » (T_R/γ_R) obtenue avec (8.7).

Précisons d'ores et déjà ici, même si cette question est traitée plus en détail au paragraphe 8.7.4, qu'un assemblage dont les boulons sont soumis à un effort de traction n'aura pas un comportement à la ruine (et donc de mode de transmission des efforts) différent selon que les boulons sont précontraints ou non.

8.4.4 Résistance à une interaction entre cisaillement et traction

La figure 8.14(b) représente un exemple d'assemblage, en l'occurrence une attache de diagonale, dans lequel les boulons sont sollicités à la fois au cisaillement (composante horizontale) et à la traction (composante verticale). La résistance ultime de tels boulons est dictée par une loi d'interaction, obtenue à partir d'essais, faisant intervenir les résistances ultimes au cisaillement pur et à la traction pure des boulons. Cette loi d'interaction (fig. 8.15), valable aussi bien pour les boulons non précontraints que pour les boulons précontraints, se formule ainsi :

$$\left(\frac{T_{dB}}{T_R/\gamma_R} \right)^2 + \left(\frac{V_{dB}}{V_R/\gamma_R} \right)^2 \leq 1.0 \quad (8.8)$$

T_{dB} : valeur de dimensionnement de l'effort de traction transmis par le boulon

T_R : résistance ultime à la traction du boulon (8.6)

V_{dB} : valeur de dimensionnement de l'effort de cisaillement transmis par une section du boulon

V_R : résistance ultime d'une section cisailée du boulon (8.4)

L'Eurocode 3 (§ 6.5.5) propose pour une interaction entre cisaillement et traction une relation légèrement différente de (8.8) :

$$\frac{F_{t,Sd}}{1.4 F_{t,Rd}} + \frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} \leq 1.0$$

$F_{t,Sd}$: valeur de calcul de l'effort de traction

$F_{t,Rd}$: résistance de calcul à la traction

$F_{v,Sd}$: valeur de calcul de l'effort de cisaillement

$F_{v,Rd}$: résistance de calcul au cisaillement

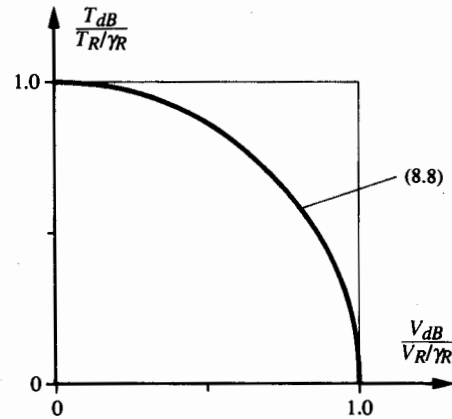


Fig. 8.15 Résistance ultime d'un boulon pour une interaction entre cisaillement et traction.

Exemple 8.2 Interaction entre traction et cisaillement

Soit un boulon M 20 précontraint, en acier 10.9, sollicité à la traction par un effort T dont la valeur de dimensionnement correspond à 50 % de sa résistance ultime en traction.

Déterminer la valeur de dimensionnement de l'effort de cisaillement V que ce boulon peut encore transmettre en admettant que la section cisillée se situe dans la tige du boulon.

Traction du boulon

La résistance à la traction du boulon vaut, selon (8.7) :

$$T_R = 0.8 f_{uB} A_s = 0.8 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 245 \text{ mm}^2 = 196 \cdot 10^3 \text{ N} = 196 \text{ kN}$$

La valeur de dimensionnement de la sollicitation, correspondant à 50 % de la résistance en traction du boulon, vaut donc :

$$T_d = 0.5 T_R = 0.5 \cdot 196 \text{ kN} = 98 \text{ kN}$$

Cisaillement du boulon

La résistance ultime du boulon soumis à un cisaillement dans la tige correspond à (8.4) :

$$V_R = 0.5 f_{uB} A = 0.5 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 314 \text{ mm}^2 = 157 \cdot 10^3 \text{ N} = 157 \text{ kN}$$

Sollicitation combinée

L'effort de cisaillement que peut alors encore reprendre le boulon est donné par (8.8) :

$$\left(\frac{T_d}{T_R / \gamma_R} \right)^2 + \left(\frac{V_d}{V_R / \gamma_R} \right)^2 = \left(\frac{98 \text{ kN}}{196 \text{ kN} / 1.1} \right)^2 + \left(\frac{V_d}{157 \text{ kN} / 1.1} \right)^2 \leq 1.0$$

d'où l'on peut tirer $V_d \leq 119 \text{ kN}$ (ce qui représente 76 % de V_R).

8.5 Résistance des pièces assemblées

Si la section 8.4 traitait de la résistance des boulons eux-mêmes, c'est la résistance des pièces assemblées à l'aide de boulons qui est examinée dans cette section. La figure 8.16 illustre les différents modes de ruine possibles des pièces assemblées, à savoir :

- rupture par pression latérale (§ 8.5.1), qui peut se manifester par une ovalisation du trou du boulon si la pince est grande ou par un arrachement de la pince si elle est petite;
- rupture de la section brute ou nette (§ 8.5.2), selon la disposition des boulons.

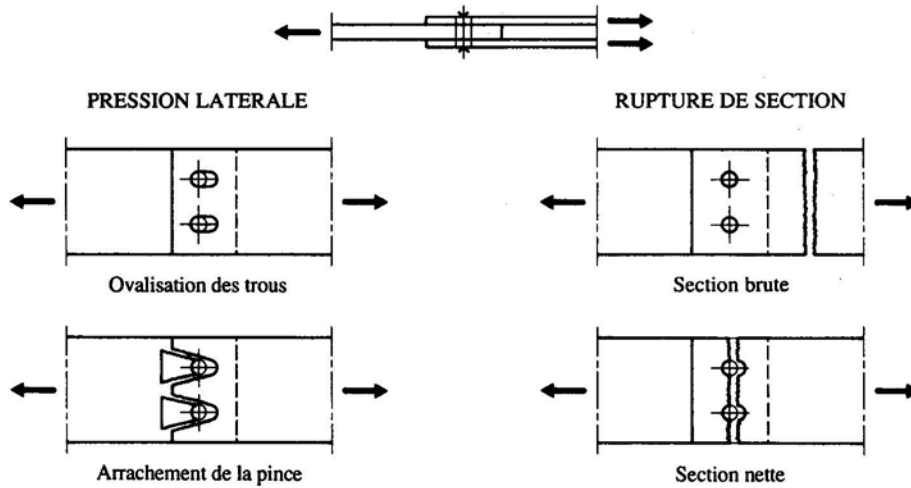


Fig. 8.16 Modes de rupture des pièces assemblées.

8.5.1 Pression latérale

La figure 8.17 montre schématiquement la position relative, à l'état chargé, d'un boulon et des pièces de l'assemblage de la figure 8.12. Rappelons que la position initiale des pièces assemblées présente un jeu entre le boulon et le bord des trous (§ 8.3.1). Lorsque l'on charge l'assemblage, on observe un glissement relatif des pièces qui se mettent en contact avec le boulon. La force F dans le tirant se transmet d'abord au boulon le long de la surface A-A et ensuite aux couvre-joints supérieur et inférieur le long des surfaces B-B'. Les pressions subies par les pièces au droit des surfaces de contact sont appelées *pressions latérales*.

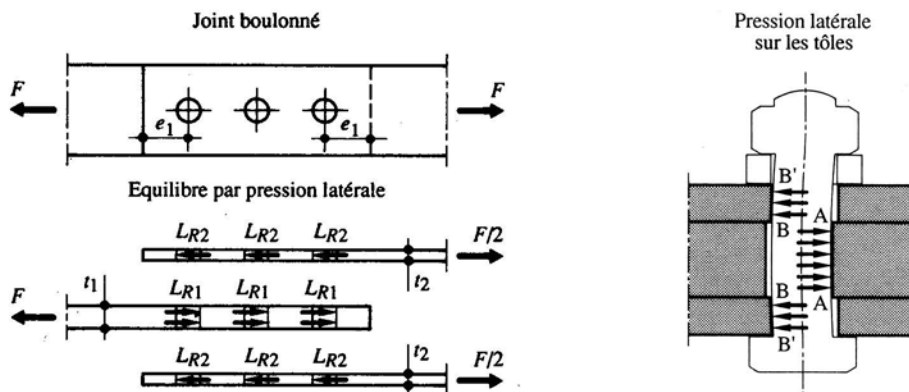


Fig. 8.17 Pressions latérales dans un assemblage boulonné.

La vérification de la pression latérale sur les pièces assemblées se base sur l'hypothèse que la pression de contact est uniformément répartie sur la hauteur des tôles, même si elle est en réalité variable avec des valeurs maximales aux points A et B. Comme la ruine par pression latérale peut se manifester notamment par l'arrachement de la pince e_1 , la résistance ultime à la pression latérale est influencée par la distance e_1 séparant les boulons du bord de la pièce dans la direction de l'effort. La vérification de la pression latérale consiste donc à éviter une ovalisation du trou ou un arrachement de la pince (fig. 8.16).

La résistance ultime à la pression latérale L_R de chacune des pièces assemblées s'exprime par :

$$L_R = \frac{1}{\gamma_M} \left(\frac{e_1}{d} \right) f_u d t = 0.8 \left(\frac{e_1}{d} \right) f_u d t \leq 2.4 f_u d t \quad (8.9)$$

L_R : résistance ultime à la pression latérale de la pièce assemblée

f_u : résistance à la traction de l'acier de la pièce assemblée

e_1 : pince dans la direction de l'effort

d : diamètre de la tige du boulon

t : épaisseur de la pièce assemblée (dans l'exemple de la figure 8.17, t_1 ou t_2 selon la pièce assemblée considérée)

γ_M : marge supplémentaire pour la résistance des moyens d'assemblage ($\gamma_M = 1.25$)

La relation (8.9) est valable pour $e_1 \leq 3 d$. En outre, les conditions de mise en place limitent la valeur de la pince à $e_1 \geq 1.4 d$. Il faut de plus prêter attention aux valeurs relatives de la pince e_1 et de l'entraxe p_1 des boulons : lorsque $p_1 < e_1 + d/2$, la norme SIA 161 utilise l'expression de la pression latérale donnée par (8.9) en remplaçant e_1 par $(p_1 - d/2)$. Signalons également que la pression latérale ne dépend pas du fait que les boulons soient précontraints ou non.

Comme de nombreux assemblages standardisés utilisent les pinces usuelles selon le tableau 8.10, à savoir $e_1 \approx 2 d$, la résistance ultime à la pression latérale s'exprime alors par :

$$L_R = 1.6 f_u d t \quad (8.10)$$

Les valeurs de résistance ultime à la pression latérale selon (8.9) sont données dans le tableau 8.33, en kN par mm d'épaisseur de tôle. Elles se trouvent également dans les tables SZS C5.

L'Eurocode 3 (§ 6.5.5) donne la formule suivante pour le calcul de la pression latérale, appelée en l'occurrence pression diamétrale :

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}}$$

$F_{b,Rd}$: résistance de calcul à la pression diamétrale

f_u : résistance à la traction de l'acier de la pièce assemblée

d : diamètre de la tige du boulon

t : épaisseur de la pièce assemblée

γ_{Mb} : facteur de résistance pour les assemblages boulonnés ($\gamma_{Mb} = \gamma_{M2} = 1.25$)

α : coefficient : $\alpha = \min \left(\frac{e_1}{3d_o}; \frac{p_1}{3d_o} - \frac{1}{4}; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1.0 \right)$

8.5.2 Sections brutes et nettes

En plus de la vérification des boulons et de la pression latérale, il est encore nécessaire de vérifier la résistance en section des pièces assemblées (fers-plats, couvre-joints, profilés, etc.). Il est pour cela nécessaire de définir deux types de sections (fig. 8.18) :

- la **section brute** A , qui est la section de la pièce hors de l'assemblage, perpendiculairement à la direction de l'effort;
- la **section nette** A_n , qui correspond à la section dans l'assemblage possédant la plus courte de toutes les lignes de rupture possibles (elle est donc plus petite que la section brute, et sa valeur dépend du nombre de trous qu'elle traverse et de leur disposition).

Pour les pièces assemblées comprimées, on admet que l'effort de compression se transmet par contact entre les tôles et les moyens d'assemblage : la vérification de la section brute est donc suffisante. Par contre, pour la vérification des éléments tendus faisant partie d'assemblages boulonnés, il est important de distinguer entre les sections brute et nette, dont la résistance ultime est donnée respectivement par :

$$\text{section brute : } F_R = f_y A \quad (8.11 \text{ a})$$

$$\text{section nette : } F_{Rn} = \frac{1}{\gamma_M} f_u A_n = 0.8 f_u A_n \quad (8.11 \text{ b})$$

F_R : résistance ultime de la section brute de la pièce assemblée

F_{Rn} : résistance ultime de la section nette de la pièce assemblée

f_y : limite d'élasticité de l'acier de la pièce assemblée

f_u : résistance à la traction de l'acier de la pièce assemblée

A : aire de la section brute

A_n : aire de la section nette

γ_M : marge supplémentaire pour la résistance des moyens d'assemblage ($\gamma_M = 1.25$)

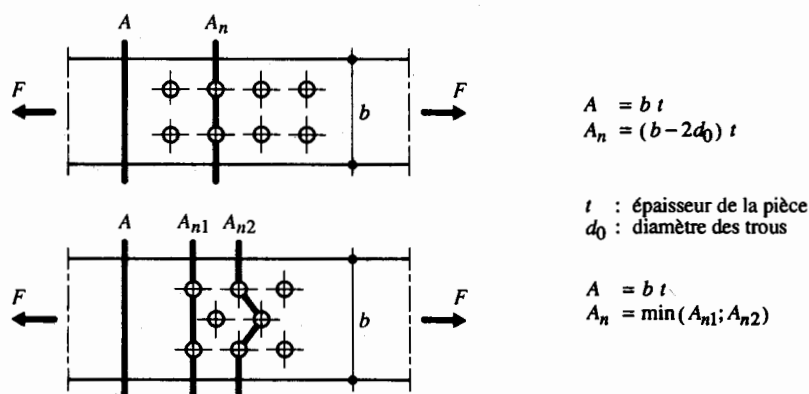


Fig. 8.18 Définitions de la section brute A et de la section nette A_n .

L'Eurocode 3 (§ 5.4.3) donne la formule suivante pour la résistance de calcul de la section nette :

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

A_{net} : aire de la section nette

γ_{M2} : facteur de résistance pour la vérification des assemblages ($\gamma_{M2} = 1.25$)

ce qui correspond à 1 % près à la « valeur de dimensionnement » (F_{Rn}/γ_R) obtenue avec (8.11 b).

8.6 Vérification d'un assemblage boulonné

8.6.1 Principes

Nous avons vu dans les sections 8.4 et 8.5 que la ruine d'un assemblage boulonné pouvait être atteinte par la rupture des boulons ou des pièces assemblées. Le type de ruine déterminant (celui qui apparaît le premier) dépend d'une part de la résistance de l'acier des pièces assemblées et des boulons, et d'autre part de leurs dimensions (diamètre, épaisseur, écartement, pince). D'une façon générale, on peut dire que la vérification de la sécurité structurale (8.1) d'un assemblage réalisé à l'aide de boulons non précontraints (le cas de l'assemblage précontraint est examiné à la section 8.7) nécessite le contrôle des modes de ruine suivants, relatifs aux boulons :

- cisaillement, avec (8.4),
- traction, avec (8.7),
- interaction traction - cisaillement, avec (8.8),

et aux pièces assemblées :

- pression latérale, avec (8.9),
- section brute, avec (8.11 a),
- section nette, avec (8.11 b).

Pour effectuer ces vérifications, il est extrêmement important d'établir un modèle de calcul de l'assemblage qui soit réaliste : le chapitre 9 traite de la modélisation et du dimensionnement des assemblages. En effet, malgré le fait que différentes approches soient possibles, il est recommandé de raisonner, pour le transfert des efforts, au niveau d'un boulon. Même si en général chacun des boulons de l'assemblage transmet une part égale de l'effort, il arrive dans certains types d'assemblages que tous les boulons ne soient pas sollicités de la même façon : on vérifiera dans ce cas la résistance du boulon le plus sollicité, et on mettra partout ailleurs des boulons du même type, pour une question d'homogénéité de l'assemblage.

Lorsque le cisaillement du boulon détermine la résistance de l'assemblage, une augmentation de celle-ci peut être obtenue en augmentant le nombre de boulons ou en choisissant des boulons d'un plus grand diamètre ou des boulons en acier à plus haute résistance. Dans le cas où la résistance de l'assemblage est déterminée par la pression latérale des tôles, une augmentation de cette résistance est possible avec une augmentation de l'épaisseur t des tôles (ou éventuellement de la pince e_1).

Il est important de préciser que lorsque la section nette est déterminante, aucune rotation plastique et par conséquent aucune redistribution des efforts intérieurs (calcul PP (tab. 2.27)) ne peuvent être prises en considération dans cette zone.

L'exemple 8.3 illustre les principes de vérification d'un assemblage boulonné pour un cas simple de joint de tirant, pour lequel différentes approches sont possibles. Il est cependant important de préciser que nous recommandons d'utiliser les principes de vérification suivants :

- pour les boulons (cisaillement, traction ou interaction), raisonner sur une section du boulon (en l'occurrence celle qui est la plus sollicitée);
- pour les pièces assemblées (pression latérale, sections brute ou nette), raisonner de façon séparée pour chaque pièce assemblée.

Ces principes de vérification seront appliqués aux assemblages étudiés au chapitre 9.

Exemple 8.3 Vérification de l'assemblage d'un tirant

Soit l'assemblage boulonné d'un tirant en acier Fe E 235 (fig. 8.19) devant transmettre une charge F ayant une valeur de dimensionnement de $F_d = 650$ kN. Les boulons sont de type M 20 en acier 4.6, dont on admet que les sections cisillées sont situées dans leur tige.

Vérifier que le nombre de boulons ainsi que les fers plats de l'assemblage sont suffisants pour transmettre cette charge.

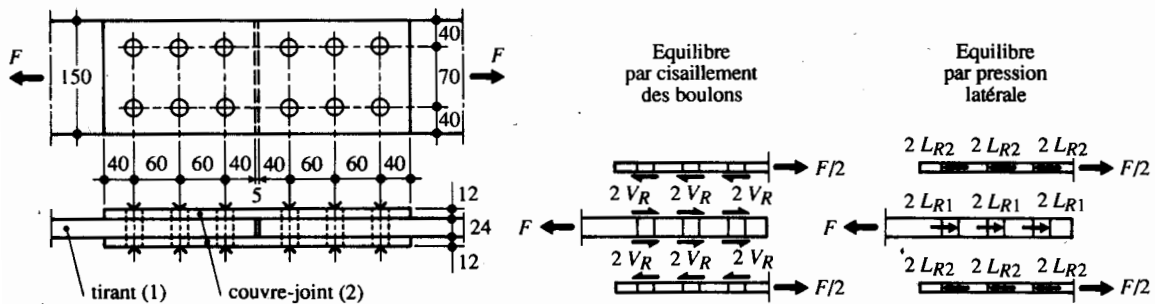


Fig. 8.19 Vérification de l'assemblage d'un tirant.

Le but de cet exemple est d'illustrer les différentes approches possibles pour vérifier un assemblage boulonné relativement simple, même si nous recommandons (voir ci-dessus) de toujours raisonner pour une section cisillée d'un boulon ou séparément pour chaque pièce assemblée.

Résistance au cisaillement des boulons

La résistance au cisaillement d'une section cisillée d'un boulon M20 en acier 4.6 est donnée par (8.4) :

$$V_R = 0.5 f_{uB} A = 0.5 \cdot 400 \text{ N/mm}^2 \cdot 314 \text{ mm}^2 = 62.8 \cdot 10^3 \text{ N} = 62.8 \text{ kN}$$

L'équilibre par cisaillement (fig. 8.19) des fers plats s'exprime de la façon suivante, selon que l'on considère le tirant (1) ou un couvre-joint (2) :

- Equilibre du tirant (1) :

$$F_d \leq 6 \cdot 2 V_R / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur l'ensemble des boulons,}$$

$$F_d / 6 \leq 2 V_R / \gamma_R, \text{ en considérant la force agissant sur chaque boulon doublement cisailé,}$$

$$F_d / 12 \leq V_R / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur une section cisillée d'un boulon.}$$

On constate que ces différentes vérifications aboutissent au même résultat. Numériquement, la dernière d'entre elles montre que la résistance au cisaillement des boulons est suffisante :

$$650 \text{ kN} / 12 = 54.2 \text{ kN} \leq 62.8 \text{ kN} / 1.1 = 57.1 \text{ kN}$$

- Equilibre d'un couvre-joint (2) :

$$F_d / 2 \leq 6 \cdot 1 V_R / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur l'ensemble des boulons,}$$

$$(F_d / 2) / 6 \leq 1 \cdot 1 V_R / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur une section cisailée d'un boulon.}$$

Ces deux vérifications aboutissent au même résultat, par ailleurs identique dans le cas particulier de cet exemple à celui obtenu avec l'équilibre du tirant (1).

Résistance à la pression latérale

La résistance à la pression latérale vaut respectivement sur le tirant et les couvre-joints (8.10) :

$$L_{R1} = 1.6 f_u d t_1 = 1.6 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 \cdot 20 \text{ mm} \cdot 24 \text{ mm} = 276 \cdot 10^3 \text{ N} = 276 \text{ kN}$$

$$L_{R2} = 1.6 f_u d t_2 = 1.6 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 \cdot 20 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm} = 138 \cdot 10^3 \text{ N} = 138 \text{ kN}$$

L'équilibre par pression latérale (fig. 8.19) des fers plats s'exprime de la façon suivante, selon que l'on considère le tirant (1) ou un couvre-joint (2) :

- Equilibre du tirant (1) :

$$F_d \leq 6 L_{R1} / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur l'ensemble des boulons,}$$

$$F_d / 6 \leq L_{R1} / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur chaque boulon.}$$

- Equilibre d'un couvre-joint (2) :

$$F_d / 2 \leq 6 L_{R2} / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur l'ensemble des boulons,}$$

$$(F_d / 2) / 6 \leq L_{R2} / \gamma_R, \text{ en considérant la force qui agit sur chaque boulon.}$$

On constate, en l'occurrence parce que l'épaisseur des couvre-joints est exactement la moitié de celle du tirant, que les vérifications de l'équilibre du tirant (1) et d'un couvre-joint (2) aboutissent au même résultat. Numériquement, la dernière d'entre elles montre que la vérification à la pression latérale est satisfaite :

$$650 \text{ kN} / 12 = 54.2 \text{ kN} \leq 138 \text{ kN} / 1.1 = 125 \text{ kN}$$

Vérification des sections brute et nette

La résistance des fers plats correspond à la valeur minimale des résistances des sections brute et nette. Il s'agit donc de vérifier :

$$F_{di} \leq \min(F_{Ri}; F_{Rni}) / \gamma_R$$

Les résistances des sections brute et nette valent pour le tirant (1) :

$$F_{R1} = f_y A_1 = 235 \text{ N/mm}^2 \cdot 150 \text{ mm} \cdot 24 \text{ mm} = 846 \cdot 10^3 \text{ N} = 846 \text{ kN}$$

$$F_{Rn1} = 0.8 f_u A_{n1} = 0.8 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 (150 \text{ mm} - 2 \cdot 22 \text{ mm}) 24 \text{ mm} = 733 \cdot 10^3 \text{ N} = 733 \text{ kN}$$

et pour les couvre-joints (2) :

$$F_{R2} = f_y A_2 = 235 \text{ N/mm}^2 \cdot 150 \text{ mm} \cdot 12 \text{ mm} = 423 \cdot 10^3 \text{ N} = 423 \text{ kN}$$

$$F_{Rn2} = 0.8 f_u A_{n1} = 0.8 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 (150 \text{ mm} - 2 \cdot 22 \text{ mm}) 12 \text{ mm} = 366 \cdot 10^3 \text{ N} = 366 \text{ kN}$$

On peut ainsi vérifier que les sections du tirant et des couvre-joints sont suffisantes :

$$F_{d1} = F_d = 650 \text{ kN} \leq \min(F_{R1}, F_{Rn1}) / \gamma_R = 733 \text{ kN} / 1.1 = 666 \text{ kN}$$

$$F_{d2} = F_d / 2 = 325 \text{ kN} \leq \min(F_{R2}, F_{Rn2}) / \gamma_R = 366 \text{ kN} / 1.1 = 333 \text{ kN}$$

On remarque dans le cas particulier de cet exemple que les vérifications du tirant et des couvre-joints aboutissent au même résultat. Cela s'explique parce que leurs largeurs sont identiques tandis que l'épaisseur des couvre-joints est exactement la moitié de celle du tirant. Comme ceci n'est pas forcément le cas d'une façon générale, on prendra soin de vérifier chaque fois l'élément le moins résistant de l'assemblage.

8.6.2 Effet de la longueur de l'assemblage

Il convient de remarquer que l'hypothèse d'une répartition uniforme de l'effort sur tous les boulons (calcul plastique) n'est en fait pas tout à fait exacte. Sous l'effet d'une charge, les tôles viennent d'abord se mettre en contact avec les boulons après le glissement initial des pièces de l'assemblage. Quand la charge extérieure augmente, les tôles se déforment de manière inégale sur la longueur de l'assemblage. Les plus grandes déformations se situent aux extrémités de l'assemblage; une redistribution uniforme des efforts ne peut donc pas se faire, et les boulons des extrémités sont par conséquent plus sollicités que les boulons centraux (fig. 8.20). Ce phénomène est d'autant plus prononcé que le nombre de boulons dans la direction de l'effort est élevé et que la distance qui les sépare est grande. Des essais ont montré que les boulons

situés aux extrémités de l'assemblage se rompent les premiers; les charges qu'ils transmettaient sont alors reportées sur les boulons suivants qui se rompent à leur tour.

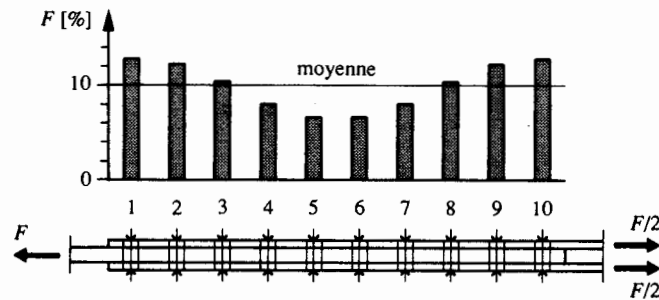


Fig. 8.20 Répartition de l'effort sur les boulons dans un assemblage de grande longueur.

L'hypothèse que tous les boulons d'un assemblage sollicité au cisaillement transmettent le même effort n'est donc pas tout à fait juste. La résistance ultime théorique de l'assemblage que l'on détermine avec cette hypothèse est supérieure à la résistance ultime réelle. Même si la norme SIA 161 ne prescrit rien à ce sujet, une réduction devrait être considérée pour des assemblages avec plus de cinq boulons sur le même axe dans la direction de l'effort, pour autant que les entraxes normaux entre boulons soient respectés.

L'Eurocode 3 (§ 6.5.10) tient compte des assemblages longs par un coefficient de réduction β_{L_f} de la résistance au cisaillement donné pour le cas où la distance L_j entre le centre des boulons d'extrémités, mesurée dans la direction de l'effort, est supérieure à $15 d$:

$$\beta_{L_f} = 1 - \frac{L_j - 15 d}{200 d}, \text{ mais } 0.75 \leq \beta_{L_f} \leq 1.0$$

Cette disposition ne s'applique pas dans le cas où l'on est assuré d'une répartition uniforme de transmission d'effort sur la longueur de l'assemblage, par exemple pour la transmission de l'effort de cisaillement entre l'âme d'une section et la semelle.

8.6.3 Effet de la dimension des trous

Pour tenir compte des tolérances de fabrication ou de montage, de même que des assemblages devant permettre une dilatation ou assurant un raccord sur une construction existante, il peut s'avérer nécessaire de permettre un déplacement en prévoyant :

- des trous agrandis présentant un jeu a plus grand que le jeu normal,
- des trous oblongs courts ou longs.

Les tables SZS C5 se réfèrent aux indications de l'Eurocode 3 (tab. 8.21) pour les jeux usuels des trous oblongs, définis par l'entraxe a des centres de perçage utilisés pour les réaliser (fig. 8.22).

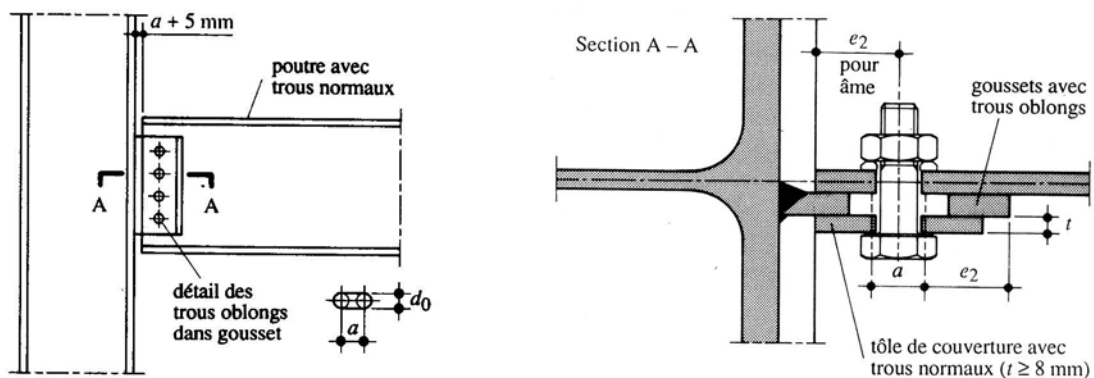
L'Eurocode 3 (§ 7.5.2) propose pour les trous agrandis ou oblongs les jeux a donnés dans le tableau 8.21.

Tableau 8.21 Jeux a des trous agrandis et oblongs selon l'Eurocode 3.

Type de trou	M12	M16	M20	M24	M27
agrandi	3 mm	4 mm	4 mm	6 mm	8 mm
oblong court	4 mm	6 mm	6 mm	8 mm	10 mm
oblong long	18 mm	24 mm	30 mm	36 mm	43 mm

Dans le cas de l'utilisation de trous agrandis ou oblongs, il est nécessaire de disposer au choix, selon les dispositions de construction, entre la tête du boulon et la tôle ou entre l'écrou et la tôle :

- une rondelle trempée de dimension adéquate,
- une tôle de couverture avec des trous normaux (fig. 8.22) lorsque les trous agrandis ou oblongs se situent sur les tôles extérieures de l'assemblage.

**Fig. 8.22** Assemblage avec des trous oblongs.

La transmission des efforts à travers les assemblages boulonnés avec des trous agrandis ou oblongs peut être totalement modifiée. Il est donc important d'adopter un modèle de calcul qui tienne compte de ces nouvelles conditions, notamment d'une diminution de la résistance au glissement (§ 8.7.2).

8.7 Vérification d'un assemblage précontraint

8.7.1 Principes

Comportement

Pour certaines constructions, le déplacement relatif des pièces de l'assemblage n'est pas toléré sous l'effet des charges de service (§ 8.2.2). Rappelons que cette possibilité de mouvement est possible à cause

du jeu entre les boulons et les trous; le mouvement peut déjà se produire pour une charge relativement faible. Afin de l'empêcher, il existe deux possibilités :

- prévoir des boulons ajustés, pour lesquels le jeu entre les boulons et les trous n'est que de 0.3 mm (§ 8.3.1);
- prévoir des boulons précontraints, de manière à ce que le frottement entre les pièces assemblées empêche le glissement de l'assemblage avant que la charge appliquée n'ait atteint la valeur pour laquelle on veut éviter un glissement.

Le comportement des assemblages avec des *boulons précontraints* est influencé par le frottement entre les pièces assemblées. Du fait de la précontrainte qui agit sur les éléments assemblés, les pièces, dans une première phase, ne peuvent pas glisser les unes par rapport aux autres et ne viennent donc pas en contact avec la tige du boulon. Par conséquent, la transmission des forces n'a pas lieu par cisaillement et pression latérale, mais s'effectue par frottement entre les éléments (fig. 8.23). Le frottement entre les pièces est proportionnel à la force de précontrainte des boulons et dépend de l'état de surface des pièces assemblées.

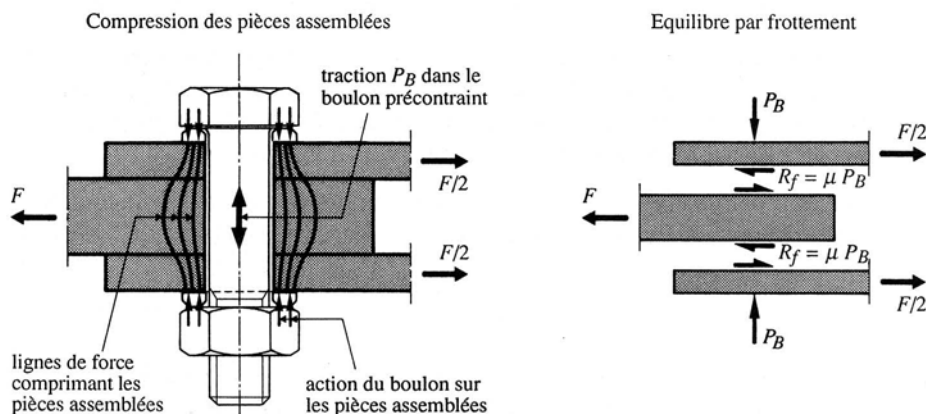


Fig. 8.23 Mécanisme de transmission d'un effort par frottement.

Dans une deuxième phase, si l'on augmente la charge, les pièces vont glisser les unes par rapport aux autres (lorsque le frottement est vaincu) et se mettre en contact avec la tige des boulons. A partir de cette charge, l'assemblage résiste par cisaillement des boulons et pression latérale des tôles. La résistance ultime est alors dictée par les mêmes critères que ceux provoquant la ruine des assemblages non précontraints.

La figure 8.24 représente la courbe charge-déplacement pour quelques moyens d'assemblage sollicités jusqu'à la ruine. La courbe relative aux boulons précontraints montre bien les trois phases du comportement de l'assemblage précontraint, soit :

- transmission des forces par frottement; dans cette phase, l'assemblage précontraint présente une rigidité élevée nécessaire à certaines constructions à l'état de service;
- glissement relatif des pièces lorsque la résistance par frottement est vaincue;
- transmission des forces par cisaillement et pression latérale jusqu'à l'état de ruine.

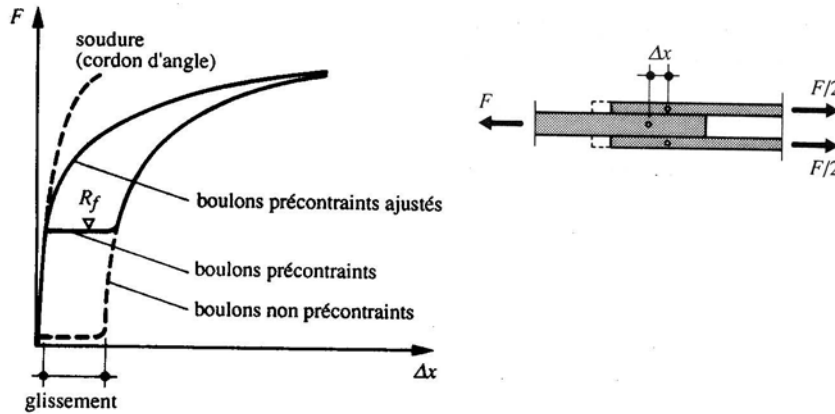


Fig. 8.24 Courbes charge-déplacement de quelques moyens d'assemblage.

Vérification

Le comportement des assemblages illustré à la figure 8.24 montre bien que leurs résistances ultimes ne dépendent pas du fait que les boulons soient ajustés ou non, ou bien qu'ils soient précontraints ou non. C'est donc souvent le comportement à l'état de service qui caractérise un assemblage précontraint. Les assemblages devant résister par frottement nécessitent donc une double vérification :

- Vérification de l'*aptitude au service*, avec la valeur de service des sollicitations S_{ser} et la résistance au glissement R_f donnée au paragraphe 8.7.2 par (8.15) ou (8.16) selon le type de trou :

$$S_{ser} \leq R_f \quad (8.12)$$

- Vérification de la *sécurité structurale*, avec les valeurs de dimensionnement S_d des sollicitations (les différentes conditions à remplir sont celles mentionnées au paragraphe 8.6.1) :

$$S_d \leq \frac{R}{\gamma_R} \quad (8.13)$$

Dans le cas relativement rare d'un assemblage devant assurer à l'état limite ultime la transmission d'un effort sans aucun glissement et conçu avec des trous agrandis ou oblongs dans le sens de l'effort, la sécurité structurale sera vérifiée à l'aide d'un critère de déformation, où la valeur de dimensionnement S_d est comparée à la résistance au glissement R_f donnée au paragraphe 8.7.2 par (8.16) :

$$S_d \leq \frac{R_f}{\gamma_R} \quad (8.14)$$

Dans le cas de trous oblongs perpendiculaires à la direction de l'effort à transmettre, la sécurité structurale se vérifie de la même façon que pour un assemblage avec des trous normaux (cisaillement des boulons et pression latérale selon respectivement les paragraphes 8.4.2 et 8.5.1).

8.7.2 Résistance au glissement

La résistance au glissement est proportionnelle à la force de précontrainte P_B du boulon (§ 8.7.3), ainsi qu'au coefficient de frottement μ des surfaces en contact. La valeur de calcul de la résistance au glissement R_f vaut donc, par surface de frottement :

$$R_f = \mu P_B \quad (8.15)$$

Le coefficient de frottement μ dépend de l'état des surfaces en contact. Lors de la réalisation d'un assemblage devant résister par frottement, il faut donc apporter un soin particulier à la préparation de ces surfaces afin que le coefficient de frottement admis dans les calculs soit conforme à la réalité.

Pour les structures de bâtiments, pour lesquelles on ne prépare en général pas les surfaces des éléments assemblés de façon particulière, on peut admettre un coefficient de frottement $\mu = 0.25$. Pour des surfaces en acier nettoyées par sablage (degré de préparation Sa 2), de même que pour des surfaces protégées par des peintures à base de silicates de zinc, un coefficient de frottement $\mu = 0.4$ peut être utilisé selon la norme SIA 161. Pour d'autres types de surfaces, la valeur du coefficient de frottement μ est à déterminer sur la base d'essais; l'Eurocode 3 (tab. 8.25) et la référence [8.3] contiennent quelques indications complémentaires à ce sujet, tandis que les valeurs numériques de la résistance au glissement R_f obtenue avec (8.15) sont données au tableau 8.34 pour un coefficient de frottement μ égal à 0.25 et 0.4.

La résistance au glissement donnée par (8.15) est valable pour des boulons dont le trou est réalisé avec un jeu normal (§ 8.3.1). Pour des trous agrandis ou oblongs dans le sens de l'effort, la résistance au glissement est plus basse, du fait d'une plus faible surface de frottement que dans le cas de trous normaux :

$$\text{trous agrandis ou oblong courts :} \quad R_f = 0.85 \mu P_B \quad (8.16a)$$

$$\text{trous oblongs longs :} \quad R_f = 0.7 \mu P_B \quad (8.16b)$$

L'Eurocode 3 (§ 6.5.8) définit la résistance de calcul au glissement $F_{s,Rd}$ d'un boulon à haute résistance précontraint de la façon suivante, par surface de frottement :

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,Cd}$$

$F_{p,Cd}$: précontrainte de calcul (correspond à la force de précontrainte P_B définie par (8.17))

k_s : coefficient dépendant de la forme du trou

$k_s = 1.0$ pour les trous normaux

$k_s = 0.85$ pour les trous agrandis ou oblongs courts

$k_s = 0.7$ pour les trous oblongs longs

μ : coefficient de frottement dépendant de la classe de traitement de surface (tab. 8.25)

γ_{Ms} : coefficient partiel de sécurité dépendant de l'orientation du trou et de l'état limite examiné

$\gamma_{Ms} = 1.40$ pour l'état limite ultime des boulons placés dans des trous agrandis ou oblongs parallèles à l'axe de l'effort à transmettre

$\gamma_{Ms} = 1.25$ pour l'état limite ultime des boulons placés dans des trous normaux ou oblongs perpendiculaires à l'axe de l'effort à transmettre

$\gamma_{Ms} = 1.10$ pour l'état limite de service des boulons placés dans des trous normaux ou oblongs perpendiculaires à l'axe de l'effort à transmettre

Tableau 8.25 Classes de traitement de surface et coefficients de frottement selon l'Eurocode 3.

Type de surface	Classe	μ
Surface découpée par grenailage ou sablage • avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes et sans piqûres de corrosion • métallisées par projection d'aluminium • métallisées par projection d'un revêtement à base de zinc garantissant un coefficient de frottement $\mu \geq 0.5$	A	0.5
Surface découpée par grenailage ou sablage et recouvertes d'une couche de peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80 mm	B	0.4
Surface nettoyée par brossage métallique ou à la flamme avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes	C	0.3
Surfaces non traitées	D	0.2

8.7.3 Force de précontrainte

Pour réaliser un assemblage précontraint, on introduit lors de la mise en place des boulons (§ 8.3.2) une force de précontrainte P_B dont la valeur à considérer dans les calculs vaut :

$$P_B = 0.7 f_{uB} A_s \quad (8.17)$$

f_{uB} : résistance ultime de l'acier du boulon

A_s : section résistante

C'est cette précontrainte qui crée autour des boulons la pression sur les pièces assemblées (fig. 8.23) nécessaire à la résistance de l'assemblage par frottement.

Exemple 8.4 Boulons précontraints travaillant par frottement

Soit une liaison poutre-colonne réalisée à l'aide de boulons M 20 en acier 10.9 précontraints (fig. 8.26). La valeur de service de courte durée de l'effort tranchant V à transmettre vaut $V_{ser,court} = 250$ kN, tandis que sa valeur de dimensionnement vaut $V_d = 400$ kN. On admettra un coefficient de frottement $\mu = 0.4$.

Déterminer le nombre de boulons précontraints nécessaire à la transmission par frottement de la réaction d'appui $V_{ser,court}$. Vérifier ensuite que ce nombre est suffisant pour assurer la transmission de la valeur de dimensionnement V_d .

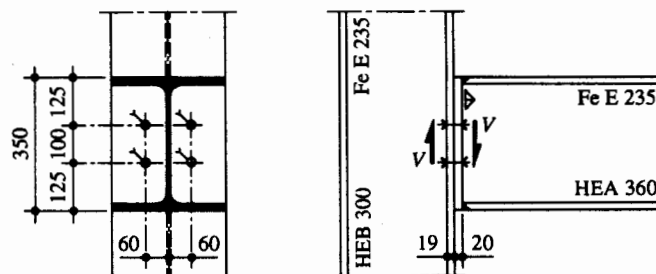


Fig. 8.26 Boulons précontraints cisailés.

Aptitude au service

La force de précontrainte P_B introduite dans chaque boulon et la résistance au glissement R_f correspondante sont données respectivement par (8.17) et (8.15) :

$$P_B = 0.7 f_{uB} A_s = 0.7 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 245 \text{ mm}^2 = 171.5 \cdot 10^3 \text{ N} = 171.5 \text{ kN}$$

$$R_f = \mu P_B = 0.4 \cdot 171.5 \text{ kN} = 68.6 \text{ kN}$$

Comme il n'y a qu'une surface de frottement par boulons, le nombre n de boulons nécessaires pour éviter le glissement (afin d'assurer l'aptitude au service) est obtenu en vérifiant la relation suivante, basée sur (8.12) (trous normaux) :

$$Q_{ser,court} \leq n R_f \text{ d'où } n \geq \frac{Q_{ser,court}}{R_f} = \frac{250 \text{ kN}}{68.6 \text{ kN}} = 3.6$$

Il faut donc quatre boulons M 20 en acier 10.9 pour transmettre sans glissement la réaction d'appui $Q_{ser,court}$.

Sécurité structurale

Si l'on admet que le cisaillement a lieu dans la tige du boulon, la résistance d'une section cisailée d'un boulon M 20 en acier 10.9 vaut (8.4) :

$$V_R = 0.5 f_{uB} A = 0.5 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 314 \text{ mm}^2 = 157 \cdot 10^3 \text{ N} = 157 \text{ kN}$$

Une vérification basée sur (8.13) montre que les quatre boulons nécessaires pour satisfaire l'aptitude au service sont suffisants pour assurer la sécurité structurale de l'assemblage :

$$Q_d = 400 \text{ kN} \leq \frac{4 V_R}{\gamma_R} = \frac{4 \cdot 157 \text{ kN}}{1.1} = 570 \text{ kN}$$

Etant donné la géométrie de l'assemblage ($e_1 > 3d$), on peut vérifier la pression latérale avec la valeur maximale donnée par (8.9), à savoir :

$$L_R = 2.4 f_u d t = 2.4 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 \cdot 20 \text{ mm} \cdot 19 \text{ mm} = 328 \cdot 10^3 \text{ N} = 328 \text{ kN}$$

Le calcul de la résistance à la pression latérale montre alors que l'assemblage prévu avec quatre boulons est suffisamment résistant :

$$V_d = 400 \text{ kN} \leq \frac{4 L_R}{\gamma_R} = \frac{4 \cdot 328 \text{ kN}}{1.1} = 1192 \text{ kN}$$

8.7.4 Comportement sous un effort de traction

Rappelons d'abord que la résistance ultime d'un boulon en traction est directement proportionnelle à la résistance à la traction f_{uB} de l'acier du boulon. Etant donné que les boulons précontraints sont déjà sollicités par la précontrainte initiale P_B à une contrainte au moins égale à $0.7 f_{uB}$ (8.17), on pourrait en déduire que l'assemblage ne peut reprendre qu'une faible force de traction extérieure.

En fait, ceci n'est pas le cas, car ce ne sont pas les boulons seuls qui transmettent la force extérieure de traction (comme c'est le cas pour les boulons non précontraints), mais l'ensemble du joint formé des boulons tendus et des pièces comprimées de l'assemblage. La force extérieure N est compensée en grande partie par décompression des pièces assemblées; il ne se produit par conséquent qu'une faible augmentation de la traction dans les boulons, comme il le sera démontré plus loin (8.22). La figure 8.27 montre les différentes phases du comportement d'un assemblage précontraint soumis à une force extérieure de traction N :

- la position initiale, avant la mise en précontrainte du boulon, est illustrée à la figure 8.27(a); l'effort de traction T_B dans le boulon est encore nul;
- la mise en précontrainte du boulon est représentée à la figure 8.27(b); le boulon est soumis à un effort de traction égal à la force de précontrainte P_B , et les pièces assemblées, soumises à une pression de contact p_c , se compriment d'une grandeur e ;

- l'application de la force extérieure N est illustrée à la figure 8.27(c); elle crée une décompression Δe des pièces assemblées, qui a pour effet de réduire la pression de contact de Δp_c et d'augmenter l'effort de traction dans le boulon de ΔT_B ;
- le cas du boulon précontraint par une force P_B soumis à une force extérieure N est représenté à la figure 8.27(d); il s'agit de la superposition des cas (b) et (c) (on admet que le décollement des pièces n'a pas encore eu lieu);
- la situation après le décollement des pièces assemblées jusqu'à la ruine de l'assemblage est décrite à la figure 8.27(e); comme il n'y a plus de pression de contact entre les pièces assemblées, l'effort de traction T_B dans le boulon est égal à la force extérieure N appliquée.

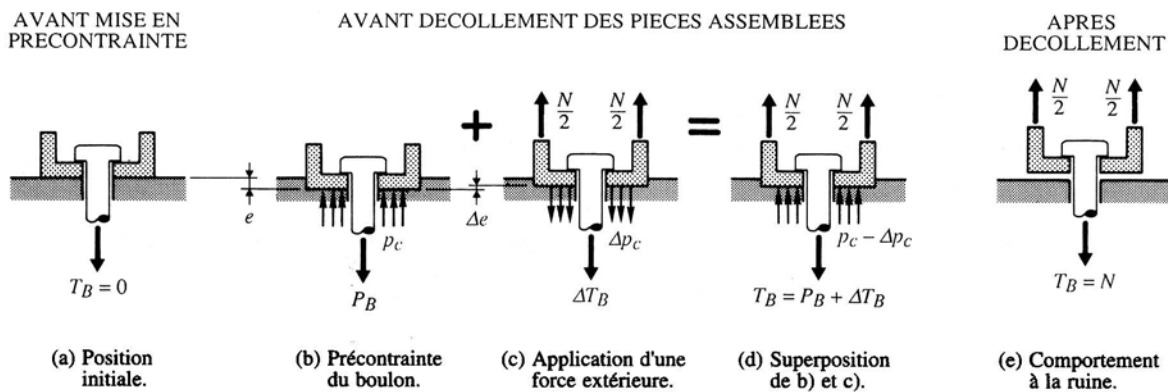


Fig. 8.27 Comportement d'un assemblage précontraint sollicité en traction.

Pour bien comprendre le comportement des boulons précontraints, examinons d'abord l'équilibre des forces dans l'assemblage précontraint sans force extérieure (fig. 8.27(b)), qui s'écrit :

$$P_B = \int_A p_c dA \quad (8.18)$$

P_B : force de précontrainte dans le boulon

p_c : pression de contact entre les pièces assemblées

A : surface de contact sur laquelle agit la pression de contact entre les pièces assemblées

Lorsqu'une force extérieure N agit sur l'assemblage (fig. 8.27(c)), elle a pour effet de diminuer de Δp_c la pression de contact entre les pièces assemblées et de provoquer une faible augmentation ΔT_B de la traction dans le boulon. Cela s'explique par les rigidités différentes du boulon et des pièces assemblées, comprimées par la précontrainte : pour les assemblages usuels, la rigidité K_C des pièces assemblées est en effet de 10 à 20 fois supérieure à la rigidité K_B des boulons. La plus grande partie de la force extérieure est par conséquent absorbée par la décompression Δp_c des pièces assemblées, tandis que l'effort de traction dans le boulon n'est augmenté que d'une faible quantité ΔT_B (fig. 8.27(d)).

Lors de l'application d'une force extérieure (fig. 8.27(c)), la décompression Δe des pièces assemblées est égale à l'allongement Δe du boulon : on respecte ainsi la compatibilité des déformations. Avec l'hypothèse d'un comportement élastique, la variation des forces agissant dans chacun des deux éléments est proportionnelle à leur rigidité K , pour une variation de longueur Δe donnée :

$$\int_A \Delta p_c dA = K_c \Delta e \quad (8.19 a)$$

$$\Delta T_B = K_B \Delta e \quad (8.19 b)$$

Δp_c : variation de la pression de contact dans les pièces assemblées

ΔT_B : variation de la force de traction dans le boulon

K_c : rigidité des pièces assemblées

K_B : rigidité des boulons

L'équilibre des forces, toujours dans le cas de l'application d'une force extérieure N (fig. 8.27(c)), s'exprime quant à lui par :

$$N = \int_A \Delta p_c dA + \Delta T_B \quad (8.20)$$

En éliminant Δe de (8.19), on peut exprimer la variation de la pression de contact par :

$$\int_A \Delta p_c dA = \frac{K_c}{K_B} \Delta T_B \quad (8.21)$$

Avec (8.21), la grandeur de l'augmentation ΔT_B de l'effort de traction dans le boulon peut alors s'établir d'après l'équilibre des forces exprimé par (8.20) :

$$\Delta T_B = \frac{N}{\left(1 + \frac{K_c}{K_B}\right)} \quad (8.22)$$

Ceci montre (avec $K_c/K_B \approx 10$ à 20) que ce n'est qu'environ 5 à 10 % de la force extérieure N qui est reprise par le boulon précontraint, le reste l'étant par la décompression des pièces assemblées, tant que celles-ci sont encore en contact.

Le décollement des pièces assemblées correspond au moment où la pression de contact $p_c - \Delta p_c$ entre les pièces assemblées (fig. 8.27(d)) est nulle, ou, autrement dit, lorsque la décompression Δp_c atteint la valeur initiale p_c créée par la précontrainte. Avec (8.18), le décollement des pièces assemblées correspond donc au moment où la variation de la force sur les pièces assemblées est égale à la précontrainte du boulon :

$$\int_A \Delta p_c dA = P_B \quad (8.23)$$

L'équilibre des forces correspondant à cette situation (fig. 8.27(d)) permet alors d'exprimer que $N = P_B + \Delta T_B$. Au moment du décollement des pièces assemblées, la force de traction extérieure N_1 est donnée, avec (8.21) et (8.23), par :

$$N_1 = P_B + P_B \frac{K_B}{K_C} = P_B \left(1 + \frac{K_B}{K_C} \right) \quad (8.24)$$

Etant donné l'ordre de grandeur du rapport des rigidités des pièces assemblées et des boulons, (8.24) montre que la force extérieure N_1 qui provoque le décollement des pièces assemblées est supérieure de 5 à 10 % à la force de précontrainte P_B .

Sur la base des équations ci-dessus, le comportement d'un assemblage précontraint peut être décrit, jusqu'au moment où le décollement des pièces assemblées a lieu, avec le schéma de la figure 8.28. La mise en précontrainte introduit dans le boulon un effort de traction P_B sans qu'une force extérieure ne soit appliquée. L'application d'une force extérieure N n'augmente ensuite que légèrement l'effort de traction dans le boulon, selon (8.22), jusqu'au décollement des pièces assemblées, qui se produit pour une force extérieure égale à N_1 . Après la séparation des pièces assemblées, l'effort normal de traction T_B sollicitant le boulon est égal à la force extérieure N (fig. 8.27(e)), et le comportement de l'assemblage est identique à celui d'un assemblage non précontraint. On remarque également que la force extérieure de traction N_u correspondant à la ruine du boulon est indépendante de la grandeur de la force de précontrainte P_B .

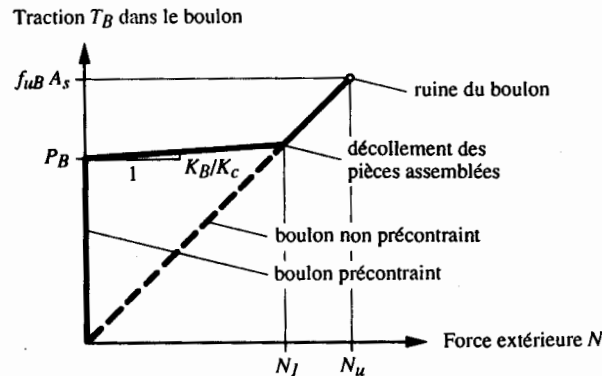


Fig. 8.28 Evolution de la force de traction dans un boulon précontraint en fonction de la force extérieure.

8.7.5 Effet de la fatigue

Le comportement d'un assemblage précontraint, tel qu'il a été expliqué ci-dessus, permet de comprendre pourquoi il est essentiel que les boulons tendus soient précontraints dans des assemblages soumis à des efforts variables répétés. La relation (8.22) montre en effet que seule une petite part (5 à 10 %) de la force de traction extérieure est reprise directement par le boulon précontraint. Comme le paramètre principal dont dépend la résistance à la fatigue d'un détail de construction est la différence de contraintes (chap. 13), due en l'occurrence à la variation ΔT_B de l'effort de traction dans les boulons, on a donc tout intérêt à précontraindre les boulons tendus afin que la différence de contraintes reste en dessous de leur résistance à la fatigue.

Cela est visualisé à la figure 8.29, qui montre dans quelle mesure une charge de fatigue ΔN_{fat} (dont la valeur maximale doit rester inférieure à celle correspondant au décollement des pièces assemblées) fait varier l'effort de traction T_B dans un boulon. La variation ΔT_B de l'effort de traction dans un boulon précontraint est beaucoup plus faible que celle qu'il y aurait dans un assemblage avec des boulons non précontraints, dans lequel l'intégralité de la force de traction extérieure est reprise par les boulons.

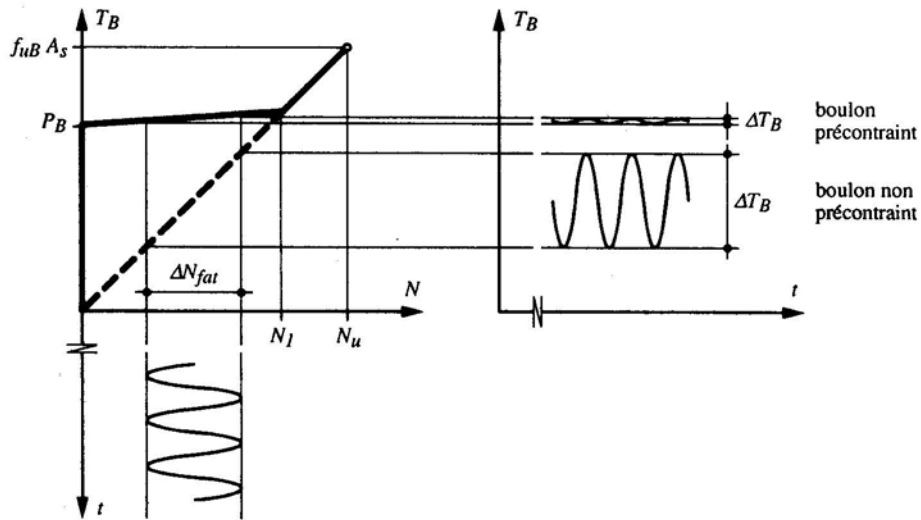


Fig. 8.29 Variations de l'effort de traction dans un boulon précontraint et dans un boulon non précontraint sous l'effet d'une charge de fatigue.

8.7.6 Force de levier

Un assemblage dont les boulons travaillent en traction doit être composé de tôles suffisamment rigides. Si les tôles n'ont pas une épaisseur suffisante, elles peuvent en effet fléchir comme le montre schématiquement la figure 8.30. Cette déformation de plaque a pour conséquence la création d'une force H , appelée *force de levier*.

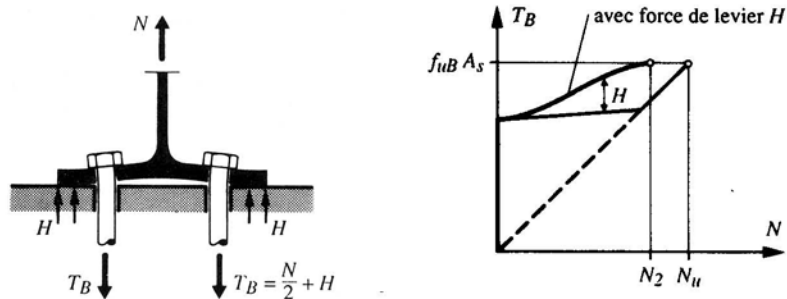


Fig. 8.30 Force de levier dans les assemblages sollicités par une force de traction.

La force de levier augmente l'effort de traction dans les boulons : pour que l'équilibre des forces représentées à la figure 8.30 soit respecté, l'effort de traction T_B dans les boulons est alors donné par :

$$T_B = \frac{N}{2} + H \quad (8.25)$$

N : force extérieure

H : force de levier

La force de levier H peut donc provoquer une rupture prématurée des boulons. Le schéma de la figure 8.30 montre l'évolution de la traction T_B dans un boulon dans un assemblage sollicité à la traction : la rupture du boulon a lieu pour une force extérieure N_2 plus petite que la charge ultime N_u d'un assemblage composé de tôles rigides.

On remarque (fig. 8.30) que cette augmentation de force dans les boulons n'influence que très peu le comportement de l'assemblage à l'état de service (petites valeurs de N). Ceci est vrai pour autant que les tôles possèdent une rigidité suffisante par rapport à la géométrie de l'assemblage et que les charges soient de nature statique. En revanche, dans le cas où un tel assemblage est soumis à des charges variables répétées (ouvrage d'art ou voies de roulement de pont roulant sollicité à la fatigue), la force de levier est à réduire à un minimum, car elle contribue à augmenter l'effort normal de traction repris par le boulon.

Une estimation de la force de levier est donnée dans différents ouvrages [8.3] [8.4]. Les tables SZS C9.1 [8.5] proposent une méthode de calcul pour une liaison poutre-colonne avec plaque frontale débordante avec des boulons à haute résistance basée sur des essais; l'ordre de grandeur de la force de levier agissant à l'extrémité de la plaque débordante a été admise égale à environ 30 % de la résistance à la traction des boulons situés dans la zone débordante. Cette grandeur de force de levier est prise en compte dans l'exemple 9.2 traitant d'une liaison poutre-colonne avec plaque frontale.

Il faut cependant relever que la force de levier ne peut se développer que si un contact entre les pièces assemblées se crée lorsque celles-ci se déforment. Sa grandeur est donc influencée directement par les paramètres suivants [8.6] :

- épaisseur des pièces assemblées; étant donné que des pièces assemblées de grande épaisseur ne vont pas se déformer beaucoup, la force de levier correspondante restera relativement faible;
- forme initiale des éléments assemblés; si la forme initiale des pièces assemblées, suite par exemple au soudage, est telle que le contact à leurs extrémités n'est pas possible, la force de levier ne pourra pas se développer;
- dispositions de construction particulières; il est possible d'intercaler entre les pièces assemblées des rondelles ou des fourrures empêchant leur contact direct, de façon à éviter le développement de la force de levier.

8.7.7 Interaction entre cisaillement et traction

La résistance au glissement d'un assemblage sollicité simultanément au cisaillement et à la traction est inférieure à celle donnée au paragraphe 8.7.2 (assemblage uniquement cisailé), car la force de traction extérieure va diminuer la pression de contact entre les pièces assemblées. L'équilibre des forces illustrées

à la figure 8.27(d) permet de déterminer la pression de contact présente au moment où la force de traction extérieure est égale à sa valeur de service N_{ser} :

$$\int_A (p_c - \Delta p_c) dA = T_B - N_{ser} = P_B + \Delta T_B - N_{ser} \quad (8.26)$$

- P_B : précontrainte initiale du boulon
 ΔT_B : part de la force extérieure de traction reprise par le boulon
 N_{ser} : valeur de service de la force extérieure de traction

Comme la part ΔT_B de la force extérieure de traction reprise par le boulon est une valeur relativement petite par rapport à la précontrainte P_B du boulon (8.22), on peut la négliger dans (8.26). Il en résulte une valeur conservatrice de la résistance au glissement d'un tel boulon, qui vaut, pour chaque surface de frottement :

$$R_f = \mu (P_B - N_{ser}) \quad (8.27)$$

Précisons encore que la vérification de la sécurité structurale au moyen de la formule d'interaction (8.8) donnée au paragraphe 8.4.4 doit également être effectuée.

L'Eurocode 3 (§ 6.5.8.4) donne des formules d'interaction pour les assemblages par boulons précontraints et à serrage contrôlé soumis à un effort de traction F_t et à un effort de cisaillement F_v . Pour un assemblage résistant au glissement à l'état limite de service, la résistance de calcul au glissement $F_{s.Rd.ser}$ d'un boulon vaut, par surface de frottement :

$$F_{s.Rd.ser} = \frac{k_s \mu (F_{p.Cd} - 0.8 F_{t.Sd.ser})}{\gamma_{Ms.ser}}$$

- k_s : coefficient dépendant de la forme du trou (§ 8.7.2)
 μ : coefficient de frottement dépendant de la classe de traitement de surface (tab. 8.25)
 $F_{p.Cd}$: précontrainte de calcul (correspond à la force de précontrainte P_B définie par (8.17))
 $F_{t.Sd.ser}$: effort de traction de calcul par boulon à l'état limite de service
 $\gamma_{Ms.ser}$: coefficient partiel de sécurité pour l'état limite de service ($\gamma_{Ms.ser} = 1.10$)

Pour un assemblage résistant au glissement à l'état limite ultime, la résistance de calcul au glissement $F_{s.Rd}$ d'un boulon vaut, par surface de frottement :

$$F_{s.Rd} = \frac{k_s \mu (F_{p.Cd} - 0.8 F_{t.Sd})}{\gamma_{Ms.ult}}$$

- $F_{t.Sd}$: effort de traction de calcul par boulon à l'état limite ultime
 $\gamma_{Ms.ult}$: coefficient partiel de sécurité pour l'état limite ultime ($\gamma_{Ms.ult} = 1.25$)

Exemple 8.5 Attache d'une diagonale

Soit l'attache entre une colonne et une diagonale de contreventement sollicitée par un effort normal F (fig. 8.31). Sa valeur de service de courte durée vaut $F_{ser,court} = 250$ kN et sa valeur de dimensionnement $F_d = 400$ kN. On admet que les éléments de l'attache sont en acier Fe E 235 et que la section cisailée des boulons se situe dans la tige. De plus, on prend un coefficient de frottement $\mu = 0.4$.

Déterminer le nombre de boulons précontraints M 20 en acier 10.9 nécessaire pour assurer que l'assemblage travaille effectivement par frottement au stade de service. Vérifier ensuite que ces boulons permettent de transmettre l'effort de dimensionnement de la diagonale à la colonne.

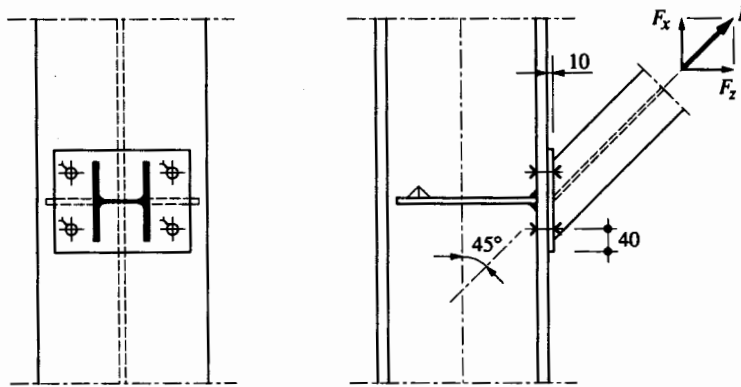


Fig. 8.31 Attache d'une diagonale de contreventement.

Aptitude au service

En décomposant la force F en une force F_x (cisaillement des boulons) et une force F_z (traction des boulons), il s'agit de vérifier la relation suivante, basée sur (8.12) et (8.27), avec n correspondant au nombre de boulons :

$$\frac{F_{ser,court,x}}{n} \leq \mu \left(P_B - \frac{F_{ser,court,z}}{n} \right)$$

L'effort normal de service et la force de précontrainte valent respectivement :

$$F_{ser,court,x} = F_{ser,court,z} = F_{ser,court} \cdot \cos 45^\circ = 250 \text{ kN} \cdot \cos 45^\circ = 177 \text{ kN}$$

$$P_B = 0.7 f_{uB} A_s = 0.7 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 245 \text{ mm}^2 = 171 \cdot 10^3 \text{ N} = 171 \text{ kN}$$

Le nombre de boulons nécessaire est alors donné par :

$$n \geq \frac{F_{ser,court,x} + \mu F_{ser,court,z}}{\mu P_B} = \frac{177 \text{ kN} + 0.4 \cdot 177 \text{ kN}}{0.4 \cdot 171 \text{ kN}} = 3.6$$

Il faut donc quatre boulons M 20 en acier 10.9 pour s'assurer que l'assemblage travaille bien par frottement sous l'effet de $F_{ser,court}$.

Sécurité structurale

La vérification de la sécurité structurale de cet assemblage est indépendante du fait que le glissement est empêché à l'état limite de service. La valeur de dimensionnement des deux composantes de l'effort agissant sur l'assemblage valent :

$$F_{dx} = F_{dz} = F_d \cdot \cos 45^\circ = 400 \text{ kN} \cdot \cos 45^\circ = 283 \text{ kN}$$

La résistance au cisaillement et à la traction d'un boulon valent respectivement, selon (8.4) et (8.7) :

$$V_R = 0.5 f_{uB} A = 0.5 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 314 \text{ mm}^2 = 157 \cdot 10^3 \text{ N} = 157 \text{ kN}$$

$$T_R = 0.8 f_{uB} A_s = 0.8 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 \cdot 245 \text{ mm}^2 = 196 \cdot 10^3 \text{ N} = 196 \text{ kN}$$

Il est ainsi possible de vérifier avec (8.8) que la résistance d'un boulon à une interaction d'efforts est suffisante :

$$\left(\frac{F_{dz}/4}{T_R/\gamma_R} \right)^2 + \left(\frac{F_{dx}/4}{V_R/\gamma_R} \right)^2 = \left(\frac{283 \text{ kN}/4}{196 \text{ kN}/1.1} \right)^2 + \left(\frac{283 \text{ kN}/4}{157 \text{ kN}/1.1} \right)^2 = 0.40 \leq 1.0$$

Il faut également contrôler que la résistance à la pression latérale est suffisante. Avec une pince de 40 mm correspondant à la valeur usuelle de $e_1 = 2d$, et en sachant que l'épaisseur de la plaque frontale vaut $t = 10$ mm (on admettra que l'aile de la colonne est au moins aussi épaisse), la résistance à la pression latérale est égale à (8.10) :

$$L_R = 1.6 f_u d t = 1.6 \cdot 360 \text{ N/mm}^2 \cdot 20 \text{ mm} \cdot 10 \text{ mm} = 115 \cdot 10^3 \text{ N} = 115 \text{ kN}$$

On constate ainsi que l'épaisseur de la plaque est suffisante pour une telle disposition de boulons :

$$\frac{F_{dx}}{4} = \frac{283 \text{ kN}}{4} = 70.8 \text{ kN} \leq \frac{L_R}{\gamma_R} = \frac{115 \text{ kN}}{1.1} = 105 \text{ kN}$$

8.8 Annexe

Cette annexe regroupe trois tableaux dans lesquels on a reporté la résistance ultime des boulons ou des pièces assemblées définie dans ce chapitre. L'utilisation des valeurs qui y sont indiquées devrait fournir une aide au dimensionnement ou à la vérification des boulons, de façon similaire aux tables SZS C5, dans lesquelles les mêmes indications sont données, sous une forme et avec des valeurs (à cause des arrondis) parfois différentes.

Les valeurs numériques qui sont contenues dans ces tableaux ont été établies à partir des relations suivantes :

- (8.4) : Résistance ultime au cisaillement V_R .
- (8.6) : Résistance ultime à la traction T_R .
- (8.9) : Résistance ultime à la pression latérale L_R .
- (8.17) : Force de précontrainte P_B .
- (8.15) : Résistance au glissement R_f .

Tableau 8.32 Résistance ultime au cisaillement et à la traction des boulons non précontraints.

(a) Résistance ultime au cisaillement V_R [kN]
dans la section de tige.

(b) Résistance ultime à la traction T_R [kN].

Acier des boulons	Type de boulon				
	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
4.6	23	40	63	90	115
5.6	28	50	79	113	143
8.8	45	80	126	181	229
10.9	57	101	157	226	286

Acier des boulons	Type de boulon				
	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
4.6	20	38	59	85	110
5.6	25	47	74	106	138
8.8	40	75	118	169	220
10.9	50	94	147	212	275

Tableau 8.33 Résistance ultime à la pression latérale L_R d'une pièce assemblée, en kN par mm d'épaisseur de la pièce assemblée [kN/mm].

Acier des pièces assemblées	Ecartement et pince	Type de boulon				
		M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
Fe E 235	valeurs minimales selon tab. 8.10 ($e_1 \approx 1.4 d$)	5.8	7.2	8.6	10.1	11.5
	valeurs usuelles selon tab. 8.10 ($e_1 \approx 2.0 d$)	7.2	10.1	11.6	14.4	15.8
	valeurs maximales ($p_1 \geq 3.5 d$, $e_1 \geq 3.0 d$)	10.4	13.8	17.3	20.7	23.3
Fe E 355	valeurs minimales selon tab. 8.10 ($e_1 \approx 1.4 d$)	8.2	10.2	12.2	14.3	16.3
	valeurs usuelles selon tab. 8.10 ($e_1 \approx 2.0 d$)	10.2	14.3	16.3	20.4	22.4
	valeurs maximales ($p_1 \geq 3.5 d$, $e_1 \geq 3.0 d$)	14.7	19.6	24.5	29.4	33.0

Tableau 8.34 Résistance à la traction T_R , force de précontrainte P_B et résistance au glissement R_f des boulons précontraints [kN].

(a) Boulons en acier 8.8.

	Type de boulon				
	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
T_R	54	100	157	226	294
P_B	47	88	137	198	257
$R_f (\mu = 0.25)$	11.8	22.0	34.3	49.4	64.3
$R_f (\mu = 0.4)$	18.8	35.2	54.9	79.1	103

(b) Boulons en acier 10.9.

	Type de boulon				
	M 12	M 16	M 20	M 24	M 27
T_R	67	126	196	282	367
P_B	59	110	172	247	321
$R_f (\mu = 0.25)$	14.7	27.5	42.9	61.8	80.3
$R_f (\mu = 0.4)$	23.5	44.0	68.6	98.8	129

Références

- [8.1] prEN 1090-1, *Exécution des structures en acier - Partie 1 : Règles générales et règles pour le bâtiment*, Comité européen de normalisation, Bruxelles, 1993.
- [8.2] CFF, *Directive pour l'évaluation des ponts-rails en construction rivetée*, CFF Chemins de fers fédéraux, Direction des travaux, Berne, 1992.
- [8.3] KULAK, G.L., FISHER, J.W., STRUIK, J.H.A., *Guide to Design Criteria for Bolted Riveted Joints*, John Wiley & Sons, New York, 1987 (Second Edition).
- [8.4] PICARD, A., BEAULIEU, D., *Calcul des charpentes en acier*, Institut canadien de la construction en acier, Willowdale, 1991.
- [8.5] SZS C9.1, *La construction métallique*, SZS Centre suisse de la construction métallique, Zurich, 1983.
- [8.6] ECCS/CECM, *European Recommendations for Bolted Connections in Structural Steelwork*, European Convention for Constructional Steelwork / Convention européenne de la construction métallique, Bruxelles, 1985.