

Constructions métalliques

Assemblages par procédés mécaniques

par **Jean-Pierre MUZEAU**

Ancien élève de l'École Normale Supérieure de Cachan

Docteur d'état ès Sciences Physiques

Professeur des Universités

Responsable du Département Génie Civil du CUST,

Institut des Sciences de l'Ingénieur de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand

1. Boulons traditionnels.....	C 2 521 - 2
1.1 Caractéristiques générales.....	— 2
1.2 Mise en œuvre	— 3
1.3 Dispositions constructives.....	— 4
1.4 Modes de transmission des efforts	— 6
2. Boulons injectés	— 11
3. Rivelons et boulons sertis précontraints	— 12
3.1 Présentation	— 12
3.2 Principe de mise en œuvre	— 12
3.3 Fonctionnement mécanique des boulons sertis précontraints.....	— 13
4. Cas des groupes de fixations.....	— 13
4.1 Résistance de groupes de fixations	— 13
4.2 Assemblages longs	— 13
5. Rivetage à chaud	— 14
6. Procédés nouveaux ou en cours de mise au point	— 14
6.1 Procédés pour profils ouverts.....	— 14
6.2 Procédés pour assemblages aveugles.....	— 17
6.3 Procédés pour éléments minces	— 20
7. Attaches par axes d'articulation.....	— 21
8. Connecteurs cloués.....	— 22
Pour en savoir plus	Doc. C 2 523

Les articles de *Constructions métalliques* concernant les procédés d'assemblage ont été subdivisés en plusieurs parties :

- [C 2 520] « Moyens d'assemblage » ;
- [C 2 521] « Assemblage par procédés mécaniques » ;
- [C 2 522] « Assemblage par soudage ou par connecteurs » ;
- [Doc. C 2 523] « Pour en savoir plus ».

Les procédés mécaniques sont ceux qui utilisent des assembleurs constitués de pièces métalliques cylindriques disposées dans des trous pratiqués dans les pièces à assembler. Il s'agit donc des différentes catégories de boulons, rivets, clous, etc.

Ces assembleurs assurent la transmission des efforts :

- soit par butée ;
- soit par mobilisation du frottement entre les pièces assemblées ;
- soit par la mise en traction des assembleurs ;

— soit par combinaison de ces sollicitations.

Dans tous les cas, la vérification de la résistance d'assemblages réalisés par un procédé mécanique nécessite la vérification conjointe de la résistance des assembleurs proprement dits mais aussi celle des pièces assemblées.

1. Boulons traditionnels

Un boulon traditionnel (figure 1) est un ensemble constitué d'une **vis**, d'un **écrou** et, le cas échéant, de **une ou deux rondelles**. En construction métallique, les têtes de vis sont généralement de forme hexagonale.

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

1.1 Caractéristiques générales

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

1.1.1 Boulons ordinaires

Les boulons ordinaires sont encore appelés boulons normaux. Ce sont, par principe, des boulons non précontraints.

Les caractéristiques mécaniques de leurs aciers constitutifs sont données dans le tableau 1.

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

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

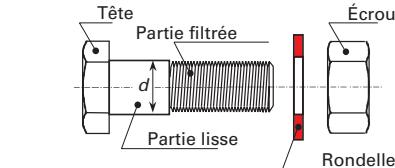


Figure 1 – Constituants d'un boulon

Tableau 1 – Valeurs nominales de la limite d'élasticité f_{yb} et de la résistance ultime à la traction f_{ub} des boulons ordinaires

Classe	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	1 000

Ces caractéristiques mécaniques sont définies dans les normes EN ISO 898-1 pour la vis et EN ISO 898-2 pour l'écrou. Elles peuvent être obtenues par écrouissage (classe 6.8) ou par traitement thermique (classes 8.8 et 10.9).

Les classes 6.8, 8.8 et 10.9 sont les plus courantes, notamment parce qu'elles conduisent à un nombre réduit de boulons.

Les caractéristiques dimensionnelles principales des boulons ordinaires sont données dans le tableau 2. Les normes qui les régissent dépendent de leur classe de qualité.

Tableau 2 – Aires des sections lisses et des sections filetées des boulons ordinaires

Diamètre nominal d(mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
Diamètre du trou d_0(mm)	9	11	13	16	18	20	22	24	26	30	33
Ø rondelle.....(mm)	16	20	24	27	30	34	37	40	44	50	55
Épaisseur rondelle.....(mm)	2,5	2,5	3	3	3	4	4	4	4	5	5
Hauteur d'écrou.....(mm)	6,8	8,4	10,8	12,8	14,8	15,8	18	19,4	21,5	23,8	25,6
Hauteur de tête.....(mm)	5,3	6,4	7,5	8,8	10	11,5	12,5	14	15	17,5	19
Section nominale A(mm ²)	50,2	78,5	113	154	201	254	314	380	452	573	707
Section resistante A_s(mm ²)	36,6	58	84,3	115	157	192	245	303	353	459	561

Tableau 3 – Caractéristiques dimensionnelles des boulons HR

Diamètre nominal d(mm)	12	14	16	18	20	22	24	27	30
Diamètre du trou d_0(mm)	13	16	18	20	22	24	26	30	33
Ø rondelle(mm)	24	27	30	34	37	40	44	50	55
Épaisseur rondelle(mm)	3	3	3	4	4	4	4	5	5
Hauteur d'écrou(mm)	11	13	15	16	18	20	22	24	27
Hauteur de tête(mm)	8	9	10	12	13	14	15	17	19
Dimension des clés (1)(mm)	19/22	22/24	24/27	27/30	30/32	32/36	36/41	41/46	46/50
Section nominale A(mm ²)	113	154	201	254	314	380	452	573	707
Section résistante A_s(mm ²)	84,3	115	157	192	245	303	353	459	561

(1) les deux nombres a/b sont tels que a correspond aux boulons HR 8.8 et b aux boulons HR 10.9.

1.1.2 Boulons à haute résistance

Les boulons à haute résistance (ou boulons HR) sont des boulons aptes à être précontraints lors de la mise en œuvre. On les appelle encore **boulons « à serrage contrôlé »**. Ils sont réalisés dans des aciers à haute limite d'élasticité de qualité 8.8 et 10.9 et ils doivent comporter un marquage spécifique « **HR** » sur chaque élément du boulon (vis, écrou et rondelle), ce qui n'est pas le cas des boulons ordinaires de classe de qualité identique. Leurs caractéristiques dimensionnelles sont données dans le tableau 3.

Les caractéristiques mécaniques minimales de ces produits sont régies par les normes NFE 27-701 et NFE 27-702. Elles sont impérativement obtenues par traitement thermique (une trempe suivie d'un revenu).

Deux points importants doivent être soulignés pour les boulons HR :

- les hauteurs d'écrous, plus importantes que pour les boulons ordinaires (90 % du diamètre nominal du boulon), conduisent à une ruine en traction par rupture ductile de la tige de la vis et non pas par arrachage des filets ;

- ils sont livrés complets sous emballage étanche afin de garantir la valeur et la tenue dans le temps du coefficient k qui déterminera l'intensité du couple à appliquer lors du serrage pour obtenir la précontrainte désirée.

Les garanties de performance des boulons HR portent sur les caractéristiques suivantes :

- limite d'élasticité, résistance et allongement de la vis soumise à un essai de traction ;
- résilience de la vis ;
- dureté de chaque composant (vis, écrou et rondelle) ;
- charge d'épreuve sur l'écrou ;
- aptitude à l'emploi sur le boulon entier avec détermination du coefficient k de rendement du couple de serrage.

Certaines des caractéristiques dimensionnelles des boulons HR diffèrent de celles des boulons ordinaires (voir tableaux 2 et 3). Celles des boulons à haute résistance sont définies dans la norme NFE 27-711.

1.1.3 Boulons HV DIN

Ce sont des boulons très répandus sur le marché européen car ils sont moins onéreux que les boulons HR. Ils sont quelquefois utilisés comme boulons précontraints alors qu'ils n'en possèdent pas les caractéristiques mécaniques.

Les boulons HV répondent aux spécifications de la norme DIN allemande. Cela se traduit par des exigences moins sévères en ce qui concerne la limite d'élasticité, par des performances inférieures vis-à-vis de la rupture fragile, par une hauteur d'écrou plus faible

(80 % du diamètre nominal de la vis) et par l'absence d'un essai d'aptitude à l'emploi sur boulon entier.

En conséquence, les deux remarques formulées précédemment pour les boulons HR ne sont plus vraies pour les boulons HV (rupture ductile et qualité de mise en œuvre). Ces derniers ne devraient donc pas être utilisés en lieu et place de boulons HR. Par contre, leur utilisation reste possible à condition de respecter scrupuleusement les prescriptions fournies par leurs fabricants.

Notons cependant que, maintenant, les boulons HV sont traités par l'Eurocode 3 de la même manière que les boulons HR.

1.1.4 Désignation des boulons

La désignation d'un boulon se fait par la lettre M (pour métrique) suivie de la valeur du diamètre nominal d en mm. La mention HR indique qu'il s'agit d'un boulon à haute résistance.

À titre d'**exemple**, un boulon M27 – 6.8 représente un boulon ordinaire de diamètre nominal 27 mm et de classe de qualité 6.8. Un boulon M24 – HR 10.9 NF représente un boulon HR à serrage contrôlé de diamètre nominal 24 mm et de qualité 10.9 respectant la norme NF.

1.2 Mise en œuvre

La mise en œuvre des boulons s'effectue au moyen de clés. Elle dépend du type de boulon.

1.2.1 Boulons ordinaires

Pour les boulons ordinaires, aucune précaution particulière n'est exigée pour le serrage si ce n'est de mettre en contact les pièces assemblées. En général, aucune rondelle n'est nécessaire.

1.2.2 Boulons précontraints

Pour les boulons HR à serrage contrôlé, la précontrainte installée dépend de la qualité et de la fiabilité de la mise en œuvre. Une des rondelles livrées avec le boulon doit obligatoirement être disposée sous l'élément mis en rotation lors du serrage (l'écrou en général). L'utilisation de la seconde rondelle est facultative mais elle facilite la répartition de la pression sur la pièce assemblée.

Le serrage peut être obtenu de quatre manières différentes :

- par le contrôle du couple ;
- par la méthode par la mesure de l'angle ;
- par la méthode dite du « tour d'écrou » ou méthode mixte ;
- par traction directe.

Serrage au couple

Le serrage au couple s'effectue en appliquant la relation suivante :

$$C = k F_{p,C} d$$

avec C couple à appliquer,

d diamètre du boulon,

k rendement vis-écrou,

$F_{p,C}$ précontrainte désirée ($F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s$).

Le couple est contrôlé à l'aide d'une clé dynamométrique manuelle ou d'une clé à chocs soigneusement calibrée.

Le coefficient k dépend du lubrifiant utilisé. Il est fourni par le fabricant. Ses valeurs sont généralement comprises entre 0,10 et 0,15.

À titre d'**exemple**, un boulon M27 – HR 10.9 NF avec $k = 0,15$ nécessite le couple de serrage suivant :

$$C = 0,15 \times 0,7 \times 1\,000 \times 459 \times 27 = 1,3 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

Serrage contrôlé par la mesure de l'angle

Le serrage contrôlé par la mesure de l'angle s'effectue en appliquant la relation suivante :

$$\alpha = 90^\circ + t + d$$

avec α angle de rotation, en degrés, à appliquer après un serrage de contact effectué manuellement,

t (mm) épaisseur de l'assemblage,

d (mm) diamètre du boulon.

Serrage par la méthode dite du « tour d'écrou »

La méthode de serrage par la méthode dite du « tour d'écrou » consiste à combiner les deux méthodes précédentes. Dans un premier temps, un préserrage est appliqué à l'aide d'une clé dynamométrique jusqu'à une valeur de précontrainte égale à une fraction de la précontrainte définitive (par exemple 40, 60 ou 75 % de la précontrainte requise pour l'assemblage). Dans un deuxième temps, on fait subir une rotation contrôlée à l'écrou de 60, 90 ou 120° (valeur obtenue après essais).

Serrage par traction directe

La méthode de serrage par traction directe est réservée aux boulons de gros diamètre. Elle consiste à appliquer un effort de traction dans la vis à l'aide d'un vérin et à bloquer l'écrou avant de relâcher l'effort.

Critique des méthodes de serrage

En France, actuellement, seule la méthode de serrage au couple est admise.

Si un contrôle s'avère nécessaire, on applique un couple égal à 96 % du couple de pose et l'écrou ne doit pas tourner de plus de 10°. Si ce n'est pas le cas :

— si l'écrou tourne de plus de 10°, tous les boulons doivent être vérifiés (et resserrés si nécessaire) ;

— s'il n'est pas possible d'atteindre le couple de contrôle malgré une rotation importante de l'écrou, cela signifie que les boulons sont surserrés et qu'ils sont plastifiés. Il convient alors de les remplacer.

1.3 Dispositions constructives

Nous indiquons ci-après les dispositions constructives relatives aux assemblages boulonnés ou rivés les plus courants. Pour les structures réalisées avec des aciers à résistance améliorée vis-à-vis de la corrosion atmosphérique, le lecteur est invité à consulter l'Eurocode 3.

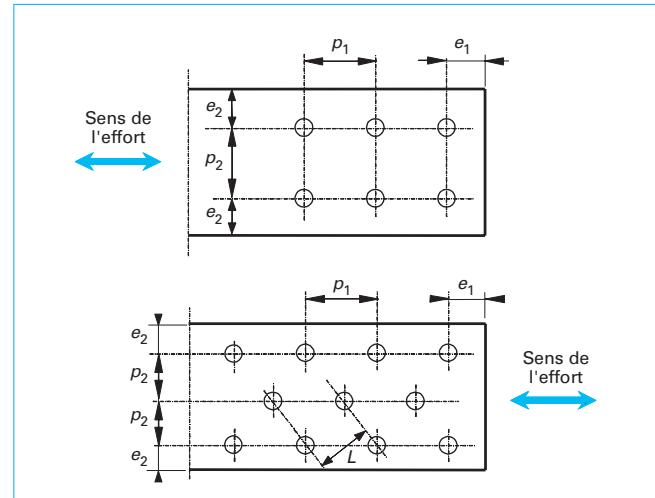


Figure 2 – Pinces et entraxes

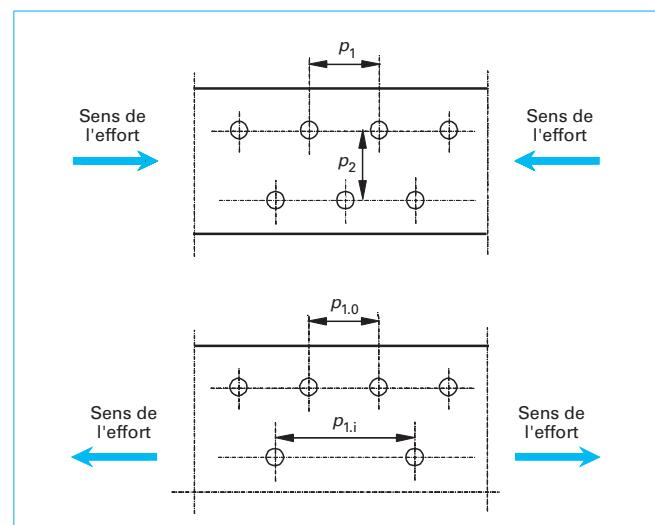


Figure 3 – Entraxes pour trous en quinconce

1.3.1 Notations

Les notations principales (figures 2, 3 et 4) sont les suivantes :

d diamètre nominal d'un boulon,

d_0 diamètre nominal du trou ou diamètre d'un rivet,

p_1 entraxe des fixations dans une rangée dans la direction de la transmission des efforts,

p_2 entraxe, mesurée perpendiculairement à la direction de la transmission des efforts, entre des rangées de fixations adjacentes,

$p_{1,0}$ entraxe des fixations dans une rangée de rive d'une pièce tendue avec trous en quinconce dans la direction de la transmission des efforts (figure 3),

$p_{1,i}$ entraxe des fixations dans une rangée intérieure d'une pièce tendue avec trous en quinconce dans la direction de la transmission des efforts (figure 3),

e_1 pince longitudinale entre le centre d'un trou de fixation et le bord adjacent d'une pièce quelconque, mesurée dans la direction de l'effort transmis,

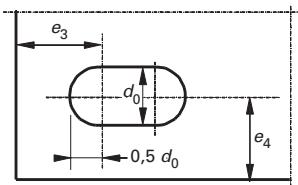


Figure 4 – Pince longitudinale et pince transversale pour trous oblongs

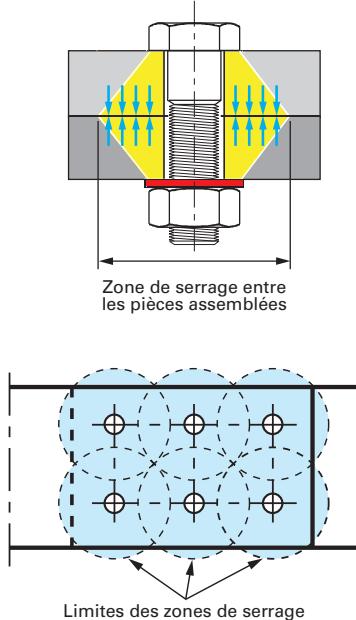


Figure 5 – Distance maximale entre boulons

- e_2 pince transversale entre le centre d'un trou de fixation et le bord adjacent d'une pièce quelconque, perpendiculairement à la direction de l'effort transmis,
- e_3 distance entre l'axe d'un trou oblong et l'extrémité ou bord adjacent d'une pièce quelconque (figure 4),
- e_4 distance entre le centre de l'arrondi d'extrémité d'un trou oblong et l'extrémité ou bord adjacent d'une pièce quelconque (figure 4),
- t épaisseur de la pièce attachée extérieure la plus mince.

1.3.2 Conditions de distance entre boulons ou rivets

Les conditions maximales ont pour but d'éviter la corrosion entre les pièces assemblées. Les zones de serrage des organes d'assemblage doivent se recouvrir afin que l'eau ne puisse pas s'infiltrer par capillarité entre les éléments de la liaison (figure 5). Elles visent également à éviter le voilement local des pièces assemblées dans la zone comprise entre deux assembleurs dans le cas où elles sont comprimées.

Les conditions minimales sont destinées à laisser suffisamment de place entre les organes d'assemblage pour permettre une pose correcte (encombrement des clés notamment).

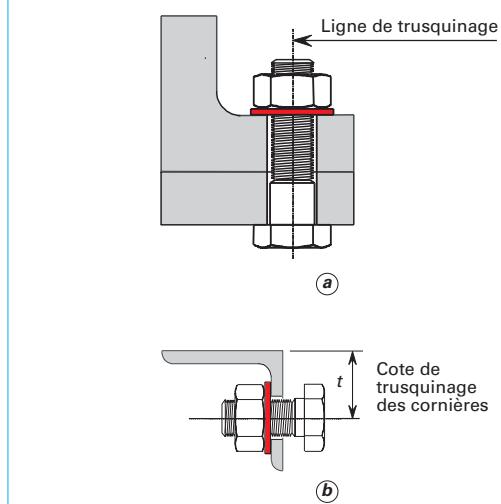


Figure 6 – Position de la ligne de trusquinage

Dans le cas d'un **chargement statique prédominant** (prEN 1993-1-8), ces conditions sont les suivantes.

Entraxes :

$$2,2 d_0 \leq p_1 \leq \text{Min (14 } t \text{ ou 200 mm)}$$

$$2,4 d_0 \leq p_2 \leq \text{Min (14 } t \text{ ou 200 mm)}$$

$$p_{1,0} \leq \text{Min (14 } t \text{ ou 200 mm)}$$

$$p_{1,i} \leq \text{Min (28 } t \text{ ou 400 mm)}$$

Pour les rangées de fixations en quinconce, un espace minimal entre rangées $p_2 = 1,2 d_0$ peut être utilisé, à condition que la distance minimale L entre deux fixations quelconques (figure 2) soit telle que $L \geq 2,4 d_0$.

Pinces pour des pièces non exposées aux intempéries :

$$1,2 d_0 \leq (e_1 \text{ ou } e_2)$$

Pinces pour des pièces exposées aux intempéries ou à d'autres influences corrosives :

$$1,2 d_0 \leq (e_1 \text{ ou } e_2) \leq 4 t + 40 \text{ mm}$$

Pinces pour trous oblongs :

$$1,5 d_0 \leq (e_3 \text{ ou } e_4)$$

Dans le cas d'exigences de **comportement à la fatigue** (prEN 1993-1-9), les pinces et entraxes minimaux sont augmentés de la manière suivante :

$$1,5 d \leq (e_1 \text{ ou } e_2)$$

$$2,5 d \leq (p_1 \text{ ou } p_2)$$

1.3.3 Dispositions recommandées

Les assembleurs sont disposés sur la *ligne de trusquinage*, une ligne parallèle au bord de l'élément (figure 6). Le respect des diamètres des organes de liaison correspondant à chaque profil, assure une pose et un serrage corrects de chacun des éléments sur les parties planes des profilés.

Les cotés de cette ligne de trusquinage ainsi que les diamètres des boulons préférables, sont définis dans les catalogues de produits sidérurgiques (voir documentation OTUA, par exemple).

Tableau 4 – Diamètres des assembleurs en fonction de l'épaisseur des pièces à assembler (cotes en mm)

Diamètre <i>d</i> des assembleurs	Cornières à ailes égales		Assemblage des semelles de profilés		
	Désignation	Trusquinage <i>t</i> (cf. figure 6)	IPE	HE	UAP
8	40 × 40 × 4 45 × 45 × 4,5	22 25	140 et 160		80
10	50 × 50 × 5	28	180 et 200	100	100 et 130
12	60 × 60 × 6	36 à 40,5	220 et 240	120	
16	70 × 70 × 7 80 × 80 × 8	37 à 43 38 à 53	270 à 330	140	150 à 220
20				160	
22			360 et 400		250
24	90 × 90 × 9	49 à 51 50 et 80 (1)	450 à 550	180	
27	100 × 100 × 10 120 × 120 × 12 150 × 150 × 15 180 × 180 × 18 200 × 200 × 20 250 × 250 × 25	50 à 53 52 à 72 (1) 57 à 102 (1) 63 à 131 (1) 65 à 151 (1) 45 à 246 (1)	600 et 750	220 à 1 000	300

(1) Pour les cornières à partir de 120 × 120 × 12, les deux cotes indiquent qu'il est possible de placer les boulons en quinconce sur deux files.

Tableau 5 – Diamètre *d*₀ des trous de perçage pour boulons

<i>d</i>(mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30	36
<i>d</i> ₀(mm)	9	11	13	15	18	20	22	24	26	30	33	39

Le tableau 4 résume quelques-unes des dispositions standards. Il fournit les diamètres d'assemblage à choisir en fonction de l'épaisseur des éléments à assembler et les cotes de trusquinage des cornières.

■ Jeux des trous de perçage

Les jeux normaux des trous de perçage des boulons sont indiqués dans le tableau 5.

1.4 Modes de transmission des efforts

Le mode de transmission des efforts dépend du type d'assemblage utilisé, du mode de mise en œuvre et de l'orientation de l'effort à transmettre par rapport à l'axe de l'organe d'assemblage.

1.4.1 Actions sur les pièces assemblées

■ Pression diamétrale

C'est la pression exercée par les assemblages sur les parois des trous dans lesquels ils sont logés. Elle se développe pour des efforts perpendiculaires à l'axe des organes d'assemblage.

La figure 7 représente l'assemblage après glissement des pièces assemblées (lorsque celui-ci est possible) et avant cisaillement du corps de l'assemblage.

La pression diamétrale est l'un des critères de dimensionnement. Les sections en contact doivent être suffisantes pour que l'assemblage ne déforme pas le trou de manière trop importante.

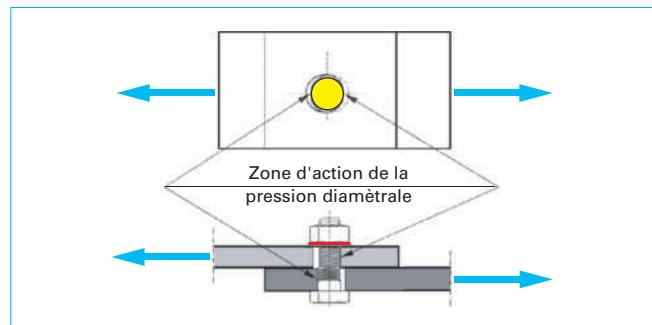


Figure 7 – Pression diamétrale

■ Poinçonnage des pièces assemblées

Dans le cas où l'effort sollicitant les assemblages est parallèle à leur axe, les pièces assemblées doivent résister au poinçonnage exercé par les têtes ou les écrous. Dans ce cas, les têtes se comportent comme un emporte-pièce vis-à-vis des plaques qui doivent résister au cisaillement correspondant.

L'Europage 3 s'appuie sur le critère d'écoulement de von Mises. En cisaillement pur, la contrainte ultime τ_u s'écrit :

$$\tau_u = \frac{1}{\sqrt{3}} f_u \approx 0,6 f_u$$

Si d_m est le diamètre moyen calculé entre les cercles inscrits et circonscrits de la tête ou de l'écrou, la résistance de calcul au cisaillement par poinçonnement s'écrit :

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_M}$$

avec t_p épaisseur de la plaque à vérifier,

f_u résistance à la traction de la plaque à vérifier,

γ_M coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]).

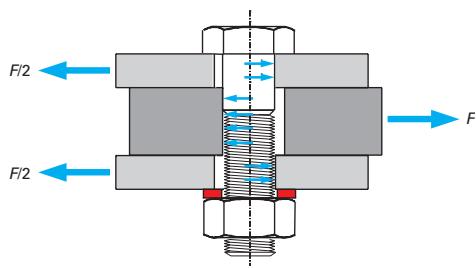


Figure 8 – Mode de transmission des efforts en cisaillement pour les boulons ordinaires

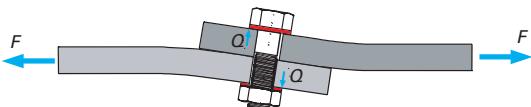


Figure 9 – Comportement d'un boulon cisaillé dans un assemblage de deux plats tendus comportant un seul boulon

1.4.2 Assemblages par boulons ordinaires

■ Transmission d'un effort de cisaillement

Dans le cas d'un effort perpendiculaire à l'axe des boulons, les pièces assemblées par boulons ordinaires sont supposées pouvoir glisser pour venir en contact avec les tiges (figure 8). Les boulons supportent alors une pression latérale dans les zones de contact et leur tige est cisaillée au droit des surfaces de glissement.

Les pièces sont, quant à elles, soumises à une pression localisée au contact avec les tiges de boulon définie précédemment comme étant la pression diamétrale.

Dans le cas très spécifique des assemblages à recouvrement à un seul boulon, le chargement tend à aligner les plats et à provoquer la rotation du boulon, comme représenté à la figure 9. Cela induit du cisaillement et de la traction dans le boulon ainsi que des contraintes de flexion locales sous la tête et l'écrou. La diminution de la résistance en cisaillement d'un boulon unique peut ainsi atteindre 10 %.

Dans un tel cas, il convient que les boulons soient munis de rondelle, sous la tête et sous l'écrou, et la pression diamétrale limitée à une valeur plus petite que dans les cas courants, c'est-à-dire :

$$F_{b,Rd} \leq \frac{1,5 f_u d t}{\gamma_{M2}}$$

avec t épaisseur du plat le plus mince,

f_u résistance à la traction du plat le plus mince,

γ_{M2} coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]).

L'accroissement de la longueur de l'assemblage, c'est-à-dire l'augmentation du nombre de boulons, réduit la flexion et par conséquent la perte de résistance en cisaillement.

Il est à noter que les contraintes de flexion locales sous la tête et l'écrou dans un assemblage à boulon unique induisent un mauvais comportement à la fatigue.

■ Transmission d'un effort de traction

Dans le cas d'un effort parallèle à l'axe des boulons, les pièces assemblées sollicitent les boulons en traction alors qu'elles sont

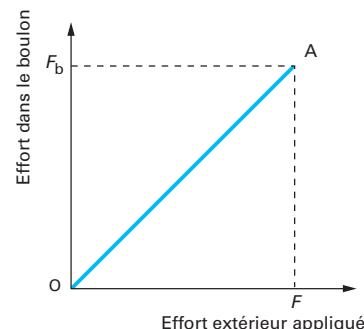
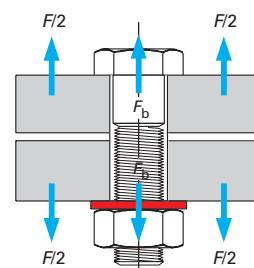


Figure 10 – Mode de transmission des efforts de traction pour les boulons ordinaires

elles-mêmes soumises à un poinçonnement provoqué par les éléments en contact : tête de la vis, écrou ou rondelles selon les cas (figure 10).

■ Transmission d'un effort oblique

Dans le cas d'un effort oblique où un boulon est soumis simultanément à un effort axial de traction, $F_{t,Ed}$, et à un effort de cisaillement, $F_{v,Ed}$, la vérification s'effectue selon une formule d'interaction établie à partir d'essais de laboratoire :

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

La pleine résistance en traction est donc disponible tant que les valeurs de l'effort de cisaillement ne dépassent pas une valeur proche de 30 % de la capacité de résistance en cisaillement $F_{v,Rd}$ (figure 11).

■ Résistance de calcul des boulons non précontraints

γ_{M2} étant le coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]), la résistance de calcul des boulons non précontraints est donnée dans le tableau 6.

1.4.3 Assemblages par boulons précontraints

Un assemblage par boulons précontraint est destiné à mobiliser le frottement entre les pièces assemblées.

En conséquence, les boulons à haute résistance et à serrage contrôlé sont soumis à une précontrainte mise en place lors du serrage qui représente environ 70 % de la résistance en traction du boulon.

La précontrainte $F_{p,C}$ est calculée selon la relation :

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s$$

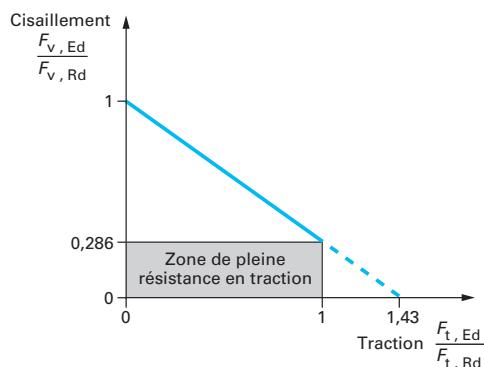


Figure 11 – Interaction cisaillement – traction

Tableau 6 – Résistance de calcul des boulons non précontraints

Résistance au cisaillement par plan de cisaillement :

- si le plan de cisaillement passe par la partie filetée du boulon :

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

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

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

- si le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du boulon :

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

avec $\alpha_v = 0,6$ quelle que soit la classe du boulon.

Résistance à la pression diamétrale :

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

où α_b est la plus petite valeur de α_d ; $\frac{f_{ub}}{f_u}$ ou 1,0.

avec $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0}$ (boulons de rive) ; $\frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4}$ (boulons intérieurs)

et $k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 ; 2,5 \right)$ pour les boulons de rive

et $k_1 = \min \left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 ; 2,5 \right)$ pour les boulons intérieurs

Résistance à la traction :

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

avec $k_2 = 0,9$ sauf pour les boulons à tête fraisée où $k_2 = 0,63$.

Résistance au poinçonnement :

$$B_{p,Rd} = \frac{0,6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$$

Cisaillement et traction combinés :

$$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$$

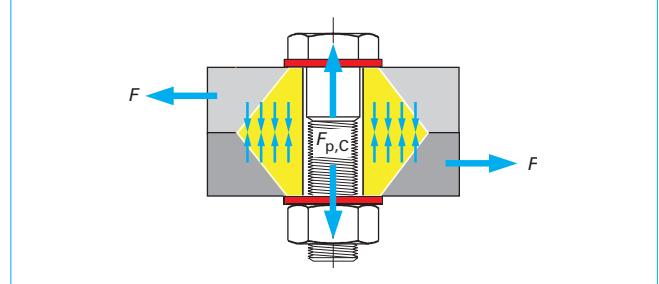


Figure 12 – Assemblage par boulon précontraint

Une fois installée, cette précontrainte assure une forte pression entre les pièces assemblées (figure 12). Cette pression autorise alors la mobilisation d'un frottement qui est fonction de l'état de surface à l'interface entre les pièces.

Coefficients de frottement entre les pièces assemblées

Les pièces à assembler nécessitent une certaine préparation afin d'obtenir un coefficient de frottement μ le plus grand possible et d'éviter un frottement trop gras.

Pour obtenir ce résultat, les traces d'huiles ou de peinture sont à proscrire.

Pour améliorer la rugosité des surfaces en contact, on peut effectuer plusieurs opérations ou traitements :

— brossage à la brosse métallique ou nettoyage à la flamme pour enlever la fleur de rouille et la calamine. On admet, dans ce cas, $\mu = 0,30$. Ce traitement est qualifié de classe C dans l'Eurocode 3 ;

— sablage par jet de sable sous pression avec de l'air comprimé ou grenaillage puis protection par une peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80 µm. On admet alors $\mu = 0,40$. Ce traitement est qualifié de classe B dans l'Eurocode 3 ;

— traitements qualifiés de classe A dans l'Eurocode 3 et pour lesquels on admet $\mu = 0,50$:

- décapage par grenaillage ou sablage avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes donnant des surfaces sans piqûre de corrosion,

- décapage pour grenaillage ou sablage puis métallisation des surfaces par projection d'aluminium,

- décapage pour grenaillage ou sablage puis protection par projection d'un revêtement à base de zinc garantissant un coefficient de frottement qui ne soit pas inférieur à 0,50 ;

— dans le cas où aucun traitement n'est effectué, on admet un coefficient de frottement $\mu = 0,20$. Ce « non-traitement » est qualifié de classe D dans l'Eurocode 3.

Selon le diamètre des boulons, les trous peuvent présenter un jeu e de 1 à 3 mm en évitant les jeux trop grands qui ont pour effet de mal répartir la pression sous les rondelles.

Transmission d'un effort perpendiculaire à l'axe des boulons

Connaissant le coefficient de frottement μ , la résistance au glissement s'exprime en fonction de la précontrainte $F_{p,C}$ par la relation suivante :

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

avec n nombre de surfaces en contact,

k_s dépendant de la forme du trou ; il vaut 1,0 pour les trous normaux et il est inférieur à 1,0 dans le cas contraire (voir l'Eurocode 3). Il prend par exemple la valeur 0,85 pour les trous surdimensionnés et 0,63 pour les trous oblongs dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts,

γ_{M3} coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]).

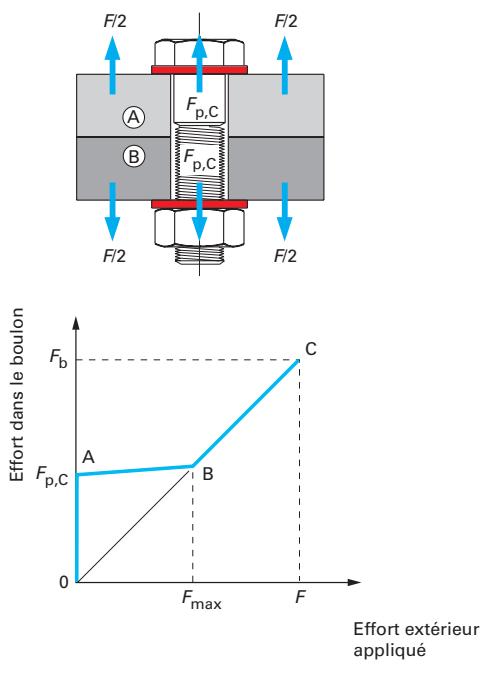


Figure 13 – Boulon précontraint en traction

Certains assemblages sont calculés pour n'accepter aucun glissement jusqu'à l'état limite ultime alors que d'autres le sont pour ne résister au glissement que jusqu'à l'état limite de service. Au-delà, c'est-à-dire pour l'état limite ultime, il convient de vérifier que la résistance au cisaillement de la tige au boulon est suffisante.

■ Transmission d'un effort parallèle à l'axe des boulons

Dans le cas d'un effort parallèle à l'axe des assemblageurs, un assemblage par boulon HR est tel que les pièces restent en contact tant que l'effort appliqué ne dépasse pas l'effort de précontrainte (figure 12).

Cette propriété se vérifie en étudiant le comportement effort – déformation de deux plats assemblés par un boulon HR et sollicité par un effort extérieur de traction comme c'est le cas des plats A et B de la figure 13.

Compte tenu du type de sections concernées, les rigidités des divers éléments sont très différentes. On peut estimer que le rapport de ces rigidités est de l'ordre de 10, le boulon étant plus souple que les plats.

Le comportement des deux types d'éléments est représenté par les deux droites de la figure 14. En l'absence de tout effort extérieur, sous l'action de la précontrainte $F_{p,C}$, le boulon est tendu et les plats sont comprimés. Le boulon est donc en extension alors que les plats sont raccourcis. Les points B pour le boulon et P pour les plats représentent cet état d'équilibre. Lorsque l'effort extérieur de traction dans les plats augmente d'une valeur ΔF_{plats} , le point représentatif vient en Q, ce qui correspond à la déformation $\varepsilon_{\Delta F}$. Pour respecter l'égalité des déformations, le point représentatif du boulon vient en C, ce qui se traduit par une variation d'effort égale à ΔF_{boulon} . On remarque ainsi que l'accroissement d'effort dans le boulon est d'intensité beaucoup plus faible que l'effort ΔF_{plats} du fait de la différence de rigidités.

Pour que les plats soient entièrement décomprimés, l'effort extérieur doit atteindre la valeur $F_{p,C}$ (point O) correspondant à la déformation ε_{max} . Pour le boulon, cette même déformation correspond

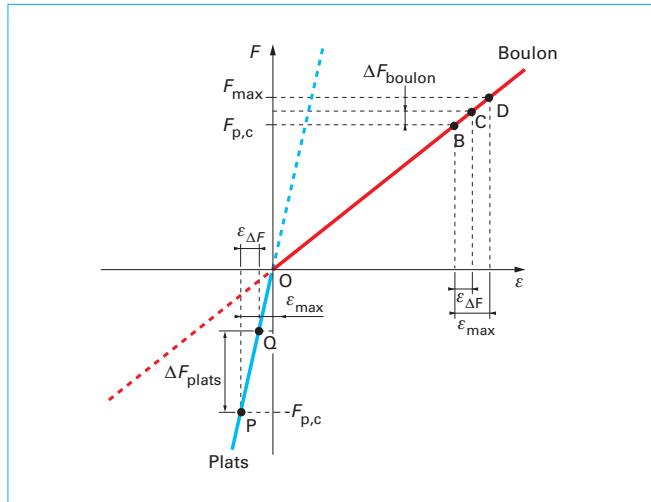


Figure 14 – Comportement en traction des pièces assemblées avec un boulon HR

au point D et donc à l'effort F_{max} . Au-delà de cette situation, l'effort dans le boulon continue de croître et les plats sont décollés.

■ Transmission d'un effort oblique

Dans ce cas, l'effort est décomposé en un effort perpendiculaire et un effort parallèle à l'axe du boulon, ce dernier tendant à diminuer la pression exercée sur les pièces assemblées et donc l'effort de frottement mobilisable.

Si une attache résistant au glissement à l'état limite ultime est soumise à un effort de traction $F_{t,Ed}$ en sus de l'effort tranchant $F_{y,Ed}$ tendant à entraîner le glissement, il convient de prendre la résistance au glissement par boulon égale à la valeur suivante :

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}}$$

Si une attache résistant au glissement à l'état limite de service est soumise à un effort de traction $F_{t,Ed,serv}$ en sus de l'effort tranchant $F_{y,Ed,serv}$ tendant à entraîner le glissement, il convient de prendre la résistance au glissement par boulon égale à la valeur suivante :

$$F_{s,Rd,serv} = \frac{k_s n \mu (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed,serv})}{\gamma_{M3}}$$

Dans ces deux expressions, γ_{M3} est le coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]).

1.4.4 Catégories d'assemblages boulonnés

Les notions précédentes sont résumées dans une synthèse soulignant les différentes catégories d'attaches en fonction du type de sollicitation et des exigences à respecter (tableau 7).

■ Attachés en cisaillement

Catégorie A : attache travaillant à la pression diamétrale

Dans cette catégorie, il convient d'utiliser des boulons de classes allant de 4.6 à 10.9 comprises. Il n'est exigé aucune précontrainte ni aucune disposition particulière pour les surfaces en contact. Il convient que l'effort de cisaillement de calcul à l'état limite ultime n'excède ni la résistance de calcul au cisaillement ni la résistance de calcul en pression diamétrale.

Tableau 7 – Catégories d'assemblages boulonnés		
Catégorie	Critères	Remarques
Attachments en cisaillement		
A En pression diamétrale	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Aucune précontrainte exigée. Toutes classes de 4.6 à 10.9
B Résistant au glissement à l'ELS	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Boulons précontraints 8.8 ou 10.9 requis.
C Résistant au glissement à l'ELU	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Boulons précontraints 8.8 ou 10.9 requis.
Attachments en traction		
D Sans précontrainte	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Aucune précontrainte exigée. Toutes classes de 4.6 à 10.9
E Avec précontrainte	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Boulons précontraints 8.8 ou 10.9 requis.
Notations :		
$F_{v,Ed}$	effort de cisaillement de calcul par boulon à l'état limite ultime	
$F_{v,Rd}$	résistance de calcul au cisaillement par boulon	
$F_{b,Rd}$	résistance de calcul en pression diamétrale par boulon	
$F_{v,Ed,ser}$	effort de cisaillement de calcul par boulon à l'état limite de service	
$F_{s,Rd,ser}$	résistance de calcul au glissement par boulon à l'état limite de service	
$F_{s,Rd}$	résistance de calcul au glissement par boulon à l'état limite ultime	
$N_{net,Rd}$	résistance de calcul à traction de la section nette au droit des trous de fixation :	
	$N_{net,Rd} = A_{net} f_y / \gamma_{M0}$ (pour γ_{M0} cf. [C 2 520, tableau 1])	
$F_{t,Ed}$	effort de traction de calcul par boulon à l'état limite ultime	
$F_{t,Rd}$	résistance de calcul à la traction par boulon	
$B_{p,Rd}$	résistance de calcul au cisaillement par poinçonnement de la tête de boulon et de l'écrou	

Catégorie B : attache résistant au glissement à l'état limite de service

Dans cette catégorie, il convient d'utiliser des boulons précontraints de classes 8.8 ou 10.9 à serrage contrôlé. Pour qu'aucun glissement ne se produise à l'état limite de service, il convient que l'effort de cisaillement de calcul à l'état limite de service n'excède pas la résistance de calcul au glissement. De plus, l'effort de cisaillement de calcul à l'état limite ultime ne doit excéder ni la résistance de calcul au cisaillement, ni la résistance de calcul en pression diamétrale.

Catégorie C : attache résistant au glissement à l'état limite ultime

Dans cette catégorie, seuls des boulons précontraints de classes 8.8 ou 10.9 à serrage contrôlé peuvent être utilisés et il convient qu'aucun glissement ne se produise à l'état limite ultime. Il faut donc que l'effort de cisaillement de calcul à l'état limite ultime n'excède pas la résistance de calcul au glissement ni également la

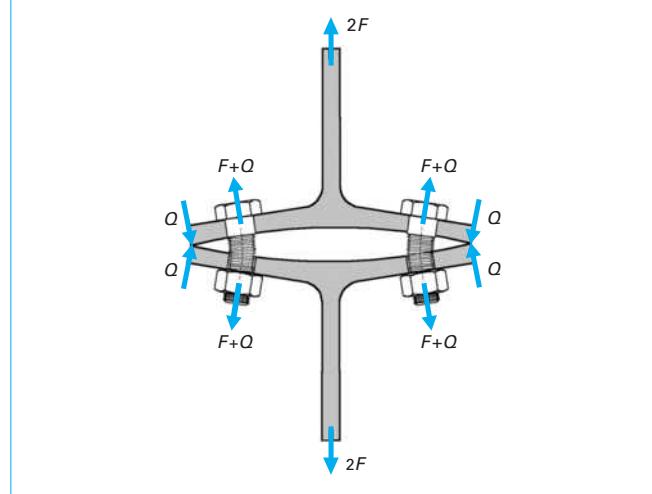


Figure 15 – Effet de levier

résistance de calcul en pression diamétrale. En outre, pour une attache tendue, il convient de vérifier la résistance plastique de calcul de la section transversale nette au droit des trous de boulons, $N_{net,Rd}$, à l'état limite ultime.

■ Attaches tendues

Catégorie D : attache par boulons non précontraints

Dans cette catégorie, il convient d'utiliser des boulons de classes 4.6 à 10.9 comprises et aucune précontrainte n'est exigée. Il convient donc de ne pas utiliser cette catégorie lorsque les attaches sont soumises à des variations fréquentes de la sollicitation en traction notamment pour éviter les problèmes de fatigue. Elle peut cependant être utilisée pour les attaches calculées pour résister aux actions usuelles de vent.

Catégorie E : attache par boulons précontraints à haute résistance

Dans cette catégorie, il convient d'utiliser des boulons de classes 8.8 et 10.9 à serrage contrôlé.

1.4.5 Effet de levier

Dans le cas où l'effort de traction est transmis à travers un assemblage constitué de semelles flexibles, les déformations de ces dernières créent un effort additionnel Q appelé effet de levier qui vient s'ajouter à l'effort nominal dans les boulons (figure 15). L'effet de levier est négligeable pour les plaques munies de raidisseurs. Dans le cas général, la capacité des assemblages prenant en compte l'effet de levier peut être évaluée selon le paragraphe 6.2.4 du prEN 1993-1-8.

1.4.6 Comparaison entre boulons ordinaires et boulons précontraints

Le comportement mécanique entre les boulons ordinaires et les boulons précontraints, diffère selon l'orientation de l'effort appliqué :

- pour un effort perpendiculaire à l'axe des boulons, l'absence ou non de déplacement des pièces assemblées est la caractéristique la plus importante ;

- pour un effort parallèle à l'axe du boulon, la variation de contrainte de traction est l'élément important (figure 16). Elle est beaucoup plus faible pour un boulon HR que pour un boulon ordinaire entraînant ainsi un bien meilleur comportement en fatigue des boulons précontraints dans le cas de sollicitations variables.

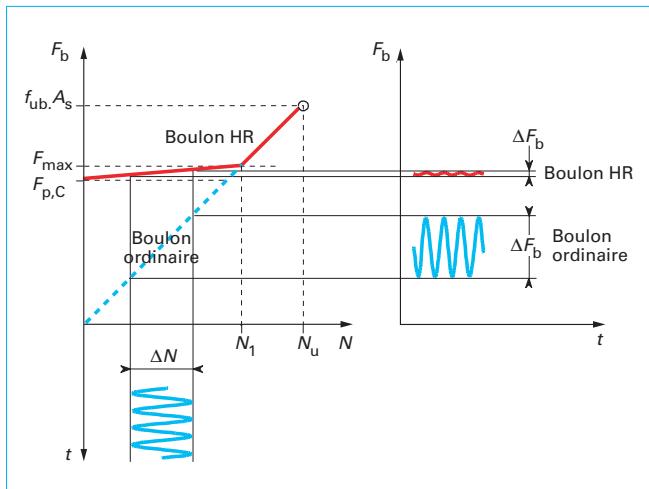


Figure 16 – Évolution de l'effort dans un boulon HR sous sollicitations variables

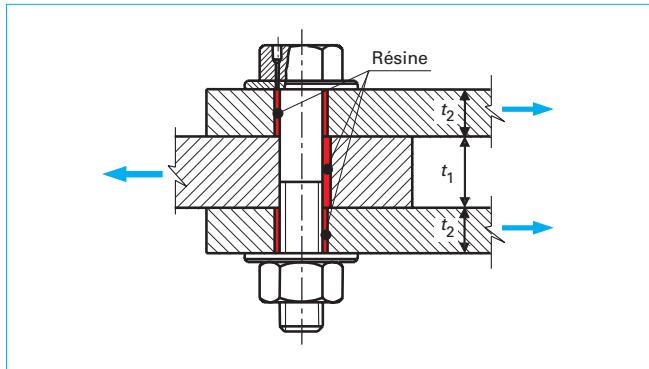


Figure 17 – Boulon injecté

2. Boulons injectés

Les boulons injectés sont des boulons pour lesquels le jeu entre le boulon et la paroi du trou est complètement rempli à l'aide d'une résine à deux composants (figure 17), les boulons peuvent être précontraints ou non.

Les boulons injectés sont des boulons traditionnels dans la tête desquels un petit trou a été percé (figure 18). Le diamètre du trou au niveau de la surface extérieure de la tête du boulon ($\varnothing 5,5$ mm) offre un support suffisant pour le nez du pistolet d'injection. L'autre partie du trou, de $3,2$ mm de diamètre, est assez large pour pouvoir injecter la résine. Ils sont pris en compte par l'Eurocode 3 comme une alternative aux rivets et boulons traditionnels pour les attaches de catégories A, B ou C du tableau 7, sachant qu'ils doivent être précontraints pour répondre aux exigences des catégories B ou C.

Une rondelle en acier trempé est placée sous la tête ; sa partie intérieure est usinée. L'espace supplémentaire libéré sous la tête facilite l'écoulement de la résine autour du boulon et, par conséquent, le remplissage parfait du jeu entre les boulons et les plats. Le diamètre intérieur de la rondelle doit au moins être 5 mm plus grand que celui du fût.

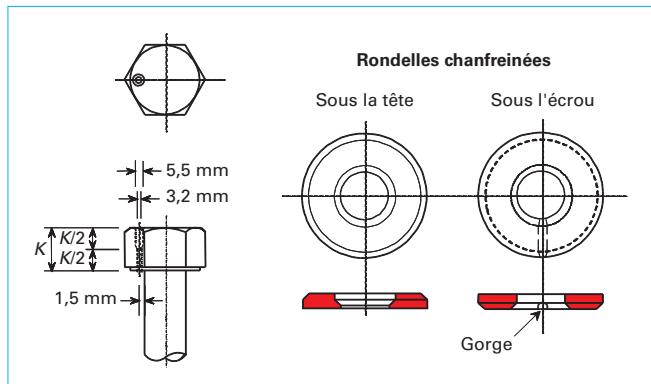


Figure 18 – Éléments spécifiques aux boulons injectés

Tableau 8 – Valeurs de β et $t_{b,resin}$

t_1/t_2	β	$t_{b,resin}$
$\geq 2,0$	1,0	$2t_2 \leq 1,5d$
$1,0 \leq t_1/t_2 \leq 2,0$	$1,66 - 0,33(t_1/t_2)$	$t_1 \leq 1,5d$
$\leq 1,0$	1,33	$t_1 \leq 1,5d$

Une seconde rondelle en acier trempé munie d'une gorge est placée sous l'écrou de manière à permettre à l'air de s'échapper. La gorge doit être située du côté de l'écrou. Si les plats sont peints, cette position empêche la peinture de venir obstruer la gorge lors du serrage.

Après prise de la résine, l'assemblage n'est plus sensible aux glissements. Ces boulons s'utilisent donc pour la réalisation d'assemblages cisaillés. Ils constituent une alternative aux boulons calibrés ou aux boulons à haute résistance à serrage contrôlé.

La transmission des efforts s'effectue soit par cisaillement et pression diamétrale (boulons injectés non précontraints), soit par cisaillement et frottement (boulons HR injectés à serrage contrôlé).

Les boulons injectés permettent de réduire le nombre de boulons dans l'assemblage et, par conséquent, le nombre de trous à forer. De plus, la possibilité de réaliser des jeux plus importants au niveau des trous peut faciliter le montage et donc réduire les coûts associés. L'équipement d'injection est peu coûteux et la quantité de résine injectée est réduite. Le temps de mise en place d'un boulon varie de 1 à 2 minutes.

Au sens de l'Eurocode 3, le calcul des boulons injectés se réalise de la même manière que pour les boulons traditionnels sauf pour la résistance à la pression diamétrale qui prend bien sûr en compte la présence de la résine.

Si $f_{b,resin}$ est la résistance en pression diamétrale de la résine et $t_{b,resin}$ son épaisseur efficace donnée dans le tableau 8, la résistance en pression diamétrale d'un boulon injecté, $F_{b,Rd,resin}$, est la suivante :

$$F_{b,Rd,resin} = \frac{k_t k_s d t_{b,resin} \beta f_{b,resin}}{\gamma_{M4}}$$

avec β coefficient dépendant du rapport d'épaisseur des plaques attachées (tableau 8, t_1 et t_2 étant précisés figure 17),

$k_t = 1,0$ pour l'état limite de service (long terme),

$k_t = 1,2$ pour l'état limite ultime,

$k_s = 1,0$ pour les trous normaux, une valeur inférieure à l'unité pour les trous surdimensionnés,

γ_{M4} coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1]).

Les **avantages des boulons injectés** sont les suivants.

- Ils constituent une alternative aux boulons à haute résistance à serrage contrôlé.
- Ils ne requièrent ni équipement spécial de serrage, ni personnel qualifié pour la mise en œuvre. Cela peut entraîner une réduction du coût global.
- Ils ne nécessitent aucune préparation particulière des plats assemblés.
- Comme la résine remplit complètement la cavité, aucune corrosion interne n'est possible.
- Lorsque les coefficients de frottement sont faibles, par exemple pour des surfaces peintes ou galvanisées à chaud, l'injection peut permettre à des boulons précontraints à haute résistance de mieux transmettre les efforts de cisaillement. C'est également une solution intéressante dans le cas d'assemblages où tout glissement est proscrit (réparation d'anciens assemblages rivétés, plats peints, plats galvanisés à chaud).

— Pour une épaisseur raisonnable des plats, la résistance de calcul à la pression diamétrale est similaire à la résistance au glissement des boulons précontraints ce qui peut donc permettre de réduire le nombre de boulons par rapport à un assemblage classique. Cela est très important lorsque la place disponible pour la réalisation de l'assemblage est limitée.

— Dans les assemblages par boulons HR à serrage contrôlé, un glissement peut survenir en raison d'une surcharge. Avec les boulons injectés, aucun glissement soudain ne peut se produire.

— Des trous surdimensionnés peuvent être utilisés pour les plats intérieurs et extérieurs, ainsi que des trous oblongs pour les plats intérieurs. Cela facilite grandement le montage et l'alignement de la structure. Après injection et prise de la résine, tout glissement est empêché. Dans le cas de trous surdimensionnés ou oblongs, une réduction de la résistance de calcul à la pression diamétrale est toutefois nécessaire (cas où la longueur de serrage dépasse $3d$).

Les **désavantages des boulons injectés** sont les suivants.

- Ils nécessitent un usinage complémentaire de la vis et des rondelles ;
- La préparation de la résine et l'injection prend du temps ;
- Les trous doivent être secs avant injection. Il faut donc prendre quelques précautions ;
- Du fait du collage implicite obtenu avec la résine, il est difficile de démonter le boulon après la prise du produit injecté.

3. Rivelons et boulons sertis précontraints

3.1 Présentation

Deux grands types de boulons sertis sont utilisés dans le domaine de la Construction Métallique.

Les premiers, connus sous le nom de « **rivelons** » (en Suisse : « rivets à anneau »), sont les M50L, les C106L et les C6L de classe 8.8 ainsi que les C50L et les C120L de classe 9.8.

Les seconds sont les **boulons sertis précontraints**. Ils sont présentés comme étant capables de garantir un niveau de sécurité comparable à celui que procurent les boulons HR 10.9 à serrage contrôlé tout en conservant un prix attractif dû à la rapidité de leur mise en œuvre. Ces produits sont brevetés et le fabricant garantit leurs caractéristiques en respect des normes NF EN 20898-1 et NF E 27-701.

Les boulons sertis (figure 19) sont constitués de deux pièces distinctes : une tige, munie d'une tête, et une bague. Lors de la mise

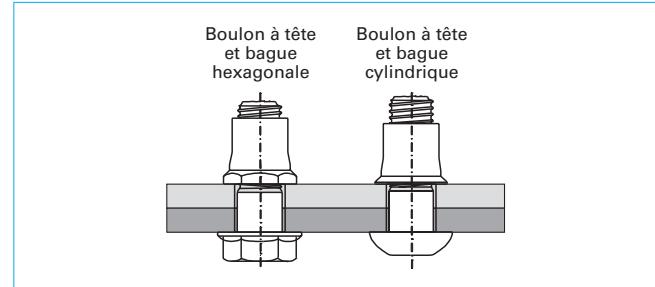


Figure 19 – Boulons sertis posés

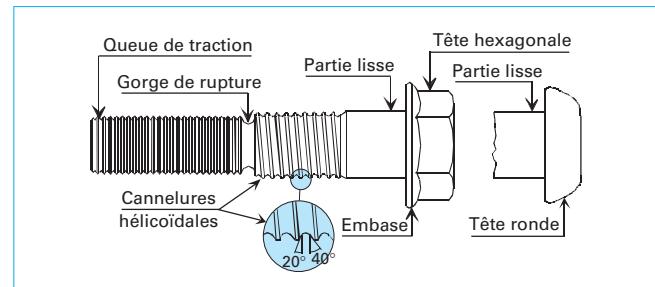


Figure 20 – Terminologie des boulons sertis

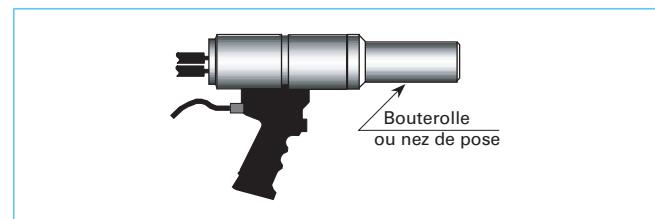


Figure 21 – Pistolet hydraulique pour le sertissage des boulons sertis précontraints

en œuvre, la bague est sertie sur la tige et elle vient constituer la tête seconde du dispositif. Pour que la liaison entre les deux éléments soit résistante et durable, des cannelures sont prévues dans la zone de sertissage de la tige ; la bague épousant la forme des cannelures, le dispositif s'apparente alors à un système vis écrou sans jeu.

Les boulons sertis précontraints (figure 20) présentent des différences géométriques importantes par rapport aux rivelons classiques : les cannelures sont hélicoïdales et non pas annulaires. Il est donc possible d'effectuer un réglage de positionnement dit aussi réglage d'approche. De plus, certains d'entre eux présentent une forme hexagonale au niveau de la tête et de la bague qui permet, si nécessaire, un démontage par des moyens usuels.

3.2 Principe de mise en œuvre

La mise en œuvre des boulons sertis s'effectue par sertissage de la bague sur la tige à l'aide d'un pistolet hydraulique spécial muni d'une bouterolle (ou nez de pose) adaptée à chaque boulon (figure 21) ; la bouterolle présentant un diamètre intérieur inférieur au diamètre extérieur de la bague.

Les phases successives qui se présentent lors de la mise en œuvre sont représentées sur la figure 22.

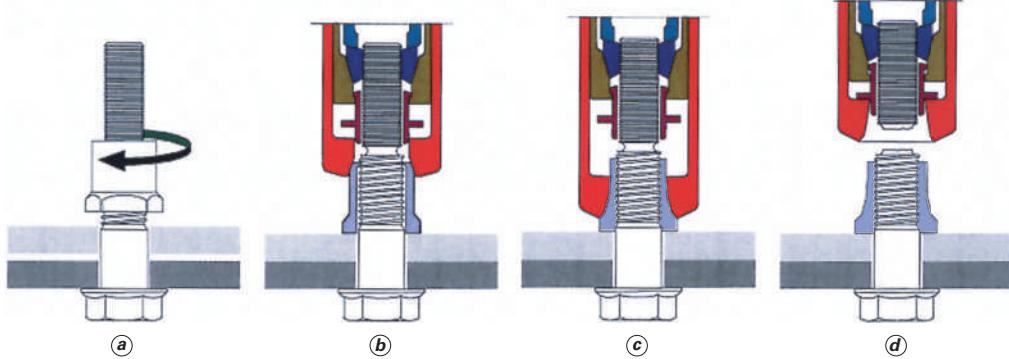


Figure 22 – Principe de pose des boulons sertis

(a) La tige est disposée dans le trou. La bague est vissée à la main sur les cannelures hélicoïdales.

(b) Le pistolet de pose est engagé jusqu'à ce que la bouterolle vienne en contact avec la bague. En actionnant la gâchette du pistolet, les mors auto-serreurs se referment sur les groupes d'accrochage de la queue de traction. La tige est ensuite tirée avec l'intérieur de la bouterolle.

(c) La traction sur la tige augmente. La bouterolle étant de diamètre intérieur plus petit que le diamètre extérieur de la bague, celle-ci se déforme en subissant une sorte d'extrusion à froid. Elle vient se sertir sur les cannelures en remplissant complètement le vide qui existe entre la bague et la tige. Sous l'action conjointe de la traction sur la tige et de l'allongement de la bague pendant le sertissage, le boulon est précontraint.

(d) L'effort de traction imposé à la tige continue de croître. Il atteint une valeur apte à casser la tige en son point le plus fragile, la gorge de rupture. Une fois cassée, la tige a tendance à reprendre sa forme initiale par élasticité mais la présence de la bague l'en empêche. Les pièces sont alors comprimées et l'assemblage est obtenu.

3.3 Fonctionnement mécanique des boulons sertis précontraints

Les boulons sertis précontraints peuvent être utilisés de la même manière que des boulons HR à serrage contrôlé (pour les assemblages résistant au glissement) ou comme des boulons standards de qualité 10.9 (ils sont alors calculés pour des efforts de cisaillement et de traction combinés).

Une qualité importante des boulons sertis doit être soulignée : le sertissage conduit à une liaison sans jeu entre la tige et la bague. Dans le cas d'un assemblage soumis à des fortes vibrations, des boulons traditionnels insuffisamment serrés risquent de se dévisser. Il n'en est pas de même pour les boulons sertis. Bien que les cannelures soient hélicoïdales, l'absence de jeu entre la tige et la bague n'autorise pas la mise en rotation de la bague.

4. Cas des groupes de fixations

4.1 Résistance de groupes de fixations

La résistance d'un groupe de fixations peut être prise égale à la somme des résistances individuelles en pression diamétrale $F_{b,Rd}$ des fixations, à condition que la résistance individuelle de calcul au

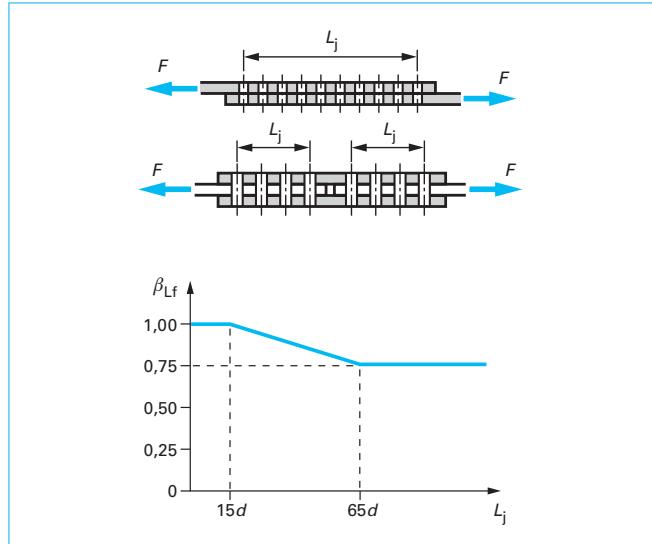


Figure 23 – Assemblages longs

cisaillement $F_{v,Rd}$ de chaque fixation soit supérieure ou égale à la résistance de calcul en pression diamétrale $F_{b,Rd}$. Sinon, il convient de prendre la résistance d'un groupe de fixations égale au nombre de fixations multiplié par la résistance de calcul la plus faible des fixations considérées individuellement.

4.2 Assemblages longs

Pour le calcul d'un groupe de fixations, l'hypothèse généralement admise est celle d'une répartition uniforme des efforts entre chacun des organes d'assemblage. Cela n'est bien sûr qu'une hypothèse grossière valable uniquement pour les assemblages relativement courts.

Si la distance L_j entre les axes des fixations extrêmes d'un assemblage, mesurée dans la direction des efforts est supérieure à $15d$ (figure 23), il convient de réduire la résistance de calcul au cisaillement $F_{v,Rd}$ de toutes les fixations en la multipliant par un coefficient réducteur β_{Lf} , donné par :

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \quad \text{avec } 0,75 \leq \beta_{Lf} \leq 1,0$$

5. Rivetage à chaud

L'assemblage par rivetage est le plus ancien procédé de solidarisation de pièces entre elles utilisé en construction métallique. Le viaduc de Gabarit et la tour Eiffel en sont de célèbres exemples.

Étant de mise en œuvre assez complexe du fait qu'ils nécessitent d'être posés à chaud, les rivets sont aujourd'hui moins utilisés au profit des boulons. Toutefois, certaines entreprises les utilisent toujours en atelier en raison de leur coût qui reste plus faible que celui des boulons.

Il existe deux formes principales de rivets : les rivets à tête ronde (symbole **R**) et les rivets à tête fraisée (symbole **F** ou **F/90**). Une troisième forme était rencontrée dans le passé, les rivets à tête fraisée bombée (symbole **FB** ou **FB/90**). La figure 24 représente ces différents éléments.

■ Principe de mise en œuvre

Comme les boulons ordinaires, la mise en œuvre des rivets ne nécessite aucune préparation des surfaces en contact autre que la réalisation du trou où il sera logé.

Le trou a un diamètre d_0 supérieur à celui du rivet de 1 mm. La raison de ce jeu est, en particulier, la facilité de mise en place.

En général, les rivets sont posés à chaud. On les chauffe à une température de l'ordre de 1 100 à 1 200 °C de façon à ce que le temps de les prendre et de les poser, ils soient à une température comprise entre 900 et 950 °C. Leur couleur passe de blanc à rouge vif entre ces températures.

Le rivet étant positionné dans le trou, la deuxième tête est formée, à l'aide d'une bouterolle et d'une contre-bouterolle, par martelage à la main ou à la machine (figure 25).

Cette opération a pour effet de refouler l'acier du rivet qui va ainsi remplir complètement le trou. C'est pourquoi le diamètre de calibrage d'un rivet est d_0 et non pas d .

Il est à noter la rétraction due au refroidissement augmente le serrage entre les pièces, ce qui crée une sorte de précontrainte.

■ Calcul des rivets et des pièces assemblées

Les résistances de calcul des rivets et des pièces assemblées en fonction des différents types de sollicitations sont indiquées au tableau 9. Il est à noter qu'en raison du type de mise en œuvre, la résistance de calcul est la même quelle que soit l'orientation de l'effort.

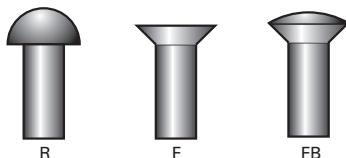


Figure 24 – Forme des rivets

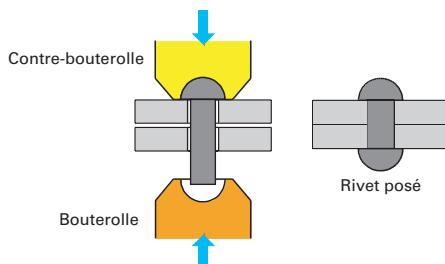


Figure 25 – Pose des rivets

Tableau 9 – Résistance de calcul des rivets

Résistance au cisaillement par plan de cisaillement :

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$$

Résistance à la pression diamétrale :

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

avec α_b est la plus petite valeur de α_d ; $\frac{f_{ur}}{f_u}$ ou 1,0,

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} \text{ (rivets de rive)} ; \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \text{ (rivets intérieurs)},$$

$$k_1 = \min \left(2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 ; 2,5 \right) \text{ pour les rivets de rive,}$$

$$k_1 = \min \left(1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 ; 2,5 \right) \text{ pour les rivets intérieurs,}$$

Résistance à la traction :

$$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$$

Dans ces expressions :

A_0 est l'aire de la section du trou

f_{ur} est la résistance ultime en traction des rivets en « en état de pose ». Pour l'acier S235, elle peut être prise égale à 400 MPa.

γ_{M2} est le coefficient de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1])

6. Procédés nouveaux ou en cours de mise au point

6.1 Procédés pour profils ouverts

6.1.1 Boulons filetés sur toute la longueur

Les boulons filetés sur toute la longueur possèdent des caractéristiques géométriques identiques à celles des boulons traditionnels à la différence près qu'ils ne comportent pas de partie lisse, le filetage étant réalisé sur toute la longueur de la tige.

Ces boulons présentent de nombreux avantages par rapport aux boulons traditionnels :

- plus grandes quantités à la commande ;
- diminution des stocks ;
- moins de tris et de manipulations à effectuer sur chantier ;
- diminution des risques d'erreur ;
- plus grande rapidité d'assemblage et de montage ;
- plus grande simplicité des tableaux de localisation des différents boulons ;
- réduction des rebuts.

Tous ces éléments conduisent à diminuer assez sensiblement les coûts même si l'on prend en compte le fait que la réalisation du filetage est légèrement plus onéreuse que pour les boulons présentant une partie lisse. Quelques études comparatives ont montré que l'utilisation de ce type de boulon peut conduire à une réduction de 25 à 90 % des différentes catégories de boulons nécessaires sur chantier.

Dans le cas d'une **solicitation de traction**, la résistance des boulons étant celle de la partie filetée, les boulons filetés sur toute la longueur possèdent la même résistance que les boulons traditionnels. Il faut toutefois noter que leur déformabilité est plus importante car elle est proportionnelle à la longueur filetée sous écrou.

Dans le cas d'une **solicitation de cisaillement**, la section de calcul à l'état ultime est bien sûr celle de la partie filetée mais, là encore, la déformation sera plus importante que pour des boulons dont la zone cisaillée correspond à la partie lisse du fait de l'écrasement préalable des filets.

Pour ce qui concerne la **résistance à la pression diamétrale**, le comportement est particulièrement complexe : les filets viennent directement en contact avec les parois des trous créant ainsi des zones de fortes concentrations de contraintes, des frottements se mobilisent, des gonflements localisés apparaissent. Tout cela contribue à limiter les déformations axiales mais à augmenter les déformations radiales. Toutefois et contrairement à ce que l'on pourrait penser, il apparaît que la résistance à la pression diamétrale n'est pas plus faible pour les boulons filetés sur toute la longueur que pour des boulons dont la pression diamétrale s'exerce sur la partie lisse de la tige. En première approche, on peut donc déterminer la résistance à la pression diamétrale en prenant en compte le diamètre nominal des boulons. Des recherches complémentaires restent néanmoins nécessaires pour vérifier cela.

Par contre, et cela a été mentionné à plusieurs reprises, les déformations associées à l'utilisation de ce type de boulon sont beaucoup plus importantes que pour les boulons traditionnels. Il convient donc d'examiner leur compatibilité au niveau de l'assemblage lui-même pris dans son ensemble.

Enfin, dans le cas d'utilisation en tant que boulon à haute résistance à serrage contrôlé, il conviendra de s'assurer que les méthodes de serrage restent adaptées du fait de l'allongement plus grand de ce type de boulon.

6.1.2 Boulons de gros diamètre

L'utilisation de plus en plus fréquente des aciers à haute limite d'élasticité conduit, à section égale, à des efforts de plus en plus importants au niveau des assemblages. Afin d'éviter d'utiliser un trop grand nombre de boulons, l'idée est donc venue d'en augmenter le diamètre.

Bien sûr cette évolution n'est possible que parce que des outils de serrage, de plus en plus puissants tout en restant suffisamment maniables, ont été mis à la disposition des entreprises.

L'utilisation de boulons de gros diamètre permet un gain de temps au montage car le nombre d'organes d'assemblage est réduit. Elle permet également une économie de matière puisque les pièces (couvre-joints par exemple) sont de longueur plus faible.

Certaines restrictions subsistent toutefois. Il faut en effet savoir qu'au-delà d'un diamètre de 30 mm, les machines de fabrication ne permettent plus de rouler les filets des vis qui doivent alors être taillés. Les fibres n'étant plus continues, les caractéristiques mécaniques de ces boulons sont affectées.

Là encore, des essais sont donc nécessaires pour évaluer convenablement les conditions d'utilisation et de mise en œuvre de ces boulons.

6.1.3 Boulons TC

Un boulon TC (de l'anglais *Tension Control*, c'est-à-dire *contrôle de l'effort de traction*) possède, à l'extrémité de la zone filetée du fût, une gorge et un embout crénelé qui permettent de contrôler la valeur du couple de serrage (figure 26). Lorsque ce dernier atteint une valeur bien définie qui correspond à la résistance de la section de la gorge de rupture, l'extrémité de la vis se rompt et le serrage est interrompu.

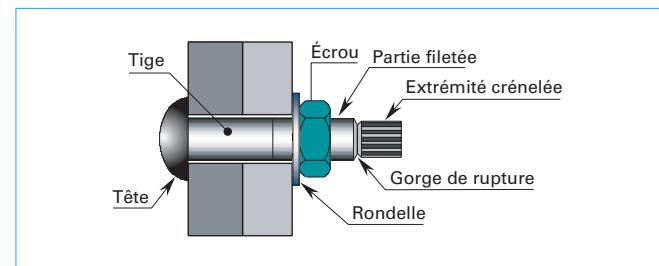


Figure 26 – Boulon TC avant serrage

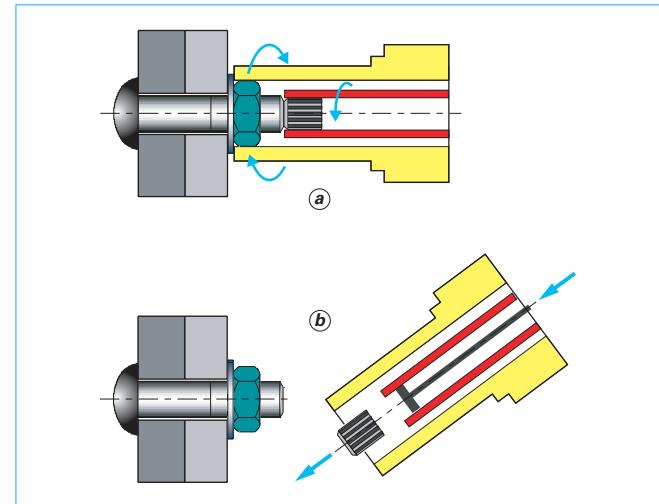


Figure 27 – Installation d'un boulon TC

L'installation de ces boulons s'effectue en trois phases à l'aide d'un pistolet spécial (figure 27) :

- le boulon est mis en place dans le trou ; l'écrou et la rondelle sont amenés en position comme pour un boulon traditionnel ;

- le pistolet, qui possède deux manchons, est installé du côté opposé à la tête du boulon. Le manchon intérieur est disposé autour de l'extrémité crénelée tandis que le manchon extérieur vient saisir l'écrou. Par l'intermédiaire du manchon extérieur, une rotation est appliquée à l'écrou, alors que la tige du boulon est maintenue et rotation par le manchon intérieur (a). La gorge est ainsi soumise à un effort de torsion ;

- la section de gorge est calibrée de manière à se rompre, sous l'effet de la torsion, lorsque l'effort de préserrage désiré est atteint dans la tige du boulon. L'embout est alors éjecté du pistolet (b).

Ce type de boulon possède les avantages suivants :

- il n'est pas nécessaire de maintenir la vis en position pendant la mise en œuvre ;

- les erreurs d'opérateur sont fortement réduites et le contrôle est très rapide ;

- l'outil de pose ne doit pas être calibré et le serrage n'est pas influencé par les conditions de mise en place sur chantier.

Si nécessaire, à la différence des boulons sertis précontraints du § 3, le boulon peut être resserré après pose. On note toutefois, à la suite d'essais, une assez grande variation de la précontrainte installée lors de la pose de ce produit.

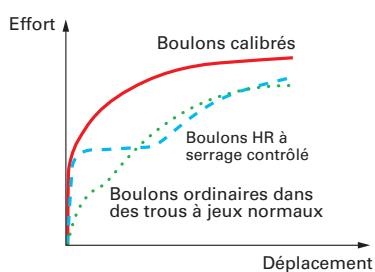


Figure 28 – Courbes d'évolution correspondant à différents moyens d'assemblage

6.1.4 Boulons calibrés

Les boulons calibrés sont tels que le jeu entre le trou et la partie lisse de la tige est limité. Ils sont obtenus à partir de vis dont les tolérances d'usinage du fût sont clairement spécifiées. Ces vis sont ensuite disposées dans des trous alésés.

Des courbes de comparaison de l'évolution des déplacements dans un assemblage en fonction de l'effort extérieur sont données à la figure 28 pour différents moyens d'assemblage.

Les exigences à satisfaire en matière de boulons calibrés sont les suivantes :

- le diamètre de la partie filetée des boulons à fût tourné doit posséder un diamètre inférieur de 1,5 mm à celui du diamètre du fût. Le diamètre du boulon à prendre en considération est celui du fût ;
- le diamètre du fût tourné doit se situer dans des tolérances de diamètre prescrites. La longueur du fût doit être telle que ce dernier puisse être complètement en contact avec les pièces assemblées ;
- des rondelles dont l'épaisseur est d'au moins 6 mm et dont le diamètre de trou est supérieur de 1,5 mm (valeur nominale) à celui du fût doivent être placées sous l'écrou des boulons à fût tourné ;
- les trous dans lesquels sont installés les boulons calibrés doivent répondre aux tolérances h11 et H11 ;
- la différence entre le diamètre du fût de boulon et le bord du trou ne doit pas excéder 0,3 mm.

Les avantages comparés des boulons injectés et des boulons calibrés sont les suivants :

– les boulons injectés possèdent un comportement similaire à celui des boulons calibrés en étant moins onéreux. Ils constituent un moyen fiable pour réaliser des assemblages exempts de tout glissement lorsqu'ils sont sollicités en cisaillement. Ils sont particulièrement efficaces dans les assemblages de plats épais où l'alésage est très coûteux ;

– les boulons injectés peuvent être installés dans des trous de diamètre habituel, c'est-à-dire de 2 ou 3 mm supérieurs au diamètre du boulon. Ce n'est pas le cas des boulons calibrés.

6.1.5 Rondelles indicatrices de précontrainte

Les rondelles indicatrices de précontrainte sont assez largement utilisées dans les pays anglo-saxons où elles sont plus connues sous le sigle DTI (*Direct Tension Indicator*). Ce sont des rondelles en acier trempé munies de saillies sur l'une de leurs faces, comme illustré à la figure 29. Les saillies sont en contact avec la face inférieure de la tête du boulon, ménageant ainsi un espace libre. Dès que le boulon est serré, les saillies s'aplatissent et l'espace libre se réduit. Lorsque l'espace résiduel a atteint une valeur bien spécifique, contrôlée à l'aide d'une jauge d'épaisseur, la traction induite dans le boulon est supérieure à la valeur minimale prescrite dans les codes. La figure 30 montre l'assemblage avant et après serrage



Figure 29 – Rondelles indicatrices de précontrainte

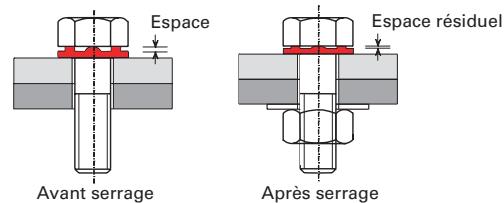


Figure 30 – Mise en œuvre des rondelles indicatrices de précontrainte

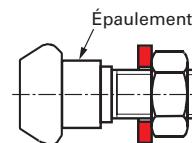


Figure 31 – Boulon Quicon

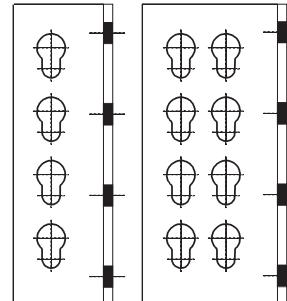


Figure 32 – Cornières ou té du système Quicon

6.1.6 Procédé Quicon

Il s'agit d'un système destiné à limiter le temps et les tâches de montage sur chantier pour des assemblages poutre-poteau. En effet, tous les boulons sont installés et serrés en usine.

Les boulons Quicon (figure 31) comportent une tête de forme très spécifique, une partie lisse munie d'un épaulement, une rondelle et un écrou. Des pièces d'assemblage spéciales (figure 32), en cornière ou en té, comportent des trous en forme de boutonnière tels que la tête du boulon puisse passer dans la zone de grand diamètre, la dimension de l'épaulement correspondant à la zone de petit diamètre.

Réservés aux assemblages poutre – poteau, les boulons Quicon sont montés en usine sur les profils des poutres et les cornières ou les té spéciaux sont installés à l'aide de boulons traditionnels sur les poteaux (figure 33).

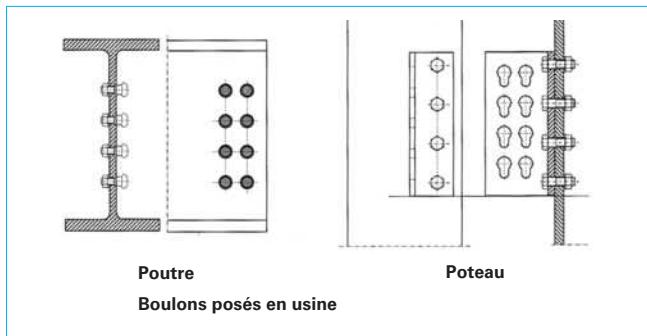


Figure 33 – Assemblage poutre – poteau par boulons Quicon

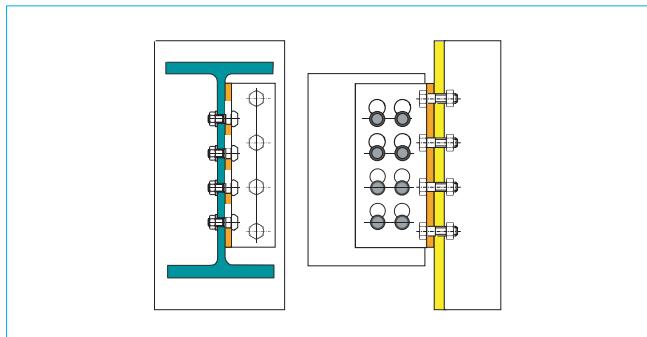


Figure 34 – Assemblage poutre – poteau par boulons Quicon : montage terminé

Sur chantier, il ne reste plus qu'à faire rentrer les têtes des boulons dans les boutonnières puis à faire descendre les poutres afin que les épaulements rentrent dans leurs logements (figure 34). L'installation est terminée.

Bien sûr, ces assemblages ne peuvent transmettre aucun moment mais ils présentent l'avantage d'une mise en œuvre simple et très rapide au niveau du chantier.

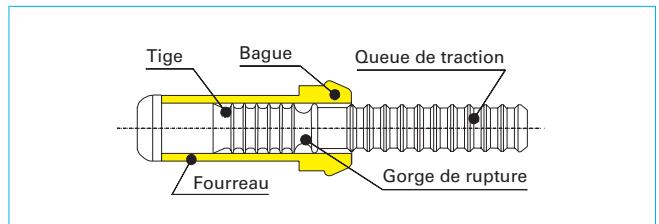


Figure 35 – Boulon BOM

6.2 Procédés pour assemblages aveugles

Nous présentons ici les techniques utilisées pour les assemblages aveugles : assemblages sur des tubes ou liaisons accessibles d'un seul côté, par exemple.

6.2.1 Boulons BOM

Le boulon BOM (de l'anglais « *Blind Oversized Mechanically* ») fonctionne sur les principes combinés des rivets aveugles et des boulons sertis. Il est constitué d'une tige munie d'une queue de traction et d'une bague comportant un fourreau (figure 35).

Le procédé d'installation est représenté à la figure 36. Le boulon est mis en place dans un trou réalisé au préalable (a). L'outil de pose vient ensuite saisir l'extrémité de la tige pour y appliquer un effort de traction. Dans un premier temps, un bulbe se crée du côté non accessible (b) créant ainsi la tête seconde du dispositif. La traction augmentant, la bague vient se sertir sur les cannelures de la tige (c). L'installation se termine par la rupture de la gorge prévue à cet effet (d).

Ce boulon est disponible dans différents diamètres (exprimés en pouces) allant de 5 mm à 19 mm environ. Sa résistance à la traction correspond sensiblement à 80 % de la résistance d'un boulon traditionnel de qualité 8.8 et de même diamètre (voir tableau 10). La ruine en traction correspond à la rupture par cisaillement du bulbe créé dans la zone aveugle. Par contre, du fait du traitement thermique réalisé sur la tige, la résistance au cisaillement de ce boulon est relativement importante. Elle est pratiquement égale à 2 fois celle d'un boulon équivalent de qualité 8.8. En conséquence,

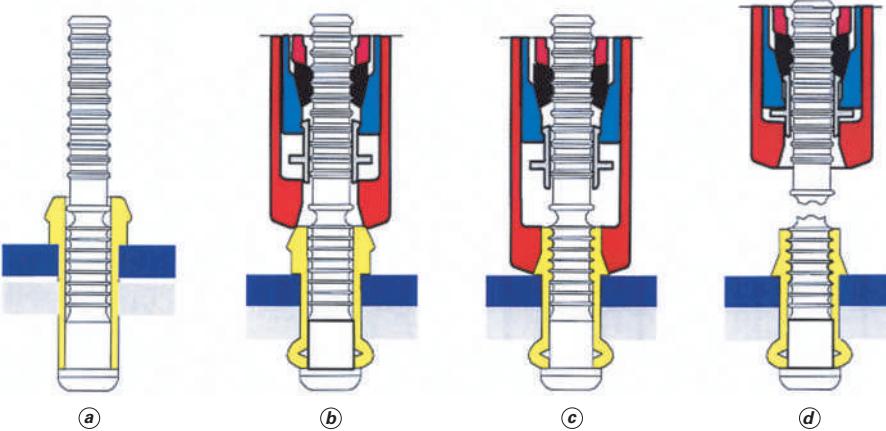


Figure 36 – Installation d'un boulon BOM

Tableau 10 – Comparaison de résistances caractéristiques pour quelques assemblages

Boulon	\varnothing (mm)	$F_{p,C}$ (kN)	F_{t,R_k} (kN)	F_{v,R_k} (kN)
HR qualité 8.8	M20	130	168	110 (partie filetée) 126 (partie lisse)
BOM	M19	40	116	171
HSBB	M20	130	173	78

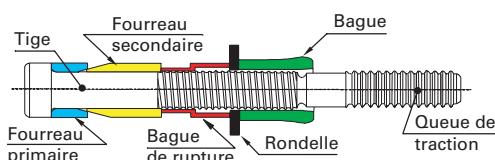


Figure 37 – Composants d'un boulon HSBB

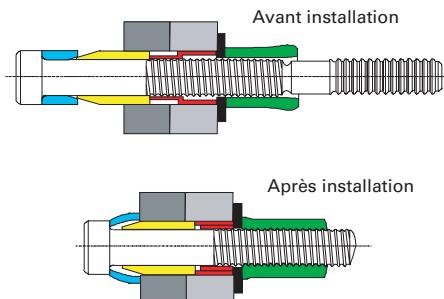


Figure 38 – Boulon HSBB avant et après installation

cet assemblage est plutôt bien adapté aux assemblages sollicités perpendiculairement aux axes des boulons.

6.2.2 Boulons HSBB

Le boulon HSBB (de l'anglais *High Strength Blind Bolt*) est un boulon aveugle à haute résistance. Plus récent que le précédent, il a été conçu pour pouvoir fournir une précontrainte comparable à celle d'un boulon HR à serrage contrôlé de qualité 8.8. Ses différents constituants sont représentés à la figure 37.

La figure 38 représente un boulon HSBB avant et après montage. L'installation consiste à forcer le fourreau primaire à venir recouvrir le fourreau secondaire en créant ainsi la tête seconde du dispositif du côté aveugle de l'assemblage. Une fois cette opération réalisée, la bague de rupture cède, libérant alors la rondelle et la bague qui viennent en contact avec les pièces à assembler. La résistance offerte alors permet de sertir la bague sur les cannelures en réalisant ainsi la liaison durable. Pour terminer, et comme précédemment avec tous les systèmes sertis, la tige se rompt au niveau de la gorge de rupture.

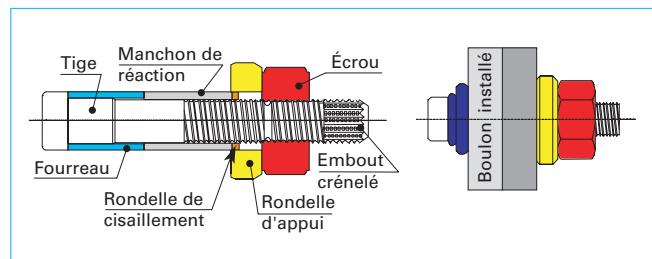


Figure 39 – Boulon aveugle Ultra-Twist

Les principaux résultats d'essais réalisés sur ce boulon sont indiqués dans le tableau 10 comparativement à des valeurs correspondant à des boulons HR 8.8 (selon l'Eurocode 3) et à des boulons BOM de diamètre comparable. On peut remarquer que le boulon HSBB fournit une assez bonne résistance en traction mais que sa résistance en cisaillement est assez limitée (due principalement à son diamètre de tige relativement faible).

6.2.3 Boulons aveugles Ultra-Twist

Un autre type d'assemblage a été développé récemment. Il s'agit du boulon aveugle Ultra-Twist représenté à la figure 39.

Les phases d'installation sont détaillées à la figure 40. Le boulon est installé dans le trou réalisé au préalable du côté accessible (a). Un pistolet de pose pour boulon « TC » est positionné sur l'embout crénélisé. Sous son action, un bulbe se forme du côté aveugle (b). La charge continuant à augmenter, la rondelle de cisaillement se rompt ce qui permet au bulbe de venir en contact avec la paroi intérieure (c). Dans cette configuration, le boulon devient équivalent à un boulon TC. La rotation de l'outil vient visser l'écrou sur la tige et achève l'installation. La précontrainte est installée et l'embout crénélisé se rompt (d).

Les caractéristiques mécaniques de ce boulon sont données dans le tableau 11. En comparant ces valeurs avec celles du tableau 10, on notera que ce nouveau produit présente de bonnes caractéristiques à la fois en traction et en cisaillement. Utilisant le même pistolet de pose que les boulons TC, il n'est pas nécessaire d'avoir recours à un outil de sertissage spécifique, ce qui rend le boulon aveugle Ultra-Twist encore plus attrayant.

6.2.4 Procédé Lindapter

Les boulons Lindapter sont d'autres produits disponibles pour des assemblages de tubes. Leur principe de fonctionnement est celui des chevilles de fixation dont l'écartement de la partie extérieure offre une certaine résistance à l'arrachement.

Il existe deux boulons de ce type, le Hollo-bolt (figure 41) et le Lindibolt (figure 42).

Tous les deux sont constitués d'une tige filetée qui entraîne une pièce cylindrique conique en translation. Dans son déplacement, l'élément intérieur provoque l'écartement des lèvres de la partie extérieure fendue assurant ainsi la fixation.

La tige filetée des boulons Hollo-bolt se termine par une tête hexagonale permettant la mise en rotation de la tige. Un écrou disposé sur la tige intérieure filetée des Lindibolts vient s'appuyer sur la partie extérieure. Lorsqu'il est mis en rotation, il exerce une traction sur la partie intérieure. Un autre écrou, visé sur la partie extérieure filetée, joue le rôle de tête. Il empêche le boulon de rentrer dans le tube et il permet un réglage de l'épaisseur du dispositif. Les figures 43 et 44 montrent des boulons Lindapter après installation. Le tableau 12 fournit les résistances garanties par le fabricant.

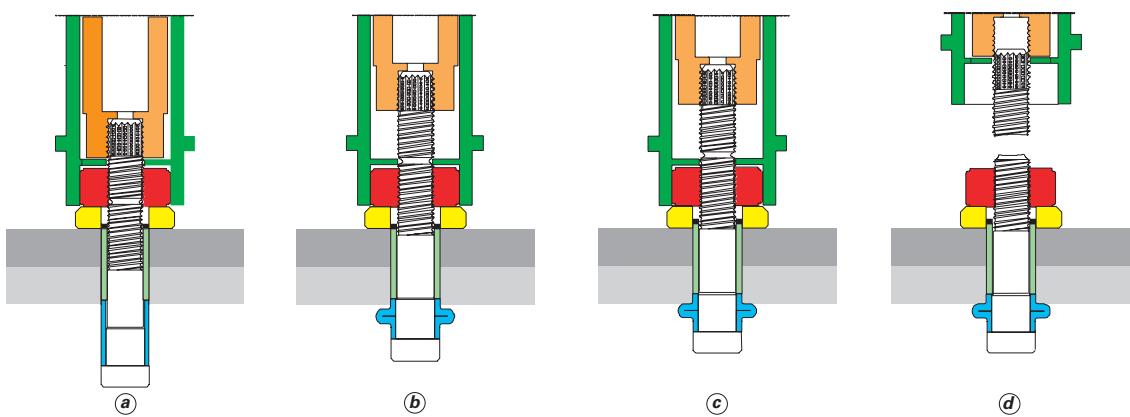


Figure 40 – Installation d'un boulon aveugle Ultra-Twist

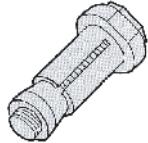


Figure 41 – Hollo-bolt

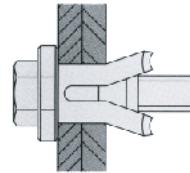


Figure 43 – Hollo-bolt installé

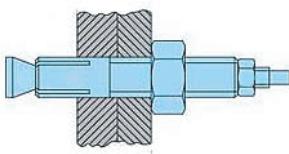


Figure 42 – Lindibolt

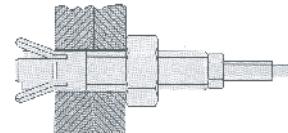


Figure 44 – Lindibolt installé

Tableau 11 – Résistances caractéristiques en traction et en cisaillement des boulons aveugles Ultra-Twist

\varnothing (mm)	A_s (mm ²)	$F_{p,C}$ (kN)	F_{t,R_k} (kN)	F_{v,R_k} (kN)
20	169	138,04	182,7	121,8
24	235	191,76	253,8	169,2
27	321	261,80	346,5	231,0

Tableau 12 – Résistances garanties pour les boulons Lindapter (en kN)

Diamètres	Hollo-bolt		Lindibolt	
	F_{t,R_k} (1)	F_{v,R_k}	F_{t,R_k}	F_{v,R_k}
M8	4 à 6	5		
M10	6 à 10	10	1,5	3,4
M12	6,5 à 15	15	3,7	5
M16	8 à 33	30	5,2	9,8
M20	16 à 46	40	8,6	15,2
M24			12,6	22,5

(1) dépend de l'épaisseur des parois du tube.

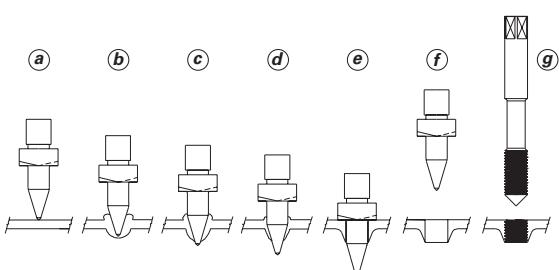


Figure 45 – Mise en œuvre du procédé Flowdrill

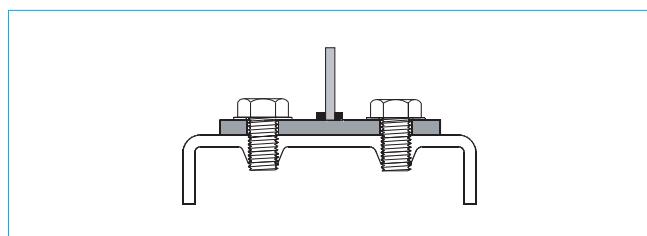


Figure 46 – Assemblage réalisé à l'aide du procédé Flowdrill

6.2.5 Procédé Flowdrill

Si l'épaisseur de la paroi d'un tube était suffisante (au moins 16 mm), il serait possible de la percer et d'exécuter un taraudage ; dans ce cas, les parois elles-mêmes joueraient en quelque sorte le rôle d'écrou. Comme les tubes utilisés en construction métallique sont généralement assez minces, ils ne permettent pas de réaliser de telles opérations, le nombre de filets ainsi formés serait trop faible pour pouvoir assurer un assemblage correct.

Le procédé « Flowdrill » est une alternative à cette démarche. C'est un procédé de forage thermique qui permet de réaliser un trou dans une paroi métallique sans que la perte de matière soit trop importante. Le trou ainsi réalisé peut ensuite être taraudé.

Ce procédé se réalise en deux phases illustrées à la figure 45. Dans la première, (a) à (f), un poinçon conique en carbure de tungstène est installé dans le mandrin d'une perceuse industrielle. Mis en rotation, il vient en contact avec la paroi (a). Par frottement sur cette dernière, il génère la chaleur nécessaire pour ramollir l'acier (b). Le poinçon pénètre alors dans la paroi en refoulant le métal et en créant une excroissance cylindrique (c) à (d). Pour

terminer, les lèvres de la collerette viennent fraiser la partie extérieure de l'excroissance (e) et il ne reste plus qu'à extraire l'outil (f). Dans la seconde phase (g), un taraudage permet de créer un nombre de filets suffisant pour pouvoir mettre en place une vis classique. La figure 46 représente un assemblage réalisé par ce procédé.

Dans son développement actuel, le procédé Flowdrill est utilisable pour des parois d'épaisseur inférieure à 12,5 mm. Il est à noter que des études ont montré que pour des parois d'épaisseur au moins égale à 6,3 mm, les résistances offertes par ce mode d'assemblage sont comparables à celles obtenues avec un système vis écrou traditionnel.

6.3 Procédés pour éléments minces

6.3.1 Clinchage

L'assemblage par clinchage est une technique relativement récente utilisée pour assembler entre eux des éléments minces formés à froid. C'est une méthode mise au point pour éviter les risques de corrosion associées au perçage car elle n'endommage pas la galvanisation.

L'assemblage par clinchage consiste à poinçonner deux tôles minces superposées (mais sans déboucher et donc sans les découper) puis à les mettre en forme.

La figure 47 montre le principe des opérations de réalisation d'un tel joint.

La figure 48 présente une coupe réalisée dans l'axe d'un joint. Elle met en évidence les déformations transversales qui résultent des opérations de formage. On remarque que le poinçon repousse les tôles suffisamment pour qu'au niveau des angles une excroissance se crée. Cette opération se solde donc par une sorte de sertissage. La liaison obtenue est alors capable de supporter des sollicitations de cisaillement mais aussi un effort de traction perpendiculaire aux plats.

6.3.2 Joint Rosette

Le système Rosette s'appuie sur un concept original de liaison par sertissage.

Ce procédé a été développé pour une utilisation dans des cloisons, des treillis et des fermes de 6 à 15 m de portée. Intégré à une chaîne de préfabrication, il permet de fournir des composants préfabriqués légers, faciles à manipuler et à transporter dans un délai très court et régulier.

La liaison est réalisée entre les deux pièces à assembler selon le schéma de la figure 49.

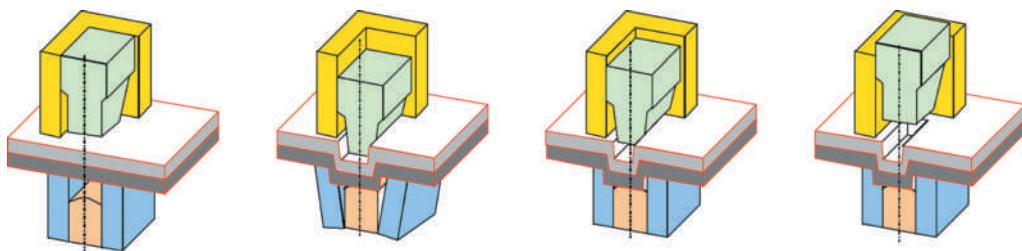


Figure 47 – Schéma de réalisation d'un clinchage

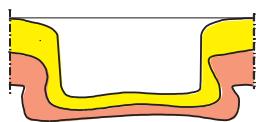


Figure 48 – Coupe d'un assemblage par clinchage

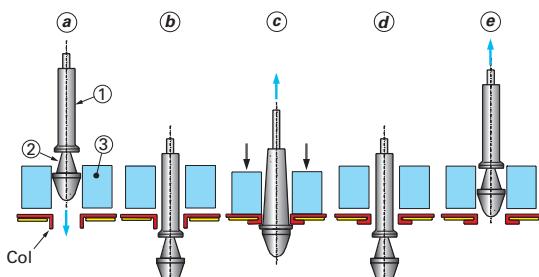


Figure 49 – Schéma de principe de réalisation du joint Rosette

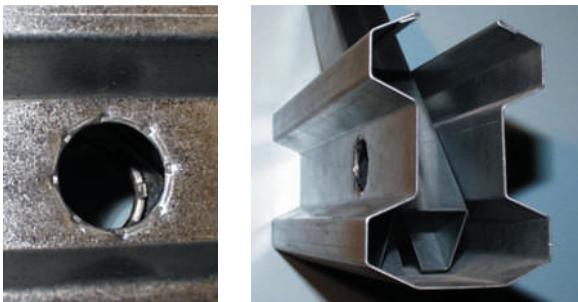


Figure 50 – Exemple de joint Rosette après mise en œuvre

Une des pièces possède un trou de 15 à 50 mm de diamètre selon l'assemblage à réaliser. L'autre est munie d'un trou un peu plus petit (diamètre inférieur de 2 mm au précédent) et elle est équipée d'un col d'environ 4 mm de hauteur.

Dans un premier temps, les profilés sont disposés selon leur orientation relative définitive, le col de la seconde pièce étant disposé dans le trou de la première (a). Dans un second temps, l'outil de sertissage est introduit librement dans le trou (b). Une fois que l'outil a traversé les deux pièces, l'élément intérieur (2) est tiré par un vérin hydraulique en même temps que le cylindre creux (3) s'appuie sur la base du col (c). Cet élément intérieur écarte alors la pièce extérieure (1) constituée d'éléments déformables (languettes) qui viennent refermer le col sur la pièce avec trou. Au droit de chaque languette, des dents se forment qui empêchent la rotation dans le plan du joint. Il ne reste plus qu'à repousser l'élément intérieur pour redonner sa forme initiale à la pièce extérieure de l'outil (d) puis à retirer l'ensemble (e). Le sertissage du col autour du trou constitue donc l'assemblage. La figure 50 montre un joint terminé.

Ce procédé s'appuie sur une déformation locale des pièces. Il ne demande ni chauffage, ni d'utiliser des moyens d'assemblage autres que la matière des profilés à assembler. À l'issue de la mise en œuvre, du fait de sa grande ductilité, le revêtement de protec-

tion ne semble pas endommagé. À l'examen visuel du joint, il n'apparaît en effet aucune déchirure dans la zone de sertissage. Il faut également noter que le jeu initial qui existe entre les deux pièces est entièrement supprimé pendant l'opération de sertissage du col par les rayons de pliage.

Toute l'opération s'effectue comme un assemblage aveugle, d'un seul côté des pièces. Cette caractéristique importante est à l'origine de la simplicité et de la rapidité du processus de couplage.

Des résultats d'essais montrent que la capacité en cisaillement de ce joint est suffisante pour des applications en fermes, treillis et cloisons. De plus, on peut noter que la faible dispersion des résultats expérimentaux est un élément important concernant la qualité de ce système constructif.

7. Attachés par axes d'articulation

Les attaches par axes d'articulation sont composées d'un axe et de chapes ou de pièces munies d'un perçage qui sont articulées autour de l'axe (figure 51). Elles sont sollicitées par un effort de traction F_{Ed} et elles doivent généralement permettre une rotation relative plus ou moins importante.

Selon les cas, l'axe peut être remplaçable ou non et il convient de veiller à ce qu'il ne puisse pas se détacher.

Exigences géométriques pour les éléments articulés

Selon que l'épaisseur t ou la géométrie des pièces sont données (figure 52), les dimensions à respecter sont les suivantes :

$$\begin{aligned} t &\geq 0,7 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y}} \quad \text{et} \quad d_0 \leq 2,5t \\ a &\geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{2d_0}{3} \quad \text{et} \quad c \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{d_0}{3} \end{aligned}$$

avec γ_{M0} coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1])

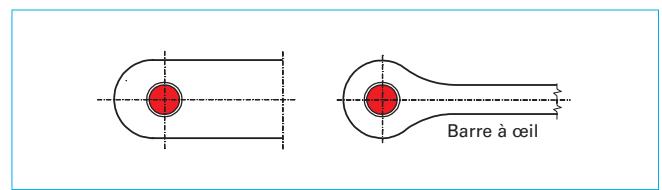


Figure 51 – Attaque par axe d'articulation

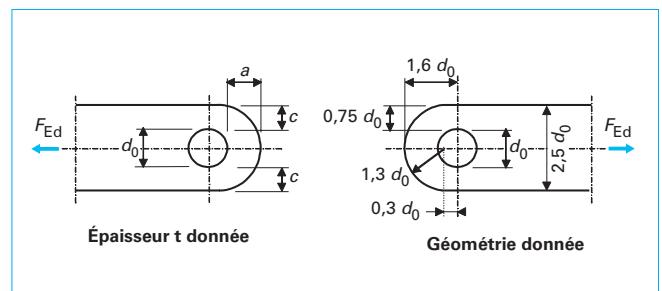
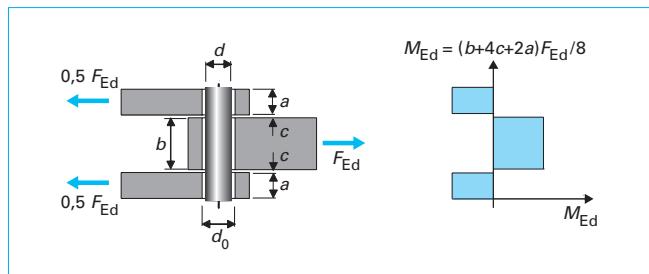


Figure 52 – Exigences géométriques

Tableau 13 – Critères de calcul pour les attaches articulées

Mode de ruine	Exigences de calcul
Résistance au cisaillement de l'âme	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 A f_{up}}{\gamma_{M2}} \geq F_{v,Ed}$
Résistance en pression diamétrale de la plaque et de l'axe	$F_{b,Rd} = \frac{1,5 t d f_y}{\gamma_{M0}} \geq F_{b,Ed}$
Si l'axe est prévu pour être remplaçable	$F_{b,Rd,ser} = \frac{0,6 t d f_y}{\gamma_{M6,ser}} \geq F_{b,Ed,ser}$
Moment résistant à la flexion de l'axe	$M_{Rd} = \frac{1,5 W_{el} f_{yp}}{\gamma_{M0}} \geq M_{Ed}$
Si l'axe est prévu pour être remplaçable	$M_{Rd,ser} = \frac{0,8 W_{el} f_{yp}}{\gamma_{M6,ser}} \geq M_{Ed,ser}$
Résistance de l'axe à une combinaison de cisaillement et de flexion	$\left(\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right)^2 + \left(\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right)^2 \leq 1$

d diamètre de l'axe d'articulation
 f_y plus faible contrainte de calcul dans l'axe ou dans la pièce attachée
 f_{up} résistance ultime en traction de l'axe d'articulation
 f_{yp} limite d'élasticité de l'axe d'articulation
 t épaisseur de la pièce attachée
 A aire de l'axe d'articulation
 W_{el} module élastique
 γ_{M2} coefficient partiel de sécurité (cf. [C 2 520, tableau 1])

**Figure 53 – Moment fléchissant exercé dans un axe d'articulation**

■ Calcul des axes d'articulation

Le moment exercé dans l'axe est calculé en prenant l'hypothèse que les pièces attachées constituent des appuis simples et les réactions entre l'axe et les pièces attachées sont supposées uniformément réparties sur la longueur de chaque pièce (figure 53).

Si l'axe est prévu pour être remplaçable, la pression diamétrale de contact est limitée pour éviter l'endommagement des pièces. Il convient alors de remplir la condition suivante :

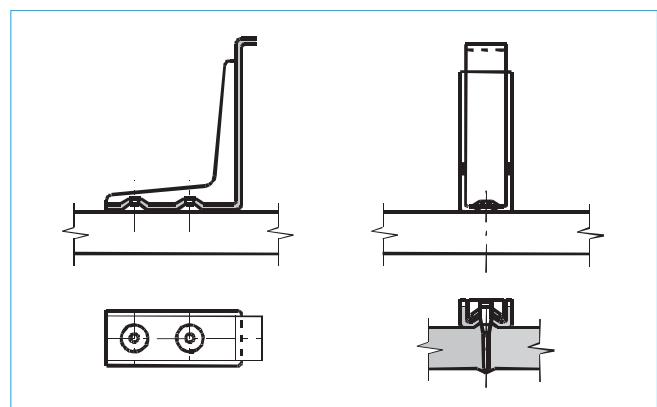
$$\sigma_{h,Ed} = 0,591 \sqrt{\frac{E F_{Ed,ser} (d_0 - d)}{d^2 t}} \leq f_{h,Rd} = 2,5 \frac{f_y}{\gamma_{M6,ser}}$$

avec $\gamma_{M6,ser}$ coefficient partiel de sécurité.

Les exigences de dimensionnement des attaches par axe d'articulation sont données dans le tableau 13.

8. Connecteurs cloués

Des connecteurs cloués au pistolet tels que ceux présentés à la figure 54 sont employés de manière alternative lorsque des tôles profilées en acier sont utilisées et que la puissance électrique nécessaire n'est pas disponible sur le chantier. Ces connecteurs ont pour avantages d'utiliser des pistolets spécifiques à cartouches au lieu de l'équipement spécial nécessaire pour réaliser le soudage complexe au travers des tôles.

**Figure 54 – Connecteurs Hilti**