

**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

UNIVERSITÉ ABOU BAKR BELKAID – TLEMCEM

FACULTÉ DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL



EXERCICES AVEC SOLUTIONS

DES ASSEMBLAGES EN CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES

SELON L'EUROCODE 3



Dr. Mohammed Abdelghani MISSOUM

Décembre 2020

Avant-propos

Ce document, concernant le calcul et la vérification des assemblages courants en constructions métalliques au sens de l'Eurocode 3. Il est destiné à permettre à des étudiants en cours d'études, d'acquérir un minimum d'informations réglementaires pour pouvoir dimensionner et calculer des assemblages simples et compliqués à la fois.

Il est apparu essentiel de rédiger l'actuel document à vocation beaucoup plus pédagogique et compréhensible pour les étudiants intéressés par la construction en acier. Les calculs sont menés selon le règlement Européen « Eurocode 3 ». On peut adapter la même démarche de vérification avec une très légère modification dans le cas du règlement Algérien « CCM 997 » qui est une dérivée de l'Eurocode 3 avec principale différence dans les coefficients partiels de sécurité « γ_{M0} ».

Le choix délibéré a été de traiter les cas les plus généralement rencontrés dans la pratique et que l'utilisateur est prétendu connaître la résistance des matériaux indispensables pour effectuer des choix judicieux.

Il est évidemment nécessaire de compléter ce document par un autre, plus didactique concernant uniquement le cours afin de détailler les différentes méthodes de conception et de vérifications des éléments d'une structure métallique.

1. Table des matières

1.	Table des matières.....	3
1.	Exercice 1 « Influence des défauts de fabrication d'un profilé sur sa résistance »...	13
1.1.	Détermination de l'erreur de tolérance sur l'inertie flexionnelle	13
1.2.	Analyse	14
2.	Exercice 2 « Assemblage de cornières sur un plat »	15
2.1	Calcul de l'effort résistant de traction.....	15
2.1.1.	Résistance au cisaillement	15
2.1.2.	Résistance des pièces à la pression diamétrale	15
2.1.3.	Résistance du plat.....	16
2.1.4.	Résistance des cornières.....	16
2.1.5.	Résistance limite de l'assemblage en traction.....	17
2.2	Résistance limite de l'assemblage en compression	17
2.2.1.	Résistance au cisaillement	17
2.2.2.	Résistance des pièces à la pression diamétrale	17
2.2.3.	Résistance du plat.....	18
2.2.4.	Résistance des cornières.....	18
2.2.5.	Résistance limite de l'assemblage en compression.....	18
3.	Exercice 3 « Assemblage d'une diagonale de contreventement sur gousset ».....	19
3.1.	Résistance de la diagonale à la traction.....	19
3.1.1.	Résistance en section brute	19
3.2.	Résistance du plat	19
3.2.1.	Résistance en section brute	19
3.2.2.	Résistance en section nette.....	20
3.3.	Résistance du gousset.....	20
3.3.1.	Résistance en section brute	20
3.3.2.	Résistance en section nette.....	20
3.4.	Résistance des boulons au cisaillement.....	21

3.5.	Résistance des pièces à la pression diamétrale	21
3.6.	Résistance des soudures.....	22
4.	Exercice 4 « Assemblage couvre joint ».....	23
4.1.	Résistance des boulons au cisaillement.....	23
4.2.	Résistance des pièces à la pression diamétrale	24
4.3.	Résistance des pièces à traction	25
	Exercice 5 « Assemblage d'une double cornière pat soudure sur gousset »	26
5.1.	Détermination des efforts pollicitants chaque cordon de soudure	26
5.2.	Détermination des longueurs des cordons de soudures.....	26
5.2.1.	Cordon 1	26
5.2.2.	Cordon 2	27
6.	Exercice 6 « Assemblage par gousset d'un poteau à une diagonale de contreventement ».....	27
6.1	Vérification des boulons au cisaillement	28
6.2	Vérification des cornières à la traction.....	29
6.3	Traction en section brute	29
6.4	Traction en section nette.....	29
6.5	Vérification à la pression diamétrale des pièces assemblées.....	29
6.6	Vérification de la soudure du gousset au poteau	30
7.	Exercice 7 « Assemblage des nœuds d'une poutre treillis »	31
7.1.	Vérification de la résistance en traction des éléments de la ferme	32
7.1.1	Vérification des membrures supérieure et inférieure	32
7.1.2	Vérification des diagonales.....	32
7.2.	Vérification de la résistance des soudures des diagonales sur les membrures.	33
7.3.	Vérification de la résistance des diagonales	33
7.3.1.	En section brute	33
7.3.2.	En section nette.....	33
7.4.	Autre vérification	34
7.5.	Détermination du nombre de boulons ordinaires M20-8.8.....	34
8.	Exercice 8 – Assemblage des contreventements au pied de poteau	35
8.1.	Détermination du nombre de boulons.....	35

8.2.	Les différentes vérifications à effectuer pour les diagonales.....	36
8.3.	Détermination du nombre de boulons précontraints.....	36
8.4.	Détermination des longueurs des soudures.....	37
9.	Exercice 9 – Assemblage poutre console.....	38
9.1.	Les boulons sont sollicités en :.....	38
9.2.	Détermination de l'effort N_{Sd} maximal que doit supporter cet assemblage...	39
9.3.	Détermination de $N_{Sd \max}$ pour les boulons sollicités en cisaillement.....	39
9.4.	Résistance de la poutre console à la pression diamétrale.....	39
9.5.	Résistance de la poutre console à la flexion.....	40
10.	EXERCICE 10 – Poutre console sollicitée dans différentes configurations.....	42
10.1.	Cas n°1.....	44
10.1.1.	Détermination des efforts de cisaillement dans les boulons.....	44
10.1.2.	Vérification au cisaillement des boulons.....	44
10.1.3.	Vérification de la poutre console en flexion.....	45
10.2.	Cas n°2.....	46
10.2.1.	Détermination des efforts de cisaillement dans les boulons.....	46
10.2.2.	Détermination des efforts de cisaillement dans les boulons.....	46
10.2.3.	Vérification des boulons au cisaillement.....	47
10.3.	Cas n°3.....	48
10.3.1.	Détermination des efforts dans les boulons.....	48
10.3.2.	Efforts de cisaillement dans les boulons (voir 1.1).....	48
10.3.3.	Efforts de traction dans les boulons.....	48
10.3.4.	Efforts résultant dans les boulons.....	48
10.4.	Cas n°4.....	50
10.5.	Cas n°5.....	50
11.	Exercice 11 – Assemblage Solive Poutre par cornières.....	52
11.1.	Vérification de la résistance des cornières et des boulons.....	54
11.1.1.	Vérification de la résistance des cornières.....	54
11.1.2.	Vérification à la traction en section brute et nette.....	55
11.1.3.	Vérification de la résistance des boulons.....	56
11.2.	Vérification de la résistance des cornières et des boulons.....	57

11.3.	Analyse des deux cas « assemblage par boulons » et « assemblage par soudure » au niveau de la poutre.....	58
11.4.	Vérification de la résistance des boulons dans le cas où ils sont précontraints	58
11.4.1.	Calcul de l'effort de précontrainte	58
11.4.2.	Vérification des boulons « Cornières-Poutres »	58
11.4.3.	Vérification des boulons « Cornières-Poteau ».....	59
11.5.	Vérification de l'assemblage par boulons ordinaires et sollicité par un effort tranchant « V_{Sd} » et un moment de flexion « M_{Sd} ». Calculs dans le cas d'une distribution élastique des efforts.....	59
11.5.1.	Vérification des boulons « Cornières-Poutre »	59
11.5.2.	Vérification des boulons « Cornières-Poteau ».....	60
12.	Exercice 12 – Assemblage poutre poteau sollicité en cisaillement.....	62
12.1.	Force de précontrainte	62
12.2.	Résistance au glissement (E.L.S.).....	62
12.3.	Résistance des boulons à l'état ultime « E.L.U. ».....	63
13.	Exercice 13 – Assemblage des contreventements par gousset.....	64
13.1.	Détermination de l'effort maximal « $N_{Sd \max}$ » que doit supporter l'assemblage sans se rompre	65
13.1.1.	Résistance des boulons au cisaillement	65
13.1.2.	Résistance des pièces assemblées à la pression diamétrale	65
13.1.3.	Résistance des pièces assemblées à la traction en section brute et nette(s)	66
13.1.4.	Résistance à traction du gousset.....	67
13.2.	Vérification de la résistance au glissement (E.L.S) de l'assemblage réalisé avec des boulons précontraints.....	68
13.3.	Détermination des longueurs des soudures (cordon ép. =5 mm) longitudinales.....	69
13.4.	Détermination de l'épaisseur du cordon de soudure frontal de l'assemblage	69
14.	Exercice 14 – Assemblage poteau poteau par couvres joints.....	70
14.1.	Vérification de la résistance des boulons	71
14.2.	Vérification de la résistance de l'éclisse (ou couvre joint).....	71
14.3.	Vérification du cordon de soudure.....	72

15.	Assemblage poutre poteau « calcul selon la méthode des composantes »	73
15.1.	Introduction	73
15.2.	Données de l'assemblage	73
15.2.1.	Géométrie de l'assemblage	73
15.2.2.	Soudures	75
15.2.3.	Pinces et entre axes	76
15.2.4.	Distances utiles dans le calcul	77
15.2.5.	Données matérielles.....	78
15.2.6.	Résistance à la traction d'un boulon.....	78
15.2.7.	Coefficients de sécurité	78
15.3.	Calcul du Moment résistant	78
15.3.1.	Étapes de calcul.....	78
15.3.2.	Identification des composantes de base.....	79
15.3.3.	Résistance	79
15.4.	Zone cisailée	81
15.4.1.	Panneau d'âme du poteau en cisaillement $V_{wp,Rd}$	81
15.5.	Zone Comprimée	82
15.5.1.	Âme du poteau en compression $F_{c,wc,Rd}$	82
15.5.2.	Âme et semelle de la poutre en compression $F_{c,b,Rd}$	84
15.5.3.	Récapitulatif des efforts en zone comprimée $F_{c,Rd}$	85
15.6.	Zone tendue.....	85
15.6.1.	Semelle de poteau fléchie $F_{t,fc,Rd}$	87
15.6.2.	Âme de poteau tendue $F_{t,wc,Rd}$	90
15.6.3.	2.4.3 - Platine d'about fléchie $F_{t,ep,Rd}$	92
15.6.4.	Âme de la poutre tendue $F_{t,wb,Rd}$	95
15.6.5.	Récapitulatif des efforts en zone tendue $F_{t,i,Rd}$	97
15.6.6.	Equilibre des efforts	98
15.7.	Moment résistant.....	99
15.8.	Rigidité.....	100
15.8.1.	- Zone cisailée	101
15.8.2.	Zone comprimée.....	101

15.8.3.	Zone tendue.....	101
15.8.4.	Comportement global de l'assemblage étudié.....	104
15.8.5.	Classification.....	105
16.	Exercice 16 « Assemblage Pied de poteau articulé sollicité Compression-cisaillement et Traction cisaillement ».....	106
16.1	Introduction.....	106
16.2	Détail de l'assemblage « Données géométriques ».....	106
16.2.1.	Chargement.....	108
16.3	Vérification à la compression Cisaillement.....	111
16.1.1.	Compression.....	111
16.3.1.	Résistance au cisaillement de l'assemblage.....	112
16.4	Résistance à la traction cisaillement.....	113
16.4.1.	Résistance à la traction.....	113
16.4.2.	Vérification de la résistance au cisaillement des tiges.....	116
17.	ANNEXES.....	117
17.1.	ANNEXE A – Coefficients partiels de sécurité pour les assemblages.....	117
17.2.	ANNEXE B – Sections brutes et nettes.....	118
17.3.	ANNEXE C – Formules de vérification des boulons ordinaires.....	120
17.4.	ANNEXE D – Critère technique de choix de la gorge en fonction des épaisseurs.....	123
17.5.	ANNEXE E – Tableau des classes des sections.....	124
17.6.	ANNEXE F – Tableau des longueurs efficaces.....	126
17.7.	ANNEXE G – Valeurs de Alpha « α ».....	128
17.8.	ANNEXE H – Bras de levier « assemblage poutre poteau ».....	129
18.	Références Bibliographiques.....	130

Notations et Abréviations

γ_c	coefficient de sécurité béton
γ_{M0}	coefficient de sécurité des sections transversale (=1.10 CCM97 ; = 1.00 EC3)
γ_{M2}	coefficient de sécurité des boulons (=1.50 pour la traction et 1.25 pour les autres CCM97 ; = 1.25 EC3)
$\gamma_{Ms,ser}$	coefficient de sécurité au glissement ELS (=1.10)
$\gamma_{Ms,ult}$	coefficient de sécurité au glissement ELU (=1.25)
A	aire de la section de la tige lisse du boulon ou de la section transversale du profilé
a	épaisseur du cordon de soudure (gorge)
A_b	section transversale de la poutre
A_c	section transversale du poteau
a_f	épaisseur du cordon de soudure (gorge) au niveau des semelles
A_{net}	aire de la section nette de la section transversale
A_s	aire de la section de la tige en partie filetée du boulon
A_v	aire de la section cisailée
A_{vc}	aire de cisaillement de la section du poteau
a_w	épaisseur du cordon de soudure (gorge) au niveau de l'âme
$b_{eff,c,wc}$	largeur efficace de l'âme du poteau en compression
$b_{eff,t,wc}$	largeur efficace en traction
b_{fb}	largeur de la semelle de la poutre
b_{fc}	largeur de la section du poteau
b_p	largeur de la platine
$B_{p,Rd}$	effort résistant au cisaillement par poinçonnement de la tête ou l'écrou du boulon
d	diamètre nominal du boulon
d_0	diamètre du trou pour un boulon
d_c	hauteur de l'âme du poteau
d_c	hauteur de l'âme du poteau
d_m	diamètre moyen entre le cercle inscrit et circonscrit de la tête du boulon ou de l'écrou, en prenant la plus petite des deux valeurs
E	module d'élasticité longitudinale
e_1	pince longitudinale entre le centre d'un trou de fixation et le bord adjacent d'une pièce, mesurée dans la direction de l'effort transmis
e_2	pince transversale entre le centre d'un trou de fixation et le bord adjacent d'une pièce, perpendiculairement la direction de l'effort transmis
$F_{b,RD}$	effort résistant de la pièce à la pression diamétrale
$F_{c, b,Rd}$	résistance de l'âme et de la semelle de la poutre en compression
$F_{c,Rd}$	résistance à la compression dans la zone comprimée
$F_{c,wc,Rd}$	résistance de l'âme du poteau en compression
f_{ck}	résistance caractéristique à la compression du béton
$F_{p,Cd}$	effort de précontrainte

$F_{s,Rd,ser}$	effort résistant du boulon au glissement à l'E.L.U
$F_{t,Ed}$	effort de traction de calcul (pièce ou boulon)
$F_{b,Rd(r)}$	résistance potentielle des rangées de boulons dans la zone tendue
$F_{tr,Rd}$	résistance à la traction efficace de chaque rangée de boulons
f_u	limite de rupture de la pièce
f_{ub}	limite de rupture du boulon
f_{uy}	limite élastique du boulon
$F_{v,RD}$	effort résistant au cisaillement du boulon
f_y	limite élastique de la pièce
$f_{y,wc}$	limite élastique de l'âme du poteau
f_{yc}	limite élastique de l'âme du poteau
h_b	hauteur de la poutre
h_c	hauteur de la section du poteau
h_p	longueur de la platine
I_y, I_z	moments d'inertie de flexion
I_{yc}	moment d'inertie de la section du poteau
k_s	facteur de forme
k_{wc}	interaction avec la contrainte de compression dans l'âme du poteau
L	longueur de la barre
L_b	longueur efficace de serrage du boulon
L_c	longueur du poteau
$l_{eff,1}$	longueur efficace d tronçon
m	distance entre l'axe du boulon et le rayon ou la soudure
$M_{b,Rd}$	moment résistant de la poutre
$M_{j,Rd}$	moment résistant de l'assemblage
M_{Sd}	moment de flexion sollicitant
n	nombre de rangées des boulons ou d'interfaces (plans de cisaillement)
$N_{c,Sd}$	effort de compression sollicitant
$N_{pl,Rd}$	résistance plastique de la section transversale
N_{Sd}	effort sollicitant
$N_{t,Sd}$	effort de traction sollicitant
$N_{u,Rd}$	résistance ultime de la section transversale
p_1	entraxe des fixations dans une rangée dans la direction de la transmission des efforts
p_2	pince, mesurée perpendiculairement à la direction de la transmission des efforts, entre des rangées de fixations adjacentes (Dans une attache boulonnée comportant plusieurs rangées de boulons tendus, les rangées de boulons sont numérotés en partant de la rangée de boulons la plus éloignée du centre de compression)
ϕ_{Cd}	capacité de rotation
ϕ_{Ed}	rotation correspondant à $2/3 M_{j,Rd}$
ϕ_{Xd}	rotation correspondant à $M_{j,Rd}$
r_c	rayon de congé de la section du poteau
S_j	rigidité nominale (pente en zone élasto-plastique)

$S_{j,ini}$	<i>rigidité initiale (pente en zone élastique)</i>
t	<i>épaisseur de la pièce (la plus petite épaisseur des pièces assemblées)</i>
t_e	<i>épaisseur de l'écrou</i>
t_{fb}	<i>épaisseur de la semelle de la poutre</i>
t_{fc}	<i>épaisseur de la semelle du poteau</i>
t_{fc}	<i>épaisseur de la semelle du poteau</i>
t_{fc}	<i>épaisseur de l'aile de la section du poteau</i>
T_h	<i>épaisseur de la tête du boulon</i>
t_p	<i>épaisseur de la pièce sous la tête du boulon ou de l'écrou (la plus faible) ou de la platine d'about</i>
t_p	<i>épaisseur de la platine</i>
t_r	<i>épaisseur de la rondelle</i>
t_{wb}	<i>épaisseur de l'âme de la poutre</i>
t_{wc}	<i>épaisseur de l'âme du poteau</i>
V_{Sd}	<i>effort de cisaillement sollicitant</i>
$V_{wp,Rd}$	<i>résistance au cisaillement du panneau d'âme du poteau (zone cisailée)</i>
W	<i>distance entre files de boulons</i>
W_{el}	<i>module élastique de flexion</i>
W_{pl}	<i>module plastique de flexion</i>
$W_{pl,b,Rd}$	<i>module plastique de la poutre selon son axe fort</i>
Z	<i>bras de levier de l'assemblage</i>
z_{eq}	<i>bras de levier équivalent en zone tendue</i>
B	<i>paramètre de transformation</i>
β	<i>paramètre de transformation dépendant de la configuration générale de l'assemblage</i>
ρ	<i>coefficient réducteur du voilement sous compression</i>
ω	<i>coefficient d'interaction avec l'âme du poteau cisailée</i>

Introduction

Le présent document concerne le dimensionnement et la vérification des assemblages métalliques couramment utilisés. Il s'inscrit dans la mise en disposition des étudiants en Licence ou en Master suivant des cours en constructions métalliques afin de les accompagner dans la compréhension du règlement Européen « Eurocode 3 » d'une manière particulière et de son dérivé, le règlement Algérie « CCM 97 ».

Le présent document s'est fixé comme principal objectif de permettre à des étudiants de justifier des zones d'assemblages et des dispositifs utilisés pour les connexions entre les éléments.

L'objet du présent document est spécialement de faciliter la démarche calculatoire en décrivant les principes, en présentant des exemples pratiques d'application.

Dans un premier temps, nous aborderont le dimensionnement des assemblages couvre-joints rencontrés par exemple dans les diagonales de contreventement. On vérifiera les résistances des boulons qu'ils soient ordinaires ou précontraints, la pression diamétrale, le poinçonnement des pièces assemblées ainsi que la résistance dans les sections brute et nettes.

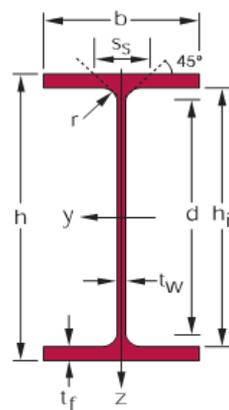
Dans un deuxième temps, deux exemples « Assemblage poutre-poteau » et « Pied de poteau articulé » seront traités d'une manière détaillée. La méthode de calcul appelée « Méthode des composantes détaillée dans l'annexe J de l'Eurocode 3 » sera utilisée pour déterminer le moment résistant et la rigidité des connexions.

1. Exercice 1 : Calcul d'incertitude des défauts de fabrication d'un profilé sur sa résistance »

Les défauts de fabrication d'un produit laminé ou reconstitué soudé sont d'origines diverses et variées. Ils peuvent engendrer une diminution des inerties en plus d'amplifier les phénomènes d'instabilité tel que le voilement.

L'exemple ci-dessous illustre bien l'importance des erreurs commises par exemple dans le calcul du moment d'inertie (et par conséquent la contrainte normale de flexion) du fait des imperfections dimensionnelles des profilés¹.

Considérant une poutre IPE 300 en acier S235 et dont les dimensions et les tolérances de fabrication par laminage sont données, par la norme Suisse CZS C5², sur la Figure 1.



IPE 300
Tolérances de laminage

$h = 300 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
 $b = 150 \text{ mm} \pm 3 \text{ mm}$
 $t_w = 7.1 \text{ mm} \pm 1.5 \text{ mm}$
 $t_f = 10.7 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$

Figure 1 – Dimensions et tolérances de fabrication d'un IPE 300

1.1. Détermination de l'erreur de tolérance sur l'inertie flexionnelle

Le moment d'inertie d'une poutre en profilé IPE est :

$$I_y = I_{y\text{âme}} + 2I_{y\text{semelles}}$$

¹ Les sections réelles présentent cinq types principaux de défauts, à s'avoir :

- Défauts de dimensions (les tolérances varient de 1% sur la hauteur à plus de 15% sur l'épaisseur des ailes, pour des IPE ou HE),
- Défauts d'équerrage (l'âme n'est pas tout à fait orthogonale aux ailes. Ceci est dû dans certain cas au soudage)
- Défauts de symétrie (l'âme peut être incurvée – flèche de 1 à 2 mm),
- Défauts de dressage (la fibre moyenne du profilé peut présenter une flèche de 2 à 3% de sa longueur).

² Les tolérances de laminage sont données par les normes spécifiques à chaque pays. Etant donné que le règlement Algérien CCM97 ne spécifie pas cette donnée, nous utilisons pour exemple la norme Suisse SZS C5.

Par souci de simplification, on va retenir que les inerties des semelles (car ces dernières ont une grande incidence sur l'inertie du profilé).

$$I_y = 2 \left[\frac{b \cdot t_f^3}{12} + b \cdot t_f \left(\frac{h_s}{2} \right)^2 \right]$$

Le premier terme de l'équation peut être aussi négligé par rapport au deuxième terme, alors :

$$I_y = 2 \left[b \cdot t_f \left(\frac{h_s}{2} \right)^2 \right]$$

Avec h_s , la distance entre centre de gravité de la semelle (repère local) et le centre de gravité du profilé (repère globale).

La tolérance relative sur le moment d'inertie est :

$$\frac{\Delta I_y}{I_y} = \frac{\Delta b}{b} + \frac{\Delta t_f}{t_f} + 2 \frac{\Delta h_s}{h_s}$$

$$\frac{\Delta I_y}{I_y} = \frac{3}{300} + \frac{2}{10.7} + 2 \frac{3}{289.3} = 0.218 \approx 22\%$$

La contrainte de flexion simple est :

$$\sigma_{fy} = \frac{M_y}{\frac{I_y}{v}} = \frac{M_y \cdot h}{2 \cdot I_y}$$

L'erreur relative sur la contrainte de flexion est :

$$\frac{\Delta \sigma_{fy}}{\sigma_{fy}} = \frac{\Delta h}{h} - \frac{\Delta I_y}{I_y} = \frac{3}{300} - 0.218 \approx 21\%$$

1.2. Analyse

Les tolérances de fabrication par laminage peuvent induire une sous-estimation de la contrainte de résistance à la flexion de 21% et par conséquent, le fait de pondérer les charges par le coefficient 1.35 (c.-à-d., +35%) permet de surévaluer le moment de flexion (et par conséquent la résistance à la flexion) dans les mêmes ordres de grandeur.

2. Exercice 2 « Assemblage de cornières sur un plat »

Considérant deux cornières de dimensions 40x40x4 mm³ attachées par un boulon à haute résistance M12-8.8 sur un plat de section 90x6 mm² en acier S235 (Figure 2).

La section cisillée de la tige du boulon se trouve en partie filetée.

Calculer les efforts résistants de traction « $N_{t,Rd}$ » et compression « $N_{c,Rd}$ » de l'assemblage.

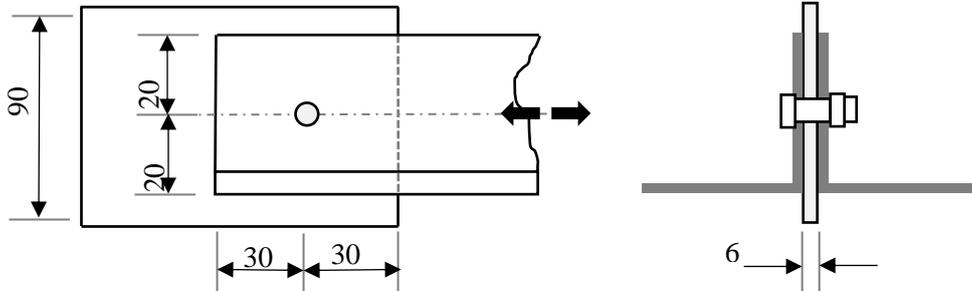


Figure 2 – Assemblage double cornière sur un gousset par un boulon ordinaire

2.1 Calcul de l'effort résistant de traction

2.1.1. Résistance au cisaillement du boulon

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

- ✓ n : Nombre de plan de cisaillement
- ✓ α_v : = 0.6 pour les boulons de classe 8.8
- ✓ f_{ub} : Résistance ultime à la traction de l'acier du boulon A_s : section résistante de la partie filetée du boulon, γ_{M2} Coefficient de sécurité pour ??? ($\gamma_{M2} = 1.25$)

Nous sommes en présence de 2 plans de cisaillement

$$F_{v,Rd} = 2 \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 2 \times \frac{0.6 \times 800 \times 84.3}{1.25} = 64\,742\,N = 64.7\,kN$$

2.1.2. Résistance des pièces à la pression diamétrale

La vérification à la pression diamétrale est effectuée au niveau du plat car l'effort est le double de celui dans la cornière.

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

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right) ; \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2.5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right]$$

- ✓ f_u : Résistance ultime à la traction de l'acier des pièces assemblées
- ✓ f_{ub} : Résistance ultime à la traction de l'acier du boulon
- ✓ d : diamètre de la partie lisse (non filetée) de la tige du boulon, et d_0 : diamètre nominale du trou (tolérance normalisée).
- ✓ t : l'épaisseur la plus mince des pièces assemblées
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right] = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{20}{13} - 1.7 \right); \text{sans objet}; 2.5 \right]$$

$$= \min[2.6; 2.5] = 2.5$$

α_b

$$= \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right] = \min \left[\left(\frac{30}{3 \times 13} \right); \text{sans objet}; \frac{800}{360}; 1 \right] = \min[0.769; 2.22; 1] = 0.769$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \times 0.769 \times 360 \times 12 \times 4}{1.25} = 26\,576 \text{ N} = 26.57 \text{ kN}$$

2.1.3. Résistance du plat

Résistance en section brute

$$N_{1,pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(6 \times 90) \times 235}{1.1} = 115\,363 \text{ N} = 115.4 \text{ kN}$$

Résistance en section nette

$$A_{net} = A - d_0 \cdot t = (6 \times 90) - 14 \times 6 = 456 \text{ mm}^2$$

$$N_{1,u,Rd} = 0.9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0.9 \frac{456 \times 360}{1.25} = 118\,195 \text{ N} = 118.2 \text{ kN}$$

2.1.4. Résistance des cornières

Résistance en section brute (on a deux cornières)

$$2N_{2,pl,Rd} = 2 \cdot \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 2 \times \frac{308 \times 235}{1.1} = 131\,600 \text{ N} = 131.6 \text{ kN}$$

Résistance en section nette

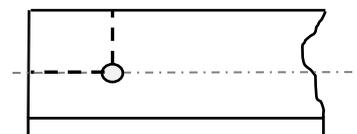


Figure 3 – Section nette cornière

$$A_{net} = [0.6x(30-(14/2)) + (20-(14/2))]x4 = 107.2 \text{ mm}^2$$

$$2N_{2,u,Rd} = 2x0.9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 2x0.9 \frac{107.2x360}{1.25} = 55\,572 \text{ N} = 55.57 \text{ kN}$$

2.1.5. Résistance limite de l'assemblage en traction

$$N_{t,Rd} = \min(F_{v,Rd}; F_{b,Rd}; N_{1,Pl,Rd}; N_{1u,Rd}; 2N_{2,Pl,Rd}; 2N_{2u,Rd};)$$

$$N_{t,Rd} = \min(64.7; 341.5; 115.4; 118.2; 131.6; 55.57)$$

$$N_{t,Rd} = 55.57 \text{ kN}$$

2.2 Résistance limite de l'assemblage en compression

2.2.1. Résistance au cisaillement

L'effort résistant au cisaillement est le même que dans le cas de traction.

Nous sommes en présence de 2 plans de cisaillement (n=2)

$$F_{v,Rd} = n \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 64.7 \text{ kN}$$

2.2.2. Résistance des pièces à la pression diamétrale

La vérification à la pression diamétrale est effectuée au niveau du plat car l'effort est le double de celui dans la cornière.

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

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right]$$

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right] = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{20}{13} - 1.7 \right); \text{sans objet}; 2.5 \right]$$

$$= \min[2.6; 2.5] = 2.5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right] = \min \left[\text{sans objet}; \text{sans objet}; \frac{800}{360}; 1 \right] = \min[2.22; 1]$$

$$= 1.0$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{2.5 \times 1 \times 360 \times 12 \times 6}{1.25} = 51\,840 \text{ N} = 51.84 \text{ kN}$$

2.2.3. Résistance du plat

Résistance en section brute

Idem que dans le cas de la traction

$$N_{1,pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(6 \times 90) \times 235}{1.1} = 115\,363 \text{ N} = 115.4 \text{ kN}$$

2.2.4. Résistance des cornières

Résistance en section brute

$$N_{2,pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{308 \times 235}{1.1} = 65\,800 \text{ N} = 65.8 \text{ kN}$$

2.2.5. Résistance limite de l'assemblage en compression

$$N_{c,Rd} = \min(F_{v,Rd} ; F_{b,Rd} ; N_{1,pl,Rd} ; N_{2,pl,Rd})$$

$$N_{c,Rd} = \min(64.7 ; 51.84 ; 115.4 ; 65.8)$$

$$N_{c,Rd} = \mathbf{51.84 \text{ kN}}$$

3. Exercice 3 « Assemblage d'une diagonale de contreventement sur gousset »

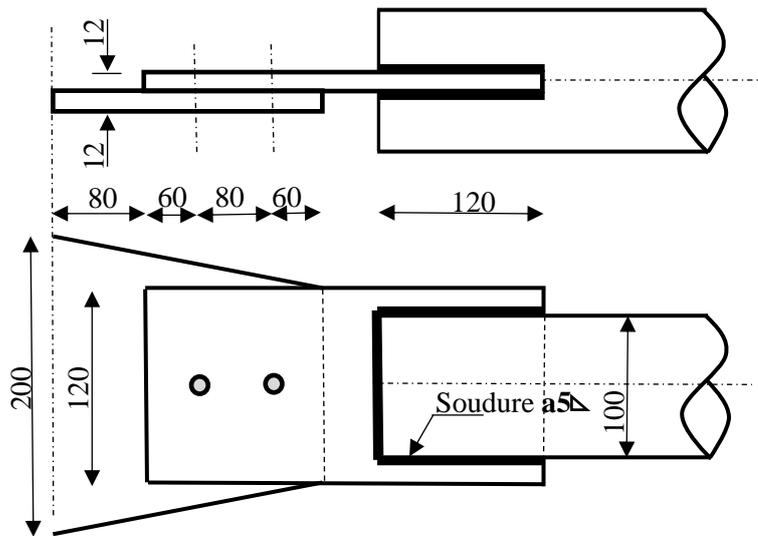


Figure 4 – Assemblage d'une diagonale de contreventement « Tube » sur plat par 2 boulons ordinaires

- ✓ Tube : diamètre extérieur $d_e=100$ mm ; épaisseur ép. =4 mm
- ✓ Plat : 120x12
- ✓ Gousset : largeur max $l_{max}=200$ mm ; largeur mini $l_{min}=120$ mm ; ép. =12 mm
- ✓ Boulons à haute résistance : M24-8.8 ; Section cisillée au niveau de la partie filetée
- ✓ Soudure : cordon d'angle épaisseur $a=5$ mm
- ✓ Acier S235

Quel est l'effort $N_{t,Sd \max}$ que doit supporter l'assemblage ?

3.1. Résistance de la diagonale à la traction

3.1.1. Résistance en section brute

$$A = \frac{\pi}{4} (d_{ext}^2 - d_{int}^2) = 615.5 \text{ mm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{615,5 \times 235}{1.1} = 131\,493 \text{ N} = 131,5 \text{ kN}$$

3.2. Résistance du plat

3.2.1. Résistance en section brute

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{120 \times 12 \times 235}{1.1} = 307\,636 \text{ N} = 307.6 \text{ kN}$$

3.2.2. Résistance en section nette

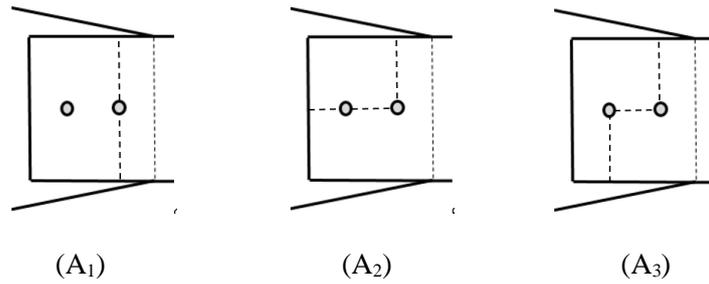


Figure 5 – Sections nettes « plat »

$$A_1 = A_0 - d_0 \cdot t = 1440 - 26 \times 12 = 1128 \text{ mm}^2$$

$$\text{Cisaillement en Bloc : } A_2 = (60 - (26/2) + 0.6(80 + 60 - (3 \times 26/2))) \times 12 = 1291 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = (2 \times (60 - (26/2)) + 0.6(80 - (26/2))) \times 12 = 1610 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = \min(A_1; A_2; A_3) = \min(1128; 1291; 1610) = 1128 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0.9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0.9 \frac{1128 \times 360}{1.25} = 292\,377 \text{ N} = 292.4 \text{ kN}$$

3.3. Résistance du gousset

3.3.1. Résistance en section brute

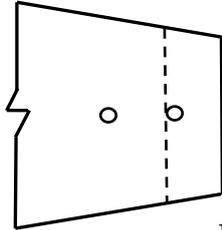


Figure 6 – Section nette 1 « gousset »

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{(144 \times 12) \times 235}{1.1} = 369\,163 \text{ N} = 369.2 \text{ kN}$$

3.3.2. Résistance en section nette

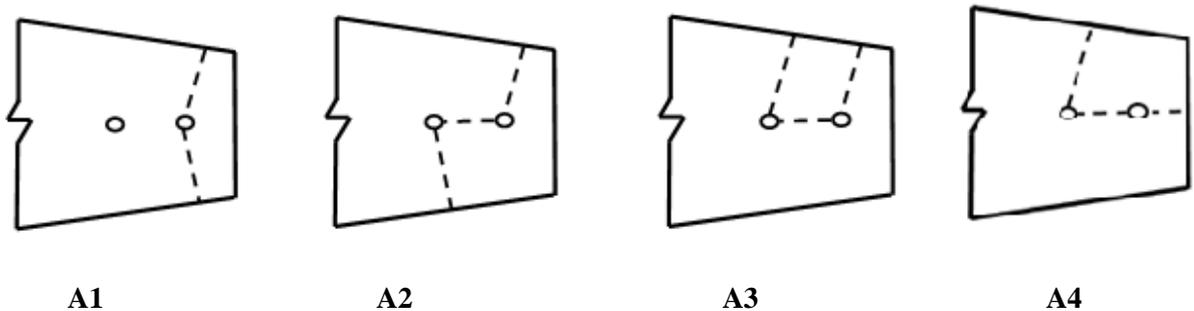


Figure 7 – Sections nettes 2 « gousset »

$$A_1 = 2 \times 54.9 \times 12 = 1318 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = (54.9 + 65.5 + 0.6 \times 54) \times 12 = 1894 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = A_2$$

$$A_4 = (65.5 + 0.6 \times (54 + 47)) \times 12 = 1513 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = \min(A_1; A_2; A_4) = \min(1318; 1894; 1513) = 1318 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0.9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0.9 \frac{1318 \times 360}{1.25} = 341\,625 \text{ N} = 341.6 \text{ kN}$$

3.4. Résistance des boulons au cisaillement

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

- ✓ n : Nombre de plan de cisaillement (n=1)
- ✓ α_v : = 0.6 pour les boulons de classe 8.8
- ✓ f_{ub} : Résistance ultime à la traction de l'acier du boulon A_s : section résistante de la partie filetée du boulon,
- ✓ γ_{M2} Coefficient de sécurité ($\gamma_{M2} = 1.25$)

Nous avons 2 boulons M24-8.8

$$2 \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 2 \cdot \frac{0.6 \times 800 \times 353}{1.25} = 271\,104 \text{ N} = 271.1 \text{ kN}$$

3.5. Résistance des pièces à la pression diamétrale

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

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right]$$

- ✓ f_u : Résistance ultime à la traction de l'acier des pièces assemblées
- ✓ d : diamètre de la partie lisse (non filetée) de la tige du boulon, et d_0 : diamètre nominale du trou (tolérance normalisée).
- ✓ t : l'épaisseur la plus mince des pièces assemblées

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right] = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{60}{26} - 1.7 \right); \text{sans objet}; 2.5 \right]$$

$$= \min[4.76; 2.5] = 2.5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right] = \min \left[\left(\frac{60}{3 \times 26} \right); \left(\frac{80}{3 \times 26} - 0.25 \right); \frac{800}{360}; 1 \right] = \min[1.15; 0.77; 2.22; 1] = \mathbf{0.77}$$

Nous sommes en présence de 2 trous

$$2. F_{b,Rd} = 2 \cdot \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = 2 \times \frac{2.5 \times 0.77 \times 360 \times 24 \times 12}{1.25} = 319\,337 \text{ N} = 319.3 \text{ kN}$$

3.6. Résistance des soudures

Il y a présence de 2 cordons de soudures latéraux et un cordon frontal.

Dans ce cas, nous pouvons utiliser la formule enveloppe qui nous met en sécurité

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F_{Rd} \sqrt{3}}{f_u}$$

$$F_{Rd} \leq \frac{a \cdot \sum l \cdot f_u}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw} \sqrt{3}} = \frac{5 \times (2 \times 120 + 100) \times 360}{0.8 \times 1.25 \times \sqrt{3}} = 353\,338 \text{ N} = 353.3 \text{ kN}$$

L'effort minimal $N_{t,Sd}$ que doit supporter l'assemblage est :

$$N_{t,Sd} \leq \min(F_{Rd}; 2 \cdot F_{b,Rd}; 2 \cdot F_{v,Rd}; N_{Pl,Rd}; N_{1,Pl,Rd}; N_{1u,Rd}; N_{2,Pl,Rd}; N_{2u,Rd};)$$

$$N_{t,Sd} \leq \min(353.3; 319.3; 271.1; 131.5; 307.6; 292.4; 369.2; 341.6)$$

$$N_{t,Sd} \leq \mathbf{131.5 \text{ kN}}$$

En cas de dépassement de la valeur de l'effort sollicitant égale 131,5 kN, il y aura apparition d'une rupture du tube en traction

4. Exercice 4 « Assemblage couvre joint »

Soit l'assemblage couvre joint boulonné en acier S235 devant transmettre une charge dont la valeur est $N_{t,Sd} = 650$ kN.

Les boulons à haute résistance de type M20-8.8 dont on admet que les sections cisillées sont situées dans la partie lisse.

Vérifier la résistance des boulons ainsi que les pièces de l'assemblage pour transmettre cette charge.

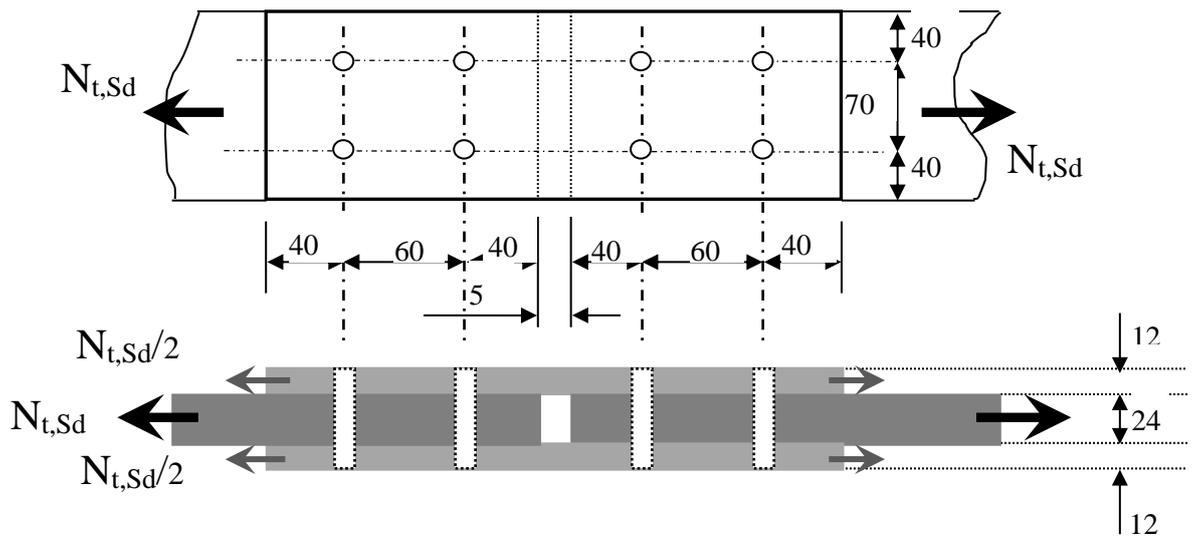


Figure 8 – Assemblage couvre joint par boulons

4.1. Résistance des boulons au cisaillement

La résistance d'un seul boulon en cisaillement :

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

- ✓ $\alpha_v = 0.6$ pour les boulons ordinaires de classe 8.8
- ✓ f_{ub} : Résistance ultime à la traction de l'acier du boulon
- ✓ A_s : aire de la section résistante en traction de la partie lisse du boulon
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \times 800 \times 314}{1.25} = 120\,576 \text{ N} = 120.6 \text{ kN}$$

Nous avons 4 boulons, 2 plans de cisaillement, alors :

$$2 \times 4 \cdot F_{v,Rd} = 8 \cdot \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = 8 \times 120.6 = 964.8 \text{ kN} > N_{t,Sd} = 650 \text{ kN}$$

Les boulons résistent par cisaillement à l'effort sollicitant.

4.2. Résistance des pièces à la pression diamétrale

Le choix de vérification de la pièce la plus fragile à la pression diamétrale dépend principalement de son épaisseur et de l'effort appliqué. Dans notre cas, la pièce centrale présente une épaisseur (24mm) qui est le double de celles des pièces extérieures (12mm). Par contre, l'effort appliqué est le double de ceux des plats extérieurs. La vérifier à la pression diamétrale dans la pièce centrale est identique à celle des pièces extérieures.

Ce qui revient à vérifier :

$$4. F_{b,Rd} = 4. \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \geq \frac{N_{t,Sd}}{2}$$

- ✓ 4 est le nombre de trous,
- ✓ $N_{t,Sd}/2$ est l'effort appliqué aux pièces extérieures. On doit donc prendre $t=12\text{mm}$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

- ✓ f_u : Résistance ultime à la traction de l'acier des pièces assemblées
- ✓ f_{ub} : Résistance ultime à la traction de l'acier du boulon
- ✓ d : diamètre de la partie lisse (non filetée) de la tige du boulon et d_0 : diamètre nominale du trou (tolérance normalisée).
- ✓ t : l'épaisseur la plus mince des pièces assemblées
- ✓ $\gamma_{M2} = 1,25$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} - 1,7 \right) ; 2,5 \right] = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{40}{22} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{70}{22} \right) ; 2,5 \right]$$

$$= \min[5,09 ; 4,45 ; 2,5] = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right] = \min \left[\left(\frac{40}{3 \times 22} \right) ; \left(\frac{60}{3 \times 22} - 0,25 \right) ; \frac{800}{360} ; 1 \right] = \min[0,61 ; 0,66 ; 2,22 ; 1] = 0,61$$

$$4. F_{b,Rd} = 4. \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} \geq \frac{N_{t,Sd}}{2}$$

$$4. F_{b,Rd} = 4. \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = 4x \frac{2,5 \times 0,61 \times 360 \times 20 \times 12}{1,25} = 421\,632\,N = 421,6\,kN > \frac{N_{t,Sd}}{2}$$

$$= 325\,kN$$

Il n'y a pas de déformation des trous de l'assemblage par pression diamétrale

4.3. Résistance des pièces à traction

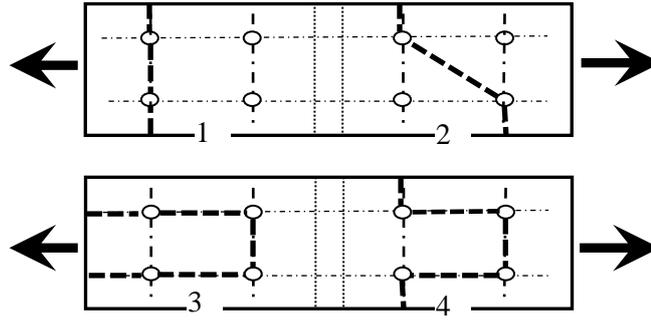


Figure 9 – Sections nettes du couvre joint

$$A_{brute} = A_0 = 150 \times 12 = 1\,800 \text{ mm}^2$$

$$A_{1\,net} = A_{brute} - 2\,d_0 t = 1800 - 2 \times 22 \times 12 = 1\,272 \text{ mm}^2$$

$$A_{2\,net} = A_{brute} - \left[\sum n_i d_0 - \sum \frac{s_i^2}{4p} \right] t$$

$$A_{2\,net} = 1800 - \left[2 \times 22 - \frac{60^2}{4 \times 70} \right] \times 12 = 1\,426 \text{ mm}^2$$

$$A_{3\,net} = \left[0.6 \left(\sum e_{1i} - \sum s_i \right) + \sum p_i \right] t$$

$$A_{3\,net} = [0.6 \times (40 + 60 - 1.5 \times 22) + (70 - 22)] \times 12 = 1058 \text{ mm}^2$$

$$A_{4\,net} = \left[0.6 \left(\sum s_i \right) + \sum p_i + \sum e_{2i} \right] t$$

$$A_{4\,net} = \left[2 \times 0.6 \times (60 - 22) + (70 - 22) + 2 \times \left(40 - \frac{22}{2} \right) \right] \times 12 = 1819 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = \min(A_1; A_2; A_3; A_4) = \min(1272; 1426; 1058; 1819) = 1058 \text{ mm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1800 \times 235}{1.1} = 384\,545 \text{ N} = 384.5 \text{ kN}$$

$$N_{pl,Rd} = 384.5 \text{ kN} > \frac{N_{t,Sd}}{2} = 325 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = 0.9 \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0.9 \frac{1058 \times 360}{1.25} = 274\,233 \text{ N} = 274.2 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = 274.2 \text{ kN} < \frac{N_{t,Sd}}{2} = 325 \text{ kN}$$

Nous sommes en présence d'une rupture des pièces en section nette.

Afin de palier à ce problème, nous pouvons réduire le nombre de trous ou leur diamètre ou bien changer la nuance de leur acier sans oublier de refaire les calculs de la résistance au cisaillement des boulons et la résistance à la pression diamétrale des pièces.

5. Exercice 5 « Assemblage d'une double cornière pat soudure sur gousset »

Soit un assemblage d'une double cornière L55x55x4.5 soudé sur un gousset en acier S235. **Quelle sera la longueur des cordons de soudure (I1 et I2) afin de reprendre l'effort de traction $N_{t,Sd}$?**

Données :

- ✓ Cordons de soudure d'angle avec épaisseur $a=5$ mm
- ✓ L'effort repris par la cornière $N_{t,Sd} = 60$ kN.

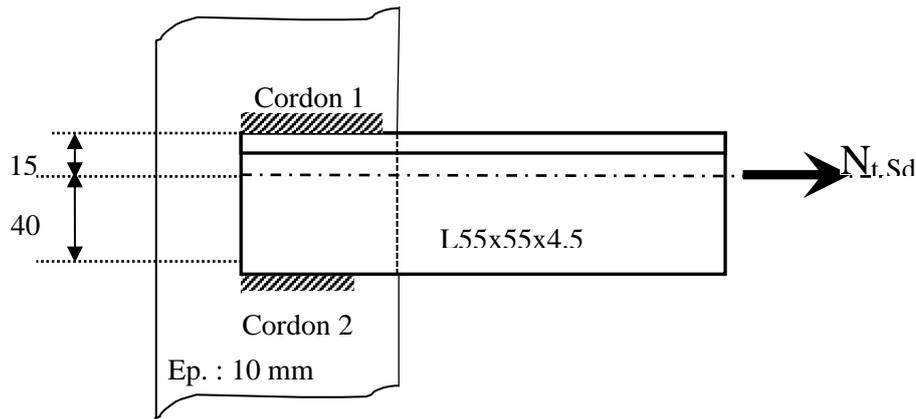


Figure 10 - Assemblage par soudure « Cornière-Gousset »

5.1. Détermination des efforts pollicitants chaque cordon de soudure

$$F_{1,sd} = N_{t,sd} \frac{40}{55} = 60 \frac{40}{55} = 43.6 \text{ kN}$$

$$F_{2,sd} = N_{t,sd} \frac{15}{55} = 60 \frac{15}{55} = 16.4 \text{ kN}$$

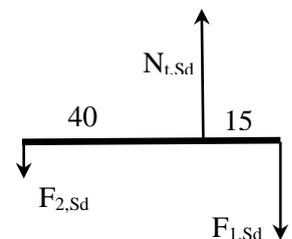


Figure 11 – Schéma RDM « répartition des efforts »

5.2. Détermination des longueurs des cordons de soudures

Nous sommes en présence de cordons latéraux

$$a. \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F\sqrt{3}}{f_u}$$

5.2.1. Cordon 1

$$a. l_1 \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F_{1,sd}\sqrt{3}}{f_u}$$

$$l_1 \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F_{1,Sd} \sqrt{3}}{a \cdot f_u}$$

$$l_1 \geq 0.8 \times 1.25 \frac{43.6 \cdot 10^3 \sqrt{3}}{5 \times 360} = 69.92 \text{ mm}$$

On prend $l_1 = 70 \text{ mm}$

5.2.2. Cordon 2

$$a \cdot l_2 \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F_{2,Sd} \sqrt{3}}{f_u}$$

$$l_2 \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F_{2,Sd} \sqrt{3}}{a \cdot f_u}$$

$$l_2 \geq 0.8 \times 1.25 \frac{16.4 \cdot 10^3 \sqrt{3}}{5 \times 360} = 15.78 \text{ mm}$$

On prend $l_2 = 20 \text{ mm}$

6. Exercice 6 « Assemblage par gousset d'un poteau à une diagonale de contreventement »

Un assemblage d'un tirant de stabilité sur un poteau se portique. Le tirant est réalisé par une double cornière 2L60x60x6 en acier S235 et dont la section brute est $A=6,91 \text{ cm}^2$. L'effort de traction appliqué à cette double cornière est $N_{t,Sd} = 90 \text{ kN}$.

Le gousset présente une épaisseur $\text{ép.}=10 \text{ mm}$, soudé de part et d'autre au poteau par des soudures de 5 mm d'épaisseur. L'angle de la double cornière avec la verticale du poteau est de 45° . L'assemblage est réalisé par des boulons ordianires M12 de classe 6.8. La section cisailée du boulon se trouve en partie lisse.

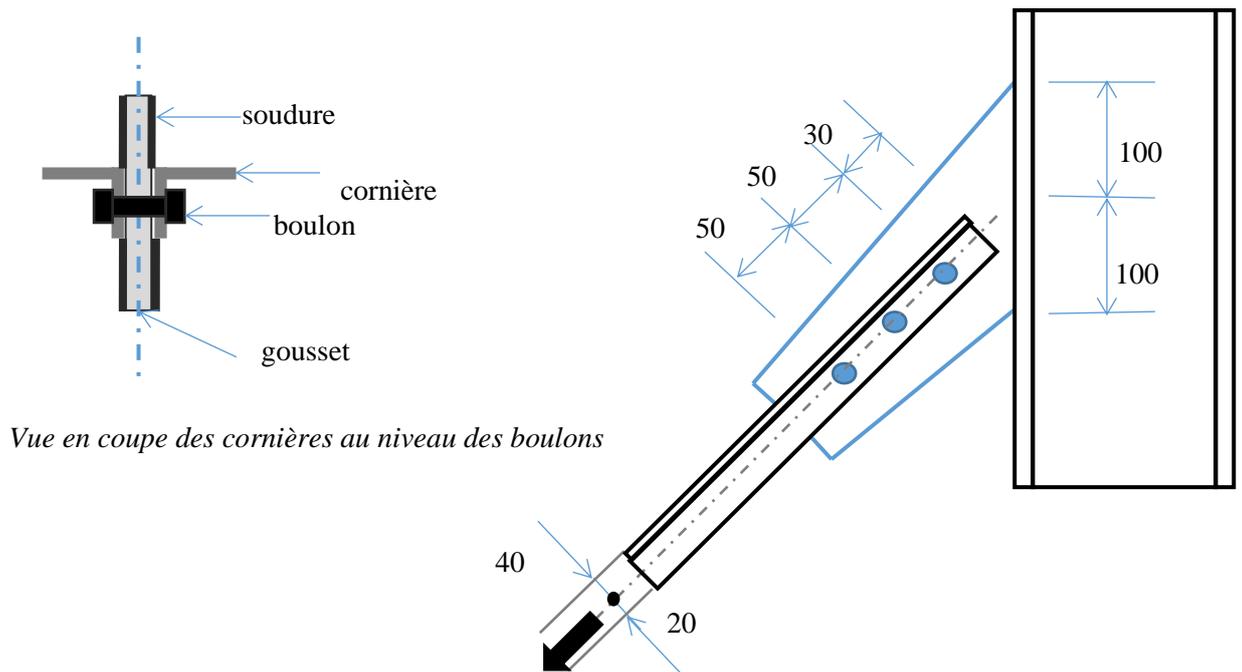


Figure 12 – Sections nettes du couvre joint

Vérifier la résistance des boulons, cornières et des soudures.

6.1 Vérification des boulons au cisaillement

Comme on est en présence d'une double cornière, il y a deux sections cisillées (ce qui augmente la résistance).

L'effort de cisaillement du boulon est donné par la formule :

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

Avec $n=2$ (2 plans de cisaillement)

$\alpha_v=0.5$ (boulons de classe 6.8)

$f_{ub} = 600$ MPa

$A=113.1$ mm²

$\gamma_{M2}=1.25$

$$F_{v,Rd} = 2x \frac{0.5x600x113.1}{1.25} = 54\,288 \text{ N} = 54.29 \text{ kN}$$

L'effort sollicitant $N_{t,sd} = 90 \text{ kN}$ est supérieur à la résistance du boulon $= 54.29 \text{ kN}$.

Les boulons ne résistent pas au cisaillement. Il y a rupture par cisaillement de la tige du boulon en section lisse

6.2 Vérification des cornières à la traction

La vérification des cornières se fait dans les sections brute et nette selon la formule ci-dessous :

$$N_{t,sd} < N_{t,Rd} = \min \left(N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} ; N_{u,Rd} = 0,9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \right)$$

6.3 Traction en section brute

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{691 \times 235}{1.1} = 147\,622 \text{ N} = 147,62 \text{ kN}$$

6.4 Traction en section nette

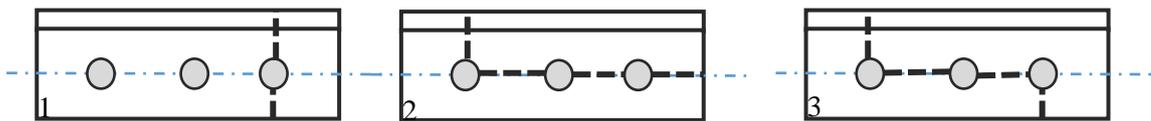


Figure 13 – Sections nettes de la cornière

$$A_1 = A - d_0 \times t = 6.91 \cdot 10^2 - 13 \times 6 = 613 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = ((60 + 34 - 13/2) + 0.5 \times (30 - 13/2 + 2 \times (50 - 13))) \times 6 = 817.5 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = ((60 + 34 - 13/2) + 0.5(2 \times (50 - 13)) + (13 - 13/2)) \times 6 = 766.5$$

$$A_{net} = A_{min} = \min (A_1, A_2, A_3) = 613 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot \frac{613 \times 360}{1.25} = 158\,889 \text{ N} = 158,89 \text{ kN}$$

Alors

$$N_{t,sd} = 45 \text{ kN} < N_{t,Rd} = \min (147,62 \text{ kN} ; 158,89 \text{ kN})$$

Il y a résistance des cornières à la traction en section brute et nette.

6.5 Vérification à la pression diamétrale des pièces assemblées

Etant donné que le gousset possède une épaisseur (ép. = 10 mm) supérieure à celle de la cornière (ép. = 6 mm), il n'est pas nécessaire de vérifier la résistance à la présence diamétrale de ce dernier.

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

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

f_u : limite élastique des pièces assemblées = 360 MPa

d : diamètre du boulon = 12 mm

t : la plus petite épaisseur des pièces assemblées = 6 mm

$\gamma_{M2} = 1.25$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{20}{13} - 1,7 \right) ; 2,5 \right] = 2.5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{30}{3 \times 13} \right) ; \left(\frac{60}{3 \times 13} - 0,25 \right) ; \frac{600}{360} ; 1 \right] = 0,769$$

$$F_{b,Rd} = \frac{2.5 \times 0.769 \times 360 \times 12 \times 6}{1.25} = 39\,864 = 39,86 \text{ kN}$$

$$F_{b,Rd} = 39,86 \text{ kN} < N_{t,Sd} = 45 \text{ kN}$$

Il y a rupture de la cornière par pression diamétrale

6.6 Vérification de la soudure du gousset au poteau

Nous sommes en présence de cordons obliques.

$$a. \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F \sqrt{3 - \sin^2 \alpha}}{f_u}$$

$$5 \times (2 \times 100) = 1000 \text{ mm}^2 \geq 0.8 \times 1.25 \frac{90\,000 \sqrt{3 - 0.5}}{360} = 395 \text{ mm}^2$$

On a résistance de soudures à l'effort de traction

L'assemblage étudié ne résiste pas à la pression diamétrale. Pour pallier à cela, on peut :

- i. Augmenter l'épaisseur des cornières et/ou le diamètre des boulons
- ii. Augmenter les dimensions des cornières et par conséquent les pinces et le pas
- iii. Et en dernier, changer la nuance des aciers des cornières

7. Exercice 7 « Assemblage des nœuds d'une poutre treillis »

Soit une poutre en treillis en acier **S 275** supportant une dalle en béton armé. Cette poutre est représentée en figure ci-dessous. La poutre est chargée aux nœuds.

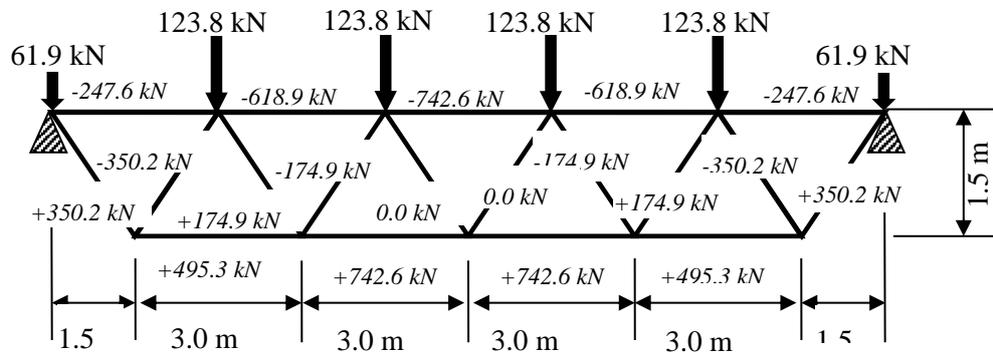


Figure 14 – Chargement de la poutre treillis

1. Dans un premier temps, on suppose que les éléments de la ferme sont soudés entre eux. Les membrures « inférieure et supérieure » sont constituées de profilés tubes carrés « **120x120x6** » dont la section est 26,43 cm². Les diagonales sont réalisées en profilé carré « **80x80x5** » dont la section est 14,36 cm².
 - 1.1 Vérifier la résistance en traction des éléments de la ferme ($N_{sd} > 0$: traction).
 - 1.2 Vérifier la résistance des soudures des diagonales sur les membrures (épaisseur de la gorge est de 8mm ; $f_y = 360$ MPa et $f_t = 235$ MPa)
2. Dans un deuxième cas, les membrures inférieure et supérieure sont constituées en **HEA 140** alors que les diagonales sont réalisées en **2 UPN 80**. Les assemblages des diagonales sur les membrures sont réalisés par un gousset de 10 mm d'épaisseur et sont boulonnées.
 - 2.1 Vérifier la résistance des diagonales en section brute et nette.
 - 2.2 Y a-t-il autres vérification à faire pour les diagonales ?
 - 2.3 Déterminer le nombre de boulons **ordinaires M20** de classe 8.8 et dont la section cisillée se trouve en partie filetée

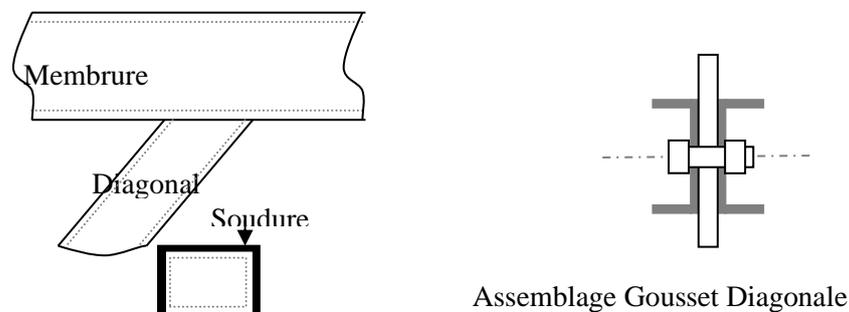
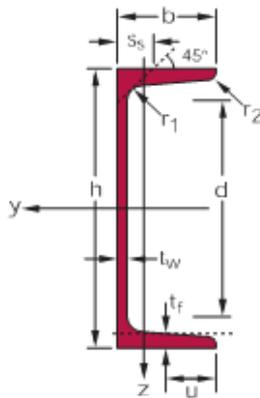


Figure 15 – Assemblage par tirant



– **Caractéristiques géométriques de l'UPN 80**

$h = 80 \text{ mm}$; $b = 45 \text{ mm}$; $t_f = 8 \text{ mm}$; $t_w = 6 \text{ mm}$

Section = 400 mm^2

– **Boulon M20-8.8**

Section lisse : 314 mm^2

Section fileté : 245 mm^2

Diamètre du trou = $d+2\text{mm}$

– **Coef. Sécurité** : $\gamma_{M0} = 1.1$

$\gamma_{M2} = 1.25$

Figure 16 – Dimensions géométriques UPN 80

7.1. Vérification de la résistance en traction des éléments de la ferme

7.1.1 Vérification des membrures supérieure et inférieure

L'effort maximal dans les membrures est égal : $N_{Sd} = 742,6 \text{ kN}$

L'effort résistant de la membrure $N_{pl,Rd}$ est égal :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{26,43 \cdot 10^2 \times 275}{1.1} = 660\,750 \text{ N} = 660,8 \text{ kN}$$

$N_{Sd} = 742,6 \text{ kN}$ est $>$ $N_{pl,Rd} = 660,8 \text{ kN}$

On a rupture par traction de la membrure. Soit on change la section du profilé ou la nuance d'acier

7.1.2 Vérification des diagonales

L'effort maximal dans les diagonales est égal : $N_{Sd} = 350,2 \text{ kN}$

L'effort résistant de la diagonale $N_{pl,Rd}$ est égal :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{14,36 \cdot 10^2 \times 275}{1.1} = 359\,000 \text{ N} = 359 \text{ kN}$$

$N_{Sd} = 350,2 \text{ kN}$ est $<$ $N_{pl,Rd} = 359 \text{ kN}$

On a une résistance de la diagonale en traction

7.2. Vérification de la résistance des soudures des diagonales sur les membrures

On est en présence de cordons de soudure frontaux

On doit vérifier la relation suivante :

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{F\sqrt{2}}{f_u}$$

- ✓ a : épaisseur de la gorge ($a=8 \text{ mm}$)
- ✓ l : longueur du cordon ($l=80 \times 2 + 80 \times 2 / \cos 45^\circ = 386 \text{ mm}$)
- ✓ $\beta_w = 0.8$ et $\gamma_{M2} = 1.25$
- ✓ f_u : limite de rupture du cordon ($f_u=235 \text{ MPa}$)

F : effort appliqué ($F=N_{sd} = 350,2 \text{ kN}$)

$$8 \times 386 > 0.8 \times 1.25 \times 350,2 \times 10^3 \times 1,414 / 235$$

$$3088 \text{ mm}^2 > 2107 \text{ mm}^2$$

Les soudures résistent à la traction

7.3. Vérification de la résistance des diagonales

7.3.1. En section brute

L'effort maximal dans les diagonales constituées de 2 UPN est égal : $N_{sd} = 350,2 \text{ kN}$

Pour **un** UPN est égal : $N_{sd}/2 = 175,1 \text{ kN}$

L'effort résistant d'un UPN $N_{pl,Rd}$ est égal :

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{400 \times 275}{1.1} = 100\,000 \text{ N} = 100 \text{ kN}$$

$N_{sd}/2 = 175,1 \text{ kN}$ est $> N_{pl,Rd} = 100 \text{ kN}$

On a rupture de la diagonale en section brute (soit on change de section ou de nuance d'acier)

7.3.2. En section nette

La section $A_{net} = A - d \times t_w = 400 - 22 \times 6 = 268 \text{ mm}^2$

L'effort résistant d'un UPN $N_{u,Rd}$ est égal :

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot \frac{268 \times 430}{1,25} = 82\,972,8 \text{ N} = 82,9 \text{ kN}$$

$N_{sd}/2 = 175,1 \text{ kN}$ est $> N_{u,Rd} = 82,9 \text{ kN}$

On rupture de la diagonale en section nette (soit on change de section ou de nuance d'acier).

7.4. Autre vérification

Vérification à la Pression diamétrale

7.5. Détermination du nombre de boulons ordinaires M20-8.8

Les boulons sont sollicités en cisaillement

On a deux plans de cisaillement de la tige en partie filetée

- ✓ *L'effort appliqué dans les diagonales est égal : $N_{sd} = 350,2 \text{ kN}$*
- ✓ *La section filetée de la vis est $A_s = 245 \text{ mm}^2$*
- ✓ *La limite élastique du boulon $f_{ub} = 800 \text{ MPa}$*
- ✓ *$\alpha_v := 0.6$ pour les boulons de classe « 8.8 »*
- ✓ *$\gamma_{M2} = 1.25$*

Le nombre de boulons « n » est égale à :

$$n > \frac{N_{sd}}{2 \cdot F_{v,Rd}}$$

Avec :

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,5 \times 800 \times 245}{1,25} = 78\,400 \text{ N} = 78,4 \text{ kN}$$

$$n > \frac{N_{sd}}{2 \cdot F_{v,Rd}} = \frac{350,2}{2 \times 78,4} = 2,23$$

Le nombre de boulons dans l'assemblage reprenant l'effort appliqué N_{sd} est de 3

8. Exercice 8 – Assemblage des contreventements au pied de poteau

Soit un assemblage d'une barre de contreventement sur un gousset (voir figure).

1. Déterminer le nombre de boulons « M20-6.8 » afin de reprendre l'effort de traction dans la barre.
2. Citer les différentes vérifications à effectuer pour les diagonales ?
3. Dans le cas où les pièces assemblées travaillent par frottement, déterminer le nombre de boulons précontraints afin de reprendre l'effort de traction dans les diagonales (pièces assemblées sablées) ?
4. Dans le cas où les barres sont soudées au gousset, déterminer la longueur des cordons de soudure.

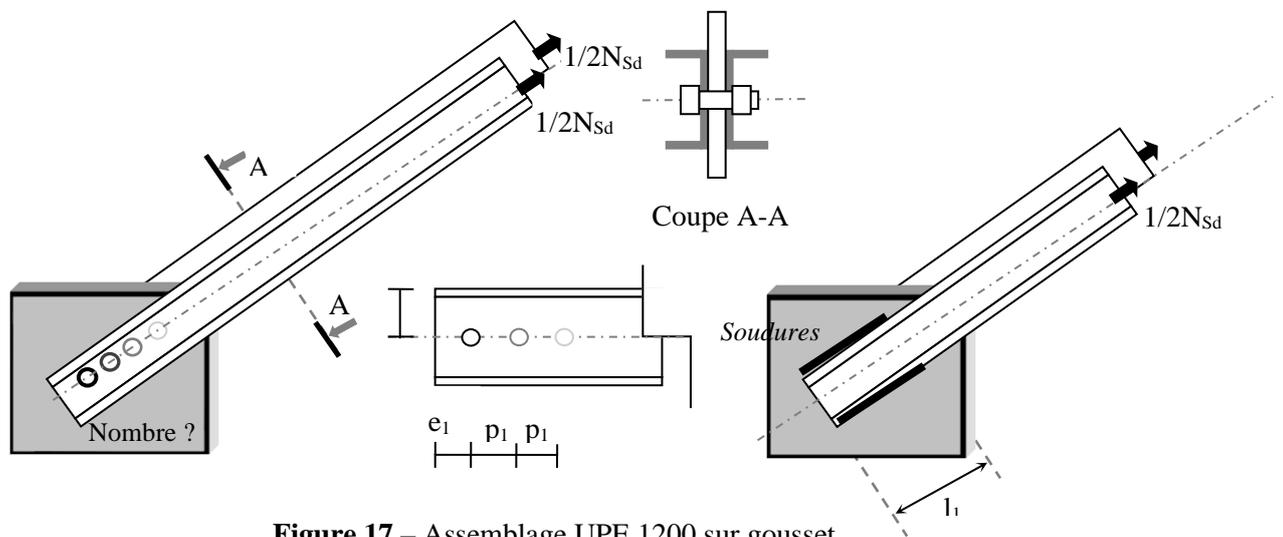


Figure 17 – Assemblage UPE 1200 sur gousset

Données :

- ✓ L'effort résultant dans les diagonales $N_{Sd} = 140$ kN,
- ✓ Boulons M20 de classe 6.8 (section de la partie fileté $A_s = 157 \text{ mm}^2$) et dont la tige est fileté sur toute la longueur,
- ✓ Diagonale de contreventement constituée d'un double UPE 120 (hauteur $h = 120 \text{ mm}$, largeur $b = 60 \text{ mm}$, épaisseur des semelles $t_f = 8 \text{ mm}$; épaisseur de l'âme $t_w = 5 \text{ mm}$, section de 1540 mm^2),
- ✓ Gousset d'épaisseur ép. = 7 mm,
- ✓ Gorge de soudure $a = 4$ mm,
- ✓ Aciers S235,
- ✓ $e_1 = 30$ mm ; $e_2 = 60$ mm ; $p_1 = 60$ mm,

8.1. Détermination du nombre de boulons

Les boulons sont sollicités en cisaillement

La formule de résistance d'un boulon en cisaillement (pour 1 plan de cisaillement) est :

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

- ✓ $\alpha_v = 0.5$ pour les boulons de classe « 6.8 »
- ✓ f_{ub} : limite élastique du boulon = $6 \times 100 = 600 \text{ MPa}$
- ✓ A_s : aire de la section filetée = 157 mm^2
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

Il y a 2 plans de cisaillement (car 2 UPE)

Le nombre de boulons est donnée par :

$$N_b \geq \frac{N_{Sd}}{2 \cdot F_{v,Rd}}$$

$2 \cdot F_{v,Rd}$ car 2 plans de cisaillement

$$F_{v,Rd} = (0,5 \times 600 \times 157) / 1,25 = 37680 \text{ N} = 37,8 \text{ kN}$$

$$N_b \geq (140 \cdot 10^3) / 2 \times 37680$$

$N_b \geq 1,85$ on prend donc 2 boulons

8.2. Les différentes vérifications à effectuer pour les diagonales

- ✓ Vérification à la traction en section brute³
- ✓ Vérification à la traction en sections nettes⁴
- ✓ Vérification à la pression diamétrale⁵

8.3. Détermination du nombre de boulons précontraints

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3ser}} F_{p,Cd}$$

$$\text{Avec } F_{p,Cd} = 0.7 f_{ub} A_s = 0.7 \times 600 \times 245 = 102\,900 \text{ N} = 102.9 \text{ kN}$$

$$^3 N_{pl,Rd} = 329 \text{ kN} \geq N_{Sd} / 2 = 70 \text{ kN}$$

$$^4 N_{u,Rd} = \frac{0.9 A_{net} f_u}{\gamma_{M1}} = 198.2 \text{ kN} \geq N_{Sd} / 2 = 70 \text{ kN}$$

$$^5 F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{1 \times 0.555 \times 360 \times 20 \times 5}{1.25} = 14\,984 \text{ N} = 15.9 \text{ kN} \leq N_{Sd} = 140 \text{ kN} : \text{ Rupture par pression diamétrale}$$

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{1 \times 2 \times 0.5}{1.1} 102.9 = 93.5 \text{ kN}$$

Le nombre de boulons est :

$$n \geq \frac{N_{Sd}}{F_{s,Rd,ser}} = \frac{140}{93.5} = 1.49$$

On peut donc prendre 2 boulons « n=2 »

Assemblage N°2

8.4. Détermination des longueurs des soudures

Il y a présence de cordons latéraux, on va donc utiliser la formule :

$$a. \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd} \sqrt{3}}{f_u}$$

- ✓ a : épaisseur de la gorge = 4 mm
- ✓ l : longueur du cordon qu'il faut déterminer
- ✓ f_u : limite de rupture du cordon = 360 MPa,
- ✓ N_{Sd} : effort appliqué (pour une cornière) = 70 kN
- ✓ $\beta_w = 0.8$ et $\gamma_{Mw} = 1.25$

On deux cordons latéraux pour une UPE. On a donc 4 cordons au total

$$4 \times L \geq (0.8 \times 1.25 \times 140.10^3 \times 1.732) / (360) = 673 \text{ mm}$$

$$L > 168 \text{ mm}$$

On prend $L=170 \text{ mm}^6$.

⁶ On peut utiliser une combinaison de soudures frontales et latérales afin de réduire la longueur de soudure latérale calculée ci-dessus.

9. Exercice 9 – Assemblage poutre console

Soit un assemblage en acier Fe360 d'une poutre console en section en U (voir dimensions sur la figure) sur un poteau HEA300.

L'assemblage est réalisé à l'aide de 2 boulons ordinaires M16-8.8 et dont la section cisailée se trouve en partie lisse. La sollicitation est appliquée sur la direction du centre de gravité (voir figure).

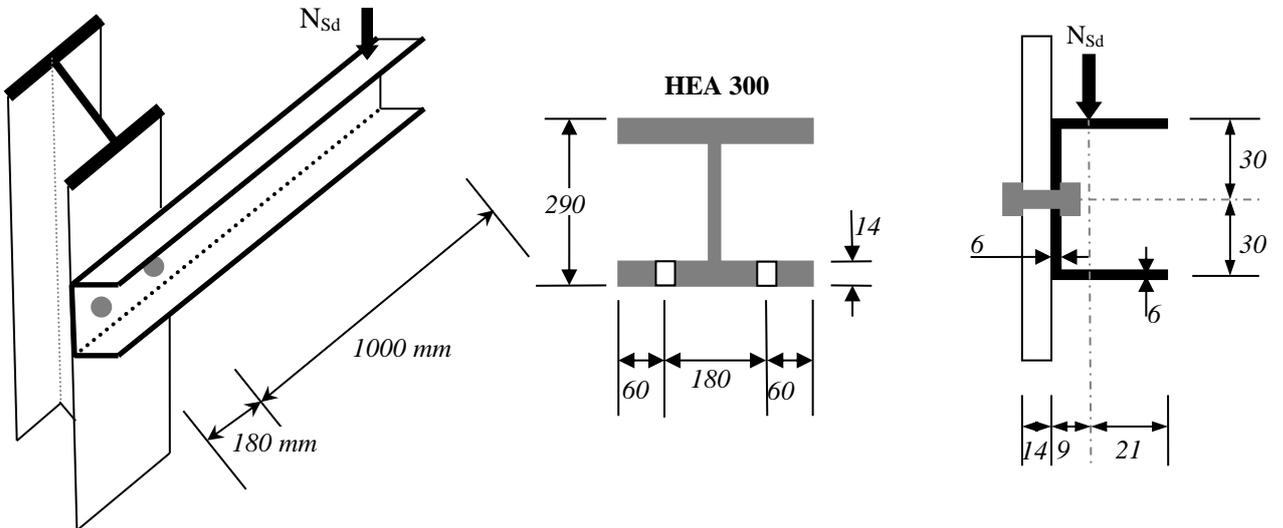


Figure 18 – Assemblage console UPE HEA

1. Citer le type de sollicitations dont sont soumis les boulons ?
2. On suppose que les boulons sont soumis uniquement au cisaillement (*on suppose que l'effort N_{Sd} est appliqué à l'interface Semelle du poteau – Ame de la section en U*), calculer l'effort maximal N_{Sd} sollicitant la poutre console afin d'éviter la rupture des éléments de l'assemblage.
3. Faites une analyse globale de cet assemblage (*commenter cet assemblage*)

Données :

- ✓ Section en U :
- ✓ $A=646 \text{ mm}^2$;
- ✓ $I_y=31.7 \cdot 10^4 \text{ mm}^4$
- ✓ Acier des pièces en S235_____

9.1. Les boulons sont sollicités en :

- a. Cisaillement de la tige
- b. Traction due au moment. Cet effort résulte de l'excentricité de N_{Sd} (appliqué dans la direction du centre de gravité) et qui induit un moment

9.2. Détermination de l'effort N_{Sd} maximal que doit supporter cet assemblage

On néglige donc le moment dû à l'excentricité de l'effort N_{Sd} appliqué dans la direction du centre de gravité ; Par conséquent, les efforts de traction dans les boulons sont nuls.

La poutre console est sollicitée en flexion

9.3. Détermination de $N_{Sd \max}$ pour les boulons sollicités en cisaillement

Déterminant avant tout, les efforts dans les boulons

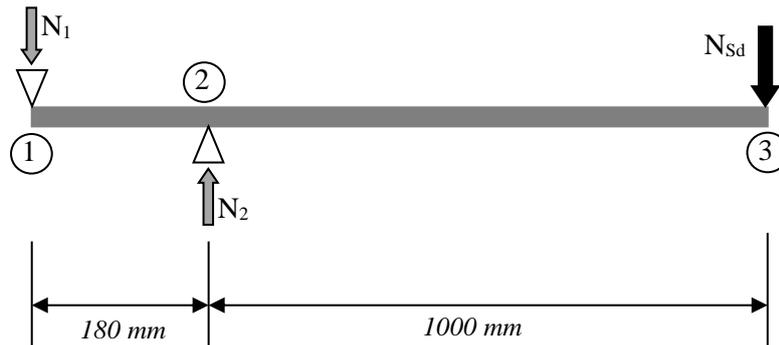


Figure 19 – Schéma RDM console

En appliquant le Principe Fondamental de la Statique « PFS », on a les réactions N_1 et N_2

$$N_1 = 5,55 \text{ kN} \quad \text{et} \quad N_2 = 6,55 \text{ kN}$$

L'effort maximal sollicitant les boulons est $N_2 = 6,55 N_{Sd}$

Afin d'éviter la rupture de la tige du boulon, on a doit :

$F_{v,Rd} > 6,55 N_{Sd}$ avec $F_{v,Rd}$ est la résistance au cisaillement d'un boulon

Alors :

$$N_{Sd} < \frac{F_{v,Rd}}{6,55} = \frac{0,6 \times 800 \times 201}{1,25 \times 6,55} = 11\,784 \text{ N}$$

$$N_{Sd} < 11,78 \text{ kN}$$

9.4. Résistance de la poutre console à la pression diamétrale

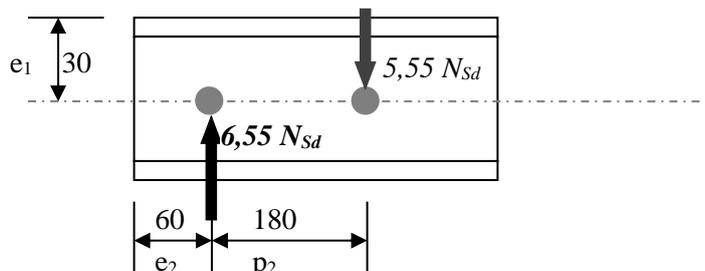


Figure 20 – Répartition des efforts dans la console

On doit vérifier la relation :

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}} > 6.55 N_{Sd}$$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

- ✓ f_u : limite élastique des pièces assemblées = 360 MPa
- ✓ d : diamètre du boulon = 16 mm
- ✓ t : la plus petite épaisseur des pièces assemblées = 6 mm
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{60}{20} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{180}{20} \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min[(6.7) ; (12.6) ; 2,5]$$

$$k_1 = 2.5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{30}{3 \times 20} \right) ; \frac{800}{360} ; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min[0.5 ; 2.22 ; 1]$$

$$\alpha_b = 0.5$$

$$N_{Sd} < \frac{F_{b,Rd}}{6.55} = \frac{2.5 \times 0.5 \times 360 \times 16 \times 6}{1.25 \times 6.55} = 5276 N$$

$$N_{Sd} < 5,28 \text{ kN}$$

9.5. Résistance de la poutre console à la flexion

Le moment maximal sollicitant la poutre (calcul RDM) est égal : 1000 N_{Sd} (*bras de levier x effort sollicitant*)

$$M_{max} = 1000 N_{Sd}$$

On doit vérifier la relation (calcul élastique) :

$$\sigma_f = \frac{M_{max}}{\frac{I}{v}} < \sigma_y$$

$$\sigma_f = \frac{1000xN_{sd}}{\frac{I}{v}} < \sigma_y$$

$$N_{sd} < \frac{Ix\sigma_y}{1000xv} = \frac{31,7 \cdot 10^4 \times 235}{1000 \times \frac{60}{2}} = 2483 \text{ N}$$

$$N_{sd} < 2,5 \text{ kN}$$

En conclusion, l'effort maximal appliqué à la poutre console doit inférieure à :

$$N_{sd} = \min (11.78 ; 5.28 ; 2.5) \text{ kN}$$

$$N_{sd} < 2,5 \text{ kN}$$

10. EXERCICE 10 – Poutre console sollicitée dans différentes configurations

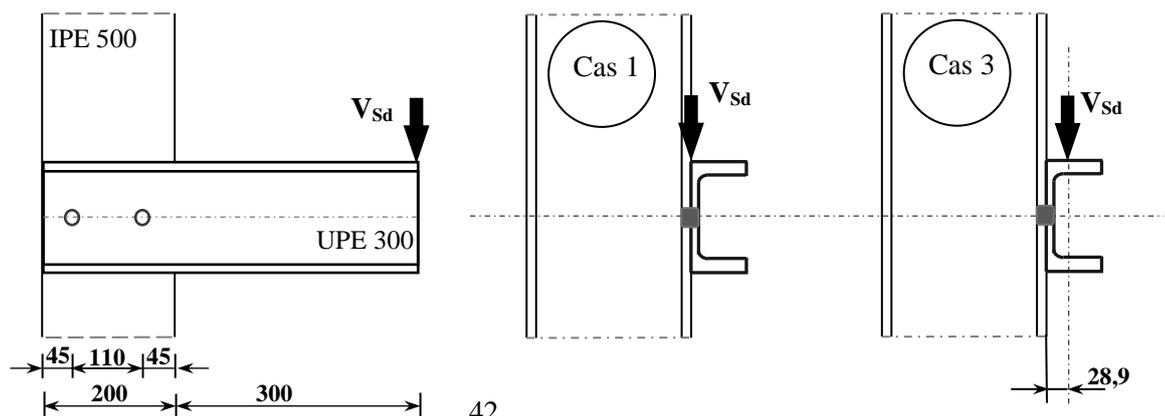
Soit un assemblage d'une poutre console (UPE 300) sur un poteau (IPE 500) en acier Fe 360.

L'assemblage est réalisé par des boulons M16-8.8

- ✓ **CAS 1** : une rangée de 2 boulons. L'effort « V_{sd} » est appliqué à l'interface de la poutre-poteau. Les boulons sont non précontraints. **Quel est l'effort maximal que doit supporter l'assemblage ?**
- ✓ **CAS 2** : 2 files d'1 boulon. L'effort « V_{sd} » est appliqué à l'interface de la poutre-poteau « V_{sd} ». Les boulons sont non précontraints. **Quel est l'effort maximal que doit supporter l'assemblage ?**
- ✓ **CAS 3** : l'effort « V_{sd} » est appliqué dans la direction du centre de gravité de la poutre. Les boulons sont non précontraints. **Quel est l'effort maximal que doit supporter l'assemblage ?**
- ✓ **CAS 4** : L'effort « V_{sd} » est appliqué à l'interface de la poutre-poteau. La soudure est appliquée sur tout le pourtour de la partie de la poutre en contact du poteau. la gorge du cordon est de 5 mm. **Quel est l'effort maximal que doit supporter l'assemblage ?**
- ✓ **CAS 5** : une rangée de 2 boulons. L'effort « V_{sd} » est appliqué à l'interface de la poutre-poteau. Les boulons sont précontraints. Les surfaces des pièces assemblées sont non traitées. **Quel est l'effort maximal que doit supporter l'assemblage à l'E.L.S ?**
- ✓ **Poutre console en flexion**
- ✓ Faites une analyse globale de l'ensemble des cas

La section cisillée des boulons se trouve en partie filetée.

Il ne vous sera pas demandé de vérifier la résistance de partie d'assemblage au niveau de la semelle du poteau dans cet exercice



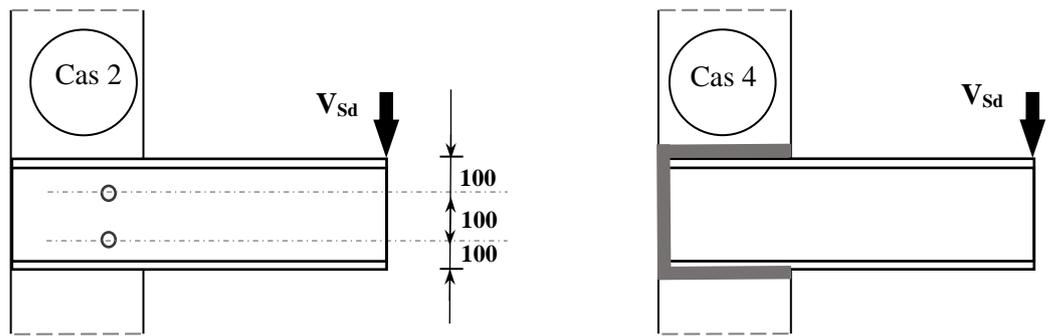


Figure 21 – Assemblage IPE UPE par boulons

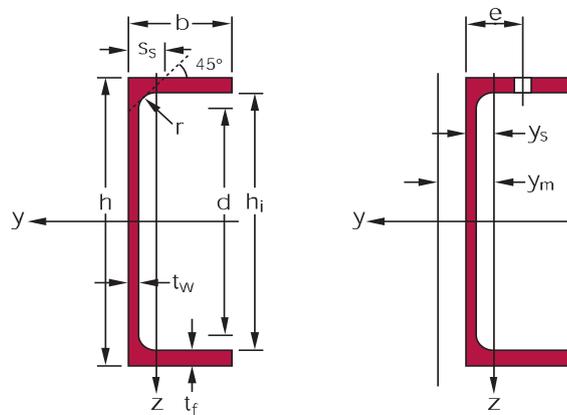


Figure 22 – Notations dimensions UPE 300

	h	b	tw	tf	r	A	hi	d	Iy	W _{el,y}	W _{pl,y}	A _{vz}
	mm	mm	mm	mm	mm	mm ²	mm	mm	mm ⁴	mm ³	mm ³	mm ²
						x10 ²			x10 ⁴	x10 ³	x10 ³	x10 ²
UPE 300*	300	100	9,5	15	15	56,6	270	240	7823	521,5	613,4	30,29

	I _z	W _{el,z}	W _{pl,z}	ys	ym	Pure bending		Pure compression	
						S235	S355	S235	S355
	mm ⁴	mm ³	mm ³	mm	mm				
	x10 ⁴	x10 ³	x10 ³	x10	x10				
UPE 300*	537,7	75,58	136,6	2,89	6,03	1	1	1	1

10.1. Cas n°1

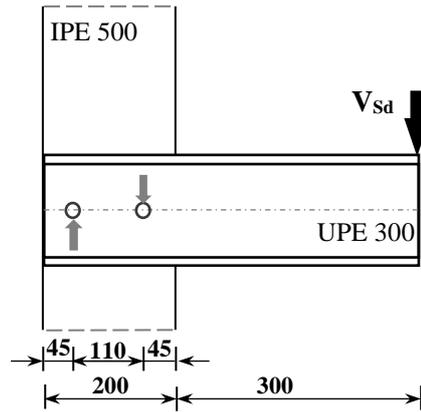


Figure 23 – Cotations de l'assemblage

Du fait que l'effort V_{sd} est supposé appliqué à l'interface poutre console/poteau, les boulons sont sollicités uniquement au cisaillement.

10.1.1. Détermination des efforts de cisaillement dans les boulons

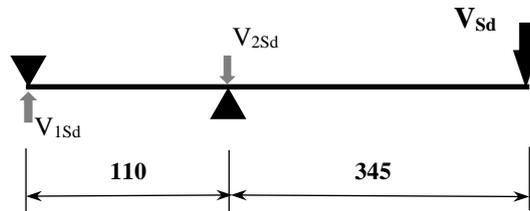


Figure 24 – Schéma RDM la poutre console

Le système est isostatique, on va appliquer le principe fondamental de la statique « PFS » pour déterminer les efforts (*actions de sens opposé dans les boulons*) dans les boulons en cisaillement.

$$V_{1,sd} = \frac{345}{110} V_{sd}$$

$$V_{2,sd} = \frac{455}{110} V_{sd}$$

10.1.2. Vérification au cisaillement des boulons

La résistance au cisaillement d'un boulon ordinaire est donnée par :

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

- ✓ $\alpha_v : = 0.6$ pour les boulons de classe 8.8
- ✓ $f_{ub} : \text{limite élastique du boulon} = 800 \text{ MPa}$
- ✓ $A_s : \text{aire de la section de la partie filetée} = 157 \text{ mm}^2$
- ✓ $\gamma_{Mb} = 1.25$

Nous avons une seule section du boulon cisailée.

Afin que le boulon le plus sollicité ($V_{2,sd}$) résiste au cisaillement, il faut que :

$$V_{2,sd} = \frac{455}{110} V_{sd} \leq F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

$$V_{sd} \leq \frac{110}{455} F_{v,Rd} = \frac{110}{455} \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

$$V_{sd} \leq \frac{110}{455} \cdot \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 157}{1,25} = 14\,575\, N$$

$$\mathbf{V_{sd} \leq 14,5\, kN}$$

10.1.3. Vérification de la poutre console en flexion

Après un calcul RDM, le moment maximal dans la poutre est : $M_y = V_{sd} \cdot d$; avec d est la distance du point d'application de l'effort au premier boulon ($d = 345\, \text{mm}$)

La contrainte de flexion maximale dans la poutre (σ_f) doit être inférieure à f_y (**calcul élastique**). Le profilé est de classe 1.

$$\sigma_f = \frac{M_y}{I} \leq f_y$$

$$\sigma_f = \frac{V_{sd} \cdot d}{I} \leq f_y$$

$$V_{sd} \leq f_y \frac{I}{d}$$

$$V_{sd} \leq f_y \frac{I}{d}$$

$$f_y = 8,8 \cdot 10 = 640\, \text{MPa} \quad ; \quad I_y = 7823 \cdot 10^4\, \text{mm}^4 \quad ; \quad v = h/2 = 150\, \text{mm}$$

$$V_{sd} \leq 640 \frac{7823 \cdot 10^4}{345} = 967\,482\, N$$

$$\mathbf{V_{sd} \leq 967\, kN}$$

10.2. Cas n°2

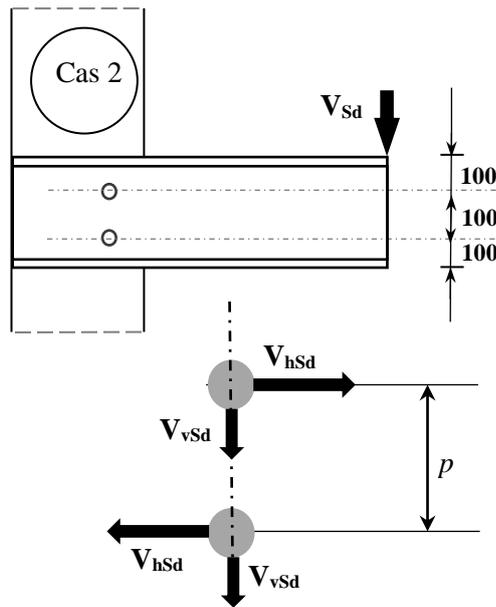


Figure 25 – Schéma RDM la poutre console « effort appliqué à l'interface de l'assemblage »

10.2.1. Détermination des efforts de cisaillement dans les boulons

L'effort V_{Sd} sollicitant la poutre console est distant « d » de 345 mm de la file des boulons. Il induit donc un moment :

$$M_{Sd} = V_{Sd} \cdot d$$

Ce dernier est un couple d'efforts égaux et de sens opposés. L'effort appliqué dans un boulon est une combinaison d'un effort dû au couple « V_{hSd} » et un effort de cisaillement « V_{vSd} » dû à l'effort tranchant V_{Sd} .

$$V_{hSd} = \frac{M_{Sd}}{p} = \frac{V_{Sd} \cdot d}{p}$$

$$V_{vSd} = \frac{V_{Sd}}{2}$$

10.2.2. Détermination des efforts de cisaillement dans les boulons

L'effort V_{Sd} sollicitant la poutre console est distant « d » de 345 mm de la file des boulons. Il induit donc un moment :

$$M_{Sd} = V_{Sd} \cdot d$$

Ce dernier est un couple d'efforts égaux et de sens opposés. L'effort appliqué dans un boulon est une combinaison d'un effort dû au couple « V_{hSd} » et un effort de cisaillement « V_{vSd} » dû à l'effort tranchant V_{Sd} .

$$V_{hsd} = \frac{M_{sd}}{p} = \frac{V_{sd} \cdot d}{p}$$

$$V_{v,sd} = \frac{V_{sd}}{2}$$

10.2.3. Vérification des boulons au cisaillement

L'effort de cisaillement dans les boulons est :

$$V_{b,sd} = \sqrt{(V_{h,sd})^2 + (V_{v,sd})^2}$$

$$V_{b,sd} = \sqrt{\left(V_{sd} \cdot \frac{d}{p}\right)^2 + \left(\frac{V_{sd}}{2}\right)^2} = V_{sd} \sqrt{\left(\frac{d}{p}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2}$$

Cet effort doit être inférieur à la résistance d'un boulon en cisaillement

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

- ✓ $\alpha_v : = 0.6$ pour les boulons de classe 8.8
- ✓ $f_{ub} : \text{limite élastique du boulon} = 800 \text{ MPa}$
- ✓ $A_s : \text{aire de la section de la partie filetée} = 157 \text{ mm}^2$
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

Nous avons une seule section du boulon cisailée.

Afin que le boulon le plus sollicité ($V_{2,sd}$) résiste au cisaillement, il faut que :

$$V_{b,sd} = V_{sd} \sqrt{\left(\frac{d}{p}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2} \leq F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$V_{sd} \leq \frac{\frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}}{\sqrt{\left(\frac{d}{p}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2}}$$

$$V_{sd} \leq \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 157}{1,25 \sqrt{\left(\frac{345}{100}\right)^2 + \left(\frac{1}{2}\right)^2}} = 19\,163 \text{ N}$$

$$\mathbf{V_{sd} \leq 19,1 \text{ kN}}$$

10.3. Cas n°3

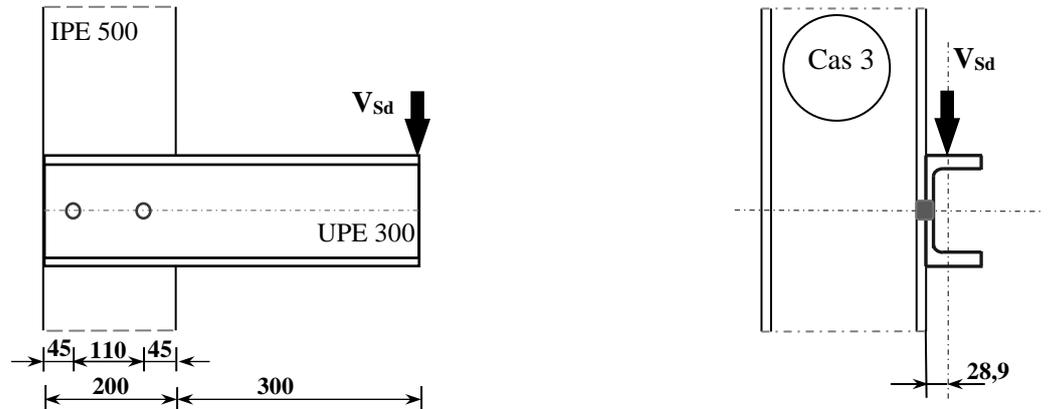


Figure 26 – Cotation de l’assemblage « Effort dans l’axe principale de l’UPE »

10.3.1. Détermination des efforts dans les boulons

Le fait que l’effort V_{sd} est appliqué dans la direction du centre de gravité de l’UPE 300, les boulons sont sollicités à la fois au cisaillement et à la traction.

10.3.2. Efforts de cisaillement dans les boulons (voir 1.1)

$$V_{1,sd} = \frac{345}{110} V_{sd}$$

$$V_{2,sd} = \frac{455}{110} V_{sd}$$

10.3.3. Efforts de traction dans les boulons

Le fait que l’effort V_{sd} est dans la direction du centre de gravité, il induit un effort de traction dans les boulons et de compression au niveau de la semelle inférieure du l’UPE et celle du poteau IPE 3000.

L’effort de traction dans les boulons est :

$$V_{t,sd} = \frac{M_{sd}}{h/2} = \frac{V_{sd} \cdot y_s}{h/2}$$

$$V_{t,sd} = \frac{28,9}{150} V_{sd}$$

10.3.4. Efforts résultant dans les boulons

On doit vérifier :

$$\frac{V_{2,Sd}}{F_{v1,Rd}} + \frac{V_{t,Sd}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$V_{t,Sd} \leq F_{t,Rd} \text{ et } V_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$$

Application numérique :

$$V_{t,Sd} \leq B_{p,Rd}$$

Avec

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

$$V_{t,Sd} = \frac{28,9}{150} V_{Sd} \leq B_{p,Rd} = \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{Mb}}$$

$$V_{Sd} \leq \frac{150}{28,9} \frac{0,6 \cdot \pi \cdot d_m \cdot t_p \cdot f_u}{\gamma_{Mb}}$$

$$V_{Sd} \leq \frac{150}{28,9} \cdot \frac{0,6 \cdot 3,14 \cdot 25,86 \cdot 15 \cdot 360}{1,25} = 1092412 \text{ N}$$

$$V_{Sd} \leq 1092 \text{ kN}$$

✓ $V_{t,Sd} \leq F_{t,Rd}$

$$V_{t,Sd} = \frac{28,9}{150} V_{Sd} \leq F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

$$V_{Sd} \leq \frac{150}{28,9} \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{Mb}}$$

$$V_{Sd} \leq \frac{150}{28,9} \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 157}{1,25} = 469370 \text{ N}$$

$$V_{Sd} \leq 469 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{2,Sd}}{F_{v1,Rd}} + \frac{V_{t,Sd}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{455}{110} V_{Sd} + \frac{28,9}{150} V_{Sd} \leq 1$$

$$V_{Sd} \leq \frac{1}{\left[\left(\frac{455}{110} / F_{v1,Rd} \right) + \left(\frac{28,9}{150} / 1,4 F_{t,Rd} \right) \right]}$$

$$V_{sd} \leq \frac{1}{\left[\left(\frac{455}{110} / \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 157}{1,25} \right) + \left(\frac{28,9}{150} / 1,4 \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 157}{1,25} \right) \right]} = 14\,258\text{ N}$$

$$V_{sd} < \min (1\,092 ; 4\,692 ; 14,2) \text{ kN}$$

$$V_{sd} \leq 14,2 \text{ kN}$$

10.4. Cas n°4

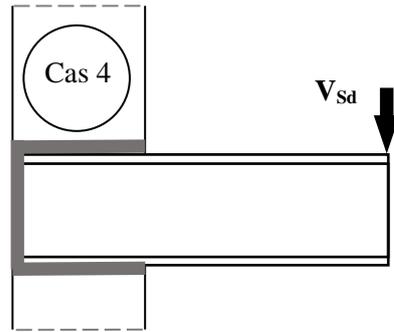


Figure 27 – Assemblage par soudure

La poutre est soudée au poteau par 1 cordon latéral et 2 cordons frontaux.

On utilise la formule enveloppe pour vérifier la résistance du cordon

$$a. \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{V_{sd} \sqrt{3}}{f_u}$$

$$V_{sd} \leq \frac{a \cdot f_u \sum l}{\beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \sqrt{3}}$$

$$\Sigma l = 2 \cdot 200 + 300 = 700 \text{ mm}$$

$$V_{sd} \leq \frac{5 \cdot 360 \cdot 700}{1,25 \cdot 0,80 \cdot \sqrt{3}} = 727\,461 \text{ N}$$

$$V_{sd} \leq 727 \text{ kN}$$

10.5. Cas n°5

Vérification à l'E.L.S des boulons précontraints

Il s'agit donc de vérifier la résistance au glissement des pièces assemblées par les boulons précontraints

L'effort de précontrainte dans les boulons est :

$$F_{p,cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

$$F_{p,cd} = 0,7 \cdot 800 \cdot 157 = 87\,920 \text{ N}$$

$$V_{2,Sd} = \frac{455}{110} V_{Sd} \leq \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3,ser}} \cdot F_{p,Cd}$$

$$V_{Sd} \leq \frac{110}{455} \cdot \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{M3,ser}} \cdot F_{p,Cd}$$

$$V_{Sd} \leq \frac{110}{455} \cdot \frac{1 \cdot 1 \cdot 0,2}{1,1} \cdot 87\,920 = 3\,864 \text{ N}$$

$$V_{Sd} \leq \mathbf{3,86 \text{ kN}}$$

Analyse de l'ensemble des cas

Cas	Type	V _{Sd,max} (kN)
Cas 0	Résistance de la poutre à la flexion	967
Cas 1	2 rangées de boulons non précontraints, V _{Sd} à l'interface	14,5
Cas 2	1 file de 2 boulons non précontraints, V _{Sd} à l'interface	19,1
Cas 3	2 rangées de boulons non précontraints, V _{Sd} au centre de gravité	14,2
Cas 4	soudure	727
Cas 5	2 rangées de boulons précontraints, V _{Sd} à l'interface	3,86

- ✓ L'assemblage par soudage donne une résistance meilleure à ceux des boulons qu'ils soient précontraints ou pas.
- ✓ Les efforts dans les boulons non précontraints sont pratiquement équivalents qu'il soit dans un assemblage où la sollicitation est dans l'interface ou dans la direction du centre de gravité de l'UPE 300. Il y a une différence d'environ 2%.
- ✓ La plus faible résistance est donnée dans le cas d'utilisation de boulons précontraints. Dans le cas où la sollicitation ne dépasse pas 3,11 kN, les boulons ne seront pas sollicités et c'est la résistance par frottement des pièces qui s'oppose à V_{Sd}. On a donc une très bonne tenue à la fatigue des boulons.
- ✓ Dans tous les cas, on n'aura pas de rupture par flexion de la poutre. Soit on aura une rupture des boulons ou de la soudure.

11. Exercice 11 – Assemblage Solive Poutre par cornières

Soit l'assemblage poutre-poteau avec double cornière constitué d'un poteau **HEA 160**, d'une poutre **IPE 240** et d'une double cornière **2L75x75x6**. Dans un premier cas, les cornières sont boulonnées et dans le deuxième cas, les cornières sont boulonnées sur le poteau et soudées sur la poutre.

- ✓ Les boulons utilisés sont des **M20 (8.8)** non précontraints. La partie cisillée se trouve en partie filetée.
- ✓ Surfaces des pièces en contact de classe **B ($\mu = 0.4$)**. Les cordons de soudure ont pour épaisseur $a=5\text{mm}$.
- ✓ Les aciers sont **S235 (Fe360)**
- ✓ Section de la cornière = $8.73 \cdot 10^2\text{mm}^2$

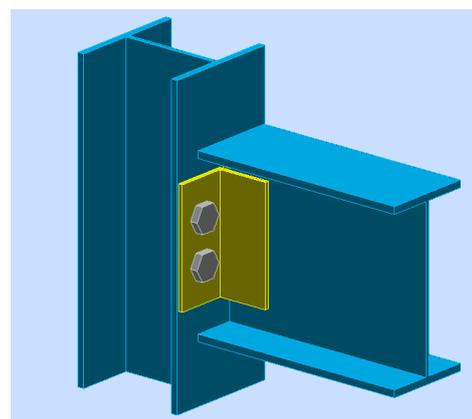
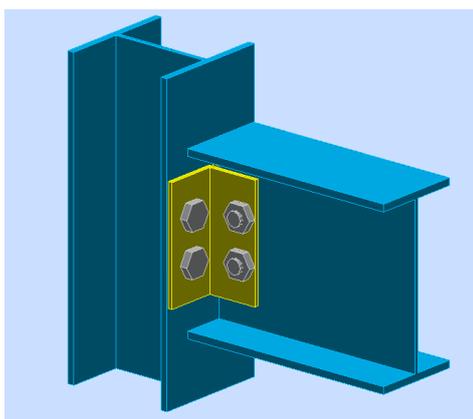
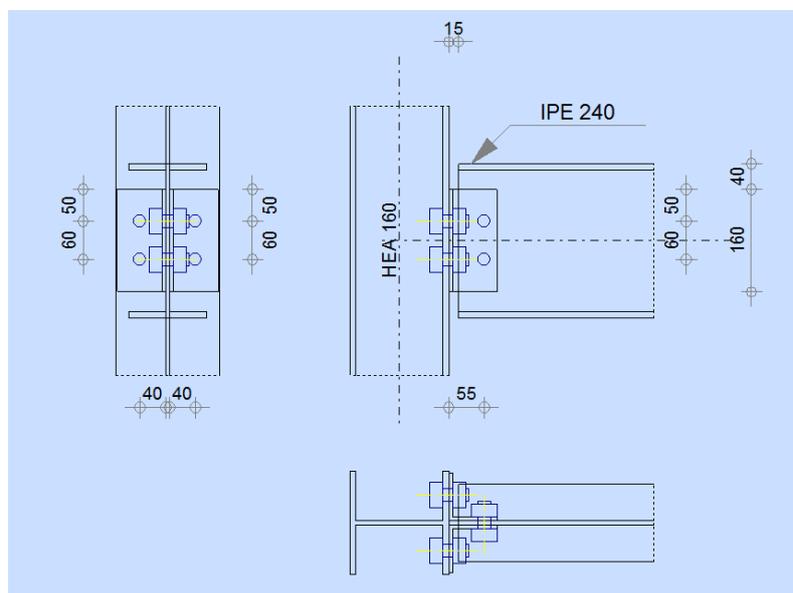


Figure 28 – Assemblage Poutre Poteau

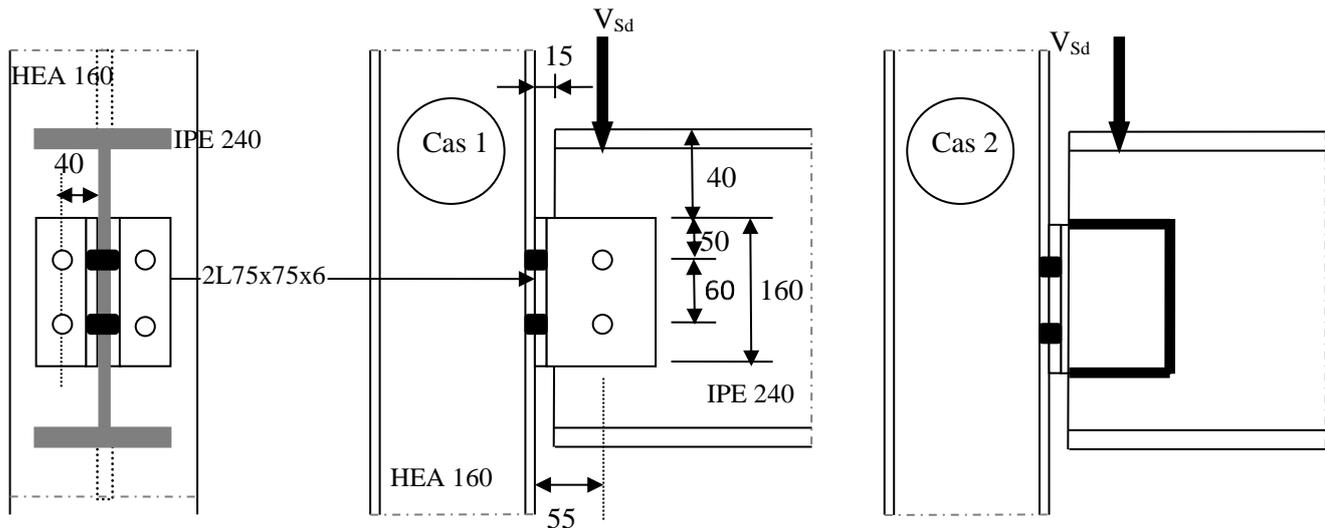


Figure 29 – Cotations 1 « Assemblage Poutre Poteau »

1. Cas 1 : Vérifier la résistance des cornières et des boulons
2. Cas 2 : Vérifier la résistance des cordons de soudure
3. Faite une analyse des deux cas
4. Vérifier la résistance des boulons dans le Cas 1 où les boulons sont précontraints
5. Vérifier la résistance de l'assemblage (*dans le cas de boulons non précontraints*) où il est sollicité par un effort de cisaillement et un moment (cas 3) pour une distribution élastique des efforts.

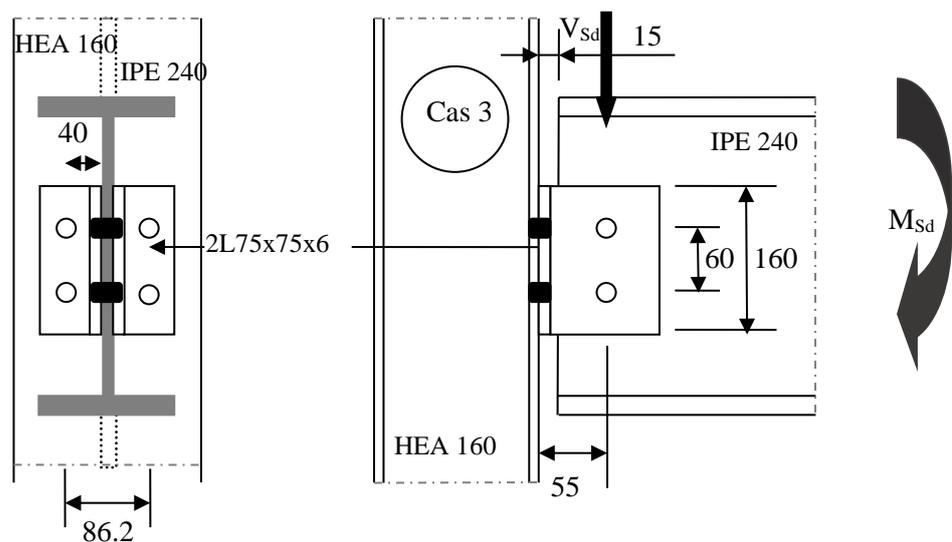


Figure 30 – Cotations 2 « Assemblage Poutre Poteau »

Données : $V_{sd} = 70\text{kN}$; $M_{sd} = 60\text{kN.m}$

11.1. Vérification de la résistance des cornières et des boulons

11.1.1. Vérification de la résistance des cornières

Les deux cornières sont sollicitées à la traction. On doit vérifier leur résistance à la traction en section brute et nette ainsi qu'à la pression diamétrale.

11.1.1.1. Vérification à la pression diamétrale

a. Cornières coté Poutre

La résistance des pièces à la pression diamétrale « $F_{b,Rd}$ » est donnée par la formule :

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

Avec :

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

- ✓ $k_1 = f_u$: limite élastique des pièces assemblées = 235 MPa
- ✓ d : diamètre du boulon = 20 mm ; d_0 : diamètre du trou du boulon = 22 mm
- ✓ t : la plus petite épaisseur des pièces assemblées = 6 mm
- ✓ Pincés et pas : $e_1 = 50$ mm ; $e_2 = 20$ mm, $p_1 = 60$ mm
- ✓ $\gamma_{M2} = 1,25$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \times \frac{20}{22} - 1,7 \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min[0,85 ; 2,5]$$

$$k_1 = 0,85$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{50}{3 \times 22} \right) ; \left(\frac{60}{3 \times 22} - 0,25 \right) ; \frac{800}{360} ; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min[(0,75) ; (0,66) ; 2,22 ; 1]$$

$$\alpha_b = 0,66$$

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{M2}} = \frac{0,85 \times 0,66 \times 360 \times 20 \times 6}{1,25} = 19388 \text{ N} = 19,4 \text{ kN}$$

Nous avons 2 cornières sollicitées simultanément avec 2 trous. Par conséquent, l'effort appliqué V_{sd} est divisé par 4.

$$\frac{V_{sd}}{4} = \frac{70}{4} = 17,5 \text{ kN} < F_{b,Rd} = 19,4 \text{ kN}$$

Pas de rupture des cornières par pression diamétrale

b. Cornières coté Poteau

Coté poteau, nous avons 2 cornières avec 2 boulons. Par conséquent, on a la même formulation de vérification qu'en 1.1.1.

Alors, il n'y a pas de rupture des cornières au niveau du poteau⁷.

11.1.2. Vérification à la traction en section brute et nette

L'effort résistant d'une pièce en traction est donnée par :

$$N_{t,Rd} \leq \min[N_{Pl,Rd} ; N_{u,Rd} ; N_{net,Rd}]$$

Les boulons ne sont pas précontraints, alors, il n'y a pas lieu de vérifier la résistance plastique de la section nette ($N_{net,Rd}$).

Calcul de la section brute et nette

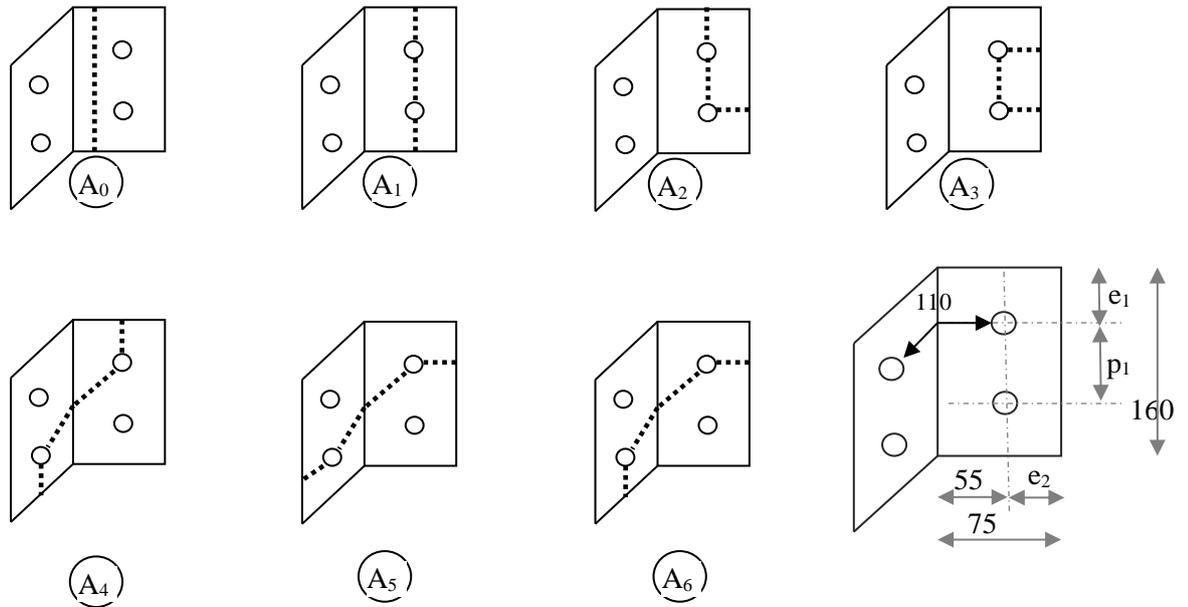


Figure 30 – Sections nettes de la cornière

$$A_0 = 0.6 \times 160 \times 6 = 576 \text{ mm}^2 \quad \text{Section Brute}$$

$$A_1 = A_0 - 2 \times d_0 \times t = 576 - 2 \times 22 \times 6 = 312 \text{ mm}^2$$

$$A_2 = [0.6 \times (e_1 + p_1) + e_2] \times t - 2 \times d_0 \times t = [0.6 \times (50 + 60) + 20] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 252 \text{ mm}^2$$

$$A_3 = [(0.6 \times p_1) + 2 \times e_2] \times t - 2 \times d_0 \times t = [(0.6 \times 60) + 2 \times 20] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 192 \text{ mm}^2$$

⁷ Dans cette partie, on n'a pas vérifié la résistance à la pression diamétrale des âmes de la poutre et du poteau car ça n'a pas été demandé dans l'exercice.

$$A_4 = [(2 \times 0.6 \times e_1) + (110 + (p_1)^2 / 4 \times 110)] \cdot t \cdot 2 \times d_0 \cdot t$$

$$= [(2 \times 0.6 \times 50) + (110 + (60^2 / 4 \times 110))] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 805 \text{ mm}^2$$

$$A_5 = [(2 \times e_2) + (110 + (p_1)^2 / 4 \times 110)] \cdot t \cdot 2 \times d_0 \cdot t$$

$$= [(2 \times 20) + (110 + (60^2 / 4 \times 110))] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 685 \text{ mm}^2$$

$$A_6 = [(0.6 \times e_1 + e_2) + (110 + (p_1)^2 / 4 \times 110)] \cdot t \cdot 2 \times d_0 \cdot t$$

$$= [(0.6 \times 50 + 20) + (110 + (60^2 / 4 \times 110))] \times 6 - 2 \times 22 \times 6 = 745 \text{ mm}^2$$

$$A_{nette} = \min (A_1 ; A_2 ; A_3 ; A_4 ; A_5 ; A_6)$$

$$A_{nette} = A_3 = 192 \text{ mm}^2$$

$$N_{pl,Rd} = A_0 \cdot f_y / \gamma_{M0} = 576 \times 235 / 1.10 \qquad \gamma_{M0} = 1.10 \text{ "CCM97"}$$

$$N_{pl,Rd} = 123054 \text{ N} = 123 \text{ kN}$$

$$N_{u,Rd} = 0.9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2} = 0.9 \times 192 \times 360 / 1.25$$

$$N_{u,Rd} = 49766 \text{ N} = 49,8 \text{ kN}$$

L'effort tranchant V_{sd} est appliqué à la double cornière, on doit vérifier la relation ci-dessous :

$$N_{t,Rd} = \frac{V_{sd}}{2} \leq \min [N_{pl,Rd} ; N_{u,Rd} ; N_{net,Rd}]$$

$$70/2 = 35 \text{ kN} < 49,8 \text{ kN} \qquad \text{Pas de rupture des cornières en traction}$$

11.1.3. Vérification de la résistance des boulons

Vérification des boulons « Cornières-Poutres »

Les boulons sont sollicités au cisaillement. On doit vérifier la relation :

Résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement « $F_{v,Rd}$ »

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

Avec :

- ✓ α_v : = 0.6 pour les boulons de classe « 8.8 »
- ✓ f_{ub} : limite élastique du boulon
- ✓ A_s : aire de la section résistante en traction de la partie filetée de la vis quand le plan le plan de cisaillement passe par cette dernière.
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.6 \times 800 \times 245}{1.25} = 94080 \text{ N} = 94,1 \text{ kN}$$

L'effort tranchant V_{sd} sollicite 2 boulons sur 2 plans de cisaillement

On doit vérifier :

$$\frac{V_{sd}}{2 \times 2} \leq F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$\frac{70}{2 \times 2} \leq F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

$$17,5 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

Pas de rupture des boulons « cornières-poutre » par cisaillement

Vérification des boulons « Cornières-Poteau »

Dans ce cas d'exemple, on néglige l'effet de l'excentricité de l'effort V_{sd} par rapport à la file des boulons dans le poteau. Ce qui revient à négliger le moment.

Comme dans le paragraphe 1.2.1, la résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement « $F_{v,Rd}$ » est donnée par la formule « $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ » est égale à « $F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$ »

L'effort appliqué au boulon d'une file et d'une rangée est égale :

$$\frac{V_{sd}}{4 \times 1} \text{ (4 boulons et un plan de cisaillement)}$$

$$\frac{V_{sd}}{4 \times 1} = 17,4 \text{ kN} \leq F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

Pas de rupture des boulons « cornières-poteau » par cisaillement

11.2. Vérification de la résistance des cornières et des boulons

La cornière coté poutre est soudée à cette dernière par un cordon latéral et deux cordons frontaux. Dans ce cas, on peut utiliser la formule enveloppe qui nous met en sécurité et aussi pour ça simplicité d'emplois.

La formule enveloppe est donnée par :

$$a \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{N \cdot \sqrt{3}}{f_u}$$

Avec $a = 5 \text{ mm}$ et $N = V_{sd} = 70 \text{ kN}$

$$\Sigma l = 2x[160+2x(75-15)] = 560 \text{ mm}$$

2 soudures de part et d'autre de l'âme de la poutre

$$a \sum l = 2800 \text{ mm}^2 \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \cdot \frac{V_{sd} \cdot \sqrt{3}}{f_u} = \frac{0.8 \times 1.25 \times 70 \cdot 10^3 \times \sqrt{3}}{360} = 336 \text{ mm}^2$$

Pas de rupture des soudures « cornières-poutre »

11.3. Analyse des deux cas « assemblage par boulons » et « assemblage par soudure » au niveau de la poutre

- D'une manière générale, l'assemblage boulonné ou soudé résiste à la sollicitation.
- De même, on a un surdimensionnement de l'assemblage par boulons et soudures.
 - ✓ Dans le cas des soudures, la surface résistante représente plus de 8 fois (8,7) celle de la surface minimum. Il serait judicieux de réduire l'épaisseur de la gorge du cordon de soudure ou réduire le nombre de cordons.
 - ✓ Dans le cas des boulons, la résistance des boulons représente 6 à 5 fois la sollicitation (coté poteau et coté poutre). Il faudrait réduire la nuance des boulons ou leur diamètre sans pour autant réduire leur nombre.
- Il faut aussi se pencher sur un calcul des boulons « coté poteau » avec effet du moment dû à l'excentricité de l'effort V_{sd} pour un calcul précis et juste.

11.4. Vérification de la résistance des boulons dans le cas où ils sont précontraints

11.4.1. Calcul de l'effort de précontrainte

L'effort de précontrainte dans un boulon **H.R. M20** de classe **8.8** est donné par la formule ci-dessous :

$$F_{p,Cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$$

$$F_{p,Cd} = 0,7 \times 800 \times 245 = 137200 \text{ N} = 137,2 \text{ kN}$$

11.4.2. Vérification des boulons « Cornières-Poutres »

La résistance des boulons au glissement à l'E.L.S. « $F_{s,Rd,ser}$ »

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

- ✓ k_s : Facteur de forme. Les trous dans la poutre et poteau sont normaux ($k_s = 1$),
- ✓ n : Nombre d'interfaces de frottement. Pour 2 cornières sur l'âme de la poutre, on a 2 interfaces en frottement ($n = 2$),

μ : Coefficient de frottement entre les pièces assemblées. Classe des surfaces B « Peinture au silicate alcali-zinc appliquée après grenailage ou sablage », ($\mu = 0,4$).

✓ $\gamma_{Ms,ser} = 1.10$

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms,ser}} \cdot F_{p.Cd} = \frac{1 \times 2 \times 0.4}{1.10} \times 137,2 = 99.78 \text{ kN}$$

$$\frac{V_{Sd}}{2} = 29 \text{ kN} \leq F_{s,Rd,ser} = 99.78 \text{ kN}$$

Pas de glissement de la cornière sur l'âme de la poutre.

11.4.3. Vérification des boulons « Cornières-Poteau »

Nous avons dans cette partie de l'assemblage 4 boulons et un plan de glissement par boulon.

L'effort sollicitant un boulon est :

$$\frac{V_{Sd}}{4 \times 1} = 17,5 \text{ kN}$$

L'effort résistant est :

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms,ser}} \cdot F_{p.Cd} = \frac{1 \times 1 \times 0,4}{1.10} \times 137,2 = 49,89 \text{ kN}$$

$F_{s,Rd,ser} = 49,89 \text{ kN}$ est > à la sollicitation = 17,5 kN

Pas de glissement de la cornière sur l'âme du poteau.

11.5. Vérification de l'assemblage par boulons ordinaires et sollicité par un effort tranchant « V_{Sd} » et un moment de flexion « M_{Sd} ». Calculs dans le cas d'une distribution élastique des efforts

11.5.1. Vérification des boulons « Cornières-Poutre »

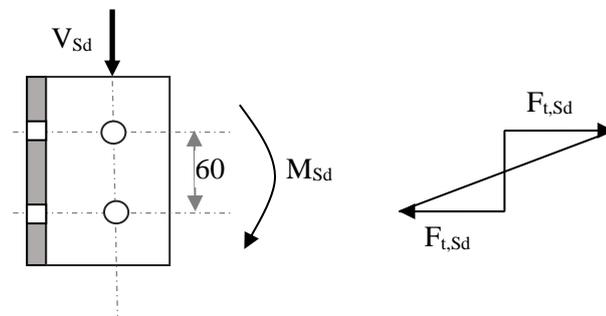


Figure 31 – Distribution des efforts « cornière poutre »

Le boulon est sollicité par 2 efforts de cisaillement « $\frac{V_{Sd}}{2} / 2$ » et $F_{t,Sd} = \frac{M_{Sd}}{2 \times 60}$

La résistance du boulon au cisaillement est donnée par la formule :

$$F_{v,Sd} = \left[\left(\frac{M_{Sd}}{2 \cdot x60} \right)^2 + \left(\frac{V_{Sd}/2}{2} \right)^2 \right]^{0,5}$$

$$F_{v,Sd} = \left[\left(\frac{60}{2 \cdot x60 \cdot 10^{-3}} \right)^2 + \left(\frac{70/2}{2} \right)^2 \right]^{0,5} = 500 \text{ kN}$$

$$F_{v,Sd} = 500 \text{ kN} > F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$$

Rupture des boulons par cisaillement

11.5.2. Vérification des boulons « Cornières-Poteau » V_{Sd}

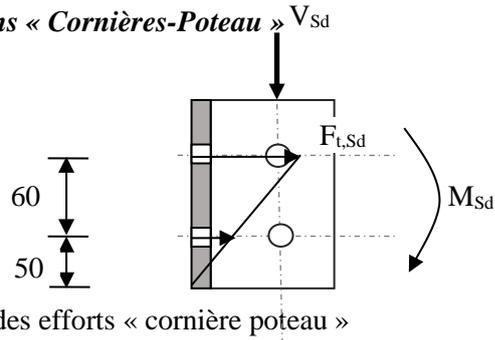


Figure 32 – Distribution des efforts « cornière poteau »

Dans cette configuration, les boulons sont sollicités simultanément au cisaillement et à la traction. Le boulon, le plus sollicité est celui de la 1^{ère} rangée.

On doit vérifier l'inéquation ci-dessous :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1$$

$F_{v,Sd}$: effort de cisaillement = $V_{Sd}/4 = 17,5 \text{ kN}$ car on a 4 boulons ;

$F_{t,Sd}$: effort de traction dans le boulon = $[M_{Sd}/(60+50)]/2 = 272.7 \text{ kN}$. On a le chiffre 2 en dénominateur car on a deux boulons dans la 1^{ère} rangée ;

$F_{v,Rd}$: effort résistant de cisaillement « $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$ » est égale à « $F_{v,Rd} = 94,1 \text{ kN}$;

$F_{t,Rd}$: effort de traction dans le boulon. Il est donné par la formule ci-dessous :

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

- ✓ f_{ub} : limite élastique du boulon = 800 MPa
- ✓ A_s : aire de la section filetée = 245 mm²
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.50$ suivant le règlement CCM97 ($\gamma_{M2} = 1.25$ selon EC3)

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 800 \times 245}{1.50} = 117600 \text{ N} = 117,6 \text{ kN}$$

Alors,

$$\frac{17,5}{94,1} + \frac{272,7}{1,4 \times 117,6} \leq 1$$

1.85 < 1 **Rupture des boulons**

On est tenu à vérifier les 3 autres conditions, à savoir :

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

- ✓ $\frac{F_{t,Sd}}{B_{p,Rd}} \leq 1$ *Traction avec le poinçonnement*
- ✓ $\frac{F_{v,Sd}}{F_{b,Rd}} \leq 1$ *Cisaillement avec la pression diamétrale, voir 1.1.1.2*
- ✓ $\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \leq 1$ *vérification à la traction des boulons*

Ces trois vérifications ne seront pas faites il y a déjà rupture des boulons.

12. Exercice 12 – Assemblage poutre poteau sollicité en cisaillement

Soit un assemblage poutre-poteau réalisé à l'aide de boulons M 20 de classe 10.9 précontraint. Les surfaces en contact sont sablées (classe B). la tige est cisillée dans sa partie lisse.

Déterminer le nombre de boulons précontraints nécessaires à la transmission par frottement de l'effort tranchant.

La détermination du nombre des boulons est faite à l'état limite de service et la vérification de leur résistance est faite à l'état ultime

$$V_{sd,ELS} = 240 \text{ kN}$$

$$V_{sd,ELU} = 400 \text{ kN}$$

Pas de vérification à la pression diamétrale pour cet exercice.

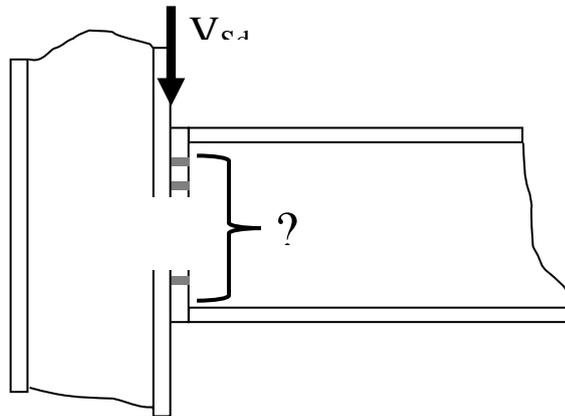


Figure 33 – Assemblage poutre poteau sollicité en cisaillement

12.1. Force de précontrainte

$$F_{p,Cd} = 0.7 f_{ub} A_s$$

$$F_{p,Cd} = 0.7 \times 1000 \times 245 = 171\,500 = 171.5 \text{ kN}$$

12.2. Résistance au glissement (E.L.S.)

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

- ✓ k_s : coefficient de forme du trou = 1
- ✓ n : nombre d'interfaces de frottement = 1
- ✓ μ : coefficient de frottement, surfaces en contact sont sablées « classe B » = 0.4
- ✓ $\gamma_{M3,ser} = 1.10$
- ✓ $\gamma_{M3,elu} = 1.25$

$$F_{s,Rd} = \frac{1 \times 1 \times 0.4}{1.10} \times 171.5 = 62.36 \text{ kN}$$

Le nombre de boulons reprenant l'efforts de cisaillement est donné par :

$$n \cdot F_{s,Rd,ser} \geq V_{Sd,ser}$$

$$n \geq \frac{V_{Sd,ser}}{F_{s,Rd,ser}}$$

$$n \geq \frac{240}{62.36} = 3.84$$

Nous prenons 4 M20-10.9

12.3. Résistance des boulons à l'état ultime « E.L.U. »

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 f_{ub} A}{\gamma_{M2,etu}}$$

$$F_{v,Rd} = \frac{0.5 \times 1000 \times 314}{1.25} = 125\,600 \text{ N} = 125.6 \text{ kN}$$

On doit vérifier la résistance de la tige par cisaillement à la sollicitation donnée par :

$$4 F_{v,Rd} \geq V_{Sd,etu}$$

$$4 \times 125.6 = 502.4 \text{ kN} \geq 400 \text{ kN}$$

En conclusion, utiliser 4M20-10.9 dans l'assemblage poutre poteau permet de reprendre les efforts à l'E.L.S. et l'E.L.U. données dans l'exercice.

13. Exercice 13 – Assemblage des contreventements par gousset

Soit un assemblage d'une barre de contreventement au pied de poteau par gousset. L'assemblage est constitué de 4 boulons M14-6.8 ($A=153,9\text{mm}^2$; $A_s=115\text{mm}^2$) dans la section cisillée est en partie filetée.

La barre est constituée d'un UPE 100 (section = $12,5 \cdot 10^2\text{mm}^2$) en acier S235 (Fe360)

1. Quel est l'effort maximal que doit supporter l'assemblage ?
2. Dans le cas où l'assemblage est constitué cette fois-ci par 3 boulons précontraints M18-8.8 ($A=254,5\text{mm}^2$; $A_s=192\text{mm}^2$) et les pièces sont non traitées, peut-il supporter à L'ELS, l'effort maximal calculé en question 1 ?

Soit l'assemblage sollicité par l'effort maximal calculé en 1 :

3. Déterminer les longueurs des soudures longitudinales ($a=5\text{mm}$)
4. Déterminer l'épaisseur de la soudure frontale

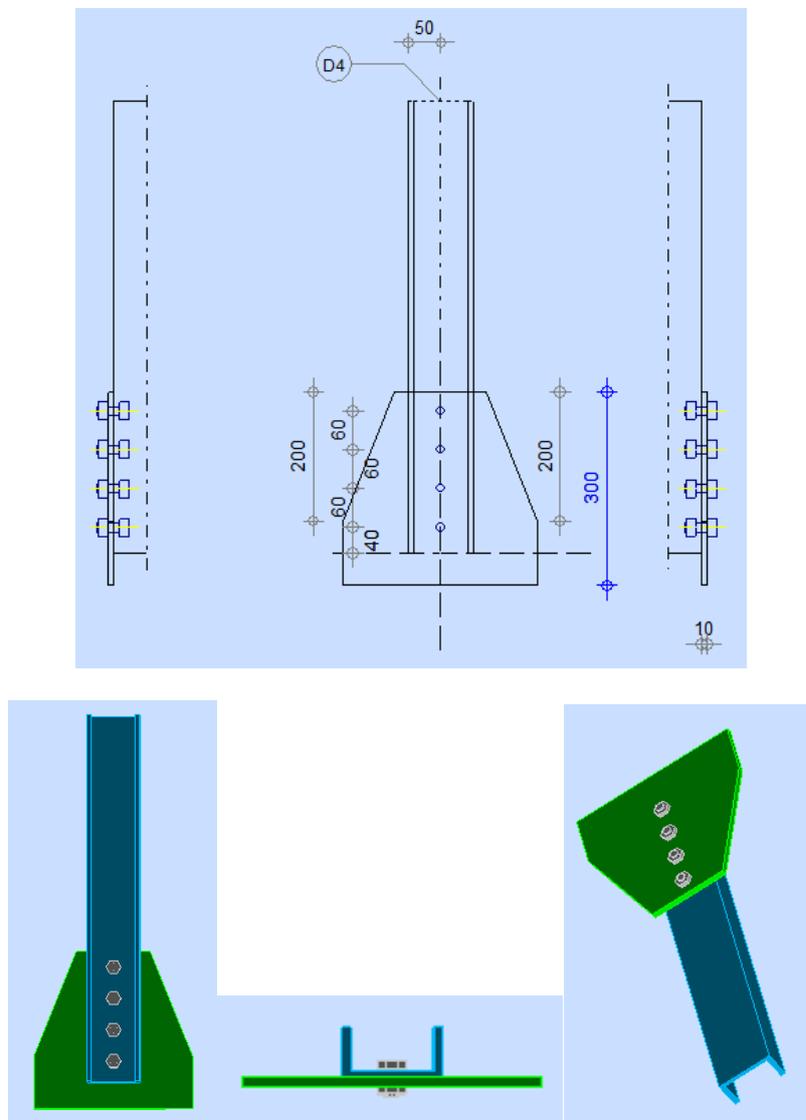


Figure 34 – Assemblage de contreventement par boulons ordinaires

13.1. Détermination de l'effort maximal « $N_{Sd \max}$ » que doit supporter l'assemblage sans se rompre

Afin que l'assemblage résiste à la sollicitation extérieure sans ruine, il doit :

- ✓ Les boulons doivent résister au cisaillement
- ✓ Les pièces assemblées doivent résister à la pression diamétrale
- ✓ Les pièces assemblées doivent résister à la traction en section brute et nette(s)

13.1.1. Résistance des boulons au cisaillement

L'assemblage est composé de 4 boulons M14-6.8. Nous sommes en présence d'un plan de cisaillement, alors :

$$N_{Sd} < 4 \cdot F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

- ✓ $\alpha_v = 0.5$ pour les boulons de classe « 4.8 ; 5.8 ; **6.8** ; 10.9 »
- ✓ f_{ub} : limite de rupture du boulon = 600 MPa
- ✓ A_s : aire de la section résistante en traction de la partie filetée de l'assemblage
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

$$N_{Sd} < 4 \cdot F_{v,Rd} = 4x \frac{0.5 \times 600 \times 115}{1.25} = 110\,400\,N = 110,4\,kN$$

13.1.2. Résistance des pièces assemblées à la pression diamétrale

Résistance du profilé UPE 100 à la pression diamétrale

L'assemblage est composé de 2 pièces (UPE 100 et un gousset d'épaisseur de 10 mm) reliées par 4 boulons M14-6.8, alors :

$$N_{Sd} < 4 \cdot F_{b,Rd} = \frac{k_1 \cdot \alpha_b \cdot f_u \cdot d \cdot t}{\gamma_{Mb}}$$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

- ✓ f_u : limite élastique des pièces assemblées = 360 MPa
- ✓ f_{ub} : limite de rupture des boulons = 600 MPa
- ✓ d : diamètre du boulon = 14 mm
- ✓ t : la plus petite épaisseur des pièces assemblées = 4.5 mm
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$
- ✓ $e_1 = 40\,mm$
- ✓ $e_2 = [50 + (55 - 4.5)] = 105.5\,mm$
- ✓ $p_1 = 60\,mm$
- ✓ p_2 : sans objet

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{105.5}{15} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min [17.99 ; 2,5]$$

$$k_1 = 2.5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{40}{3 \times 15} \right); \left(\frac{60}{3 \times 15} - 0.25 \right); \frac{600}{360}; 1 \right]$$

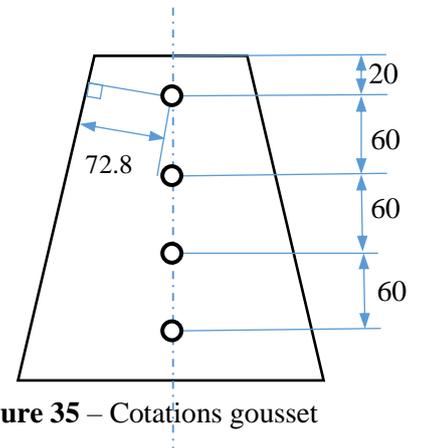
$$\alpha_b = \min[0.88; 1.08; 1.66; 1]$$

$$\alpha_b = 0.88$$

$$N_{Sd} < 4 \cdot F_{b,Rd} = 4x \frac{2.5 \times 0.88 \times 360 \times 14 \times 4.5}{1.25} = 159\,667\,N = 159,67\,kN$$

Résistance du gousset à la pression diamétrale

- ✓ f_u : limite élastique des pièces assemblées = 360 MPa
- ✓ f_{ub} : limite de rupture des boulons = 600 MPa
- ✓ d : diamètre du boulon = 14 mm
- ✓ t : épaisseur du gousset = 10 mm
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$
- ✓ $e_1 = 20\text{mm}$
- ✓ $e_2 = 72.8\text{mm}$
- ✓ $p_1 = 60\text{mm}$
- ✓ p_2 : sans objet



✓ Figure 35 – Cotations gousset

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right]$$

$$k_1 = \min \left[\left(2.8 \cdot \frac{72.8}{15} - 1.7 \right); \left(1.4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right); 2.5 \right]$$

$$k_1 = \min[11.89; 2.5]$$

$$k_1 = 2.5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right); \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0.25 \right); \frac{f_{ub}}{f_u}; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{20}{3 \times 15} \right); \left(\frac{60}{3 \times 15} - 0.25 \right); \frac{600}{360}; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min[0.44; 1.08; 1.66; 1]$$

$$\alpha_b = 0.44$$

$$N_{Sd} < 4 \cdot F_{b,Rd} = 4x \frac{2.5 \times 0.44 \times 360 \times 14 \times 10}{1.25} = 177\,408\,N = 177,41\,kN$$

13.1.3. Résistance des pièces assemblées à la traction en section brute et nette(s)

Résistance à traction du profile UPE 100

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = \min \left(N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}; N_{u,Rd} = 0.9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \right);$$

Résistance en section brute

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{1250 \times 235}{1.0} = 293\,750\,N = 293,75\,kN$$

Résistance en section nette

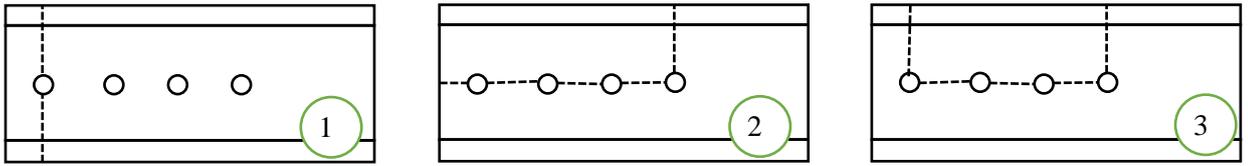


Figure 36 – Sections nettes

$$A_{1net} = A - d_0 \cdot t = 1250 - 15 \times 4.5 = 1\,182 \text{ mm}^2$$

$$A_{2net} = 0.6[e_1 + 3 \cdot p_1 - 3.5d_0]t_1 + (h_i/2) \cdot t_1 + (b - t_w) \cdot t_2$$

$$A_{2net} = 0.6[40 + 3 \times 60 - 3.5 \times 15] \times 4.5 + (85/2) \times 4.5 + (55 - 4.5) \times 7.5 = 1\,022 \text{ mm}^2$$

$$A_{3net} = 0.6[3p_1 - 3d_0]t_1 + 2[(h_i/2) \cdot t_1 + (b - t_w) \cdot t_2]$$

$$A_{3net} = 0.6[3 \times 60 - 3 \times 15] \times 4.5 + 2[(85/2) \times 4.5 + (55 - 4.5) \times 7.5] = 1\,504 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = \min [A_{1net} ; A_{2net} ; A_{3net}]$$

$$A_{net} = \min [1\,182 ; 1\,022 ; 1\,504] \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = 1\,022 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0.9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0.9 \times 1\,504 \times 360}{1.25} = 389\,836 \text{ N} = 389,84 \text{ kN}$$

Détermination de l'effort maximal

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

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = \min (293.75 ; 389.84) \text{ kN}$$

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = 283.75 \text{ kN}$$

13.1.4. Résistance à traction du gousset

Résistance en section brute

La résistance à la traction en section brute du gousset est la section minimale entre l'extrémité soudée du gousset (ép.=10 mm) et le bord du premier trou de boulon

$$A = 2 \times 136.55 \times 10 = 2\,731 \text{ mm}^2$$

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{2\,731 \times 235}{1.0} = 641\,785 \text{ N} = 641,79 \text{ kN}$$

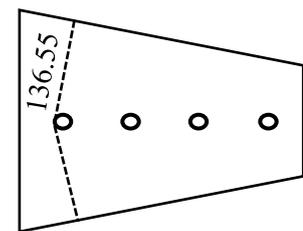


Figure 37 – Sections brute

Résistance en section nette

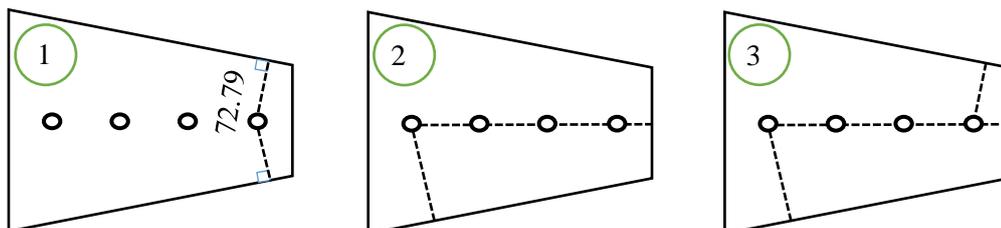


Figure 38 – Sections nettes

$$A_{1net} = (2 \times 72.79 - d_0) t = (2 \times 72.79 - 15) \times 10 = 1\,300 \text{ mm}^2$$

$$A_{2net} = [0.6(e_1 + 3p_1 - 4d_0) + 136.55 - d_0/2] t = [0.6 \times (20 + 3 \times 60 - 4 \times 15) + 136.55 - 15/2] \times 10 = 2\,130.5 \text{ mm}^2$$

$$A_{3net} = [0.6(3p_1 - 4d_0) + 136.55 + 72.79 - 2d_0/2] t = [0.6 \times (3 \times 60 - 4 \times 15) + 136.55 + 72.79 - 2 \times 15/2] \times 10 = 2\,663.4 \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = \min [A_{1net} ; A_{2net} ; A_{3net}]$$

$$A_{net} = \min [1\,300 ; 2\,130.5 ; 2\,663.4] \text{ mm}^2$$

$$A_{net} = 1\,300 \text{ mm}^2$$

$$N_{u,Rd} = 0,9 \cdot \frac{A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 1\,300 \times 360}{1,25} = 336\,960 \text{ N} = 336,96 \text{ kN}$$

Détermination de l'effort maximal

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

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = \min (641.79 ; 336.96) \text{ kN}$$

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = 336,96 \text{ kN}$$

La résistance des pièces assemblées (profile et gousset) est :

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = \min (283.75 ; 336.96) \text{ kN}$$

$$N_{Sd} < N_{t,Rd} = 283,75 \text{ kN}$$

L'EFFORT MAXIMAL « $N_{SD,MAX}$ » QUE DOIT SUPPORTER L'ASSEMBLAGE SANS SE ROMPRE EST :

$$N_{Sd,max} = \min [4F_{v,Rd} ; 4F_{b,Rd} ; N_{t,Rd}]$$

$$N_{Sd,max} = \min [110.4 ; (159.67 ; 177.41) ; 283.75] \text{ kN}$$

$$N_{Sd,max} = 110.4 \text{ kN}$$

13.2. Vérification de la résistance au glissement (E.L.S) de l'assemblage réalisé avec des boulons précontraints

Cette fois-ci, nous sommes en présence de 3 boulons M18-8.8

On doit vérifier l'inéquation :

$$3 \cdot F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu}{\gamma_{Ms,ser}} \cdot F_{p,Cd} > N_{Sd,max} = 110.4 \text{ kN}$$

Avec :

- ✓ $F_{p,Cd}$, effort de précontrainte = $F_{p,Cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s$
- ✓ k_s , coefficient de forme des trous = 1 (trous normaux)
- ✓ n , nombre de surfaces d'adhérence = 1
- ✓ μ , coefficient de frottement = 0.2 (classe de surface D - pièces non traitées)

$$3 \cdot F_{s,Rd,ser} = 3 \times \frac{1 \times 1 \times 0.2}{1.10} \cdot (0.7 \times 800 \times 192) = 58\,647 \text{ N} = 58,65 \text{ kN} < N_{Sd,max} = 110.4 \text{ kN}$$

Il y a glissement des pièces assemblées à l'E.L.S (pas d'adhérence entre les pièces)

Solutions :

- ✓ Changer l'état des surfaces en contact des pièces assemblées (surfaces sablées et peintes avec $\mu=0.4$). Dans ce cas, $3 \cdot F_{s,Rd,ser} = 117.29 \text{ kN} > N_{Sd,max} = 110.4 \text{ kN}$. C'est la solution la plus simple et la plus économique.
- ✓ Avoir Double profilé 2UPE 100
- ✓ Changer la nuance et le diamètre des boulons voire leur nombre

13.3. Détermination des longueurs des soudures (cordon ép. =5 mm) longitudinales

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd,max} \sqrt{3}}{f_u}$$

a : épaisseur de la gorge = 5mm

l : longueur du cordon (à déterminer)

$N_{Sd,max}$: effort appliqué = 110.4 kN

f_u : limite de rupture du cordon = 360 MPa

Acier235 (Fe 360), on a : $\beta_w = 0.8$ et $\gamma_{Mw} = 1.25$

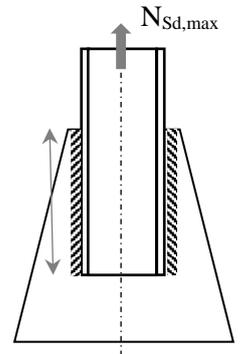


Figure 39 – assemblage par cordons latéraux

$$\sum l = 2l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd,max} \sqrt{3}}{a \cdot f_u}$$

$$l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd,max} \sqrt{3}}{2 a \cdot f_u}$$

$$l \geq 0.8 \times 1.25 \frac{110.4 \times 10^3 \sqrt{3}}{2 \times 5 \times 360} = 53 \text{ mm}$$

On prend L=55 mm

13.4. Détermination de l'épaisseur du cordon de soudure frontal de l'assemblage

$$a \cdot \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd,max} \sqrt{2}}{f_u}$$

$$a \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd,max} \sqrt{2}}{l \cdot f_u}$$

$$a \geq 0.8 \times 1.25 \frac{110.4 \cdot 10^2 \sqrt{2}}{100 \times 360} = 4.33 \text{ mm}$$

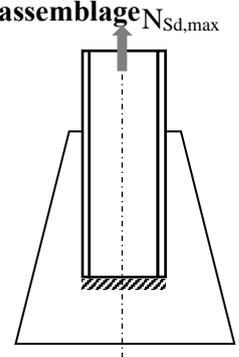


Figure 40 – Assemblage par cordon frontal

On prend a=5 mm

14. Exercice 14 – Assemblage poteau poteau par couvres joints

Soit un assemblage de continuité de poteaux réalisé dans un premier temps par éclisse (figure 1a) puis dans un deuxième temps par soudage (figure 1b). Le poteau est sollicité en traction par N_{Sd} .

1. Vérifier la résistance des boulons, de l'éclisse puis interpréter les résultats.
2. Vérifier la résistance des soudures et commenter les résultats.

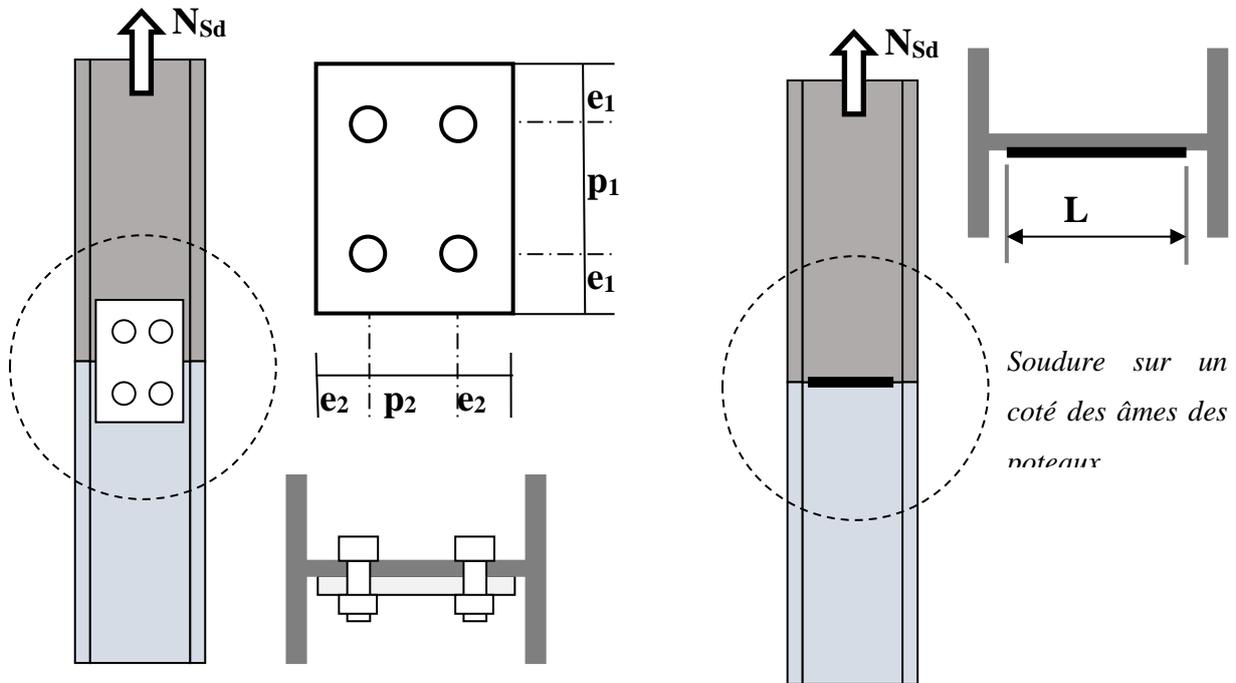


Figure 41 – Assemblage boulonné

Figure 42 – Assemblage soudé

Données :

$$N_{Sd} = 200 \text{ kN}$$

Poteau en HEA 300 ($h=290 \text{ mm}$; $b = 300 \text{ mm}$; épaisseur des semelles $t_f = 14 \text{ mm}$; épaisseur de l'âme $t_w = 8.5 \text{ mm}$)

Boulons M 20 – Classe 6.8 ; section lisse $A = 314 \text{ mm}^2$ et section fileté $A_s = 245 \text{ mm}^2$; Section cisailée des tiges des boulons en partie fileté ; diamètre des trous de perçage $d_o = 22 \text{ mm}$

Eclisse (ou plaque) de dimensions 180x210x8

Aciers en Fe360 ; $\gamma_{M2} = 1.25$; $\beta_w = 0.8$; $\gamma_{Mw} = 1.25$

Gorge de soudure $a = 3 \text{ mm}$; Longueur de la soudure ($l=208 \text{ mm}$)

$e_1 = 50 \text{ mm}$; $e_2 = 40 \text{ mm}$; $p_1 = 110 \text{ mm}$; $p_2 = 100 \text{ mm}$;

14.1. Vérification de la résistance des boulons

Les boulons sont sollicités en cisaillement

La formule de résistance d'un boulon en cisaillement est :

Pour un plan de cisaillement :

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

- ✓ $\alpha_v : = 0.5$ pour les boulons de classe « 6.8 »
- ✓ $f_{ub} : \text{limite élastique du boulon} = 6 \times 100 = 600 \text{ MPa}$
- ✓ $A_s : \text{aire de la section fileté} = 245 \text{ mm}^2$
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$

L'effort sollicitant N_{sd} est repris par **2 boulons**, on doit vérifier l'inéquation :

$$2 \cdot F_{v,Rd} \geq N_{sd}$$

A.N. : $2 \times (0.5 \times 600 \times 245) / 1.25 \geq 200. \text{ kN}$

$$117,6 \text{ kN} \geq 200. \text{ kN}$$

La condition n'est pas vérifiée. Il va y avoir rupture des tiges des boulons par cisaillement.

14.2. Vérification de la résistance de l'éclisse (ou couvre joint)

On vérifie le couvre joint en pression diamétrale donnée par :

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

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

- ✓ $f_u : \text{limite élastique des pièces assemblées égale à } 360 \text{ MPa}$
- ✓ $d : \text{diamètre du boulon} = 20 \text{ mm}$
- ✓ $t : \text{épaisseur du couvre joint} = 8 \text{ mm}$
- ✓ $\gamma_{M2} = 1.25$
- ✓ $e_1 = 50 \text{ mm} ; e_2 = 40 \text{ mm} ; p_1 = 110 \text{ mm} ; p_2 = 100 \text{ mm} ;$

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \times \frac{40}{22} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \times \frac{100}{22} \right) ; 2,5 \right]$$

$$k_1 = \min [(3,40) ; (6,36) ; 2,5]$$

$$k_1 = 2,5$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{50}{3 \times 22} \right) ; \left(\frac{110}{3 \times 22} - 0,25 \right) ; \frac{600}{360} ; 1 \right]$$

$$\alpha_b = \min [(0,76) ; (1,41) ; 1,66 ; 1]$$

$$\alpha_b = 0,76$$

On a 2 boulons et donc 2 trous qui résistent à la pression diamétrale, on doit vérifier :

$$2.F_{b,Rd} \geq N_{Sd}$$

$$\text{A.N. : } 2 \times (2,5 \times 0,76 \times 360 \times 200 \times 8) / 1,25 \geq 200 \text{ kN}$$

$$1\,751 \text{ kN} \geq 200 \text{ kN}$$

Le couvre-joint résiste à la pression diamétrale

14.3. Vérification du cordon de soudure

L'effort sollicitant est perpendiculaire au cordon de soudure, alors, c'est un cordon frontal.

On doit vérifier :

$$a. \sum l \geq \beta_w \cdot \gamma_{Mw} \frac{N_{Sd} \cdot \sqrt{2}}{f_u}$$

- ✓ a : épaisseur de la gorge = 3 mm
- ✓ l : longueur du cordon = 208 mm
- ✓ N_{Sd} : effort appliqué = 200 kN
- ✓ f_u : limite de rupture du cordon = 360 MPa
- ✓ $\beta_w = 0,8$ et $\gamma_{Mw} = 1,25$

$$\text{A.N. : } 3 \times 208 \geq (0,8 \times 1,25 \times 200 \cdot 10^3 \times 1,414) / 360$$

$$624 \text{ mm}^2 \geq 785 \text{ mm}^2$$

La condition n'est pas vérifiée et donc il va y avoir rupture de la soudure

15. Assemblage poutre poteau « calcul selon la méthode des composantes »

ASSEMBLAGE POUTRE POTEAU PAR PLATINE D'EXTREMITE BOULONNÉE AVEC JARRET »

Calcul du Moment Résistant et de la Rigidité rotationnelle

15.1. Introduction

L'assemblage de l'exemple ci-dessous est calculé conformément à la norme Européenne « EC3 ». La procédure générale du calcul d'assemblage poteau poutre boulonné par platine d'about consiste aux calculs de la résistance « détermination du moment résistant de l'assemblage $M_{j,rd}$ » et de la rigidité « détermination de la rigidité initiale de l'assemblage $S_{j,ini}$ ».

15.2. Données de l'assemblage

15.2.1. Géométrie de l'assemblage

Il s'agit d'un assemblage poteau poutre boulonné par platine d'about non débordante comportant deux rangées de boulons Figure ??.

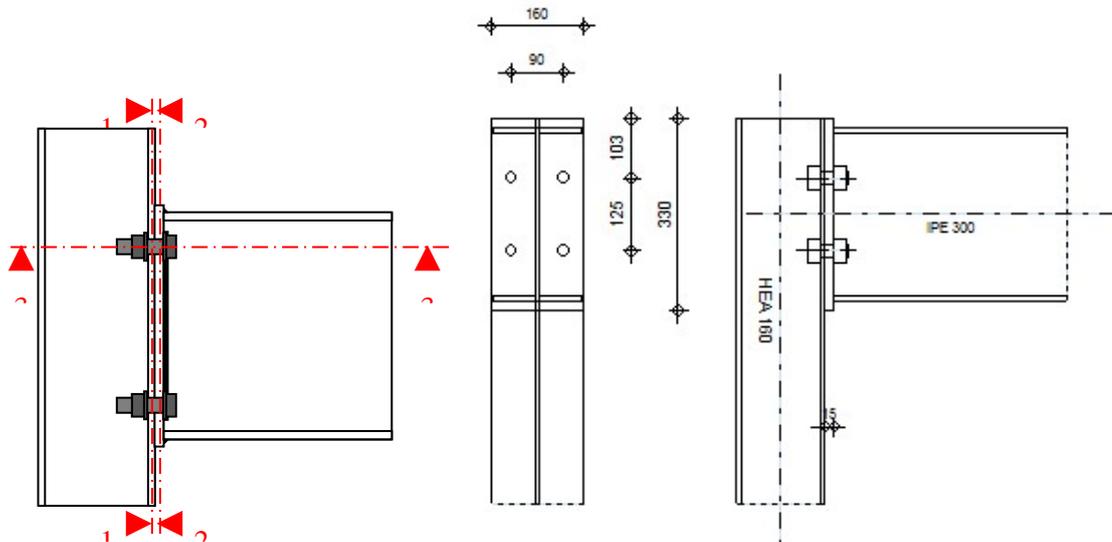


Figure 43 – Géométrie de l'assemblage

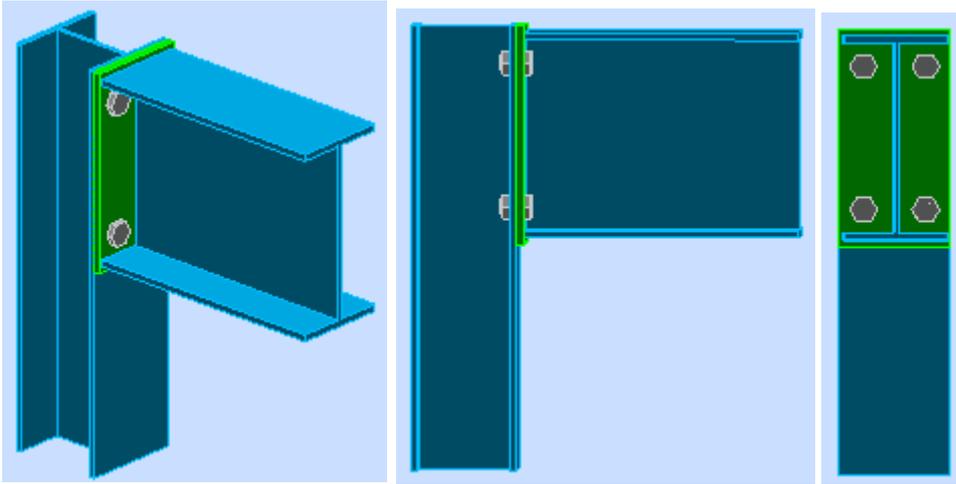


Figure 44 – Vues 3D et 2D de l'assemblage

Le tableau ci-dessous résume les caractéristiques géométriques des sections utilisées. Autres détails des profilés sont présentés en annexe.

Poteau	A_c (mm ²)	h_c (mm)	b_{fc} (mm)	t_{wc} (mm)	t_{fc} (mm)	r_c (mm)	h_{ic} (mm)	d_{wc} (mm)
HEA 160	3880	152	160	6	9	15	134	104

Poutre	A_b (mm ²)	h_b (mm)	b_b (mm)	t_{wb} (mm)	t_{fb} (mm)	r_b (mm)	h_{ib} (mm)	d_b (mm)
IPE 300	5380	300	150	7.1	10.7	15	278.6	248.6

Platine d'about	h_p (mm)	b_p (mm)	t_p (mm)
	320	160	12

Où

d : Diamètre du boulon;

A : Aire de la tige du boulon non filetée ;

A_s : Aire de la tige du boulon filetée ;

t_h : Epaisseur de la tête du boulon ;

t_e : Epaisseur de l'écrou ;

t_r : Epaisseur de la rondelle ;

t_{fc} : Epaisseur de la semelle du poteau ;

t_p : Epaisseur de la platine d'about ;

L_b : Longueur efficace de serrage du boulon.

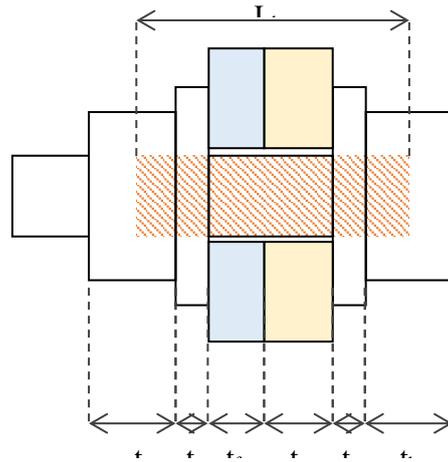


Figure 45 – Détails de la géométrie du boulon

Si le boulon dispose des rondelles

$$L_b = \frac{t_e}{2} + t_r + t_{fc} + t_p + t_r + \frac{t_h}{2}$$

Si le boulon ne dispose pas de rondelles

$$L_b = \frac{t_e}{2} + t_{fc} + t_p + \frac{t_h}{2}$$

Boulons	d	d ₀	A	A _s	T _h	t _e	t _r	L _b	f _{yb}	f _{ub}
M20	(mm)	(mm)	(mm ²)	(mm ²)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(MPa)	(MPa)
10.9	20	22	314	245	13	16	4	43.5	900	1000

Résistance de calcul à la traction d'un boulon individuel:

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 1000 \times 353}{1,25} = 254\,160\,N = 254,16\,kN$$

15.2.2. Soudures

Pour les éléments structuraux en acier S235 ; $\beta_w = 0,8$

Soudures des semelles de la poutre sur la platine :

$$a_f \geq t_{fb} \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}{f_u \sqrt{2}} \right) = 10,7x \left(\frac{235}{1,0} \right) \left(\frac{0,8 \times 1,25}{360 \sqrt{2}} \right) = 4,93\,mm$$

Des cordons d'angles à pleine résistance d'épaisseur $a_f = 5\,mm$ sont utilisés pour assembler la platine avec les deux semelles de la poutre.

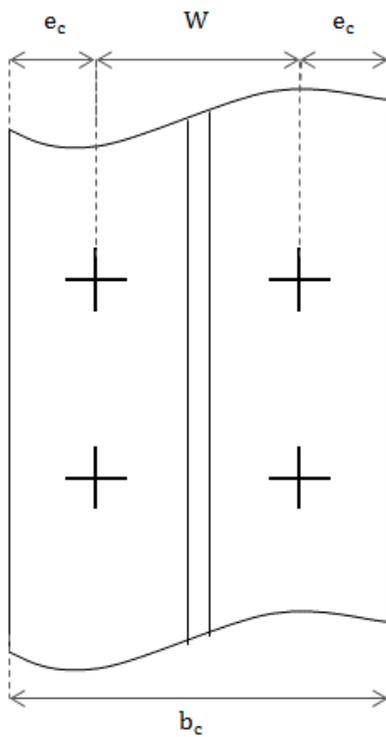
Soudures de l'âme de la poutre sur la platine :

$$a_w \geq t_{wb} \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}{f_u \sqrt{2}} \right) = 7.1x \left(\frac{235}{1.0} \right) \left(\frac{0.8x1.25}{360\sqrt{2}} \right) = 3.25 \text{ mm}$$

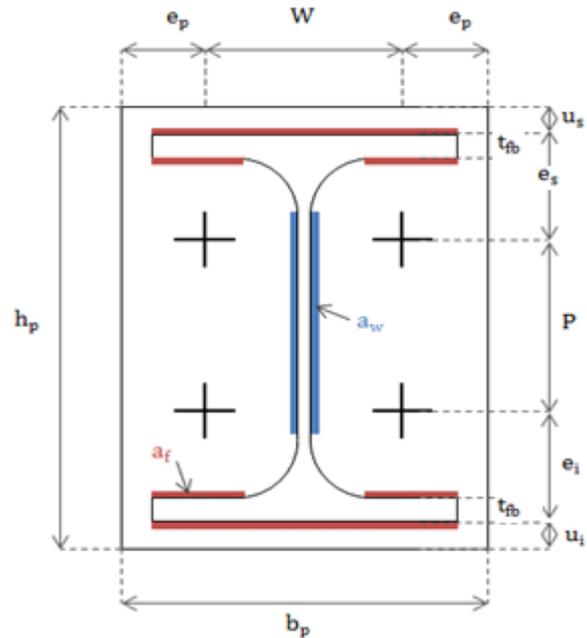
Des cordons d'angles à pleine résistance d'épaisseur $a_w = 4 \text{ mm}$ sont utilisés pour assembler la platine avec l'âme de la poutre.

15.2.3. Pincés et entre axes

e_c	e_p	W	P	u_s	u_i	e_s	e_i
35	35	90	210	10	10	45	45
(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)



Coupe 1-1 : Détails poteau



Coupe 2-2 : Détails platine d'about

Figure 46 – Pincés et entre axes « Poteau Platine »

15.2.4. Distances utiles dans le calcul

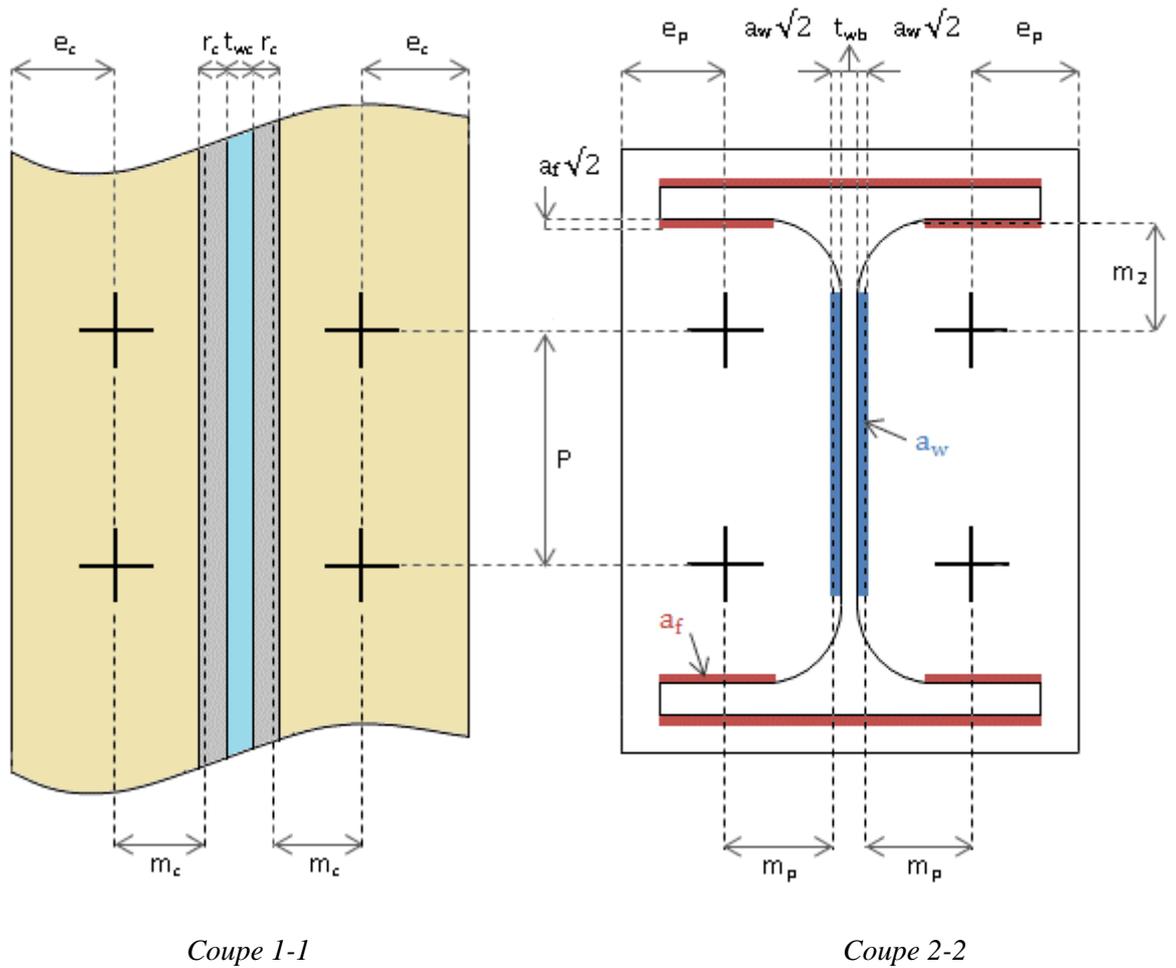


Figure 47 – Pinces et entre axes

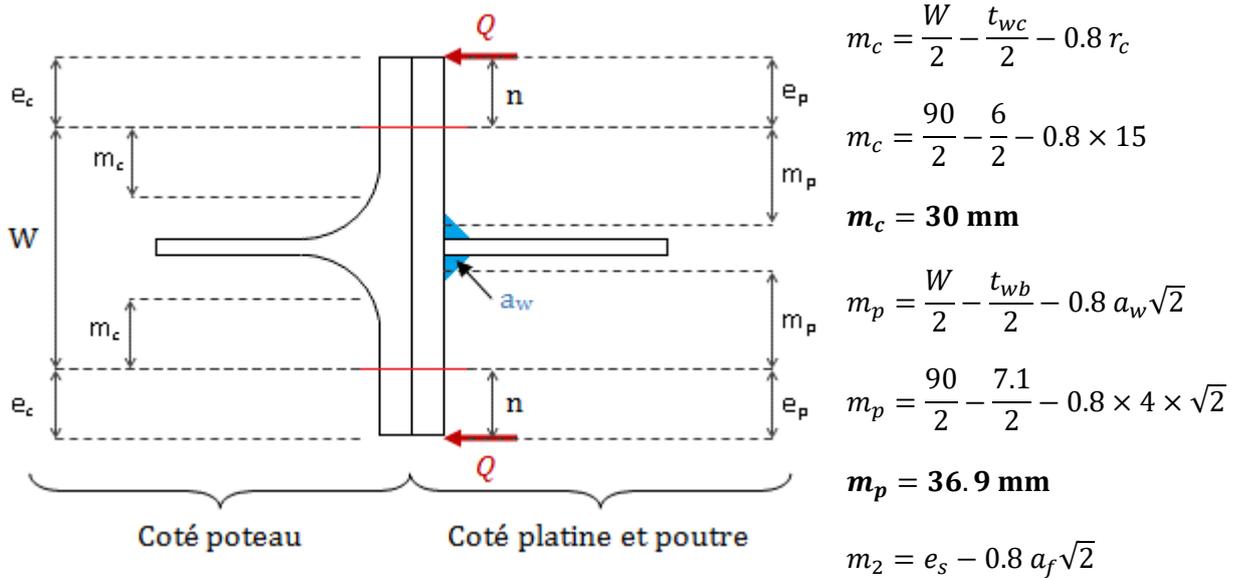


Figure 48 – Pinces et entre axes Coupe 3-3

$$m_2 = 30.8 \text{ mm}$$

$$e_{min} = \min(e_c ; e_p)$$

$$e_{min} = \min(35 ; 35)$$

$$e_{min} = 35 \text{ mm}$$

Où Q : Effort de levier éventuel. Il dépendra des modes de ruines en zone tendue ;

n : Bras de levier de l'effort de levier Q . Calculée par la suite.

15.2.5. Données matérielles

Acier **S235** (pour tous les éléments structuraux) :

- ✓ $f_y = 235 \text{ N/mm}^2$,
- ✓ $f_u = 360 \text{ N/mm}^2$ ($t < 40 \text{ mm}$)
- ✓ Module d'élasticité : $E = 210000 \text{ N/mm}^2$

15.2.6. Résistance à la traction d'un boulon

$$F_{T,Rd} = 0.9 \frac{A_s f_{ub}}{\gamma_{M2}} = 0.9 \times \frac{245 \times 1000}{1.25}$$

$$F_{T,Rd} = 176.4 \text{ kN}$$

15.2.7. Coefficients de sécurité

Coefficient de sécurité sur les éléments : $\gamma_{M0} = 1.1$

Coefficient de sécurité sur les boulons : $\gamma_{M2} = 1.25$

15.3. Calcul du Moment résistant

15.3.1. Étapes de calcul

- ✓ Calculer la résistance à la compression dans la zone comprimée $F_{c,Rd}$
- ✓ Calculer la résistance au cisaillement du panneau d'âme du poteau (zone cisailée) $V_{wp,Rd}$
- ✓ Déterminer la résistance potentielle des rangées de boulons dans la zone tendue $F_{t,Rd(t)}$
- ✓ Calculer la résistance à la traction efficace de chaque rangée de boulons $F_{tr,Rd}$
- ✓ Calculer le moment résistant de l'assemblage $M_{j,Rd}$

15.3.2. Identification des composantes de base

Lorsqu'un un assemblage poteau poutre est soumis à un moment de flexion sollicitant, nous pouvons le diviser en 3 zones et chaque zone comporte une ou plusieurs composantes comme indique la figure ci-dessous

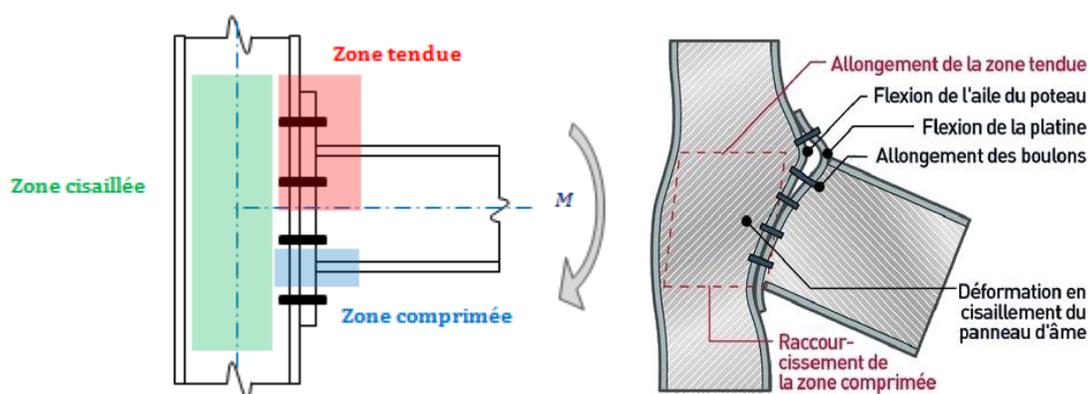


Figure 49 –Zones de sollicitations dans un assemblage poteau poutre

N°	Composantes	Zone
1	panneau d'âme de poteau en cisaillement	cisailée
2	âme de poteau comprimée	comprimée
3	âme de poteau tendue	tendue
4	semelle de poteau fléchie	tendue
5	platine d'about fléchie	tendue
7	semelle et âme de poutre comprimées	comprimée
8	âme de poutre tendue	tendue
10	boulons tendus	tendue

15.3.3. Résistance

Rappel de la procédure générale de calcul de résistance

Le calcul du moment résistant de l'assemblage dans cet exemple se fait par la méthode des composantes présentée dans l'Eurocode 3 partie 1-8. Les composantes de base citées dans la section précédente (1.4) permettent de calculer les résistances élémentaires dans chaque élément. Le moment

résistant final $M_{j,Rd}$ est obtenu à partir des efforts défavorables de traction, limités par le minimum entre la zone cisailée et comprimée et par la suite, multipliés par leur bras de levier correspondant.

Organigramme général de la procédure de calcul

Le calcul d'un assemblage poteau poutre boulonné par platine d'about peut se résumer comme montre la figure ci-dessous

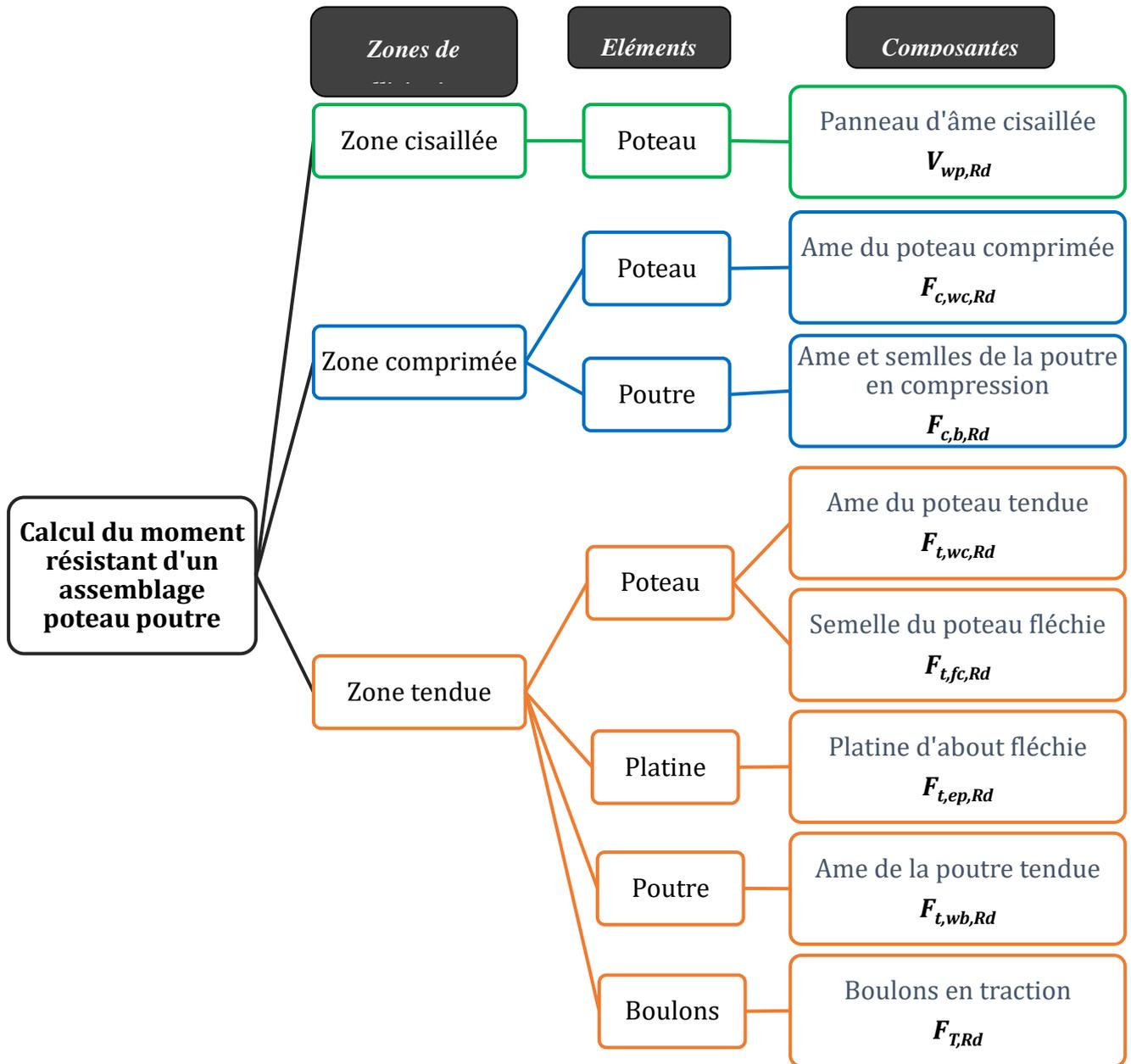


Figure 50 – Procédure générale du calcul de $M_{j,Rd}$

15.4. Zone cisailée

15.4.1. Panneau d'âme du poteau en cisaillement $V_{wp,Rd}$

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 A_{vc} f_{y,c}}{\beta \sqrt{3} \gamma_{M0}}$$

Où

A_{vc} : Aire de cisaillement de la section du poteau ;

$f_{y,c}$: Limite élastique de l'âme du poteau ;

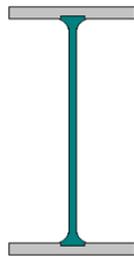
β : Paramètre de transformation dépendant de la configuration générale de l'assemblage ;

γ_{M0} : Coefficient de sécurité.

i - Détermination de l'aire de cisaillement de la section du poteau A_{vc}

L'aire de cisaillement d'une section qui est égale à :

Profilé laminé :



$$A_{vc} = A_c - 2 b_{fc} t_{fc} + t_{fc} (t_{wc} + 2 r_c)$$

PRS :



$$A_{vc} = t_{wc} h_{ic}$$

Figure 51 –Section cisailée

$$A_{vc} = 3880 - 2 \times 160 \times 9 + 9 \times (6 + 2 \times 15)$$

$$A_{vc} = 1324 \text{ mm}^2$$

ii - Détermination du paramètre de transformation β

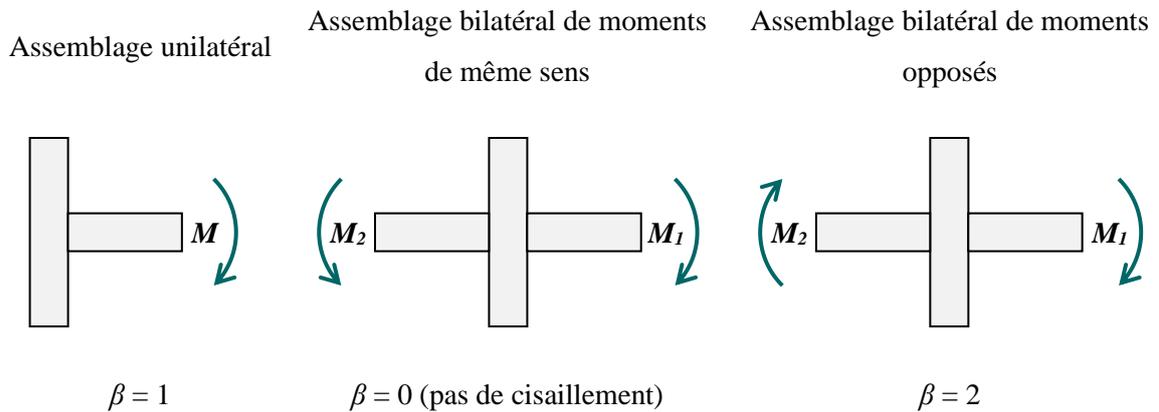


Figure 52–Coefficient β

iii - Calcul de l'effort résistant du panneau d'âme du poteau en cisaillement $V_{wp,Rd}$

$$V_{wp,Rd} = \frac{0.9 \times 235 \times 1324}{1 \times 1.1x\sqrt{3}}$$

$$V_{wp,Rd} = 1469.75 \text{ kN}$$

15.5. Zone Comprimée

15.5.1. Ame du poteau en compression $F_{c,wc,Rd}$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{b_{eff,c,wc} \omega \rho k_{wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

Où

$b_{eff,c,wc}$: Largeur efficace de l'âme du poteau en compression ;

ω : coefficient d'interaction avec l'âme du poteau cisailée ;

ρ : coefficient réducteur du voilement sous compression ;

k_{wc} : interaction avec la contrainte de compression dans l'âme du poteau (prise égale à 1) ;

t_{wc} : épaisseur de l'âme du poteau ;

$f_{y,wc}$: Limite élastique de l'âme du poteau ;

γ_{M1} : Coefficient de sécurité.

i - Détermination de la largeur efficace de compression $b_{eff,c,wc}$

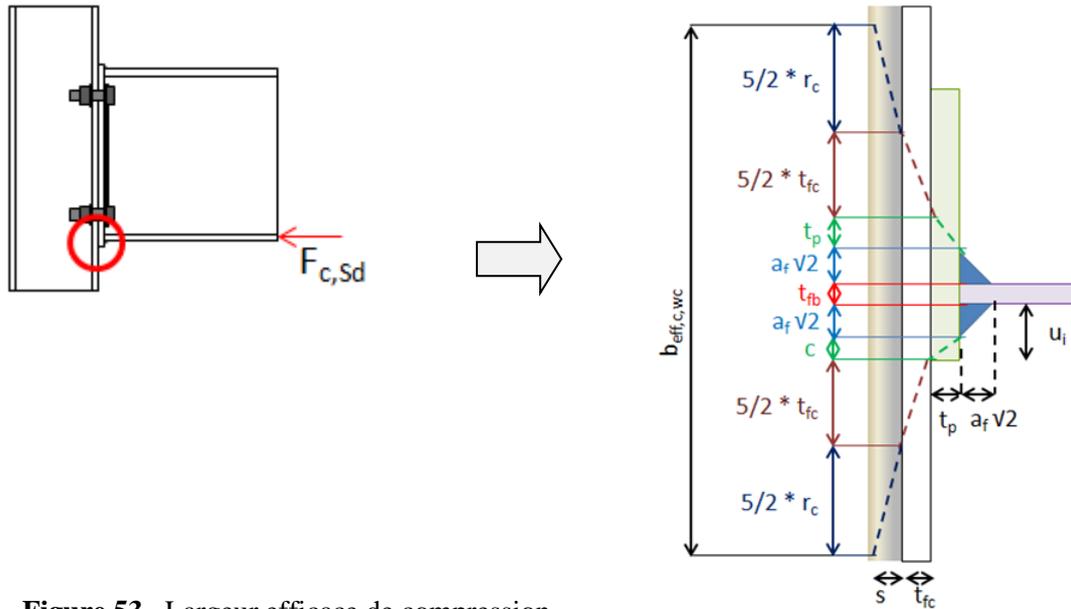


Figure 53– Largeur efficace de compression

Avec :

$$c = \min (t_p; (u_i - a_f \sqrt{2}))$$

$$s = r_c \quad \text{Pour un profilé laminé}$$

$$s = a \sqrt{2} \text{ Pour un PRS}$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + (2 \sqrt{2} a_f) + t_p + c + (5 s) + (5 t_{fc})$$

$$b_{eff,c,wc} = 10.7 + (2 \times \sqrt{2} \times 5) + 12 + (10 - \sqrt{2} \times 5) + (5 \times 15) + (5 \times 9)$$

$$b_{eff,c,wc} = 159.76 \text{ mm}$$

ii - Détermination du coefficient d'interaction avec l'âme du poteau cisailée ω

Nous avons une configuration unilatérale : $\beta = 1 \Rightarrow \omega = \omega_I$

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \left(\frac{b_{eff,c,wc} t_{wc}}{A_{VC}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \times \left(\frac{159.76 \times 6}{1324} \right)^2}}$$

$$\omega = \omega_I = 0.77$$

iii - Détermination du coefficient réducteur du voilement de l'âme du poteau ρ

Nous calculons d'abord l'élanement réduit :

$$\bar{\lambda}_p = 0.932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_c f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} = 0.932 \sqrt{\frac{159.76 \times 104 \times 235}{210000 \times 6^2}}$$

$$\bar{\lambda}_p = 0.67$$

Vérification : $\bar{\lambda}_p \leq 0.72 \Rightarrow$ Pas de voilement dans l'âme du poteau et $\rho = 1$

iv - Calcul de l'effort résistant de l'âme de poteau comprimée $F_{c,wc,Rd}$

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{159.76 \times 0.77 \times 1 \times 1 \times 6 \times 235}{1}$$

$$F_{c,wc,Rd} = 173.45 \text{ kN}$$

15.5.2. Ame et semelle de la poutre en compression $F_{c,b,Rd}$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{b,Rd}}{h_b - t_{fb}}$$

Où

$M_{b,Rd}$: Moment résistant de la poutre ;

h_b : Hauteur de la poutre ;

t_{fb} : Epaisseur de la semelle de la poutre.

i - Détermination de la classe de section de la poutre

D'après les tableaux (Annexe B), nous avons :

Ame fléchie : $c/t = 208 / 7.1 = 29.3 \leq 72 \varepsilon \Rightarrow$ Classe 1

Semelle comprimée : $c/t = (150 - 2 \times 15 - 7.1) / (2 * 10.7) = 5.27 \leq 9 \varepsilon \Rightarrow$ Classe 1

La poutre est de **classe 1**

ii - Détermination du moment résistant de la poutre $M_{b,Rd}$

$$M_{b,Rd} = \frac{W_{pl,b,Rd} f_{yb}}{\gamma_{M0}}$$

Où

$W_{pl,b,Rd}$: Module plastique de la poutre selon son axe fort ;

f_{yb} : Limite élastique de la poutre ;

γ_{M0} : Coefficient de sécurité. (=1.1)

$$M_{b,Rd} = \frac{628.4 \times 10^3 \times 235}{1.1}$$

$$M_{b,Rd} = 134.25 \text{ kNm}$$

iii - Calcul de l'effort résistant de la poutre en compression $F_{c,b,Rd}$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{134.25}{(300 - 10.7) \times 10^{-3}}$$

$$F_{c,b,Rd} = 464.05 \text{ kN}$$

15.5.3. Récapitulatif des efforts en zone comprimée $F_{c,Rd}$

$$F_{c,Rd} = \min (F_{c,wc,Rd} ; F_{c,b,Rd})$$

Où :

$F_{c,wc,Rd}$: Résistance de l'âme du poteau en compression ;

$F_{c,b,Rd}$: Résistance de l'âme et de la semelle de la poutre en compression.

$$F_{c,Rd} = \min (173.45; 464.05)$$

$$F_{c,Rd} = 175.45 \text{ kN}$$

15.6. Zone tendue

La zone tendue est divisée en tronçons en té suivant le nombre de rangées et de groupe de boulons dont l'assemblage étudié dispose. Chaque tronçon se caractérise par une longueur efficace (annexe C) et une résistance.

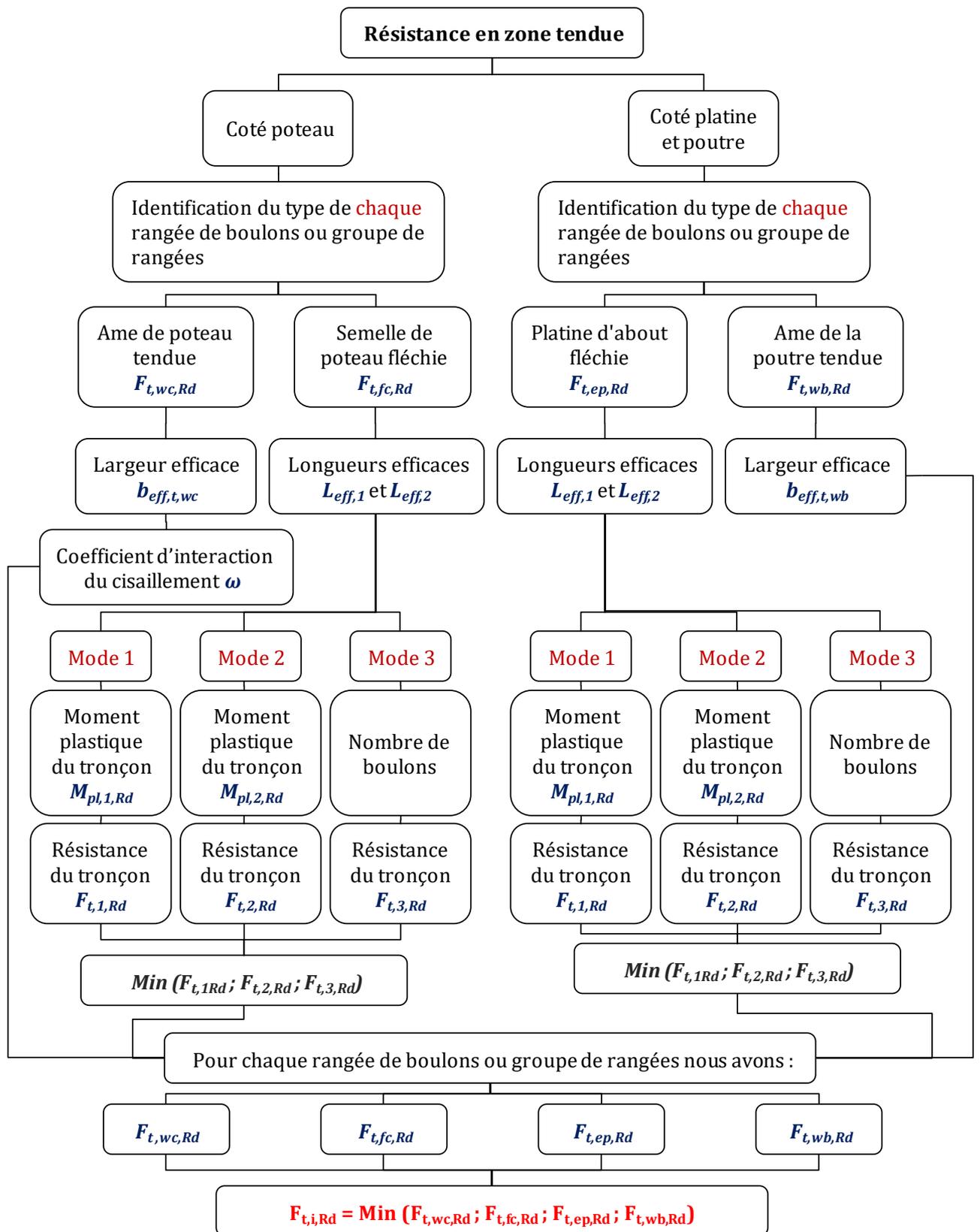


Figure 54– Organigramme général de calcul en zone tendue

15.6.1. Semelle de poteau fléchie $F_{t,fc,Rd}$

i - Rangée 1 : rangée d'extrémité

a - Longueur du tronçon

$$m = m_c = 30 \text{ mm}; e = e_c = 35 \text{ mm}$$

$$n = \min(1.25m; e_{\min}) = 35 \text{ mm}$$

Mécanisme circulaire $L_{eff,cp}$

$$L_{eff,cp} = 2 \pi m$$

$$L_{eff,cp} = 2 \times 3.14 \times 30$$

$$L_{eff,cp} = \mathbf{188.4 \text{ mm}}$$

Mécanisme non circulaire $L_{eff,nc}$

$$L_{eff,nc} = 4 m + 1.25 e$$

$$L_{eff,nc} = (4 \times 30) + (1.25 \times 35)$$

$$L_{eff,nc} = \mathbf{163.75 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 1 $L_{eff,1}$

$$L_{eff,1} = \min(L_{eff,cp}; L_{eff,nc})$$

$$L_{eff,1} = \mathbf{163.75 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 2 $L_{eff,2}$

$$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$$

$$L_{eff,2} = \mathbf{163.75 \text{ mm}}$$

b - Résistance du tronçon

Mode 1 : Mécanisme complet

Moment plastique du tronçon $M_{pl,1,Rd}$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,1} t_{fc}^2 f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times 163.75 \times 9^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \mathbf{0.708 \text{ kNm}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,1,Rd}$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \times 0.708}{(30) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,1,Rd} = \mathbf{94.45 \text{ kN}}$$

Mode 2 : Mécanisme partiel

Moment plastique du tronçon $M_{pl,2,Rd}$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,2} t_{fc}^2 f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times 163.75 \times 9^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \mathbf{0.708 \text{ kNm}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,2,Rd}$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{(2 \times 0.708) + (35 \times 10^{-3} \times 2 \times 176.4)}{(30 + 35) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,2,Rd} = \mathbf{211.75 \text{ kN}}$$

Mode 3 : Ruine des boulons

Résistance du tronçon $F_{t,3,Rd}$

Nombre des boulons dans le tronçon : 2

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

$$F_{t,3,Rd} = 2 \times 176.4$$

$$F_{t,3,Rd} = \mathbf{352.8 \text{ kN}}$$

ii - Rangée 2 : rangée d'extrémité

a - Longueur du tronçon

$m = m_c = 30 \text{ mm}$; $e = e_c = 35 \text{ mm}$

$n = \min(1.25m; e_{\min}) = 35 \text{ mm}$

Mécanisme circulaire $L_{eff,cp}$

$$L_{eff,cp} = 2 \pi m$$

$$L_{eff,cp} = 2 \times 3.14 \times 30$$

$$L_{eff,cp} = \mathbf{188.4 \text{ mm}}$$

Mécanisme non circulaire $L_{eff,nc}$

$$L_{eff,nc} = 4m + 1.25e$$

$$L_{eff,nc} = (4 \times 30) + (1.25 \times 35)$$

$$L_{eff,nc} = \mathbf{163.75 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 1 $L_{eff,1}$

$$L_{eff,1} = \min(L_{eff,cp}; L_{eff,nc})$$

$$L_{eff,1} = \mathbf{163.75 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 2 $L_{eff,2}$

$$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$$

$$L_{eff,2} = \mathbf{163.75 \text{ mm}}$$

b - Résistance du tronçon

Mode 1 : Mécanisme complet

Moment plastique du tronçon $M_{pl,1,Rd}$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,1} t_{fc}^2 f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times 163.75 \times 9^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \mathbf{0.708 \text{ kNm}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,1,Rd}$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \times 0.708}{(30) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,1,Rd} = \mathbf{94.45 \text{ kN}}$$

Mode 2 : Mécanisme partiel

Moment plastique du tronçon $M_{pl,2,Rd}$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,2} t_{fc}^2 f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times 163.75 \times 9^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \mathbf{0.708 \text{ kNm}}$$

Mode 3 : Ruine des boulons

Nombre des boulons dans le tronçon : 2

Résistance du tronçon $F_{t,2,Rd}$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{(2 \times 0.708) + (35 \times 10^{-3} \times 2 \times 176.4)}{(30 + 35) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,2,Rd} = \mathbf{211.75 \text{ kN}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,3,Rd}$

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

$$F_{t,3,Rd} = 2 \times 176.4$$

$$F_{t,3,Rd} = \mathbf{352.8 \text{ kN}}$$

iii - Groupe 1-2

a - Longueur du tronçon

$$m = m_c = 30 \text{ mm}; e = e_c = 35 \text{ mm}; P = 210 \text{ mm}$$

$$n = \min(1.25m; e_{\min}) = 35 \text{ mm}$$

Mécanisme circulaire $L_{eff,cp}$

$$L_{eff,cp} = (\pi m + P) \times 2$$

$$L_{eff,cp} = (3.14 \times 30 + 210) \times 2$$

$$L_{eff,cp} = \mathbf{608.4 \text{ mm}}$$

Mécanisme non circulaire $L_{eff,nc}$

$$L_{eff,nc} = (2 m + 0.625 e + 0.5 P) \times 2$$

$$L_{eff,nc} = (2 \times 30 + 0.625 \times 35 + 0.5 \times 210) \times 2$$

$$L_{eff,nc} = \mathbf{347.5 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 1 $L_{eff,1}$

$$L_{eff,1} = \min(L_{eff,cp}; L_{eff,nc})$$

$$L_{eff,1} = \mathbf{347.5 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 2 $L_{eff,2}$

$$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$$

$$L_{eff,2} = \mathbf{347.5 \text{ mm}}$$

b - Résistance du tronçon

Mode 1 : Mécanisme complet

Moment plastique du tronçon $M_{pl,1,Rd}$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,1} t_{fc}^2 f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times 347.5 \times 9^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 1.5 \text{ kNm}$$

Résistance du tronçon $F_{t,1,Rd}$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \times 1.5}{(30) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,1,Rd} = 200.44 \text{ kN}$$

Mode 2 : Mécanisme partiel

Moment plastique du tronçon $M_{pl,2,Rd}$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,2} t_{fc}^2 f_{yc}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times 347.5 \times 9^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 1.5 \text{ kNm}$$

Résistance du tronçon $F_{t,2,Rd}$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{(2 \times 1.5) + (35 \times 10^{-3} \times 4 \times 176.4)}{(30 + 35) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,2,Rd} = 426.1 \text{ kN}$$

Mode 3 : Ruine des boulons

Résistance du tronçon $F_{t,3,Rd}$

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

Nombre des boulons dans le tronçon : 4

$$F_{t,3,Rd} = 4 \times 176.4$$

$$F_{t,3,Rd} = 705.6 \text{ kN}$$

15.6.2. Ame de poteau tendue $F_{t,wc,Rd}$

i - Rangée 1 : rangée d'extrémité

a - Longueur du tronçon

$$b_{eff,t,wc} = L_{eff,1} \Rightarrow b_{eff,t,wc} = 163.75 \text{ mm}$$

b - Coefficient d'interaction avec le cisaillement

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{VC}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \times \left(\frac{163.75 \times 6}{1324} \right)^2}}$$

$$\omega_1 = 0.76$$

c - Résistance

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.76 \times 163.75 \times 6 \times 235}{1.1}$$

$$F_{t,wc,Rd} = 160.08 \text{ kN}$$

ii - Rangée 2 : rangée d'extrémité

a - Longueur du tronçon

$$b_{eff,t,wc} = L_{eff,1} \Rightarrow b_{eff,t,wc} = 163.75 \text{ mm}$$

b - Coefficient d'interaction avec le cisaillement

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \times \left(\frac{163.75 \times 6}{1324} \right)^2}}$$

$$\omega_1 = 0.76$$

c - Résistance

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.76 \times 163.75 \times 6 \times 235}{1.1}$$

$$F_{t,wc,Rd} = 160.08 \text{ kN}$$

iii - Groupe 1-2

a - Longueur du tronçon

$$b_{eff,t,wc} = L_{eff,1} \Rightarrow b_{eff,t,wc} = 347.5 \text{ mm}$$

b - Coefficient d'interaction avec le cisaillement

$$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3 \times \left(\frac{347.5 \times 6}{1324} \right)^2}}$$

$$\omega_1 = 0.48$$

c - Résistance

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0.48 \times 347.5 \times 6 \times 235}{1.1}$$

$$F_{t,wc,Rd} = 216.35 \text{ kN}$$

15.6.3. 2.4.3 - Platine d'about fléchie $F_{t,ep,Rd}$

i - Rangée 1 : 1ère rangée sous la semelle tendue de la poutre

a - Longueur du tronçon

$$m = m_p = 36.9 \text{ mm}; e = e_p = 35 \text{ mm}; m_2 = 28.6 \text{ mm}$$

$$n = \min(1.25m; e_{\min}) = 35 \text{ mm}; \lambda_1 = 0.51; \lambda_2 = 0.39; \alpha = 6 \text{ (voir annexe D)}$$

Mécanisme circulaire $L_{eff,cp}$

$$L_{eff,cp} = 2 \pi m$$

$$L_{eff,cp} = 2 \times 3.14 \times 36.9$$

$$L_{eff,cp} = 231.7 \text{ mm}$$

Mécanisme non circulaire $L_{eff,nc}$

$$L_{eff,nc} = \alpha m$$

$$L_{eff,nc} = 6 \times 36.9$$

$$L_{eff,nc} = 221.4 \text{ mm}$$

Longueur efficace mode 1 $L_{eff,1}$

$$L_{eff,1} = \min(L_{eff,cp}; L_{eff,nc})$$

$$L_{eff,1} = 221.4 \text{ mm}$$

Longueur efficace mode 2 $L_{eff,2}$

$$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$$

$$L_{eff,2} = 221.4 \text{ mm}$$

b - Résistance du tronçon

Mode 1 : Mécanisme complet

Moment plastique du tronçon $M_{pl,1,Rd}$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,1} t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times 221.4 \times 12^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 1.7 \text{ kNm}$$

Résistance du tronçon $F_{t,1,Rd}$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \times 1.7}{(36.9) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,1,Rd} = 184.3 \text{ kN}$$

Mode 2 : Mécanisme partiel

Moment plastique du tronçon $M_{pl,2,Rd}$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,2} t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times 221.4 \times 12^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \mathbf{1.7 \text{ kNm}}$$

Mode 3 : Ruine des boulons

Nombre des boulons dans le tronçon : 2

Résistance du tronçon $F_{t,2,Rd}$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{(2 \times 1.7) + (35 \times 10^{-3} \times 2 \times 176.4)}{(36.9 + 35) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,2,Rd} = \mathbf{219.08 \text{ kN}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,3,Rd}$

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

$$F_{t,3,Rd} = 2 \times 176.4$$

$$F_{t,3,Rd} = \mathbf{352.8 \text{ kN}}$$

ii - Rangée 2 : rangée d'extrémité

a - Longueur du tronçon

$$m = m_p = 36.9 \text{ mm}; e = e_p = 35 \text{ mm}$$

$$n = \min(1.25m; e_{\min}) = 35 \text{ mm}$$

Mécanisme circulaire $L_{eff,cp}$

$$L_{eff,cp} = 2 \pi m$$

$$L_{eff,cp} = 2 \times 3.14 \times 36.9$$

$$L_{eff,cp} = \mathbf{231.73 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 1 $L_{eff,1}$

$$L_{eff,1} = \min(L_{eff,cp}; L_{eff,nc})$$

$$L_{eff,1} = \mathbf{191.35 \text{ mm}}$$

Mécanisme non circulaire $L_{eff,nc}$

$$L_{eff,nc} = 4 m + 1.25 e$$

$$L_{eff,nc} = (4 \times 36.9) + (1.25 \times 35)$$

$$L_{eff,nc} = \mathbf{191.35 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 2 $L_{eff,2}$

$$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$$

$$L_{eff,2} = \mathbf{191.35 \text{ mm}}$$

b - Résistance du tronçon

Mode 1 : Mécanisme complet

Moment plastique du tronçon $M_{pl,1,Rd}$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,1} t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times 191.35 \times 12^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \mathbf{1.47 \text{ kNm}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,1,Rd}$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \times 1.47}{(36.9) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,1,Rd} = \mathbf{159.34 \text{ kN}}$$

Mode 2 : Mécanisme partiel

Moment plastique du tronçon $M_{pl,2,Rd}$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,2} t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times 191.35 \times 12^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \mathbf{1.47 \text{ kNm}}$$

Résistance du tronçon $F_{t,2,Rd}$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{(2 \times 1.47) + (35 \times 10^{-3} \times 2 \times 176.4)}{(36.9 + 35) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,2,Rd} = \mathbf{212.62 \text{ kN}}$$

Mode 3 : Ruine des boulons

Résistance du tronçon $F_{t,3,Rd}$

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

$$F_{t,3,Rd} = 2 \times 176.4$$

$$F_{t,3,Rd} = \mathbf{352.8 \text{ kN}}$$

Nombre des boulons dans le tronçon : 2

iii - Groupe 1-2

a - Longueur du tronçon

$m = m_p = 30 \text{ mm}$; $e = e_p = 35 \text{ mm}$; $m_2 = 28.6 \text{ mm}$; $P = 210 \text{ mm}$

$n = \min(1.25m; e_{\min}) = 35 \text{ mm}$; $\lambda_1 = 0.51$; $\lambda_2 = 0.39$; $\alpha = 6$ (voir annexe D)

Mécanisme circulaire $L_{eff,cp}$

$$L_{eff,cp} = (\pi m + P) \times 2$$

$$L_{eff,cp} = (3.14 \times 36.9 + 210) \times 2$$

$$L_{eff,cp} = \mathbf{651.73 \text{ mm}}$$

Mécanisme non circulaire $L_{eff,nc}$

$$L_{eff,nc} = (0.5 P + \alpha m - 2 m - 0.625 e) \\ + (2 m + 0.625 e + 0.5 P)$$

$$L_{eff,nc} = (0.5 \times 210 + 6 \times 36.9 + 0.5 \times 210)$$

$$L_{eff,nc} = \mathbf{431.4 \text{ mm}}$$

Longueur efficace mode 1 $L_{eff,1}$

$$L_{eff,1} = \min (L_{eff,cp} ; L_{eff,nc})$$

$$L_{eff,1} = 431.4 \text{ mm}$$

Longueur efficace mode 2 $L_{eff,2}$

$$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$$

$$L_{eff,2} = 431.4 \text{ mm}$$

b - Résistance du tronçon

Mode 1 : Mécanisme complet

Moment plastique du tronçon $M_{pl,1,Rd}$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,1} t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25 \times 431.4 \times 12^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,1,Rd} = 3.31 \text{ kNm}$$

Résistance du tronçon $F_{t,1,Rd}$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$F_{t,1,Rd} = \frac{4 \times 3.31}{(36.9) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,1,Rd} = 359.65 \text{ kN}$$

Mode 2 : Mécanisme partiel

Moment plastique du tronçon $M_{pl,2,Rd}$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 L_{eff,2} t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \times 431.4 \times 12^2 \times 235}{1.1}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 3.31 \text{ kNm}$$

Résistance du tronçon $F_{t,2,Rd}$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd} + n \sum F_{T,Rd}}{m + n}$$

$$F_{t,2,Rd} = \frac{(2 \times 3.31) + (35 \times 10^{-3} \times 4 \times 176.4)}{(36.9 + 35) \times 10^{-3}}$$

$$F_{t,2,Rd} = 435.5 \text{ kN}$$

Mode 3 : Ruine des boulons

Résistance du tronçon $F_{t,3,Rd}$

$$F_{t,3,Rd} = \sum F_{T,Rd}$$

Nombre des boulons dans le tronçon : 4

$$F_{t,3,Rd} = 4 \times 176.4$$

$$F_{t,3,Rd} = 705.6 \text{ kN}$$

15.6.4. Ame de la poutre tendue $F_{t,wb,Rd}$

i - Rangée 1 : 1ère rangée sous la semelle tendue de la poutre

a - Longueur du tronçon

$$b_{eff,t,wb} = L_{eff,1} \Rightarrow b_{eff,t,wc} = 221.4 \text{ mm}$$

c - Résistance

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wc} f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{221.4 \times 6 \times 235}{1.1}$$

$$F_{t,wc,Rd} = 335.8 \text{ kN}$$

ii - Rangée 2 : rangée d'extrémité

a - Longueur du tronçon

$$b_{eff,t,wb} = L_{eff,1} \Rightarrow b_{eff,t,wc} = 191.35 \text{ mm}$$

c - Résistance

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wc} f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{191.35 \times 6 \times 235}{1.1}$$

$$F_{t,wc,Rd} = 290.24 \text{ kN}$$

iii - Groupe 1-2

a - Longueur du tronçon

$$b_{eff,t,wb} = L_{eff,1} \Rightarrow b_{eff,t,wc} = 431.4 \text{ mm}$$

c - Résistance

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wc} f_{yb}}{\gamma_{M0}} = \frac{431.4 \times 6 \times 235}{1.1}$$

$$F_{t,wc,Rd} = 654.35 \text{ kN}$$

15.6.5. Récapitulatif des efforts en zone tendue $F_{t,i,Rd}$

Récapitulatif par rangées de boulons et groupe de boulons coté poteau

Rangées	Ame du poteau tendue $F_{t,wc,Rd}$ (kN)	Semelle de poteau fléchie			Minimum coté poteau (kN)
		$F_{t,fc,Rd}$ (kN)			
		Mode 1 $F_{t,1,Rd}$	Mode 2 $F_{t,2,Rd}$	Mode 3 $F_{t,3,Rd}$	
1	160.08	94.45	211.7	352.8	94.45
2	160.08	94.45	211.7	352.8	94.45
1-2	216.35	200.44	426.1	705.6	200.44

Récapitulatif par rangées de boulons et groupe de boulons coté platine et poutre

Rangées	Platine d'about fléchie			Ame de la poutre tendue $F_{t,wb,Rd}$ (kN)	Minimum coté platine et poutre (kN)
	$F_{t,ep,Rd}$ (kN)				
	Mode 1 $F_{t,1,Rd}$	Mode 2 $F_{t,2,Rd}$	Mode 3 $F_{t,3,Rd}$		
1	184.3	219.1	352.8	335.8	184.3
2	159.3	212.6	352.8	290.2	159.3
1-2	359.6	435.5	705.6	654.3	359.6

Minimum en zone tendue

Rangées	Minimum coté poteau (kN)	Minimum coté platine et poutre (kN)	Minimum en zone tendue $F_{t,(i),Rd}$ (kN)
1	94.45	184.3	94.45
2	94.45	159.3	94.45
1-2	200.44	359.6	200.44

15.6.6. Equilibre des efforts

Effet du groupe

i - Minimum en zone tendue $F_{t,(i),Rd}$

Nous avons obtenu en zone tendue :

$$F_{t,(1),Rd} = 94.45 \text{ kN}$$

$$F_{t,(2),Rd} = 94.45 \text{ kN}$$

$$F_{t,(1+2),Rd} = 200.44 \text{ kN}$$

ii - Résistance effective pour chaque rangée en zone tendue $F_{i,t,Rd}$

$$F_{1,t,Rd} = F_{t,(1),Rd} \Rightarrow F_{1,t,Rd} = \mathbf{94.45 \text{ kN}}$$

$$F_{2,t,Rd} = \min(F_{t,(2),Rd} ; (F_{t,(1+2),Rd} - F_{t,(1),Rd})) = \min(94.45 ; (200.44 - 94.45))$$

$$\Rightarrow F_{2,t,Rd} = \mathbf{94.45 \text{ kN}}$$

Limitation des efforts par le cisaillement et la compression

i - Minimum entre le cisaillement et la compression

Zone cisailée	Minimum zone comprimée	Minimum
$V_{wp,Rd}$ (kN)	$F_{c,Rd}$ (kN)	(kN)
146.64	159.76	146.64

ii - Résistance effective finale pour chaque $F_{i,t,Rd}$

L'équilibre des efforts est assuré par l'équation :

$$\sum F_{i,t,Rd} = V_{wp,Rd} \Rightarrow 94.45 + 94.45 = 146.64 \Rightarrow 188.9 > 146.4$$

La rangée 2 doit de nouveau être limitée pour assurer l'équilibre ci-dessus

$$F_{1,t,Rd} = F_{1,t,Rd} \Rightarrow F_{1,t,Rd} = \mathbf{94.45 \text{ kN}}$$

$$F_{2,t,Rd} = V_{wp,Rd} - F_{1,t,Rd} \Rightarrow F_{2,t,Rd} = \mathbf{52.19 \text{ kN}}$$

On déduit que la résistance de l'assemblage est pilotée par le panneau d'âme du poteau cisailée.

15.7. Moment résistant

Le moment résistant $M_{j,Rd}$ est la somme des efforts dans les boulons multipliés par leur bras de levier par rapport au centre de compression de l'assemblage qui est donné à mi- épaisseur de la semelle comprimée de la poutre (figure 8).

Pour un assemblage à 2 rangées de boulons disposant d'une rangée en zone tendue et l'autre pas loin du centre de compression, l'Eurocode suppose que seulement la rangée en zone tendue qui est prise en compte dans le calcul du moment résistant (voir annexe E).

Si nous considérons que les deux rangées sont actives :

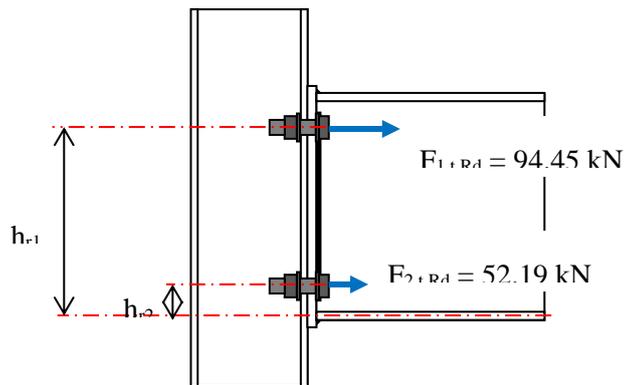


Figure 55 – Efforts et bras de levier des boulons

Où

h_{r1} : bras de levier de la rangée 1 ;

h_{r2} : bras de levier de la rangée 2.

Rangées	$F_{i,t,Rd}$ (kN)	h_{ri} (mm)	M_i (kNm)
1	94.45	249.65	23.5
2	52.19	39.65	2.1

$$M_{j,Rd} = \sum F_{i,t,Rd} \times h_{ri} = (94.45 \times 249.65 \times 10^{-3}) + (52.19 \times 39.65 \times 10^{-3})$$

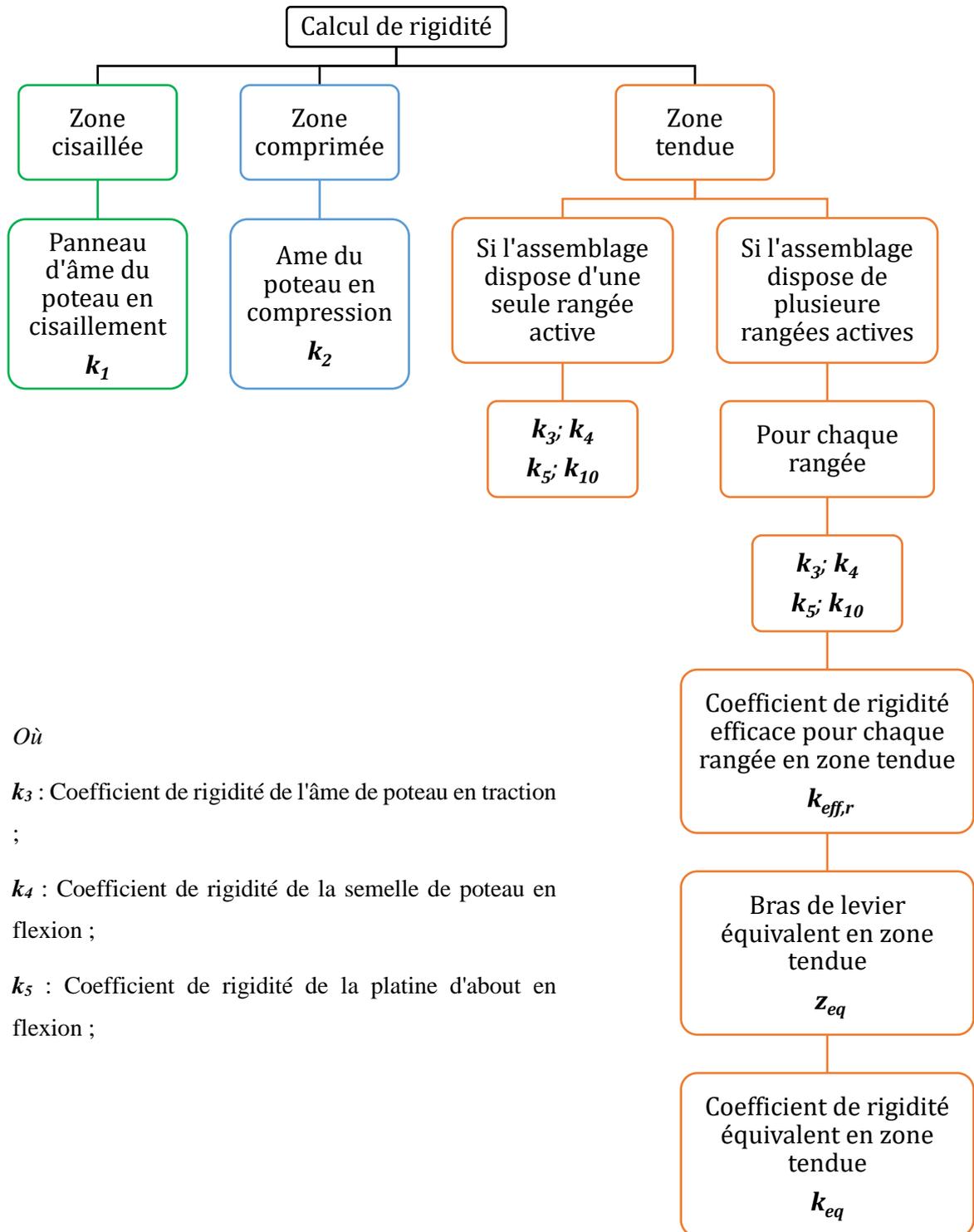
$$\mathbf{M_{j,Rd} = 25.6 \text{ kNm}}$$

Si nous considérons que seule la rangée 1 active $\mathbf{M_{j,Rd} = 23.5 \text{ kNm}}$

Nous remarquons que la rangée 2 participe seulement de 8% en terme de résistance.

15.8. Rigidité

La deuxième partie dans ce document est le calcul de la rigidité initiale $S_{j,ini}$ de l'assemblage ainsi que sa rigidité nominale S_j . La figure ci-dessous résume la procédure générale du calcul de rigidité.



Où

k_3 : Coefficient de rigidité de l'âme de poteau en traction ;

k_4 : Coefficient de rigidité de la semelle de poteau en flexion ;

k_5 : Coefficient de rigidité de la platine d'about en flexion ;

Figure 56 – Procédure générale du calcul de $S_{j,ini}$

15.8.1. - Zone cisailée

Panneau d'âme du poteau en cisaillement k_1

$$k_1 = \frac{0.38 A_{VC}}{\beta Z}$$

Où

A_{VC} : Aire de cisaillement de poteau ;

β : Paramètre de transformation ;

Z : Bras de levier de l'assemblage (voir annexe E).

$$k_1 = \frac{0.38 \times 1321}{1 \times 249.56}$$

$$k_1 = 2.04 \text{ mm}$$

15.8.2. Zone comprimée

Ame du poteau en compression k_2

$$k_2 = \frac{0.7 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_c}$$

Où

$b_{eff,c,wc}$: Largeur efficace en compression ;

t_{wc} : Epaisseur de l'âme du poteau ;

d_c : Hauteur de l'âme du poteau.

$$k_2 = \frac{0.7 \times 159.76 \times 6}{104}$$

$$k_2 = 6.45 \text{ mm}$$

15.8.3. Zone tendue

Ame du poteau en traction k_3

$$k_3 = \frac{0.7 b_{eff,t,wc} t_{wc}}{d_c}$$

Où

$b_{eff,t,wc}$: Largeur efficace en traction ;

t_{wc} : Epaisseur de l'âme du poteau ;

d_c : Hauteur de l'âme du poteau.

$$k_3 = \frac{0.7 \times 163.75 \times 6}{104}$$

$$k_3 = 6.61 \text{ mm}$$

Semelle du poteau en flexion k_4

$$k_4 = \frac{0.9 l_{eff,1} t_{fc}^3}{m^3}$$

Où

$l_{eff,1}$: Longueur efficace d tronçon ;

t_{fc} : Epaisseur de la semelle du poteau ;

m : Distance entre l'axe du boulon et le rayon ou la soudure.

$$k_4 = \frac{0.9 \times 163.75 \times 9^3}{30^3} \Rightarrow k_4 = 3.97 \text{ mm}$$

Platine d'about en flexion k_5

$$k_5 = \frac{0.9 l_{eff,1} t_p^3}{m^3}$$

Où

$l_{eff,1}$: Longueur efficace d tronçon ;

t_p : Epaisseur de la platine d'about ;

m : Distance entre l'axe du boulon et le rayon ou la soudure.

$$k_5 = \frac{0.9 \times 221.4 \times 12^3}{36.9^3} \Rightarrow k_5 = 6.85 \text{ mm}$$

Boulons en traction k_{10}

$$k_{10} = \frac{1.6 A_s}{L_b}$$

Où

A_s : Section filetée du boulon ;

L_b : Longueur de serrage du boulon.

$$k_6 = \frac{1.6 \times 245}{43.5} \Rightarrow k_6 = 9.01 \text{ mm}$$

Coefficient de rigidité efficace pour chaque rangée en zone tendue $k_{eff,r}$

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_{i,r}}}$$

Où

$k_{i,r}$: Coefficient de rigidités en zone tendue (k_3 , k_4 , k_5 et k_{10}).

Comme nous avons une seule rangée active dans le présent exemple, $k_{eff,r}$ ne va pas être calculé.

Bras de levier équivalent en zone tendue z_{eq}

$$z_{eq} = \frac{\sum k_{eff,r} h_r^2}{\sum k_{eff,r} h_r}$$

Où

$k_{eff,r}$: Coefficient de rigidité efficace pour chaque rangée regroupant les composantes tendues ;

h_r : Bras de levier de chaque rangée.

Comme nous avons une seule rangée active dans le présent exemple, z_{eq} ne va pas être calculé.

Coefficient de rigidité équivalent en zone tendue k_{eq}

$$k_{eq} = \frac{\sum k_{eff,r} h_r}{z_{eq}}$$

Où

$k_{eff,r}$: Coefficient de rigidité efficace pour chaque rangée regroupant les composantes tendues ;

h_r : Bras de levier de chaque rangée ;

z_{eq} : Bras de levier équivalent en zone tendue.

Comme nous avons une seule rangée active dans le présent exemple, k_{eq} ne va pas être calculé.

Rigidité initiale $S_{j,ini}$

$$S_{j,ini} = \frac{E Z^2}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} + \frac{1}{k_3} + \frac{1}{k_4} + \frac{1}{k_5} + \frac{1}{k_{10}}}$$

Où

E : Module de Young ;

Z : Bras de levier de l'assemblage (voir annexe E) ;

$$S_{j,ini} = \frac{210000 \times 249.56^2}{\frac{1}{2.04} + \frac{1}{6.45} + \frac{1}{6.61} + \frac{1}{3.97} + \frac{1}{6.85} + \frac{1}{9.01}}$$

$$S_{j,ini} = 10022.1 \text{ kNm/rad}$$

Rigidité nominale S_j

$$S_j = S_{j,ini} / \mu$$

μ : Coefficient de rigidité pris égal à 2 pour une attache boulonné par platine d'about.

$$S_j = 10022.1 / 2$$

$$S_j = 5011.05 \text{ kNm/rad}$$

15.8.4. Comportement global de l'assemblage étudié

Loi de comportement

Il s'agit de la loi de comportement globale moment rotation (voir figure 10)

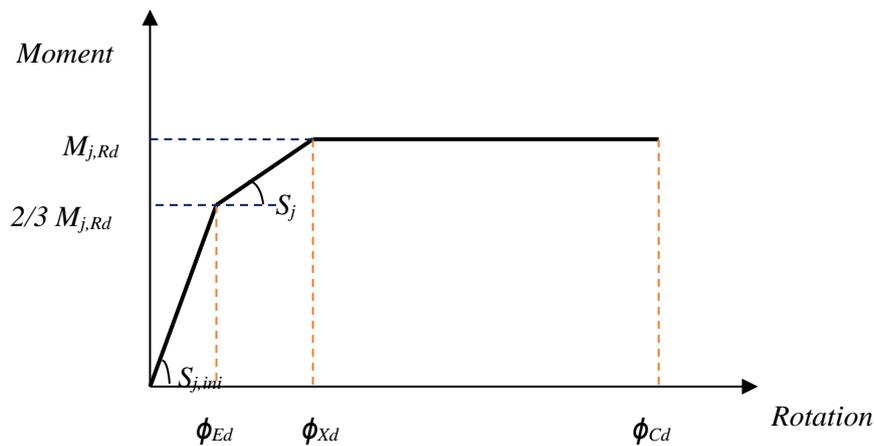


Figure 57 – Loi moment rotation générale

Où

$M_{j,Rd}$: Moment résistant de l'assemblage ;

$S_{j,ini}$: Rigidité initiale (pente en zone élastique);

S_j : Rigidité nominale (pente en zone élasto-plastique);

ϕ_{Ed} : Rotation correspondant à $2/3 M_{j,Rd}$;

ϕ_{Xd} : Rotation correspondant à $M_{j,Rd}$;

ϕ_{Cd} : Capacité de rotation.

$$S_{j,ini} = \frac{2/3 M_{j,Rd}}{\phi_{Ed}} \Rightarrow \phi_{Ed} = \frac{2/3 M_{j,Rd}}{S_{j,ini}} = \frac{2/3 \times 25.6}{10022.1} \Rightarrow \phi_{Ed} = 1.7 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

$$S_j = \frac{M_{j,Rd}}{\phi_{Xd}} \Rightarrow \phi_{Xd} = \frac{M_{j,Rd}}{S_j} = \frac{25.6}{5011.05} \Rightarrow \phi_{Xd} = 5.1 \times 10^{-3} \text{ rad}$$

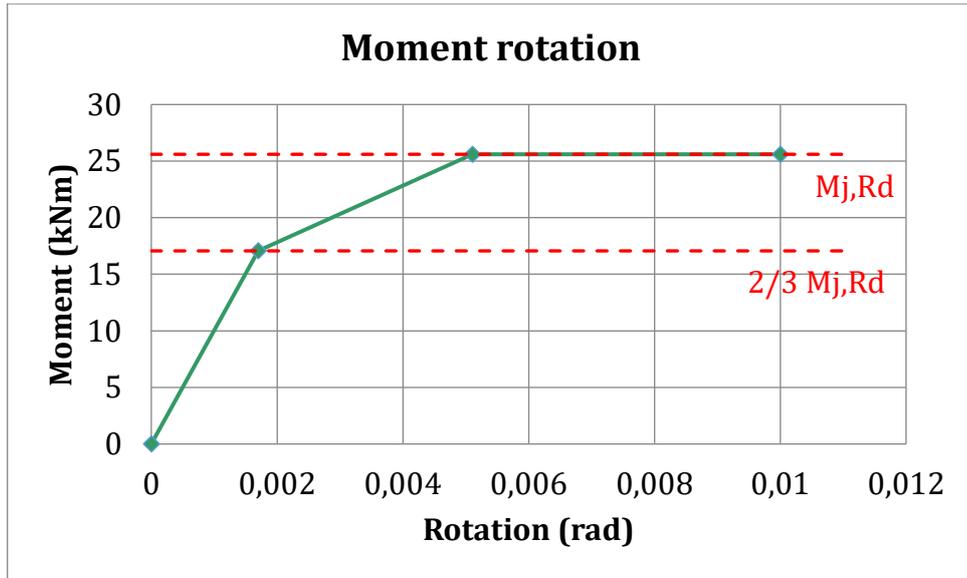


Figure 58 – Courbe Moment Rotation

15.8.5. Classification

Résistance

- Moment résistant de la poutre (section 2.3.2) : $M_{b,Rd} = 134.24$ kNm
- Moment résistant de l'assemblage (section 2.6) : $M_{j,Rd} = 25.6$ kNm

$$0.25 * M_{b,Rd} = 33.56 \text{ kNm} > M_{j,Rd}$$

En terme de résistance, l'assemblage est classé comme articulé.

Rigidité

Longueur de la poutre 5 m

$$\text{rigidité de la poutre} : \frac{E_b I_b}{L} = \frac{210000 \times 8357 \times 10^4}{5000} = 3509.94 \text{ kNm/rad}$$

$$\text{Limite assemblage rigide structure contreventée} : 25 \frac{E_b I_b}{L} = 87748.5 \text{ kNm/rad}$$

$$\text{Limite assemblage rigide structure non contreventée} : 8 \frac{E_b I_b}{L} = 28079.52 \text{ kNm/rad}$$

$$\text{Limite assemblage articulé} : 0.5 \frac{E_b I_b}{L} = 1754.97 \text{ kNm/rad}$$

$$0.5 \frac{E_b I_b}{L} \leq S_{j,ini} \leq 8 \frac{E_b I_b}{L}$$

En terme de rigidité, l'assemblage est classé comme semi-rigide.

16. Exercice 16 « Assemblage Pied de poteau articulé sollicité Compression-cisaillement et Traction cisaillement »⁸

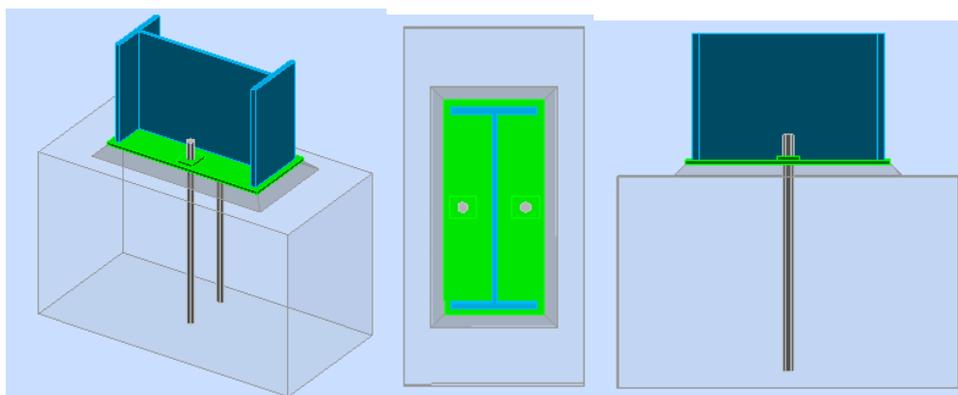
16.1 Introduction

On va vous présenter les méthodes de calcul, fondées sur l'EC3 et l'EC2, afin de vérifier la résistance des pieds de poteaux articulés sollicités une fois en « compression-cisaillement » puis une deuxième fois en « traction-cisaillement »

On utilisera des tronçons en T tendus et comprimés pour vérifier la résistance flexionnelle et la rigidité en rotation initiale du pied de poteau.

Ces méthodes sont fondées sur la méthode des composantes de l'EN 1993-1-8. Les différentes composantes sont : les tiges d'ancrage en traction et/ou en cisaillement, la plaque d'assise fléchie, la plaque d'assise et le béton comprimés et les soudures.

16.2 Détail de l'assemblage « Données géométriques »



⁸ Exemple traité dans les cahiers de l'APK, association de promotion de la construction métallique et dont nous sommes adhérents. Les membres de l'association sont autorisés à utiliser les documents pour des besoins pédagogiques.

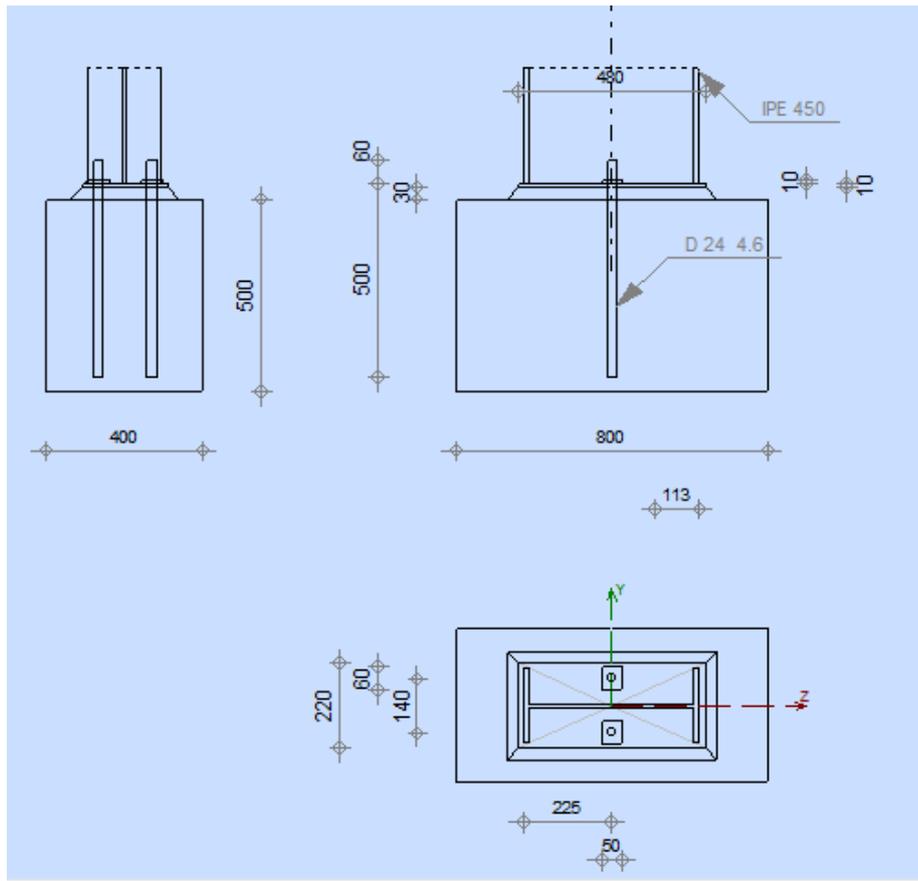
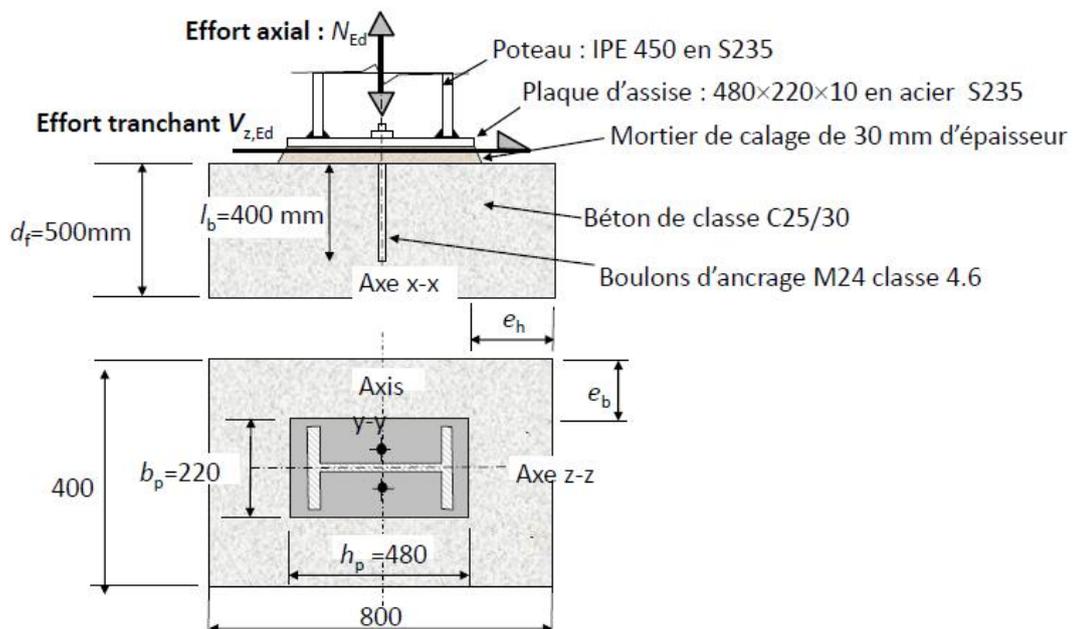


Figure 59 – Assemblage pied de poteau articulé



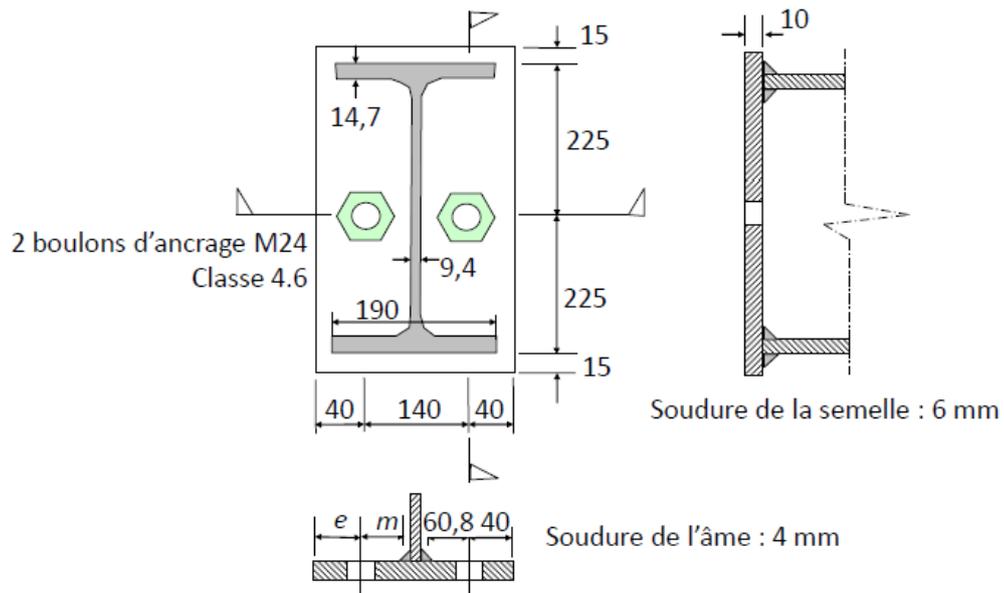


Figure 60 – données géométriques du pied de poteau articulé

16.2.1. Chargement

Cas de charge « Compression »

$$N_{c,Ed} = 85 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 35 \text{ kN}$$

Cas de charge « Traction »

$$N_{c,Ed} = 8.86 \text{ kN}$$

$$V_{z,Ed} = 17.5 \text{ kN}$$

Travail demandé : Vérification de la résistance en compression, cisaillement et traction

Poteau

Profilé: IPE 450

$L_c =$	5.00 [m]	Longueur du poteau
$a =$	0,0 [Deg]	Angle d'inclinaison
$h_c =$	450 [mm]	Hauteur de la section du poteau
$b_{fc} =$	190 [mm]	Largeur de la section du poteau
$t_{wc} =$	9 [mm]	Epaisseur de l'âme de la section du poteau
$t_{fc} =$	15 [mm]	Epaisseur de l'aile de la section du poteau
$r_c =$	21 [mm]	Rayon de congé de la section du poteau
$A_c =$	98,82 [cm ²]	Aire de la section du poteau
$I_{yc} =$	33742,90 [cm ⁴]	Moment d'inertie de la section du poteau
Matériau: ACIER		
$f_{yc} =$	235,00 [MPa]	Résistance
$f_{uc} =$	360,00 [MPa]	Résistance ultime du matériau

Platine de prescellement

$l_{pd} =$	480 [mm]	Longueur
$b_{pd} =$	220 [mm]	Largeur
$t_{pd} =$	10 [mm]	Epaisseur

Ancrage

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe =	4.6	Classe de tiges d'ancrage
$f_{yb} =$	240,00 [MPa]	Limite de plasticité du matériau du boulon
$f_{ub} =$	400,00 [MPa]	Résistance du matériau du boulon à la traction
$d =$	24 [mm]	Diamètre du boulon
$A_s =$	3,53 [cm ²]	Aire de la section efficace du boulon
$A_v =$	4,52 [cm ²]	Aire de la section du boulon
$n =$	2	Nombre de rangées des boulons

Ancrage

Le plan de cisaillement passe par la partie NON FILETÉE du boulon

Classe = 4.6 Classe de tiges d'ancrage

$e_v = 140$ [mm] Entraxe

Dimensions des tiges d'ancrage

$L_1 = 60$ [mm]

$L_2 = 500$ [mm]

Platine

$l_{wd} = 50$ [mm] Longueur

$b_{wd} = 60$ [mm] Largeur

$t_{wd} = 10$ [mm] Epaisseur

Coefficients de matériau

$\gamma_{M0} = 1,00$ Coefficient de sécurité partiel

$\gamma_{M2} = 1,25$ Coefficient de sécurité partiel

$\gamma_C = 1,50$ Coefficient de sécurité partiel

Semelle isolée

$L = 800$ [mm] Longueur de la semelle

$B = 400$ [mm] Largeur de la semelle

$H = 500$ [mm] Hauteur de la semelle

Béton

Classe BETON25

$f_{ck} = 25,00$ [MPa] Résistance caractéristique à la compression

Mortier de calage

$t_g = 30$ [mm] Epaisseur du mortier de calage

$f_{ck,g} = 12,00$ [MPa] Résistance caractéristique à la compression

$C_{f,d} = 0,30$ Coef. de frottement entre la plaque d'assise et le béton

Soudures

$a_p = 6$ [mm] Plaque principale du pied de poteau

16.3 Vérification à la compression Cisaillement

16.1.1. Compression

Résistance de calcul du béton « C25/30 »

$$f_{cd} = \alpha_{cc} \frac{f_{ck}}{\gamma_c} = 1 \times \frac{25}{1.5} = 16.7 \text{ MPa}$$

La valeur de β_j est égale à 2/3, comme : $e_m = 30 \text{ mm} \leq \min \begin{cases} 50 \text{ mm} \\ 0.2 \times b_p \\ 0.2 \times h_p \end{cases}$

Coefficient α_{bf} :

$$\alpha_{bf} = \min \left[\left(1 + \frac{d_f}{\max(h_p, b_p)} \right) ; \left(1 + 2 \frac{e_h}{h_p} \right) ; \left(1 + 2 \frac{e_b}{b_p} \right) ; 3 \right]$$
$$\alpha_{bf} = \min \left[\left(1 + \frac{500}{480} \right) ; \left(1 + 2 \frac{800 - 480}{480} \right) ; \left(1 + 2 \frac{400 - 220}{220} \right) ; 3 \right] = 1.67$$

Capacité portante de la fondation

$$f_{jd} = \alpha_{bf} \cdot \beta_j \cdot f_{cd}$$

$$f_{jd} = 1.67 \times (2/3) \times 16.7 = 18.6 \text{ MPa}$$

Largeur d'appui additionnelle de la semelle

$$c = t_p \sqrt{\frac{f_{yp}}{3 \cdot f_{jd} \cdot \gamma_{M0}}} = 10 \sqrt{\frac{235}{3 \times 18.6 \times 1.0}} = 20.5 \text{ mm}$$

Caractéristiques géométriques

$$h_{cp} = \min(h_p; h_c + 2c) = \min(480; 450 + 2 \times 20.5) = 480 \text{ mm}$$

$$b_{cp} = \min(b_p; b_{fc} + 2c) = \min(220; 190 + 2 \times 20.5) = 220 \text{ mm}$$

Nous sommes donc en présence d'une **Projection Courte**

$$l_{cp} = h_c - 2 t_{fc} - 2 c = 450 - 2 \times 14.7 - 2 \times 20.5 = 379.6 \text{ mm} \geq 0$$

Résistance en compression de l'assemblage de pied de poteau :

$$N_{c,Rd} = f_{jd} (h_{cp} b_{cp} - l_{cp} (b_{cp} - t_{wc} - 2 c))$$

$$N_{c,Rd} = 18.6 \times (480 \times 220 - 379.6 (220 - 9.4 - 2 \times 20.5)) = 766\,600 \text{ N} = 766.6 \text{ kN}$$

Vérification de la résistance en compression

$$N_{c,Rd} = 766.6 \text{ kN} \geq N_{c,Ed} = 85 \text{ kN}$$

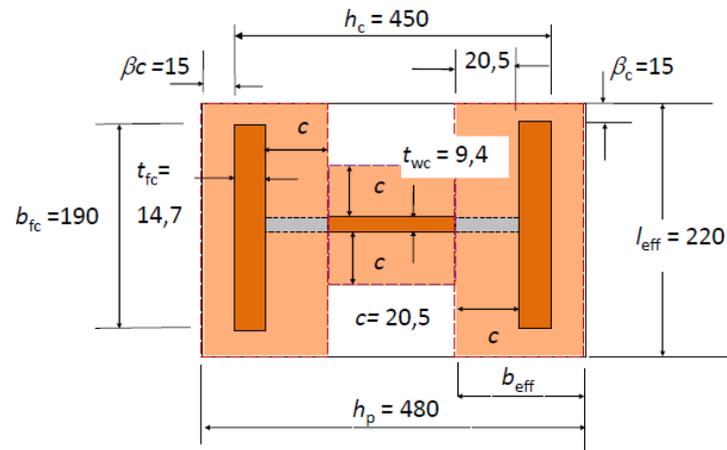


Figure 61 – Éléments dimensionnelles pour le calculs

Résistance au frottement

$$F_{f,Rd} = C_{f,d} N_{c,Ed}$$

$$F_{f,Rd} = 0.2 \times 85 = 17 \text{ kN}$$

16.3.1. Résistance au cisaillement de l'assemblage

Résistance au cisaillement de la tige d'ancrage

$$F_{vb,Rd} = \frac{\alpha_{bc} \cdot f_{ub} \cdot A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{vb,Rd} = \frac{(0.44 - 0.0003 \times 240) \times 400 \times 353}{1.25 \times 10^3} = 41.6 \text{ kN}$$

Résistance au cisaillement de l'assemblage

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} + n \cdot F_{vb,Rd} = 17 + 2 \times 41.6 = 100.2 \text{ kN}$$

Résistance au cisaillement des soudures

$$V_{w,Rd} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \cdot a \cdot l_{w,eff}$$

$$l_{w,eff} = 2 \times (450 - 2 \times 14.7 - 2 \times 21) = 757.2 \text{ mm}$$

$$V_{w,Rd} = \frac{360 / \sqrt{3}}{0.8 \times 1.25} \times 4 \times 757.2 = 629\,500 \text{ N} = 629.5 \text{ kN}$$

Vérification de la résistance au cisaillement

$$V_{z,Rd} = \min(F_{v,RD}; V_{w,Rd}) = 100.2 \text{ kN} \geq V_{z,Ed} = 35 \text{ kN}$$

16.4 Résistance à la traction cisaillement

16.4.1. Résistance à la traction

Longueur m

$$m = \frac{p}{2} - \frac{t_{wc}}{2} 0.8\sqrt{2} a_w$$

$$m = \frac{(140)}{2} - \frac{9.4}{2} 0.8\sqrt{2} \times 4 = 60.8 \text{ mm}$$

Longueur efficaces et mécanismes

$$l_{eff,cp} = 2 \pi m$$

$$l_{eff,cp} = 2 \times 3.14 \times 60.8 = 381.9 \text{ mm}$$

$$l_{eff,nc} = 4 m + 1.25. e$$

$$l_{eff,nc} = 4 \times 60.8 + 1.25 \times 40 = 293.1 \text{ mm}$$

Longueurs efficaces des modes 1 et 2

$$l_{eff,1} = \min(l_{eff,cp}; l_{eff,nc}) = 293.1 \text{ mm} =$$

$$l_{eff,2} = l_{eff,nc} = 293.1 \text{ mm} =$$

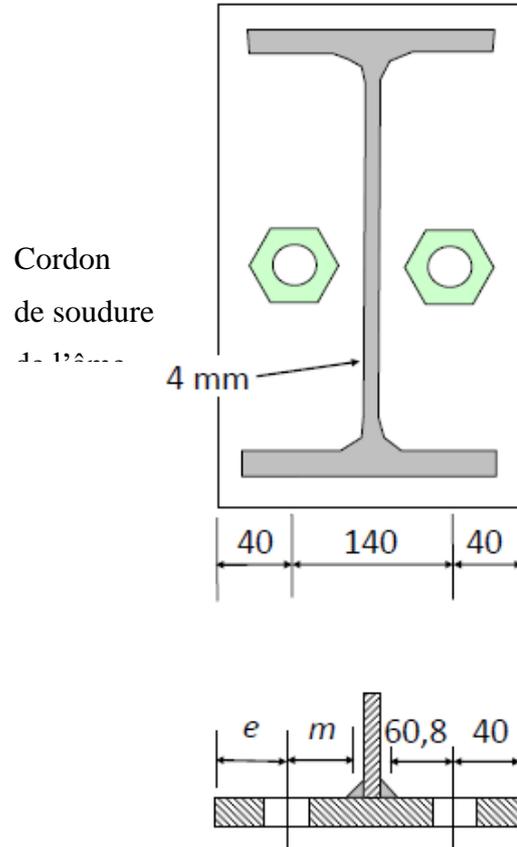


Figure 62 – Détermination de e et m

Présence d'un effet de levier ?

Longueur limite d'allongement de la tige d'ancrage

$$L_b^* = \frac{8.8 m^3 A_s}{l_{efe,1} t_p^3}$$

$$L_b^* = \frac{8.8 \times 60.8^3 \times 353}{293.1 \times 10^3} \approx 2382 \text{ mm}$$

Longueur d'allongement de la tige d'ancrage

$$L_b = 8 d + e_m + t_p + t_{wa} + 0.5 k$$

$$L_b = 8 \times 24 + 30 + 10 + 5 + 0.5 \times 22 = 248 \text{ mm} \leq L_b^* = 2382 \text{ mm}$$

Un effet de levier se développe et les modes de ruine 1, 2, 3 et 4 doivent être considérés.

Résistance à la flexion de la plaque d'assise « par unité de longueur »

$$m_{pl,Rd} = \frac{t_p^2 f_{yp}}{4 \gamma_{M0}}$$

$$m_{pl,Rd} = \frac{10^2 \times 235}{4 \times 1.0} = 5875 \text{ N.mm/mm} = 5.87 \text{ kN.mm/mm}$$

Résistance à la flexion de la plaque d'assise

$$\text{Mode 1 : } M_{pl,1,Rd} = l_{eff,1} \cdot m_{pl,Rd} = 293.1 \times 5.87 = 1722 \text{ kN}$$

$$\text{Mode 2 : } M_{pl,2,Rd} = l_{eff,2} \cdot m_{pl,Rd} = 293.1 \times 5.87 = 1722 \text{ kN}$$

Résistance d'une tige d'ancrage en traction

Résistance de calcul en traction d'une tige d'ancrage

$$F_{t,Rd} = \frac{0.9 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$F_{vb,Rd} = \frac{0.9 \times 400 \times 353}{1.25 \times 10^3} = 101.6 \text{ kN}$$

Contrainte d'adhérence de calcul

$$f_{bd} = \frac{0.36 \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c}$$

$$f_{bd} = \frac{0.36 \times \sqrt{25}}{1.5} = 1.2 \text{ MPa}$$

Résistance de calcul par adhérence entre le béton et la tige d'ancrage

$$F_{t,bond,Rd} = \pi d l_b f_{bd}$$

$$F_{t,bond,Rd} = 3.14 \times 24 \times 400 \times 1.2 = 36172 \text{ N}$$

$$= 36.2 \text{ kN}$$

Résistance de calcul des tiges d'ancrage

$$F_{t,Rd,anchor} = \min[F_{t,Rd} ; F_{t,bond,Rd}]$$

$$= 36.2 \text{ kN}$$

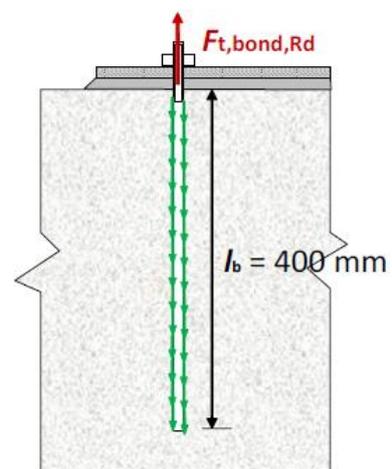
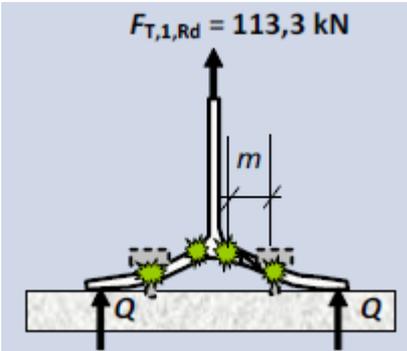
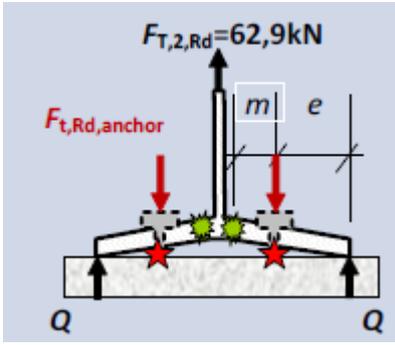


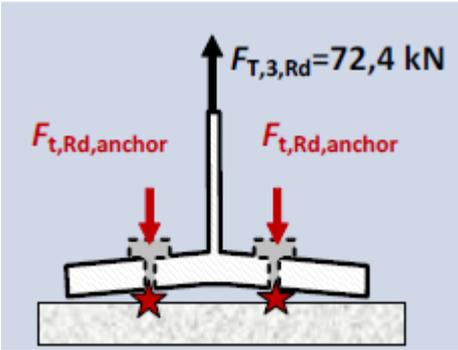
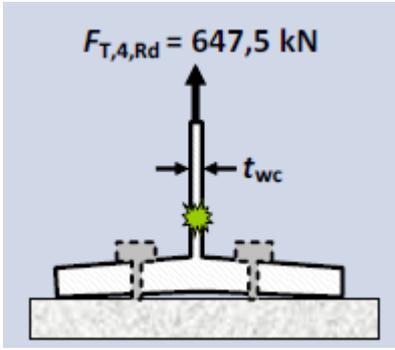
Figure 63 – Tige d'ancrage

Résistance à la traction du tronçon en T : mode 1 et 2

Mode de ruine	Mode 1	Mode 2
Forme du mode de ruine		
Résistance du tronçon en T	$F_{T,1,Rd} = \frac{4 M_{pl,1,Rd}}{m}$ $F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 1722}{60.8} = 113.3 \text{ kN}$	$F_{T,2,Rd} = \frac{2 M_{pl,1,Rd} + 2nF_{t,Rd,anchor}}{m + n}$ $F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 1722 + 2 \times 4036.1}{60.8 + 40} = 62.9 \text{ kN}$

$$n = \min(e ; 1.25 \text{ m}) = \min(40 ; 1.25 \times 60.8) = 40 \text{ mm}$$

Résistance à la traction du tronçon en T : modes 3 et 4

Mode de ruine	Mode 3	Mode 4
Forme du mode de ruine		
Résistance du tronçon en T	$F_{T,3,Rd} = 2 T_{t,Rd,anchor}$ $F_{T,3,Rd} = 2 \times 36.2 = 72.4 \text{ kN}$	$F_{T,4,Rd} = \frac{b_{eff,t} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}$ $F_{T,4,Rd} = \frac{293.1 \times 9.4 \times 235}{1.0 \cdot 10^3} = 647.5 \text{ kN}$

$$b_{eff,t} = l_{eff,1} = 293.1 \text{ mm}$$

Résistance du tronçon en T tendu équivalent

$$F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd} ; F_{T,2,Rd} ; F_{T,3,Rd} ; F_{T,4,Rd}) = 62.9 \text{ kN}$$

Résistance des soudures

$$F_{t,w,RD} = l_{w,eff,t} a_w \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}}$$

$$F_{t,w,RD} = 293.1 \times 2 \times 4 \frac{360 / \sqrt{3}}{0.8 \times 1.25} = 487\,357 \text{ N} = 487 \text{ kN}$$

Vérification de la résistance de l'assemblage en traction

$$N_{T,Rd} = \min(F_{T,Rd} ; F_{t,w,Rd}) = 62.9 \text{ kN} \geq N_{t,Ed} = 17 \text{ kN}$$

16.4.2. Vérification de la résistance au cisaillement des tiges

$$\frac{V_{Ed}}{n F_{vb,Rd}} + \frac{N_{t,Ed}}{1.4 N_{T,Rd}} = \frac{17.5}{2 \times 41.6} + \frac{8.86}{1.4 \times 62.9} = 0.31 \leq 1$$

Vérification de la résistance au cisaillement des soudures

$$\frac{\sqrt{\left(\frac{N_{t,Ed}}{l_{w,eff,t}}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{l_{w,eff}}\right)^2}}{(a f_{vw,d})} \leq 1$$

$$\frac{\sqrt{\left(\frac{8.86}{2 \times 293.1}\right)^2 + \left(\frac{17.5}{757.2}\right)^2}}{\left(\frac{360\sqrt{3}}{0.8 \times 1.25 \times 4}\right)} = 0.033 \leq 1$$

17. ANNEXES

17.1. ANNEXE A – Coefficients partiels de sécurité pour les assemblages

Résistance des barres et sections transversales	γ_{M0} , γ_{M1} et γ_{M2} voir l'EN 1993-1-1
Résistance des boulons	γ_{M2}
Résistance des rivets	
Résistance des axes d'articulation	
Résistance des soudures	
Résistance des plaques en pression diamétrale	
Résistance au glissement	γ_{M3}
— à l'état limite ultime (catégorie C)	
— à l'état limite de service (catégorie B)	$\gamma_{M3,ser}$
Résistance en pression diamétrale d'un boulon injecté	γ_{M4}
Résistance des assemblages dans une poutre à treillis en profils creux	γ_{M5}
Résistance des axes d'articulation à l'état limite de service	$\gamma_{M6,ser}$
Précontrainte des boulons à haute résistance	γ_{M7}
Résistance du béton	γ_c voir l'EN 1992
NOTE Les valeurs numériques pour γ_M peuvent être définies dans l'Annexe Nationale. Les valeurs recommandées sont les suivantes : $\gamma_{M2} = 1,25$; $\gamma_{M3} = 1,25$ et $\gamma_{M3,ser} = 1,1$, $\gamma_{M4} = 1,0$; $\gamma_{M5} = 1,0$; $\gamma_{M6,ser} = 1,0$; $\gamma_{M7} = 1,1$.	

17.2. ANNEXE B – Sections brutes et nettes

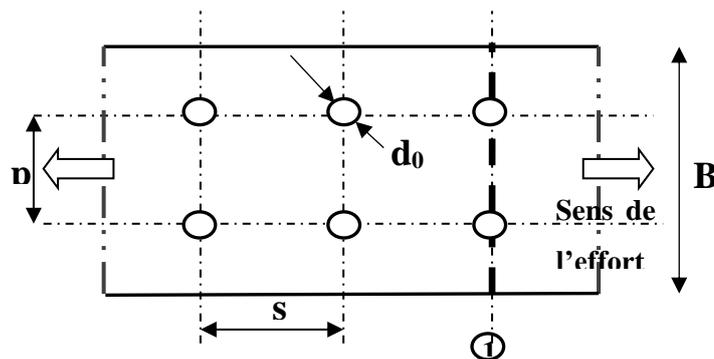
Lorsqu'on assemble par boulons des pièces sollicitées en traction, on doit tenir en compte de la présence des trous qui modifient le comportement mécanique des pièces. La présence des trous réduit l'aire de la section brute pour résister à la traction. Il faut alors calculer l'aire nette des pièces « A_{net} ».

La section nette est obtenue en calculant la somme des aires nettes de tous les segments situés le long de la section de rupture passant ou non par les trous de perçage où poinçonnage.

$$A_{net} = \sum_0^n A_{net,i}$$

17.2.1. Cas des trous alignés

Dans le cas où les trous de fixation sont alignés transversalement, l'aire à déduire de toute section transversale perpendiculaire à l'axe de la pièce (aussi la direction de l'effort sollicitant) est la somme des aires des sections des trous.

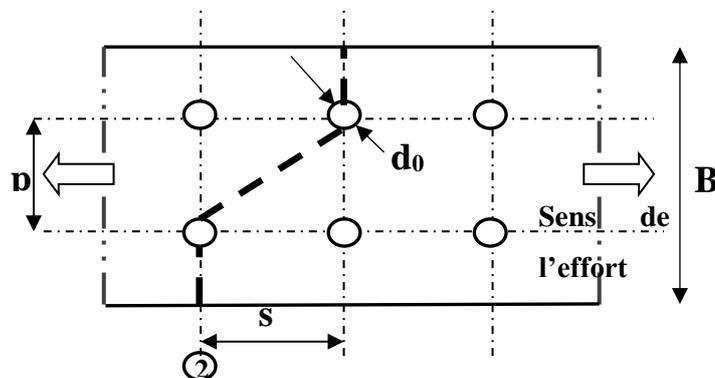


La section nette est :

$$A_{net} = A_1 = A_{brute} - 2 d_0 t$$

$$A_{brute} = B.t \text{ (avec } B \text{ la largeur de la pièce et } t \text{ son épaisseur)}$$

17.2.2. Cas des trous passant par une section oblique



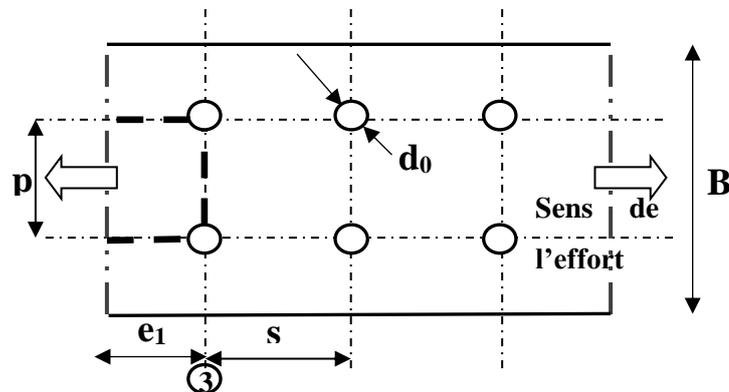
Dans le cas d'une section inclinée par rapport à l'axe longitudinal de la pièce, comme c'est souvent le cas dans les assemblages dont les trous de boulons sont disposés en quinconce, la section nette dépend alors des entraxes des trous.

L'aire nette de la section inclinée est calculée par :

$$A_{net} = A_2 = A_{brute} - \left[\sum n_i d_0 - \sum \frac{s_i^2}{4p} \right] t$$

$(s^2t/(4.p))$ est l'aire de la section inclinée pour tenir compte qu'on n'est pas en traction pure sur les parties en diagonales.

17.2.3. Autre cas



La section nette est :

$$A_{net} = A_3 = \left[0.6 \sum n_i e_1 - \sum n_i p_i \right] t$$

L'aire nette d'un segment sollicité en cisaillement pur (c.-à-d. dont le plan est parallèle à l'axe de l'effort de traction est égale à $0.6 e_1$ dont la valeur 0.6 (valeur arrondie de $\frac{1}{\sqrt{3}}$) découle du critère de rupture de von Mises Hencky.

- ✓ t est l'épaisseur de la pièce (généralement la plus faible des épaisseurs des pièces assemblées)

17.3. ANNEXE C – Formules de vérification des boulons ordinaires

17.3.1. Résistance des boulons au cisaillement par plan de cisaillement « $F_{v,Rd}$ »

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

Avec :

α_v : = 0.6 pour les boulons de classe « 4.6 ; 5.6 ; 8.8 »

α_v : = 0.5 pour les boulons de classe « 4.8 ; 5.8 ; 6.8 ; 10.9 »

f_{ub} : limite de rupture du boulon

A_s : aire de la section résistante en traction de la partie filetée de la vis quand le plan de cisaillement passe par cette dernière. *Dans le cas où la section cisailée passe la partie lisse de la vis, il faut remplacer A_s par A .*

$\gamma_{M2} = 1.25$

17.3.2. Résistance des pièces à la pression diamétrale « $F_{b,Rd}$ »

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

Avec :

$$k_1 = \min \left[\left(2,8 \cdot \frac{e_2}{d_0} - 1,7 \right) ; \left(1,4 \cdot \frac{p_2}{d_0} \right) ; 2,5 \right]$$

$$\alpha_b = \min \left[\left(\frac{e_1}{3 \cdot d_0} \right) ; \left(\frac{p_1}{3 \cdot d_0} - 0,25 \right) ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; 1 \right]$$

f_u : limite de rupture des pièces assemblées

d : diamètre du boulon et d_0 : diamètre du trou

t : la plus petite épaisseur des pièces assemblées

$\gamma_{M2} = 1.25$

N.B. : Il ne faut pas oublier de vérifier les pièces à la traction en section brute et nette.

$$N_{Sd} < N_{pl,Rd} = A \cdot f_y / \gamma_{M0} \quad \text{et} \quad N_{Sd} < N_{u,Rd} = 0,9 \cdot A_{net} \cdot f_u / \gamma_{M2}$$

Avec $\gamma_{M0} = (1.10 \text{ CCM97} ; 1.0 \text{ EC3})$ et $\gamma_{M2} = 1.25$

17.3.3. Résistance des boulons à la traction « $F_{t,Rd}$ »

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

Avec :

f_{ub} : limite élastique du boulon

A_s : aire de la section filetée.

$\gamma_{M2} = 1.25$

17.3.4. Résistance des pièces assemblées au poinçonnement « $B_{p,Rd}$ »

La résistance de calcul au cisaillement par poinçonnement de la tête du boulon ou de l'écrou est déterminée par la relation ci-dessous :

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

Avec :

t_p : épaisseur de la pièce sous la tête du boulon ou de l'écrou (la plus faible)

d_m : diamètre moyen entre le cercle inscrit et circonscrit de la tête du boulon ou de l'écrou, en prenant la plus petite des deux valeurs⁹.

$$\gamma_{M2} = 1.25$$

N.B. : dans le cas des rondelles, d_m est le diamètre extérieur de ces derniers.

17.3.5. Résistance des boulons à des efforts combinés de cisaillement et de traction

On doit satisfaire la condition suivante :

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$$

Plus exactement, on est tenu de vérifier les 4 conditions, à savoir :

$$\frac{F_{t,Sd}}{F_{t,Rd}} \leq 1$$

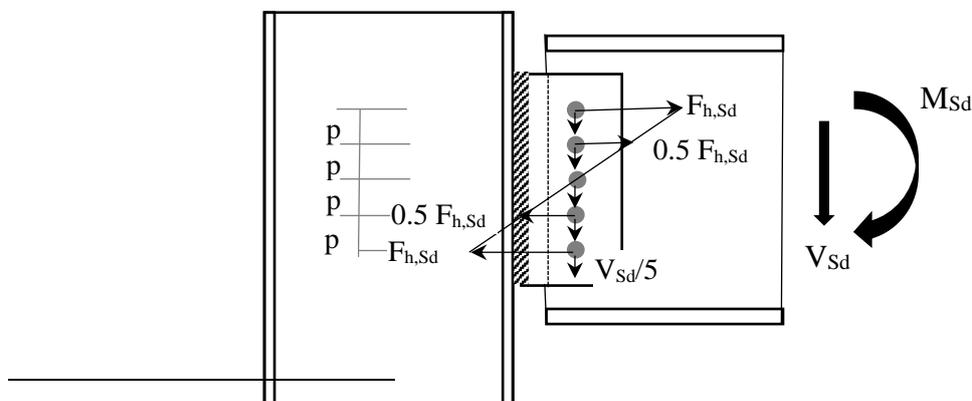
$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Sd}}{1,4 \cdot F_{t,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{F_{t,Sd}}{B_{p,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{F_{v,Sd}}{F_{b,Rd}} \leq 1$$

17.3.6. Cas particulier « Répartition et calcul des efforts dans un assemblage par plat sollicité en cisaillement et flexion »

Exemple dans le cas d'un gousset ou cornières



⁹ D'une manière générale, les dimensions de l'écrou et de la tête de la vis sont semblables à part la hauteur qui diffère.

Avec :

$$F_{h,sd} = \frac{M_{sd}}{5p}$$

Après avoir repérer le centre de rotation de l'assemblage, on doit calculer l'effort de cisaillement dans le **boulon le plus sollicité** qui est déterminé par l'équation ci-dessous :

$$F_{v,sd} = \left[\left(\frac{M_{sd}}{5 \cdot p} \right)^2 + \left(\frac{V_{sd}}{5} \right)^2 \right]^{0,5}$$

Avec :

M_{sd} : Moment fléchissant ;

V_{sd} : Effort tranchant ;¹⁰

p : est la distance entre deux boulons¹¹

5 : c'est le nombre de boulons (*dans l'exemple ci-dessus, il y a 5 boulons*)

¹⁰ Dans le cas d'une double cornière, il faut diviser l'effort tranchant V_{sd} par 2.

¹¹ Dans le cas d'un assemblage avec un nombre de rangées impaires, il faut diviser le M_{sd} et V_{sd} par ce nombre. Dans la figure ci-dessus, on divise par 5. Par contre, si le nombre de rangées est pair, il faut faire un calcul pour déterminer sa valeur.

17.4. ANNEXE D – Critère technique de choix de la gorge en fonction des épaisseurs

Utilisation de l'abaque :

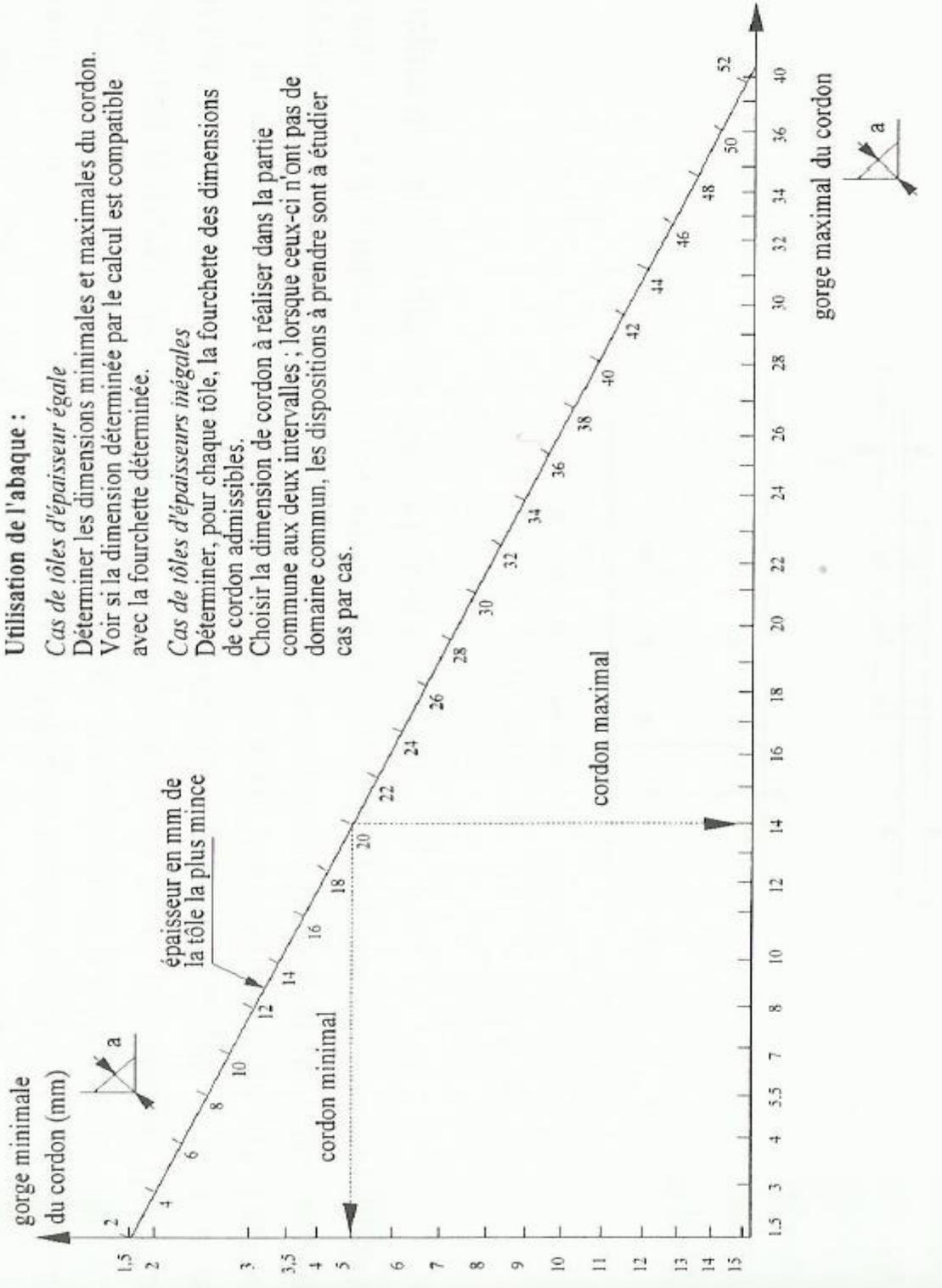
Cas de tôles d'épaisseur égale

Déterminer les dimensions minimales et maximales du cordon.
Voir si la dimension déterminée par le calcul est compatible avec la fourchette déterminée.

Cas de tôles d'épaisseurs inégales

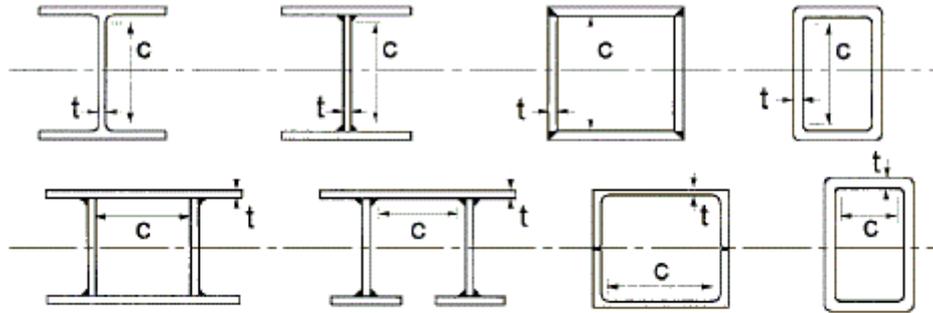
Déterminer, pour chaque tôle, la fourchette des dimensions de cordon admissibles.

Choisir la dimension de cordon à réaliser dans la partie commune aux deux intervalles ; lorsque ceux-ci n'ont pas de domaine commun, les dispositions à prendre sont à étudier cas par cas.



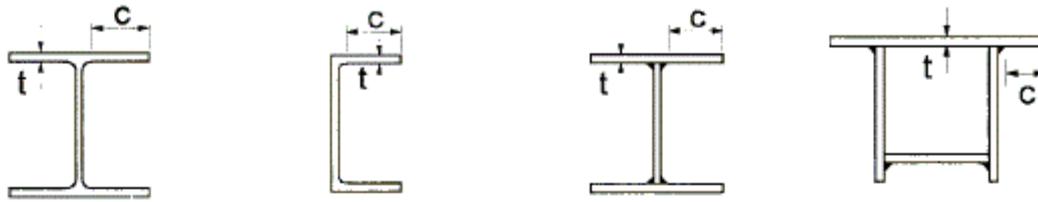
17.5. ANNEXE E – Tableau des classes des sections

Parois comprimées internes



Classe	Paroi fléchie	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 72\varepsilon$	$c/t \leq 33\varepsilon$	lorsque $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{396\varepsilon}{13\alpha-1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{36\varepsilon}{\alpha}$			
2	$c/t \leq 83\varepsilon$	$c/t \leq 38\varepsilon$	lorsque $\alpha > 0,5$: $c/t \leq \frac{456\varepsilon}{13\alpha-1}$ lorsque $\alpha \leq 0,5$: $c/t \leq \frac{41,5\varepsilon}{\alpha}$			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 124\varepsilon$	$c/t \leq 42\varepsilon$	lorsque $\psi > -1$: $c/t \leq \frac{42\varepsilon}{0,67+0,33\psi}$ lorsque $\psi \leq -1$: $c/t \leq 62\varepsilon(1-\psi)\sqrt{-\psi}$			
$\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	460
	ε	1,00	0,92	0,81	0,75	0,71

Semelles en console



Classe	Paroi comprimée	Paroi fléchie et comprimée				
		Extrémité comprimée	Extrémité tendue			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
1	$c/t \leq 9\epsilon$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
2	$c/t \leq 10\epsilon$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\epsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$			
Distribution des contraintes dans les parois (compression positive)						
3	$c/t \leq 14\epsilon$	$c/t \leq 21\epsilon\sqrt{k_{\sigma}}$ Pour k_{σ} , voir l'EN 1993-1-5				
$c = \sqrt{235/f_y}$	f_y	235	275	355	420	475
	ϵ	1,00	0,92	0,81	0,75	0,7

17.6. ANNEXE F – Tableau des longueurs efficaces

Semelle de poteau non raidie

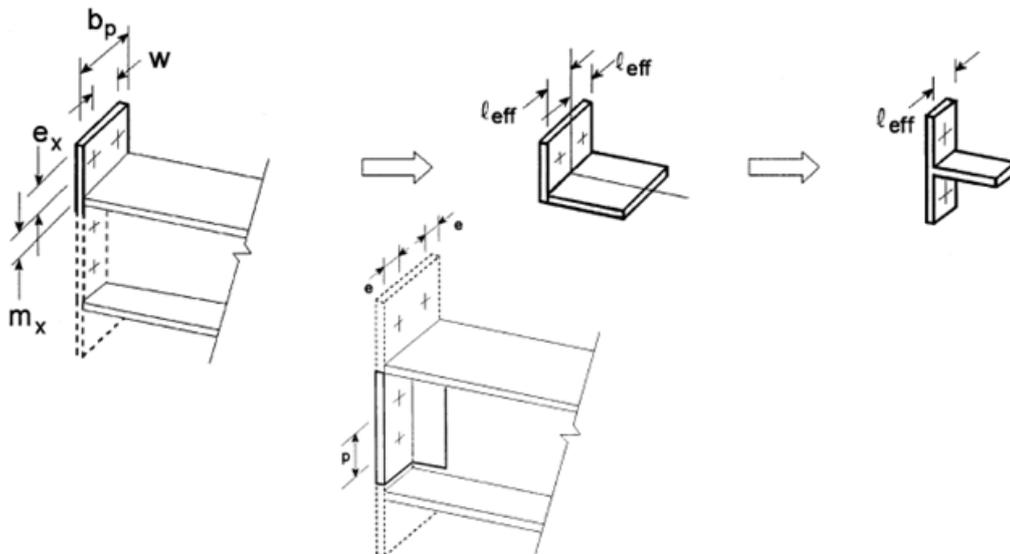
Emplacement de la rangée de boulons	Rangée de boulons prise isolément		Rangée de boulons considérée comme partie d'un groupe de rangées de boulons	
	Mécanismes circulaires $\ell_{\text{eff,cp}}$	Mécanismes non circulaires $\ell_{\text{eff,nc}}$	Mécanismes circulaires $\ell_{\text{eff,cp}}$	Mécanismes non circulaires $\ell_{\text{eff,nc}}$
Rangée de boulons intérieure	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Rangée de boulons d'extrémité	La plus petite des deux valeurs : $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	La plus petite des deux valeurs : $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	La plus petite des deux valeurs : $\pi m + p$ $2e_1 + p$	La plus petite des deux valeurs : $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Mode 1 :	$\ell_{\text{eff,1}} = \ell_{\text{eff,nc}}$ mais $\ell_{\text{eff,1}} \leq \ell_{\text{eff,cp}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff,1}} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$ mais $\Sigma \ell_{\text{eff,1}} \leq \Sigma \ell_{\text{eff,cp}}$	
Mode 2 :	$\ell_{\text{eff,2}} = \ell_{\text{eff,nc}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff,2}} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$	

Semelle de poteau raidie

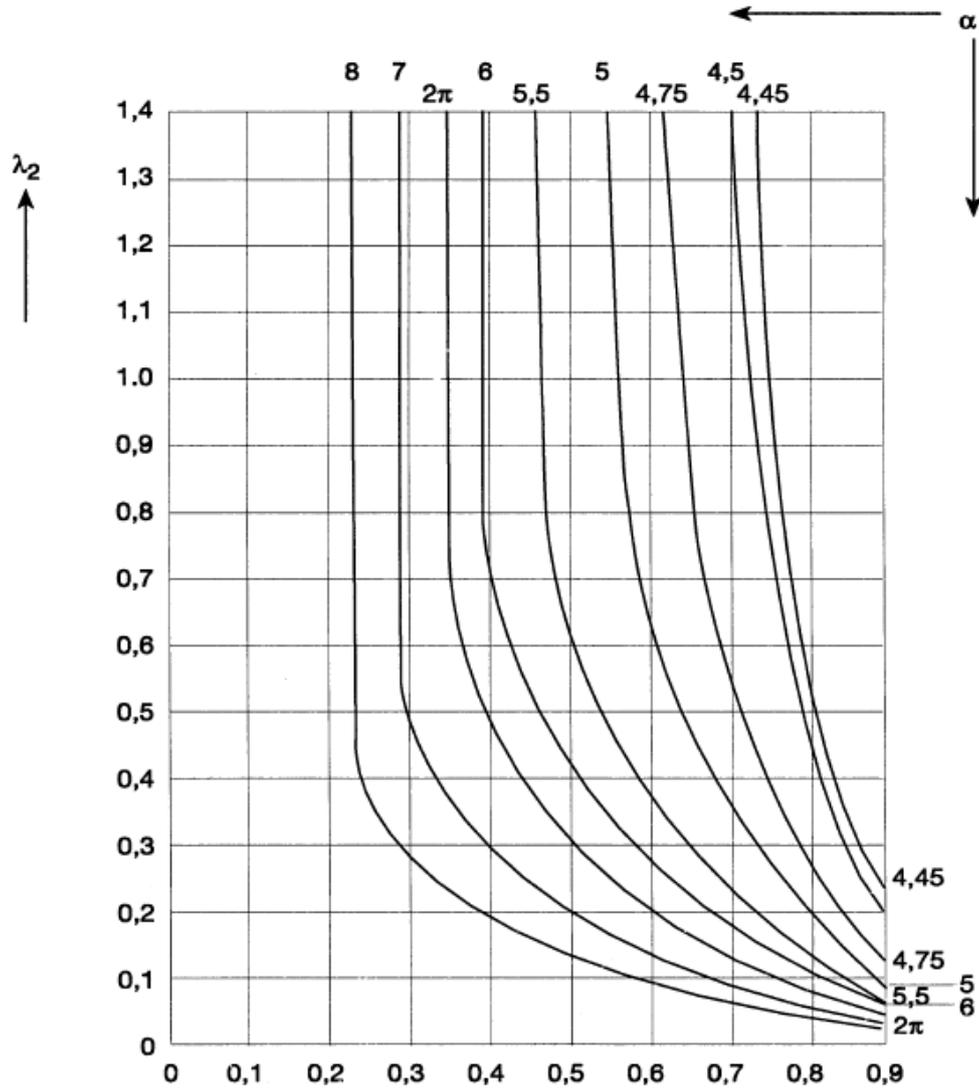
Emplacement de la rangée de boulons	Rangée de boulons prise séparément		Rangée de boulons considérée comme partie d'un groupe de rangées de boulons	
	Mécanismes circulaires $\ell_{\text{eff,cp}}$	Mécanismes non circulaires $\ell_{\text{eff,nc}}$	Mécanismes circulaires $\ell_{\text{eff,cp}}$	Mécanismes non circulaires $\ell_{\text{eff,nc}}$
Rangée de boulons adjacente à un raidisseur	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m$ $-(2m + 0,625e)$
Autre rangée de boulons intérieure	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Autre rangée de boulons d'extrémité	La plus petite des deux valeurs : $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	La plus petite des deux valeurs : $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	La plus petite des deux valeurs : $\pi m + p$ $2e_1 + p$	La plus petite des deux valeurs : $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Rangée de boulons d'extrémité adjacente à un raidisseur	La plus petite des deux valeurs : $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m$ $-(2m + 0,625e)$	Sans objet	Sans objet
Pour Mode 1 :	$\ell_{\text{eff,1}} = \ell_{\text{eff,nc}}$ mais $\ell_{\text{eff,1}} \leq \ell_{\text{eff,cp}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff,1}} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$ mais $\Sigma \ell_{\text{eff,1}} \leq \Sigma \ell_{\text{eff,cp}}$	
Pour Mode 2 :	$\ell_{\text{eff,2}} = \ell_{\text{eff,nc}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff,2}} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$	
Il convient de déterminer α l'annexe D				

Platine d'about

Emplacement de la rangée de boulons	Rangée de boulons prise séparément		Rangée de boulons considérée comme partie d'un groupe de rangées de boulons	
	Mécanismes circulaires $l_{eff,cp}$	Mécanismes non circulaires $l_{eff,nc}$	Mécanismes circulaires $l_{eff,cp}$	Mécanismes non circulaires $l_{eff,nc}$
Rangée de boulons située sur la partie débordante de la platine d'about	La plus petite des valeurs : $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	La plus petite des valeurs : $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
Première rangée de boulons sous la semelle de poutre tendue	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Autre rangée de boulons intérieure	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Autre rangée de boulons d'extrémité	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
Mode 1 :	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$ mais $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\Sigma l_{eff,1} = \Sigma l_{eff,nc}$ mais $\Sigma l_{eff,1} \leq \Sigma l_{eff,cp}$	
Mode 2 :	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\Sigma l_{eff,2} = \Sigma l_{eff,nc}$	
Il convient de déterminer α d'après l'annexe D				

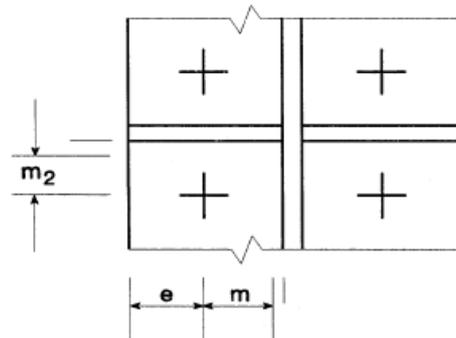


17.7. ANNEXE G – Valeurs de Alpha « α »

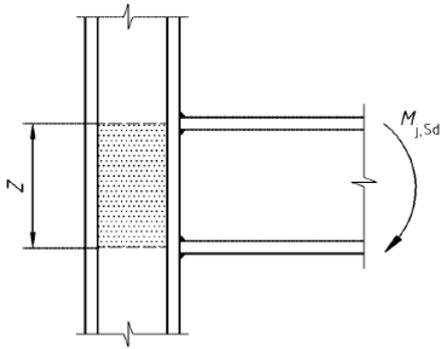


$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e}$$

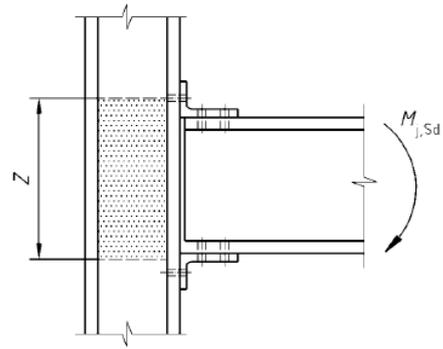
$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e}$$



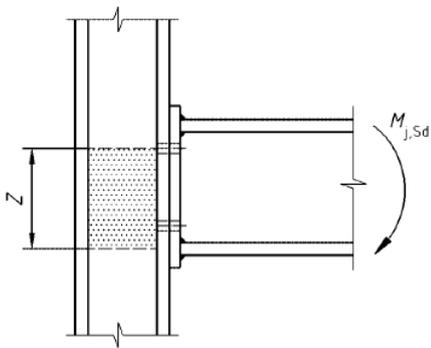
17.8. ANNEXE H – Bras de levier « assemblage poutre poteau »



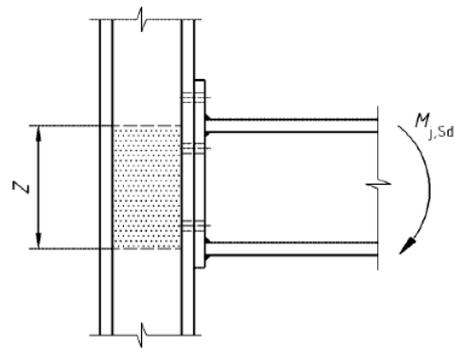
a) Attache soudée



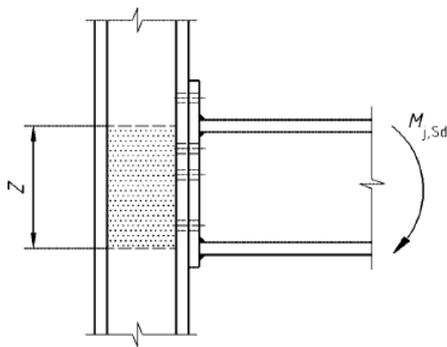
b) Attache boulonnée avec cornières de semelle



c) Attache boulonnée avec platine d'about ne comportant qu'une seule rangée de boulons actifs en traction



d) Attache boulonnée avec platine d'about débordante ne comportant que deux rangées de boulons actifs en traction



e) Autres attaches boulonnées avec platine d'about comportant plusieurs rangées de boulons tendus

18. Références Bibliographiques

- [1] NF EN 1993-1-8 Eurocode 3 partie 1.8 - Calcul des assemblages, Décembre 2005, Editions AFNOR
- [2] Eurocode 3 partie 1.8 - Annexe J - Assemblages dans les ossatures de bâtiments
- [3] NF EN 1993-1-1 Partie 1-1 - Règles générales et règles pour les bâtiments, Octobre 2005, Editions AFNOR
- [4] Les cahiers de l'APK, La construction métallique avec les Eurocodes – Interprétation Exemple de calcul, Editions Eyrolles, 2014 453 pages
- [5] D.T.R. BC 2.44« Règles de Conception et de Calcul des Structures en Acier, CCM97 »
- [6] Cabinet JAILLET ROUBY, Assemblages poteaux poutres et poutres poteaux en acier d'après l'Eurocode 3, calcul des assemblages par platines d'about, par double cornières d'âme ou par éclisses de semelles et d'âme, Edition CSTB, 2012, 463 pages
- [7] Ivor RYAN, Assemblage des pieds de poteaux en acier, Dimensionnement des assemblages de pieds de poteaux métallique encastrés et articulé, Edition CSTB, 2010, 235 pages
- [8] Picard BEAULIEU, Calcul des charpentes d'acier, Institut Canadien de la Construction en Acier « ICCA », 1991, 862 pages