



Ce contenu est mis à disposition selon les termes de la [Licence Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Attribution – Pas d'Utilisation Commerciale – Partage dans les Mêmes Conditions 4.0 International.

Boulonnerie Inoxydable

—

Partenariat avec **BUMAX**[®]
A BUFAB COMPANY

Sommaire

Sommaire.....	2
Pourquoi l'Inox ?.....	3
Résistance Mécanique.....	3
Corrosion	4
Certaines conditions sont propices à son développement :.....	4
Les éléments d'addition qui améliorent les caractéristiques mécaniques et inoxydables :	4
Les modes de corrosion des inox sont :.....	4
Méthodes de détermination de la résistance à la corrosion.....	4
Perméabilité Magnétique	5
Une valeur de perméabilité μ_r :	5
Fatigue	5
Les éléments encourageants le risque de rupture par fatigue :.....	5
Les plus BUMAX	5
Comparatif de Calculs Acier au Carbone / Acier Inoxydable	6
Exemple d'application	9
Conclusion.....	10
Bibliographie	11

Pourquoi l'Inox ?

La boulonnerie en acier Inoxydable est principalement utilisée pour sa résistance à la corrosion, mais elle offre d'autres avantages :

- Résistance Mécanique similaire aux produits en acier
- Résistance à la Corrosion
- Perméabilité ou non perméabilité magnétique
- Résistance à la Fatigue
- Durée de vie améliorée
- Ductilité / Résilience

Les domaines d'applications peuvent être :

- Offshore / Onshore
- Pharmaceutique
- Agroalimentaire
- Chimie et Pétrochimie
- Energie (renouvelable, nucléaire, ...)

Résistance Mécanique

Comparatif de Nuances Similaires											
	Acier 8.8	A4-80	Bumax [®] 88	Acier 10.9	A4-100	Bumax [®] 109	Acier 12.9	C1-110	17-7 PH	Inconel 718	Bumax [®] DX 129
R_{p0.2} / f_{yb} [Mpa]	640	600	640	900	800	900	1080	820	1035	1030	1080
R_m / f_{ub} [Mpa]	800	800	800	1000	1000	1000	1200	1100	1240	1230	1200

Il est à noter que les caractéristiques mécaniques sont identiques pour des nuances similaires. L'intérêt de l'inox se trouve donc dans ses autres caractéristiques.

Corrosion

La corrosion est l'altération d'un composant métallique par oxydation.

Certaines conditions sont propices à son développement :

- Milieux humides (présence d'ion $H^+_{(aq)}$, $Cl^-_{(aq)}$, ...)
- Milieux corrosifs (usage industriel, bord de mer, ...)
- Milieux à risques biologiques (industrie, agricole, agroalimentaire, ...)
- Températures élevées
- Acidité du milieu
- Contact avec d'autres matériaux
- Géométrie des pièces (concentration de contraintes, accumulation de matières corrosives, ...)
- Etat de surface (acier brut, inox non passivé, pollution par piquage, ...)

Les éléments d'addition qui améliorent les caractéristiques mécaniques et inoxydables :

- Chrome
- Nickel
- Molybdène
- Titane
- Niobium

L'inox crée une couche passive de chrome qui se crée automatiquement en contact avec l'air. Cette couche est naturelle et se régénère perpétuellement.

Les modes de corrosion des inox sont :

- **Corrosion par piqûres**, se produit lorsque la pièce est en contact avec un milieu acide, organique stagnant ou chloré (eau de mer, air marin, atmosphère pollué, ...). C'est le phénomène de corrosion le plus courant.
- **Corrosion intergranulaire**, se produit lorsque la température reste élevée (de 400 à 800°C) de façon prolongée en milieux même peu corrosifs. Il s'agit d'une corrosion qui pénètre dans les joints de grains de la structure du matériau.
- **Corrosion sous contrainte** (*rare*), se produit sur des pièces sous contraintes en milieu corrosif. Ces contraintes peuvent être résiduelles dues au processus de fabrication ou sous sollicitations externes.

Méthodes de détermination de la résistance à la corrosion

- Test au brouillard salin selon EN ISO 9227 pour tous les métaux
- Test au chlorure ferrique selon la norme ASTM G48 pour les Inox
- Le PREN (Pitting Resistance Equivalent Number) est un indice prédictif de la résistance d'un acier inoxydable à la corrosion par piqûres localisée. Il est basé sur sa composition chimique.

Perméabilité Magnétique

La perméabilité magnétique d'un acier est son aptitude à conduire les flux magnétiques.

La norme *EN ISO 3506 Annexe H*, stipule que la perméabilité magnétique convient d'être obtenue par un métallurgiste

Une valeur de perméabilité μ_r :

- Petite, signifie que le matériau est peu ou non magnétique. Lorsque μ_r tend vers 1, le matériau est amagnétique.
- Grande, signifie que le matériau est magnétique voire très magnétique.

La valeur de perméabilité μ_r nécessaire dépend de l'application pour laquelle le matériau est employé.

Fatigue

La Fatigue est la détérioration d'un matériau soumis à des charges répétées, alternées ou non, de faible ampleur. La charge peut être très inférieure à la limite élastique du matériau.

La ruine par fatigue intervient par propagation de fissures amorcées au niveau des défauts ou des impuretés du matériau.

Les éléments encourageants le risque de rupture par fatigue :

- Filets usinés
- Inclusions/impuretés dans le matériau (à la coulée ou au niveau des soudures)
- Pièces soudées bout à bout d'épaisseur différentes sans débardage (concentration de contraintes)
- Trainage de cisaillement important
- Zone d'inversion de contrainte (poutre de roulement continue, ...)
- Soudure sur aciers à haute limite d'élasticité sans maîtrise correcte du refroidissement
- Faible résilience (faible allongement après dépassement du seuil élastique)
- Mauvais contrôle de la précontrainte

Le calcul en fatigue est défini dans la *NF EN 1993-1-9*

Les plus **BUMAX**[®]

A BUFAB COMPANY

Une qualité métallurgique accrue (peu d'impuretés et une composition stricte de ses éléments d'addition) et un procédé de fabrication unique pour les inox (frappe à froid et roulage des filets) qui confèrent :

- Une similitude de résistance mécanique par rapport aux aciers 8.8, 10.9 et 12.9
- Une meilleure résistance à la corrosion
- Une meilleure résistance à la fatigue
- Une résistance thermique élevée (suivant les nuances)
- Des boulons qui ne grippent pas. Montage/démontage facilité
- Une ductilité élevée
- Des nuances amagnétiques ou magnétiques

Comparatif de Calculs Acier au Carbone / Acier Inoxydable

La Clause 6.1-Généralités de la NF EN 1993-1-4 stipule que les Assemblages sont vérifiés selon la NF EN 1993-1-8 sauf modifications ou remplacements figurant dans les dispositions particulières données en 6.2 et 6.3.

En d'autres termes, les vérifications se font de la même façon que les assemblages en acier, mais certains termes de calculs peuvent être modifiés pour s'adapter aux particularités des Inox.

Dans la suite de cette partie, les normes NF EN 1993-1-1, NF EN 1993-1-4 et NF EN 1993-1-8 seront notées respectivement EN311, EN314 et EN318.

	Acier au Carbone NF EN 1993-1-1 NF EN 1993-1-8	Acier Inoxydable NF EN 1993-1-4 NF EN 1993-1-8									
Données											
Caractéristiques mécaniques Modules d'Young $E^{(1)}$ Module de Cisaillement G Coefficient de Poisson ν	<i>EN311§3.2.6</i> $E = 210 \text{ GPa}$ $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = 80.8 \text{ GPa}$ $\nu = 0.3$	<i>EN314§2.1.3(1)</i> $E = \text{Dépend de la Nuance}$ $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \text{Dépend de la Nuance}$ $\nu = 0.3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th colspan="3">Nuances selon EN314§2.1.2 Tbl.2.1</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Austénitique Et Austéno-Ferritique sauf :</td><td>Nuances 1.4539 1.4529 1.4547</td><td>Ferritique</td></tr> <tr> <td>$E = 200 \text{ GPa}$ $G = 76.9 \text{ GPa}$</td><td>$E = 195 \text{ GPa}$ $G = 75 \text{ GPa}$</td><td>$E = 220 \text{ GPa}$ $G = 84.6 \text{ GPa}$</td></tr> </tbody> </table>	Nuances selon EN314§2.1.2 Tbl.2.1			Austénitique Et Austéno-Ferritique sauf :	Nuances 1.4539 1.4529 1.4547	Ferritique	$E = 200 \text{ GPa}$ $G = 76.9 \text{ GPa}$	$E = 195 \text{ GPa}$ $G = 75 \text{ GPa}$	$E = 220 \text{ GPa}$ $G = 84.6 \text{ GPa}$
Nuances selon EN314§2.1.2 Tbl.2.1											
Austénitique Et Austéno-Ferritique sauf :	Nuances 1.4539 1.4529 1.4547	Ferritique									
$E = 200 \text{ GPa}$ $G = 76.9 \text{ GPa}$	$E = 195 \text{ GPa}$ $G = 75 \text{ GPa}$	$E = 220 \text{ GPa}$ $G = 84.6 \text{ GPa}$									
Coefficients Partiels	<i>EN311§6.1 / EN318§2.2(2)</i> $\gamma_{M0} = 1.00$ $\gamma_{M1} = 1.00$ $\gamma_{M2} = 1.25$ $\gamma_{M3} = 1.25$ $\gamma_{M3,ser} = 1.10$	<i>EN314§5.1(2)</i> $\gamma_{M0} = 1.10$ $\gamma_{M1} = 1.10$ $\gamma_{M2} = 1.25$									
Notes : ¹ : Il est à noter que les Inox (hormis les nuances d'acier ferritique référencées dans la NF EN 1993-1-4 Tbl.2.1) sont moins raides que les aciers au carbone. Cette raideur est caractérisée par un module d'Young plus faible.											

	Acier au Carbone NF EN 1993-1-1 / NF EN 1993-1-8	Acier Inoxydable NF EN 1993-1-4 / NF EN 1993-1-8
Vérifications		
Cisaillement	<p>EN318§3.6.1 Tbl.3.4</p> $F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>Cisaillement dans la partie filetée du boulon (A est la section nette du boulon A_s) :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour les Classes 4.6, 5.8, 8.8 et 12.9 $\alpha_v = 0.6$ - pour les Classes 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 $\alpha_v = 0.5$ <p>Cisaillement dans la partie non filetée du boulon (A est la section du boulon) : $\alpha_v = 0.6$</p>	<p>EN314§6.2(3)</p> <p>Cisaillement dans la partie filetée du boulon $\alpha_v = 0.5$</p> <p>Cisaillement dans la partie non filetée du boulon $\alpha_v = 0.6$</p>
Pression Diamétrale	<p>EN318§3.6.1 Tbl.3.4</p> $F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}}$ <p>où α_b est la plus petite valeur entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour les boulons de rive $1.0 ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; \frac{e_1}{3 d_0}$ - pour les boulons intérieurs $1.0 ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; \frac{p_1}{3 d_0} - \frac{1}{4}$ <p>k_1 est la plus petite valeur entre :</p> <ul style="list-style-type: none"> - pour les boulons de rive $2.5 ; 2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 ; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7$ - pour les boulons intérieurs $2.5 ; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7$ <p>EN318§3.6.1(10) Pour les assemblages à simple recouvrement avec une seule ligne de boulons il convient :</p> <ul style="list-style-type: none"> - que les boulons soient munis de rondelles sous la tête et sous l'écrou. - de limiter la résistance en pression diamétrale à : $F_{b,Rd} = \frac{1.5 f_u d t}{\gamma_{M2}}$	<p>EN314§6.2(1)</p> <p>f_{ub} prend la valeur $f_{u,red}$</p> <p>$f_{u,red} = 0.5 f_y + 0.6 f_u$ mais $f_{u,red} \leq f_u$</p>
Traction	<p>EN318§3.6.1 Tbl.3.4</p> $F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}$ <p>où $k_2 = 0.63$ pour les boulons à têtes fraisées $k_2 = 0.9$ pour les autres types de boulons</p>	
Poinçonnement	<p>EN318§3.6.1 Tbl.3.4</p> $B_{p,Rd} = \frac{0.6 \pi d_m t_p f_u}{\gamma_{M2}}$ <p>où d_m est le diamètre moyen de la tête du boulon</p>	
Traction et Cisaillement combinés	<p>EN318§3.6.1 Tbl.3.4</p> $\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Rd}}{1.4 F_{t,Rd}} \leq 1.0$	

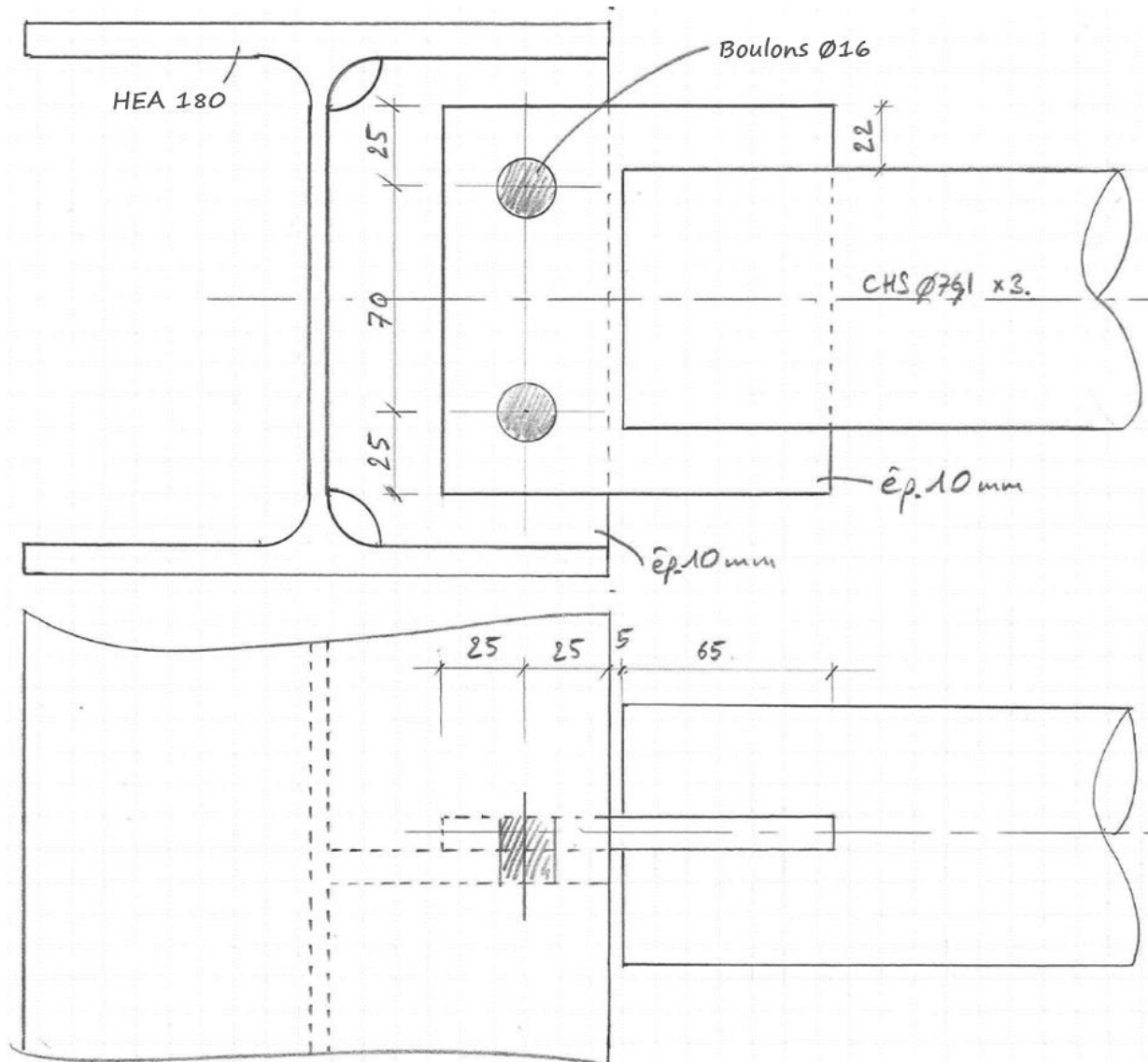
	Acier au Carbone NF EN 1993-1-1 NF EN 1993-1-8	Acier Inoxydable NF EN 1993-1-4 NF EN 1993-1-8																																	
Vérifications en Précontrainte																																			
Résistance au glissement	<p>EN318§3.9.1</p> <p>Attache de Cat.B (Résistante à l'ELS)</p> $F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3,ser}} F_{p,C}$ <p>Attache de Cat.C (Résistante à l'ELU)</p> $F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} F_{p,C}$ <p>où k_s est le coefficient de forme en fonction du type de trou.</p> <table><tr><th>Description</th><th>k_s</th></tr><tr><td>Boulons utilisés dans des trous normaux.</td><td>1,0</td></tr><tr><td>Boulons utilisés soit dans des trous surdimensionnés soit dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.</td><td>0,85</td></tr><tr><td>Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.</td><td>0,7</td></tr><tr><td>Boulons utilisés dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.</td><td>0,76</td></tr><tr><td>Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.</td><td>0,63</td></tr></table> <p>n est le nombre de plan de frottement μ est le coefficient de frottement</p> <table><tr><th>Traitement de surface</th><th>Classe</th><th>Coefficient de frottement μ</th></tr><tr><td>Surfaces grenaillées ou sablées, débarrassées de toute rouille non adhérente, exemptes de piqûres.</td><td>A</td><td>0,50</td></tr><tr><td>Surfaces revêtues par galvanisation à chaud selon EN ISO 1461, suivi d'un grenaillage léger (balayage) et revêtues d'une peinture au silicate de zinc inorganique d'une épaisseur nominale de 60 μm</td><td>B</td><td>0,40</td></tr><tr><td>Surfaces grenaillées ou sablées a) revêtues d'une peinture au silicate de zinc inorganique d'une épaisseur nominale de 60 μm b) métallisées par projection d'aluminium, de zinc ou d'une combinaison des deux jusqu'à une épaisseur nominale ne dépassant pas 80 μm.</td><td>B</td><td>0,40</td></tr><tr><td>Surfaces revêtues par galvanisation à chaud selon EN ISO 1461, suivi d'un grenaillage léger (balayage) (ou par un procédé abrasif équivalent)</td><td>C</td><td>0,35</td></tr><tr><td>Surfaces nettoyées à la brosse métallique ou au chalumeau, débarrassées de toute rouille non adhérente.</td><td>C</td><td>0,30</td></tr><tr><td>Surfaces brutes de laminage.</td><td>D</td><td>0,20</td></tr></table> $F_{p,C} = 0.7 f_{ub} A_s$	Description	k_s	Boulons utilisés dans des trous normaux.	1,0	Boulons utilisés soit dans des trous surdimensionnés soit dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,85	Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,7	Boulons utilisés dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,76	Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,63	Traitement de surface	Classe	Coefficient de frottement μ	Surfaces grenaillées ou sablées, débarrassées de toute rouille non adhérente, exemptes de piqûres.	A	0,50	Surfaces revêtues par galvanisation à chaud selon EN ISO 1461, suivi d'un grenaillage léger (balayage) et revêtues d'une peinture au silicate de zinc inorganique d'une épaisseur nominale de 60 μ m	B	0,40	Surfaces grenaillées ou sablées a) revêtues d'une peinture au silicate de zinc inorganique d'une épaisseur nominale de 60 μ m b) métallisées par projection d'aluminium, de zinc ou d'une combinaison des deux jusqu'à une épaisseur nominale ne dépassant pas 80 μ m.	B	0,40	Surfaces revêtues par galvanisation à chaud selon EN ISO 1461, suivi d'un grenaillage léger (balayage) (ou par un procédé abrasif équivalent)	C	0,35	Surfaces nettoyées à la brosse métallique ou au chalumeau, débarrassées de toute rouille non adhérente.	C	0,30	Surfaces brutes de laminage.	D	0,20	<p>EN314§2.2.2</p> <p>Non Applicable. Sauf si l'aptitude à la précontrainte est démontrée à partir de résultats d'essais.</p> <p>BUMAX[®] propose ce type d'essais pour leurs produits. Les consulter pour plus d'informations.</p>
Description	k_s																																		
Boulons utilisés dans des trous normaux.	1,0																																		
Boulons utilisés soit dans des trous surdimensionnés soit dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,85																																		
Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est perpendiculaire à la direction des efforts.	0,7																																		
Boulons utilisés dans des trous oblongs courts dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,76																																		
Boulons utilisés dans des trous oblongs longs dont l'axe longitudinal est parallèle à la direction des efforts.	0,63																																		
Traitement de surface	Classe	Coefficient de frottement μ																																	
Surfaces grenaillées ou sablées, débarrassées de toute rouille non adhérente, exemptes de piqûres.	A	0,50																																	
Surfaces revêtues par galvanisation à chaud selon EN ISO 1461, suivi d'un grenaillage léger (balayage) et revêtues d'une peinture au silicate de zinc inorganique d'une épaisseur nominale de 60 μ m	B	0,40																																	
Surfaces grenaillées ou sablées a) revêtues d'une peinture au silicate de zinc inorganique d'une épaisseur nominale de 60 μ m b) métallisées par projection d'aluminium, de zinc ou d'une combinaison des deux jusqu'à une épaisseur nominale ne dépassant pas 80 μ m.	B	0,40																																	
Surfaces revêtues par galvanisation à chaud selon EN ISO 1461, suivi d'un grenaillage léger (balayage) (ou par un procédé abrasif équivalent)	C	0,35																																	
Surfaces nettoyées à la brosse métallique ou au chalumeau, débarrassées de toute rouille non adhérente.	C	0,30																																	
Surfaces brutes de laminage.	D	0,20																																	
Résistance au glissement en présence de traction	<p>EN318§3.9.1</p> <p>Attache de Cat.B (Résistante à l'ELS)</p> $F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3,ser}} (F_{p,C} - 0.8 F_{t,Ed,ser})$ <p>Attache de Cat.C (Résistante à l'ELU)</p> $F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} (F_{p,C} - 0.8 F_{t,Ed})$ <p>où $F_{t,Ed,ser}$ est l'effort de traction de service dans le boulon $F_{t,Ed}$ est l'effort de traction ultime dans le boulon</p>																																		

Exemple d'application

Le bouton en tube rond $\varnothing 76.1 \times 3$ ci-dessous est attaché au poteau en HEA180 par deux boulons $\varnothing 16$.

Pour cet exemple, seule la vérification des boulons est traitée, la vérification des éléments fera l'objet d'un autre cours.

La vérification des boulons inox est comparée à celle de boulons en acier. Pour ce faire, des nuances similaires sont utilisées.



Acier au Carbone NF EN 1993-1-1 / NF EN 1993-1-8		Acier Inoxydable NF EN 1993-1-4 / NF EN 1993-1-8	
DONNÉES			
Nuances des boulons			
8.8	F _{ub} = 80 daN/mm ²	BUMAX <small>A BUFAB COMPANY</small> 88	F _{ub} = 80 daN/mm ²
Nuances des éléments			
S275	F _u = 43 daN/mm ²	1.4003	F _{uRed} = 41 daN/mm ² Où F _{uRed} = 0.5 f _y + 0.6 f _u Avec f _y = 28 daN/mm ² f _u = 45 daN/mm ²
Avertissements			
En présence d’une seule rangée de boulons, les boulons devront comporter des rondelles de chaque côté.			
RÉSISTANCES			
Résistance au cisaillement des boulons			
$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ Où A = 157mm ² (cisaillement dans la partie filetée : A = A _s) γ _{M2} = 1.25 (pour les deux matériaux)			
$\alpha_v = 0.6$ (dépend de la classe de boulon et spécialement de la ductilité) F _{v,Rd} = 6029 daN / boulon		$\alpha_v = 0.5$ (dépend de la position du plan de cisaillement – dans la partie filetée ou non) F _{v,Rd} = 5024 daN / boulon	
Résistance en pression diamétrale			
En présence d’une seule rangée de boulons, la résistance à la pression diamétrale est :			
$F_{b,Rd} = \min \left\{ \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}} ; \frac{1.5 f_u d t}{\gamma_{M2}} \right\}$ Où γ _{M2} = 1.25 (pour les deux matériaux)			
$k_1 = \min \left\{ 2.5 ; 2.8 \frac{e_2}{d_0} - 1.7 ; 1.4 \frac{p_2}{d_0} - 1.7 \right\} = 2.19$			
$\alpha_b = \min \left\{ 1.0 ; \frac{f_{ub}}{f_u} ; \frac{e_1}{3 d_0} \right\} = 0.46$ Même valeur pour les deux matériaux car la géométrie est dimensionnante.			
F _{b,Rd} = 5545 daN / boulon		F _{b,Rd} = 5287 daN / boulon	

Conclusion

À matériaux comparables, la résistance des boulons inox est limitée par le choix normatif des coefficients.

Bibliographie

- Norme NF EN 1993-1-1
- Norme NF EN 1993-1-4
- Norme NF EN 1993-1-9
- Norme NF EN ISO 9227
- Norme EN ISO 3506
- Norme ASTM G48
- <https://fr.wikipedia.org/wiki/Corrosion>
- [https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_\(matériau\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Fatigue_(matériau))
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Acier_inoxydable
- https://en.wikipedia.org/wiki/Pitting_resistance_equivalent_number
- <https://www.bumax-fasteners.com/>
- <https://www.bumax-fasteners.com/bumax-grades/>