

# Sommaire

<b>Introduction générale</b> .....	19
<b>Chapitre I : ASSEMBLAGES METALLIQUES</b>	
1 Introduction .....	22
1.1 Définition et rôle d'un assemblage.....	22
1.2 Différentes formes d'assemblages rencontrés en construction métallique.....	23
• 1.2.1 Assemblages poutre-poteau par platine d'extrémité.....	23
• 1.2.2 Assemblage poutre-poteau par cornières d'âme et/ou de semelles .....	24
• 1.2.3 Assemblages de continuité de poutres ou de poteaux.....	24
• 1.2.4 Assemblages pied du poteau.....	26
1.3 Classification des assemblages.....	26
2 Comportement de la zone tendue (tronçon en t).....	28
2.1 Conception du Tronçon en T.....	29
2.2 Fonctionnement de tronçon en T.....	30
• 2.2.1 Rigidité axiale du tronçon en T.....	31
• 2.2.2 Résistance en traction du tronçon en T .....	31
• 2.2.3 Longueur efficace du tronçon en T.....	34
3 Exemples d'application.....	36
3.1 IPE300.....	36
• 3.1.1 Calcul de résistance des tronçons en T.....	36
3.1.1.2 Le moment résistant plastique.....	38
3.1.1.2 La résistance de calcul à la traction .....	38
3.1.1.3 Résistance de la semelle du tronçon en té (3modes de ruine).....	39
• 3.1.2 Calcul de rigidité.....	39
• 3.1.3 Force de Levier.....	39
• 3.1.4 Force élastique.....	39
3.2 HEA 260.....	39
• 3.2.1 Calcul de résistance.....	40
3.2.1.1 Le moment résistant plastique .....	40

3.2.1.2 La résistance de calcul à la traction d'un boulon .....	40
3.2.1.3 Résistance de la semelle du tronçon en té (3modes de ruine).....	40
• 3.2.2 Calcul de rigidité.....	41
• 3.2.3 Force de Levier.....	41
• Force élastique.....	41
3.3 HEA300.....	41
• 3.3.1 Calcul de résistance .....	43
3.3.1.1 Le moment résistant plastique .....	43
3.3.1.2 La résistance de calcul à la traction d'un boulon .....	43
3.3.1.3 Résistance de la semelle du tronçon en T (3modes de ruine).....	43
• 3.3.2 Calcul de rigidité.....	43
• 3.3.3 Force de Levier.....	44
• 3.3.4 Force élastique.....	44
4 Conclusion.....	44

## **Chapitre II : ETAT ACTUEL SUR LES ASSEMBLAGES EN T**

1 Introduction.....	46
2 Travaux de « O. S. Bursi a & J. P. Jaspart b 1997 ».....	46
2.1 Introduction.....	46
2.2 Conclusion.....	47
3 Travaux de “Minas E. Lemonis and Charis J. Gantes 2006 ».....	47
3.1 Introduction.....	47
3.2 Conclusion.....	49
4 Travaux de “ZhenyuWang, Jinfan Zhang and Jianqun Jiang 2016 ».....	50
4.1 Introduction.....	50
4.2 Conclusion.....	52

## **Chapitre III : MODES D'ASSEMBLAGES**

1 Introduction.....	55
2 Définition d'un boulon.....	56
2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques des boulons.....	56
• Caractéristiques Géométriques .....	56
• Caractéristiques Mécaniques .....	57
2.2 Formes et dimensions .....	57
2.3 La fabrication .....	58
2.4 Représentation symbolique .....	58
2.5 Désignation d'un boulon .....	58
2.6 Longueurs de tiges nécessaires .....	60
3 Procédés d'exécution .....	60
4 Dispositions constructives réglementaires .....	61
5 Sollicitations des boulons.....	61
6 Résistance de calcul des boulons ordinaires.....	62
6.1 Résistance au cisaillement .....	62
6.2 Pression diamétrale .....	62
6.3 Résistance à la traction.....	63
6.4 Résistance au Poinçonnement.....	63
7 Boulons ordinaires.....	64
7.1 Principe de Fonctionnement.....	64
• 7.1.1 La force de précontrainte.....	65
7.1.1.1 Mise en œuvre de la force de précontrainte.....	65
7.1.1.2 Le couple de serrage.....	66
7.1.1.3 La méthode du tour d'écrou .....	66
7.1.1.4 La méthode par rondelles de mesures .....	66
• 7.1.2 L'état de surface des pièces en contact.....	66
• 7.1.3 la forme et la dimension de trous .....	67
• 7.1.4 Le nombre de plan de contact.....	67
7.2 Résistance du boulon.....	67

• 7.2.1 Résistance au glissement d'un boulon précontraint .....	67
• 7.2.2 Résistance à la traction d'un boulon précontraint .....	68
7.2.2.1 Boulons soumis à des efforts combinés de traction et de cisaillement ....	68
8 Conclusion.....	69

## **Chapitre IV : MODÉLISATION D'UN ASSEMBLAGE EN T**

1 Introduction.....	71
1.1 Présentation de logiciel de calcul.....	72
• 1.1.1 Organisation d'un calcul .....	72
1.1.1.1 Choix de la géométrie et du maillage .....	72
1.1.1.2 Définition du modèle mathématique.....	72
• 1.1.2 Résolution du problème discrétisé.....	72
• 1.1.3 Analyse et post-traitement des résultats.....	73
2 Développements d'un modèle numérique pour l'assemblage en T.....	73
2.1 Données géométriques.....	73
• 2.1.1 Propriétés matérielles.....	74
• 2.1.2 Maillage .....	75
3 Analyse des résultats.....	77
3.1 Etude sans précontrainte .....	77
• 3.1.1 Réponses globales (force-déplacement).....	77
• 3.1.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux avec l'approche "Eurocode3" .....	79
• 3.1.3 Comportement du boulon.....	81
3.2 Étude avec Précontrainte.....	83
3.2.1 Effet de la précontrainte.....	83
4 Conclusion.....	85
<b>Conclusion générale</b> .....	86
Référence bibliographique.....	88
Annexe.....	90

# Listes des Figures

## Chapitre 1 : Assemblages métalliques

**Figure 1** - Types d'assemblages boulonnés dans une structure métallique

**Figure 2** - Assemblages par platine d'extrémité boulonnée

**Figure 3** - Exemple d'assemblage poteau poutre

**Figure 4** - Assemblage de continuité

**Figure 5** : Assemblage pied de poteau

**Figure 6** : Classification par la rigidité

**Figure 7** : Classification par la résistance.

**Figure 8** : Classification selon la capacité de rotation

**Figure 9** : assemblage poteau-poutre avec une platine d'extrémité

**Figure 10** : Assemblage en T.

**Figure 11** : Modélisation d'une semelle de poteau et d'une platine d'extrémité - Sous forme de tronçons en T.

**Figure 12** : Modes de ruine du tronçon en T.

**Figure 13** : Caractéristiques d'un tronçon en T

**Figure 14** : Répartition des moments dans un tronçon en T

**Figure 15**: Schémas des lignes de plastification des tronçons en t (mécanisme individuel et de groupe)

**Figure 16**: Variétés de caractéristiques géométriques des tronçons en T.

## Chapitre 2 : Etat actuel sur les assemblages en T

**Figure 1** : Courbe force déplacement d'un tronçon

**Figure 2** : Caractéristiques géométriques des spécimens T1 (IPE300) et T2 (HE220B)

**Figure 3** : Courbe force déplacement du tronçon T1 et T2.

**Figure 4** : Force dans le boulon en fonction de la force appliquée

**Figure 5** : Modèle MSC d'un tronçon en T à la traction.

**Figure6** : Courbe force déplacement des tronçons avec différents épaisseurs de semelles

**Figure 7** : courbe force déplacement d'un spécimen

### **Chapitre 3 : Modes d'assemblages**

**Figure1** : différents composantes de pièces boulonnées

**Figure2** : Formes du boulon

**Figure3** : Dispositions constructives

**Figure 4** : Poinçonnement de la plaque

**Figure5** : Boulon précontraint

**Figure 6** : Influence du nombre de plans de frottement

### **Chapitre 4 : Modélisation d'un assemblage en T**

**Figure 1** : Modèles de tronçon en T correspondant à la partie tendue de l'assemblage

**Figure 2** : Géométrie du tronçon en té

**Figure 3** : - Lois du comportement des matériaux (tronçon T1)

**Figure4** : les tronçons en T

**Figure5** : Déplacement imposé

**Figure6** : Courbe Force-Déplacement (T1)

**Figure7** : Courbe Force-Déplacement (T2)

**Figure8** : Courbe Force-Déplacement (T3)

**Figure9** : Définition de la rigidité et de la résistance pour un tronçon en té à partir d'une courbe Force-Déplacement

**Figure10** : Force dans le boulon en fonction de la force extérieure appliquée

**Figure11** : Evolution de la force de levier résultante

**Figure12** : Courbe Force-Déplacement avec et sans précontrainte (T1)

**Figure13** : Courbe Force-Déplacement avec et sans précontrainte (T2)

# Liste des tableaux

**Tableau1** : Caractéristiques des tronçons utilisés dans la modélisation

**Tableau2** : Rigidité initiale des tronçons : comparaison MEF/EC3/E.exp

**Tableau3** : Résistance des tronçons : comparaison MEF/EC3/E.exp

**Tableau4** : Rigidité initiale (MEF) sans et avec précontrainte.

**ANNEXE :**

**Tableau 1 Annexe-A** : Valeurs de la longueur efficace de la semelle du poteau non raidi

**Tableau2** : Valeurs de la longueur efficace de la platine d'extrémité

**Tableau 3 Annexe-B** : Caractéristique géométrique des boulons

**Tableau 4 Annexe-B** : Caractéristique mécanique des Boulons

**Tableau 5 Annexe-C** : Pincés longitudinales et transversales, entraxes minimum et maximum

**Tableau 6 Annexe-C** : valeurs des coefficients  $\mu$  et  $k_s$

# LISTE DES NOTATIONS

$A_s$  : La section de la partie filetée

$B_{t,Rd}$  : La résistance à la traction de boulon.

$b_{p,Rd}$  : La résistance de calcul au cisaillement par poinçonnement

$C$  : couple de serrage

$d_w$  : Le diamètre de la rondelle, de la tête du boulon ou de l'écrou selon la partie qui est en contact avec la semelle.

$d$  : diamètre du boulon.

$F_{Rd}$  : La résistance à la traction.

$f_y$  : La limite d'élasticité.

$F_{el}$  : Force élastique.

$f_{v,Rd}$  : Résistance au cisaillement.

$f_{bRd}$  : Résistance à la pression diamétrale.

$f_{ub}$  : La résistance ultime.

$F_{p,Cd}$  : la force précontrain.

$F_{s,Rd}$  : La résistance de calcul au glissement d'un boulon précontraint.

$f_{s,Rd}$  : Effort résistant combine de traction et de cisaillement.

$f_{t,Sd,ult}$  : Effort de traction ultime.

$f_{t,Sd,ser}$  : Effort de traction service.

$f_t$  : Effort de traction admissible.

$k_{ini}$  : La rigidité initiale.

$k_f$  : Rigidité de la semelle du poteau.

$k_p$  : Rigidité de la platine d'extrémité.

$k_b$  : Rigidité axiale des boulons.

$K$  : coefficient de frottement vis écrou au niveau de la file.

$k_s$  : Coefficient de forme des trous.

$l_{eff}$  : La longueur efficace.



$L_b^*$  : Longueur seuil de boulon.

$L_b$  : Longueur utile de boulon.

**MEF** : méthode élément finie.

$M_p$  : Moment plastique de la semelle.

$M_{bp}$  : Moment plastique de la contre plaque.

$Q$  : Force de levier.

$t_{bp}$  : L'épaisseur des contre-plaques.

$t_f$  : Épaisseur de la semelle.

$t_w$  : Épaisseur de l'âme.

$t_r$  : Épaisseur de rondelle.

$t_h$  : Épaisseur de la tête

$t_e$  : Épaisseur de l'écrou.

$t_p$  : L'épaisseur de la plaque sous la tête de la vis ou de l'écrou.

$\tau_u$  : Contrainte de cisaillement ultime.

$\mu$  : Coefficient de frottement.

## INTRODUCTION GENERALE

Généralement, les assemblages des éléments d'une structure en acier sont réalisés par soudage et/ou par boulonnage. L'assemblage d'une poutre à un poteau par platine d'extrémité est aujourd'hui énormément utilisé dans la construction métallique pour sa simplicité d'une part et de son économie de fabrication d'autre part. Cependant, le comportement structural de ce type d'assemblage est extrêmement complexe à comprendre.

Dans les approches usuelles de calcul de structures, les assemblages entre élément sont considérés rigides ou articulés. Des essais de laboratoire confirmés par des modèles éléments finis ont montré que, pour beaucoup d'assemblages sollicités en flexion, le comportement réel est situé entre ces deux cas extrêmes. Ce comportement, caractérisé par une relation Moment-Rotation peut être modélisé par des ressorts. Les paramètres les plus importants de la loi Moment-Rotation sont la rigidité initiale, le moment résistant et la capacité de rotation. Ces trois paramètres sont essentiels pour l'analyse globale de la structure.

Selon l'Eurocode 3, le calcul des caractéristiques mécaniques telles que la rigidité ou la résistance s'appuie sur une méthode dite « des composantes » qui considère que l'assemblage est constitué de composantes élémentaires. Les lois force-déplacement de chacune d'elles sont établies et associées, en série ou en parallèle.

Dans le cas général, un assemblage soumis à un moment fléchissant est décomposé en zone tendue, cisailée et comprimée. La zone tendue mobilise des composantes de type tronçon en T équivalent dont la résistance et la rigidité sont déterminées en se ramenant à un calcul élémentaire 2D en utilisant la notion de longueur efficace. Cette dernière dépend de la position de la rangée de boulons. La déformation d'un tronçon en T est d'une part liée au comportement des boulons sollicités en traction et d'autre part, à l'état de déformation de la semelle ou de la platine sollicitée en flexion. Une des caractéristiques importante du comportement des tronçons en T est le Test de développement de forces de levier sous la semelle qui augmentent les forces reprises par les boulons.

Dans un premier temps, nous allons faire un calcul analyse d'un tronçon T. Ce calcul plastique est utilisé pour déterminer la résistance des tronçons en T2 équivalent en considérant trois modes de ruine.

Par la suite, une étude bibliographique est développée afin de faire le point sur les différentes recherches sur les assemblages en T particulièrement.

Et en fin, nous allons modéliser sur le logiciel CASTEM des assemblages issus des essais expérimentaux pour les comparer.

# **Chapitre 1**

## **ASSEMBLAGES METALLIQUES**

## 1.2 INTRODUCTION

L'utilisation des structures en acier boulonnées est très populaire dans la construction, en raison de la capacité d'assemblage rapide de la structure. Dans ces structures, les assemblages sont des éléments critiques et par conséquent, une compréhension de leur comportement est particulièrement importante.

En Europe, la conception des assemblages métalliques est réglementée par Eurocode 3, qui fournit des spécifications pour les éléments soudés et boulonnés. En particulier, Eurocode 3 suggère l'utilisation d'un Tronçon en T équivalent en traction afin de modéliser l'assemblage.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes formes d'assemblages répandues en construction métallique, ainsi que la classification des assemblages. Nous allons également analyser le comportement et le fonctionnement des tronçons en T qui constituent des composantes majeures dans la zone tendue des assemblages soumis à la flexion. Par la suite, nous allons, dans un premier temps, donner les formules qui permettent de calculer la rigidité, la résistance et les efforts internes d'un tronçon en T, et dans un deuxième temps, nous effectuons des analyses qualitatives de leur sensibilité à l'évolution de la position de la force de levier résultante.

Enfin, nous allons établir le calcul analytique des trois profilés (IPE300, HEA260 et HEA300) comprenant le moment résistant plastique, la résistance à la traction afin d'obtenir la rigidité initial, ainsi leurs forces élastique.

### 1.2 Définition et rôle d'un assemblage

La caractéristique essentielle des constructions métalliques est d'être composées d'un ensemble d'éléments barres « Poutre-Poteau » constitués de profilés laminés ou soudés souvent en forme de (I ou de H) et qu'il faut assembler entre eux pour constituer l'ossature.

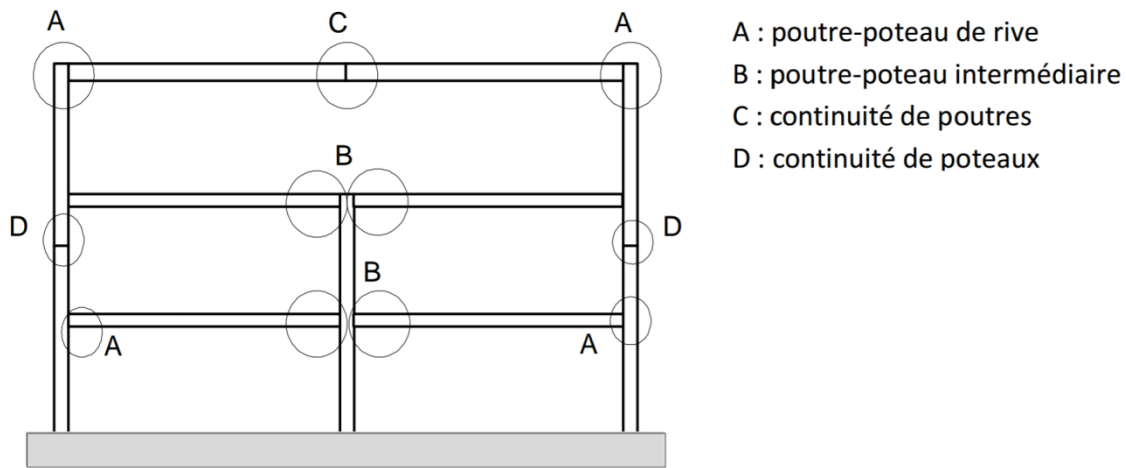
Les liaisons entre ces différents éléments représentent ce qu'on appelle communément « Assemblages ». Ces derniers constituent des composants spécifiques à la construction métallique. Ils jouent un rôle très important de liaison. Ils permettent de réunir et de solidariser plusieurs éléments entre eux tout en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les éléments assemblés, sans générer d'efforts parasites.

Un assemblage mal conçu, mal calculé ou mal réalisé peut conduire à l'effondrement de la structure. De ce fait la conception et le calcul des assemblages est d'une importance capitale.

## 1.2 Différentes formes d'assemblage rencontrées en construction métallique [1]

Les poutres et les poteaux dans une structure en acier peuvent être assemblés par différents types d'assemblages. Dans le cas des assemblages boulonnés, on peut distinguer plusieurs types tel que :

- Les assemblages poutre-poutre (C)
- Les assemblages poutre-poteau (A et B)
- Les assemblages de continuité (C)
- Les assemblages dans un système en treillis « un nœud »
- Les assemblages poteau-fondation « pied de poteau »

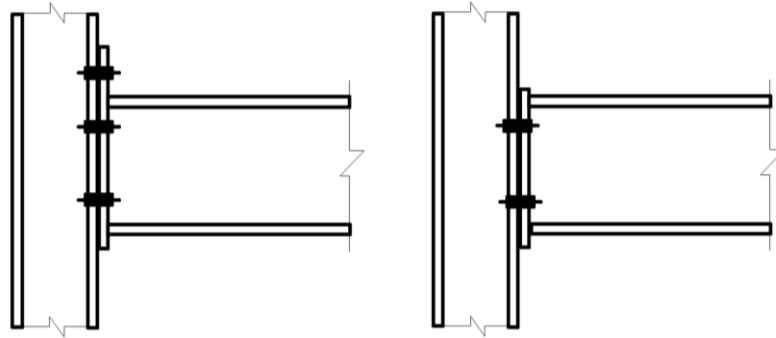


*Figure 1 : Types d'assemblages boulonnés dans une structure métallique*

Les assemblages boulonnés les plus couramment utilisés sont ceux avec platine d'about ou avec cornière d'âme et/ou de semelle. Ces derniers sont généralement moins rigides et moins résistants que des assemblages avec platine d'about.

### 1.2 Assemblages poutre-poteau par platine d'extrémité

Ce type d'assemblage se fait par une platine d'extrémité soudée à l'extrémité de la poutre et attachée au poteau par des boulons disposés en plusieurs rangées verticales. Cette platine peut être débordante ou non.



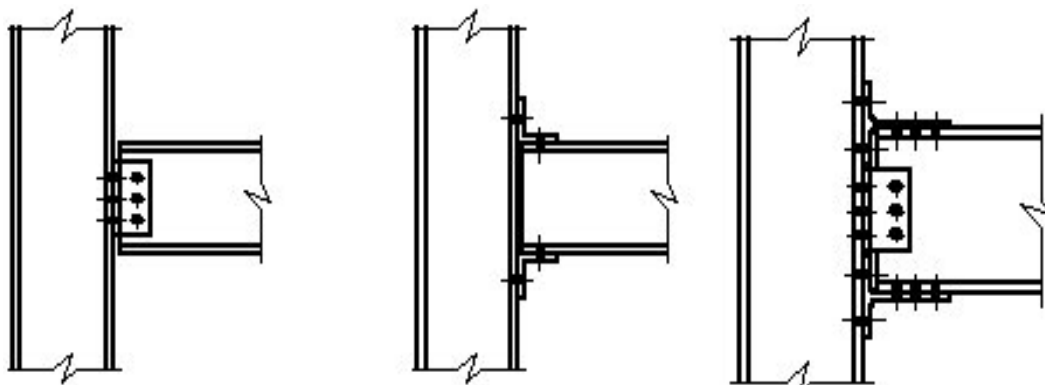
(a) Assemblage par platine débordante

(b) Assemblage par platine non débordante

*Figure 2 - Assemblages par platine d'extrémité boulonnée*

### 1.2 Assemblage poutre-poteau par cornières d'âme et/ou de semelles

Dans ce type d'assemblages, les cornières sont boulonnées sur la semelle du poteau, sur la semelle de la poutre et sur l'âme de la poutre.



(a) Assemblage par cornières d'âme

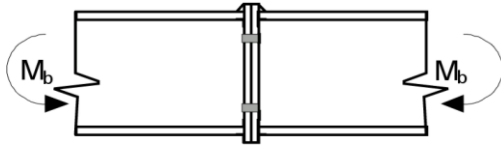
(b) Assemblage par cornières de semelles

(c) Assemblage par des tronçons en T et cornières d'âme

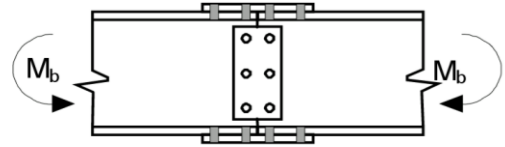
*Figure 3 - Exemple d'assemblage poteau poutre*

### 1.2 Assemblages de continuité de poutres ou de poteaux

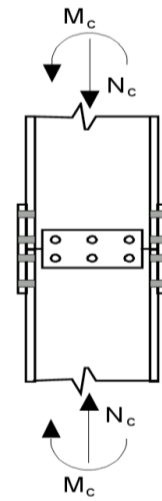
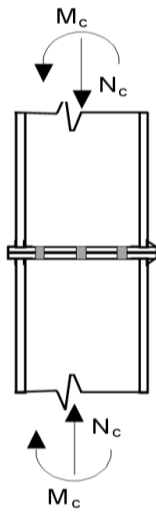
Les assemblages de continuité de poutre et de poteau ont pour fonction d'assurer la continuité de l'élément dans lequel ils se situent.



(a) Assemblage par platines d'extrémité



(b) Assemblage par couvre-joint

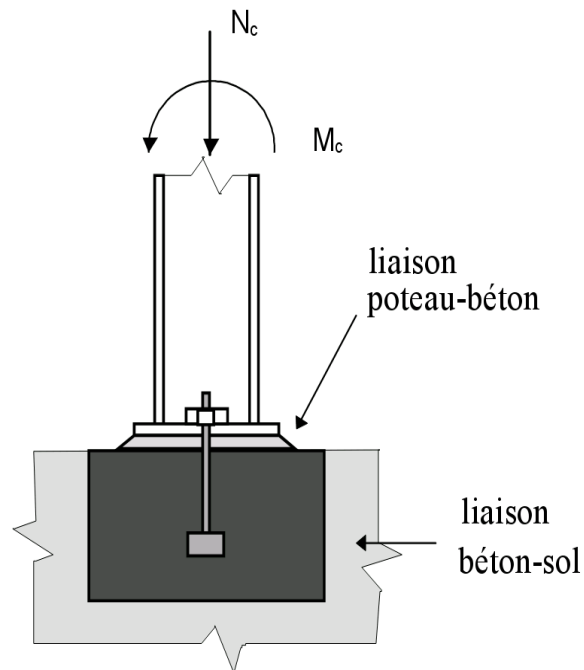


*Figure 4 : Assemblage de continuité*



## 1.2 Assemblages pied de poteau

Ce type d'assemblages relie entre eux des éléments de nature différente: profilé métallique par un bloc de béton.



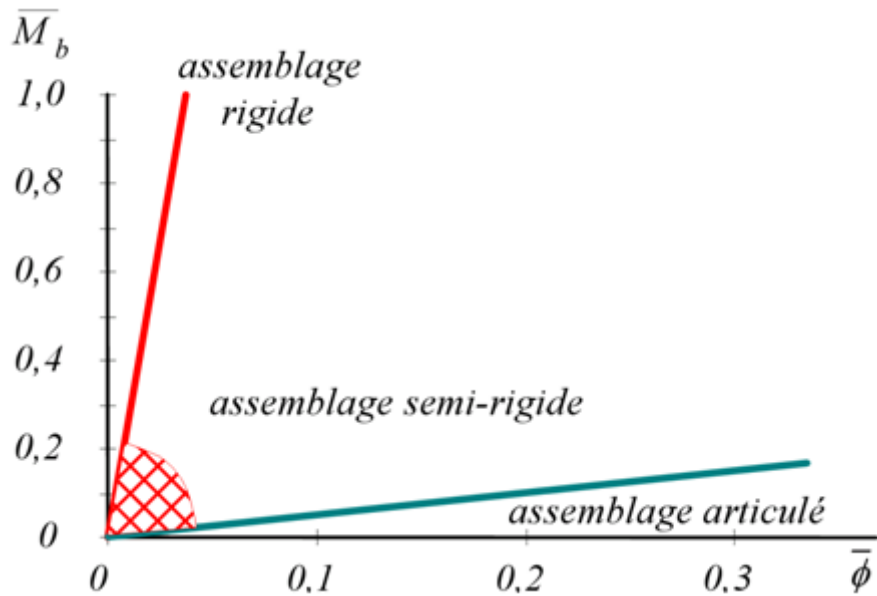
*Figure5 : Assemblage pied de poteau*

## 1.3 Classification des assemblages

Selon l'Eurocode 3, la rigidité rotationnelle d'un assemblage permet de le classer en rigide, semi-rigide ou articulé (figure6). L'influence de la rigidité de l'assemblage dépend de celle de l'élément de poutre qu'il attache. En dessous d'une certaine valeur, l'assemblage sera considéré articulé et au delà d'une certaine valeur l'assemblage sera considéré rigide.

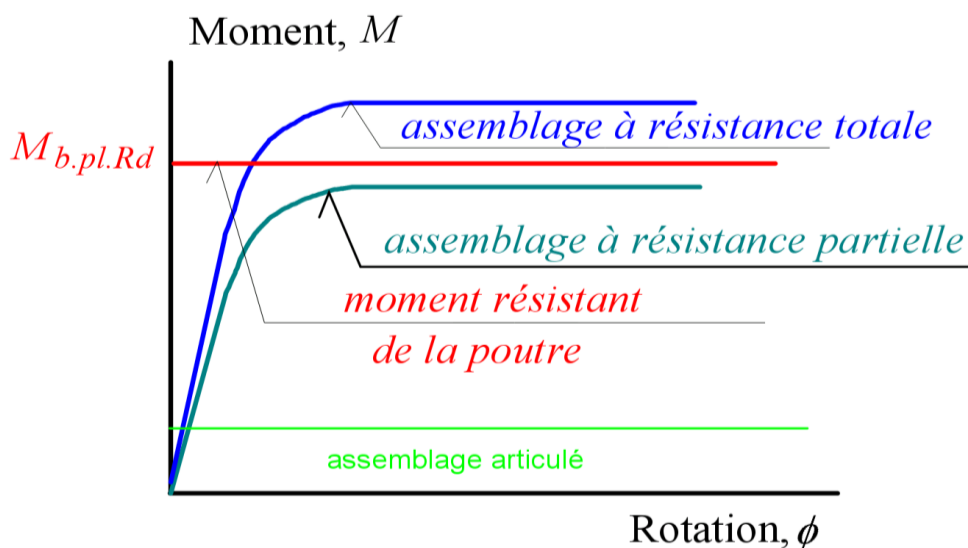
Entre les deux bornes, les assemblages sont considérés semi-rigides et leurs caractéristiques sont à prendre en compte dans l'analyse de structure.

La rigidité calculée de l'assemblage peut être utilisée dans l'analyse globale des structures même si l'assemblage est classé articulé ou rigide. S'il est classé semi-rigide, il est nécessaire d'utiliser la valeur calculée de rigidité.



**Figure6** : Classification par la rigidité

En ce qui concerne la résistance, les assemblages sont classés comme étant « a pleine résistance » ou « a résistance partielle » selon que leur résistance dépasse ou non celle de l'élément attaché possédant la résistance la plus faible. L'assemblage peut être considéré « articulé » lorsque sa résistance est faible par rapport a celle de la poutre attaché et dans ce cas, il est nécessaire de s'assurer que l'assemblage a une capacité de rotation suffisante.



**Figure7** : Classification par la résistance.

Les assemblages peuvent être classifiés en fonction de la capacité de rotation. Cette classification constitue une mesure de leur capacité à résister à une ruine locale prématurée.

L'intérêt pratique d'une telle classification est de vérifier si une analyse globale élastoplastique peut être effectuée jusqu'à la formation d'un mécanisme de ruine plastique dans la structure, ce qui implique la formation des rotules plastiques dans un certain nombre d'assemblages.

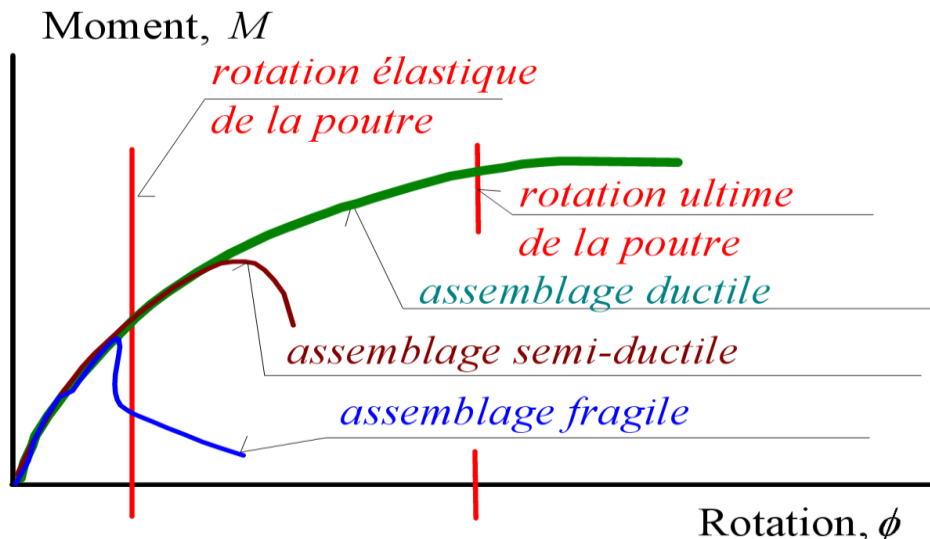


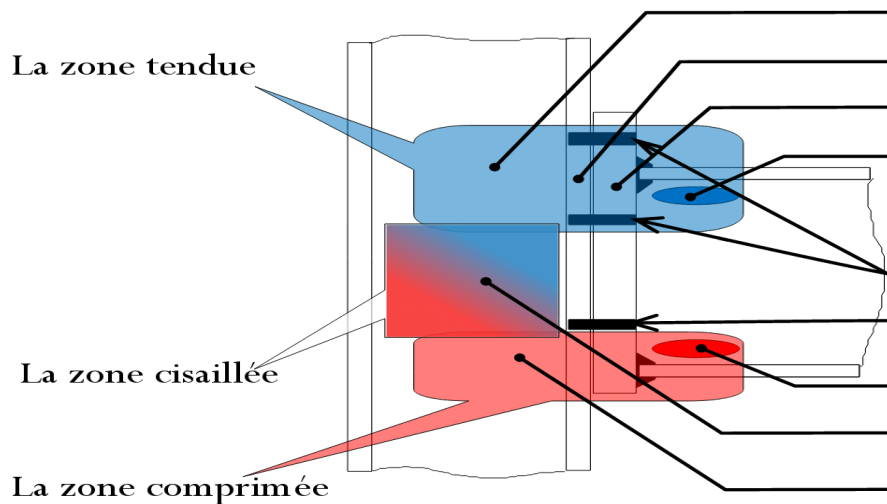
Figure8 : Classification selon la capacité de rotation

## 2 COMPOTEMENT DE LA ZONE TENDU (TRONÇON EN T) :

Le comportement global de l'assemblage, représenté par une loi moment-rotation, peut être déterminé de différentes manières telles que des essais, des calculs avancés ou en utilisant la méthode de composantes, démarche proposé dans l'Eurocode 3 pour caractériser le comportement mécanique des assemblages courants de construction métallique.

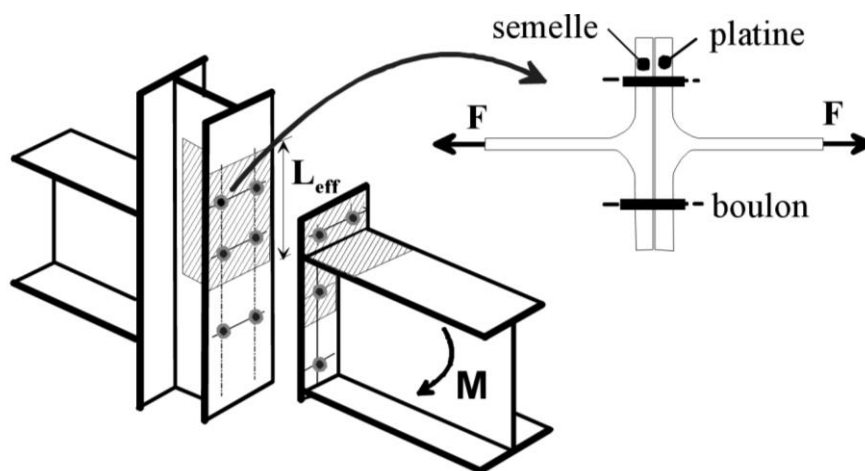
Les classes de rigidité, de résistance et de ductilité des assemblages ont été présentées. Dans ce contexte, les assemblages peuvent être considérés comme rigides, semi-rigides ou articulés selon la rigidité, à résistance totale ou à résistance partielle selon le moment résistant, et finalement ductiles, semi-ductiles ou fragiles selon la capacité de rotation.

Cette approche consiste à décomposer l'assemblage en différentes zones qui sont : la zone tendue, la zone comprimée et la zone cisailée (figure9)



**Figure9** : assemblage poteau-poutre avec une platine d'extrémité

Une des composantes principales d'un assemblage boulonné avec platine débordante de type poteau-poutre est le tronçon en T qui représente la zone tendue. Ce tronçon en T peut être considéré comme un assemblage élémentaire unique ou comme une partie d'une configuration plus complexe.

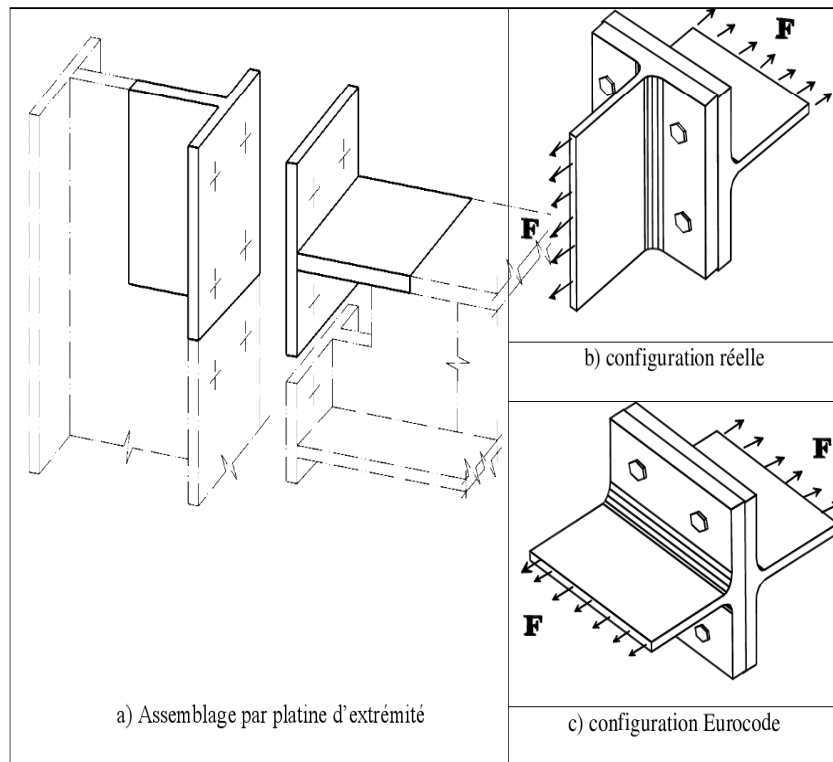


**Figure10** : assemblage en T

## 2.1 Conception du Tronçon en T

La modélisation des composantes d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité pour calculer la rigidité et la résistance est un problème complexe. L'approche de l'Eurocode 3

a rendu ce problème abordable en utilisant le tronçon en T équivalent, voir figure 11 .Ce dernier est utilisé pour modéliser les différentes composantes.



**Figure 11** : Modélisation d'une semelle de poteau et d'une platine d'extrémité -  
Sous forme de tronçons en T.

## 2.2 Fonctionnement du tronçon en T

Le tronçon en T offre la possibilité de traduire la courbe force-déplacement de chaque composante. Le modèle est utilisé dans le domaine élastique (calcul de la rigidité) et le domaine plastique (calcul de la résistance). Les règles de calcul sont fournies dans l'approche de l'Eurocode 3.

Dans un assemblage boulonné par platine, le moment de flexion est transmis sous forme de couple. Ainsi, il est d'usage d'admettre que les efforts dus au moment de flexion sont concentrés dans l'axe des semelles de la poutre assemblée. En l'absence de l'effort tranchant et de l'effort normal dans la poutre, les efforts dus au moment de flexion sont égaux.

Les efforts dus au moment de flexion sont des efforts de traction et de compression. L'effort de traction se développe dans la semelle supérieure de la poutre assemblée tandis que l'effort de compression agit au niveau de la semelle inférieure. Ainsi, les boulons supérieurs sont soumis à la traction. La compression est transmise par contact direct entre la semelle de la poutre assemblée et la semelle adjacente du poteau.

L'effort de traction transmis par la semelle supérieure de la poutre développe des efforts de traction dans les boulons qui permettent d'assembler la platine d'extrémité à la semelle du poteau. L'effort de traction dans les boulons induit une flexion dans la platine d'extrémité. Dans les domaines élastique et plastique, l'effort de chaque boulon peut transmettre de la poutre assemblée au poteau adjacent est conditionné par la platine d'extrémité, par ces boulons mêmes ou par la combinaison des deux.

### 2.2.1 Rigidité axiale du tronçon en T

Pour le calcul de la rigidité initiale du tronçon en T d'une seule rangée de boulons, nous devons cumuler la contribution de la semelle du poteau (1er tronçon), de la platine d'extrémité (2eme tronçon) et des boulons avec leurs coefficients de rigidité associés en série. Nous en déduisons alors la rigidité de la rangée de boulons de la façon suivante :

$$k_{ini} = \frac{1}{\frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b}} \quad (Eq. 1)$$

Où :

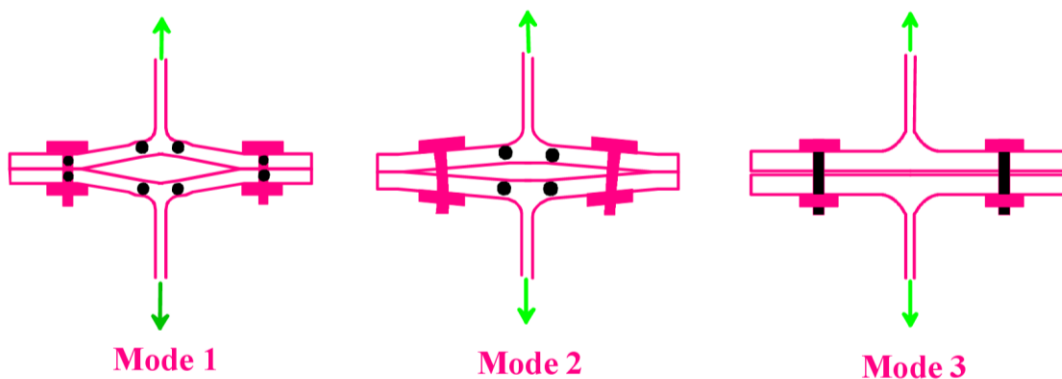
$k_f$ : Rigidité de la semelle du poteau (1<sup>er</sup> tronçon).

$k_p$ : Rigidité de la platine d'extrémité (2<sup>ème</sup> tronçon).

$k_b$  : Rigidité axiale des boulons.

### 2.2.2 Résistance en traction du tronçon en T

Dans le domaine plastique, trois modes de ruines sont envisagés, voir figure 12. Ces modes de ruines sont conditionnés par la résistance de la semelle du tronçon en flexion et des boulons en traction. Ces trois modes de ruine sont représentés d'une manière simple par la ruine plastique de la platine (mode1), la ruine mixte de la platine et des boulons (mode 2) ou la ruine des boulons (mode 3).



*Figure12 : Modes de ruine du tronçon en T*

La résistance à considérer est celle donnée par la valeur minimale de ruine des trois modes.

$$F_{Rd} = \min(F_{TRd1}, F_{TRd2}, F_{TRd3}). \quad (Eq. 2)$$

Celles-ci sont données par les équations :

Mode 1 :(Formule simplifiée) :

- $F_{TRd1} = \frac{4M_p + 2}{m} \quad (Eq. 2.1)$

(Formule alternative) :

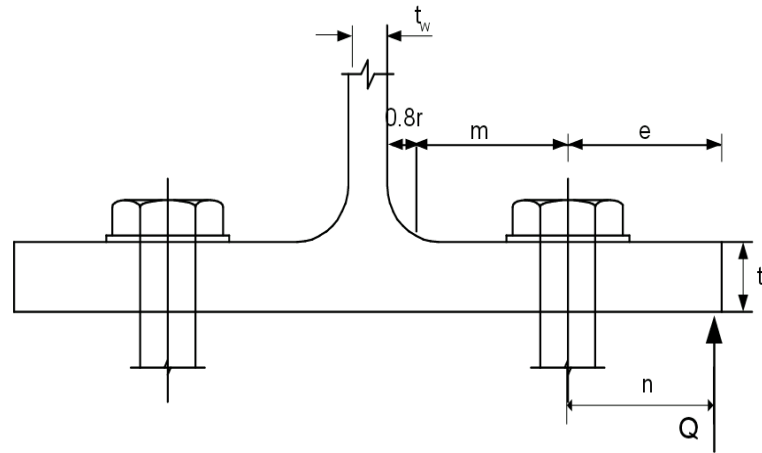
- $F_{TRd1} = \frac{(32n - 2d_w)M_p + 16.n.M_{bp}}{8m.n - d_w(m+n)} \quad (Eq. 2.2)$

Mode 2 :

- $F_{TRd2} = \frac{2.M_p + n.\sum B_{t,Rd}}{m+n} \quad (Eq2.3)$

Mode 3 :

- $F_{TRd3} = \sum B_{t,Rd} \quad (Eq2.4)$



*Figure13 : Caractéristiques géométriques d'un tronçon en T*

Où la valeur de n est délimitée dans l'Eurocode 3 par  $n = \min(e ; 1.25 m)$ ,  $M_p$  et  $M_{bp}$  sont les moments plastiques de la semelle et de la contre-plaque, respectivement. Ils sont calculés en utilisant la valeur de la longueur efficace.

$$M_{pl,1,Rd} = M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25 \sum l_{eff} * t_f^2 * f_y}{\gamma_{m0}} \quad (Eq3)$$

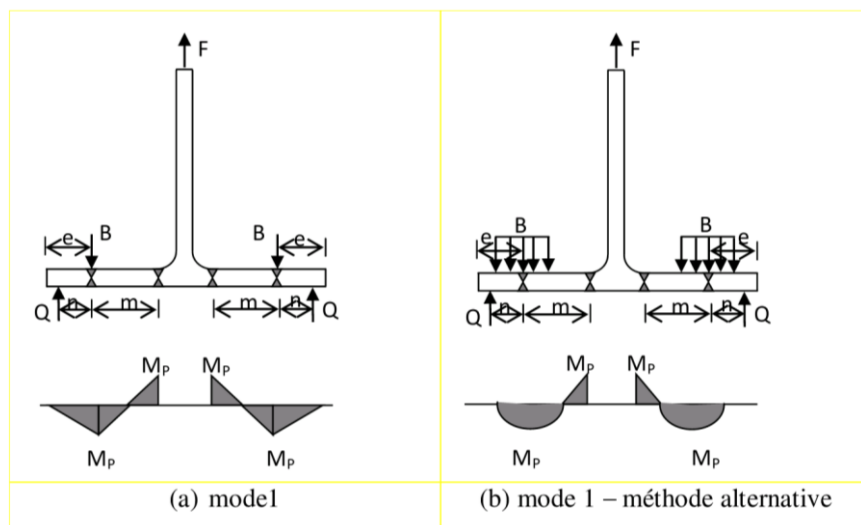
Où:

- $f_y$  est la limite d'élasticité,

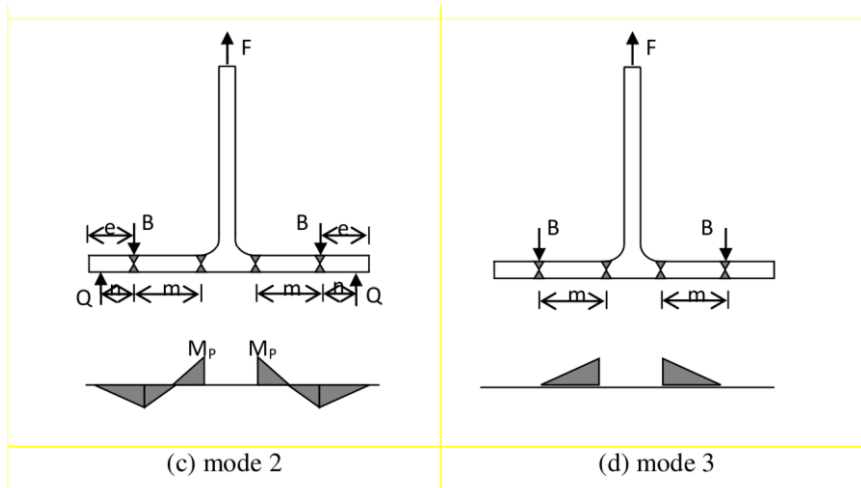
- $t_{bp}$  est l'épaisseur des contre-plaques,
- $d_w$  est le diamètre de la rondelle, de la tête du boulon ou de l'écrou selon la partie qui est en contact avec la semelle,
- $B_{t,Rd}$  est la résistance en traction de tous les boulons dans le tronçon en T.

Dans les modes 1 et 2, la déformation de la semelle du tronçon en T conduit à l'apparition de l'effort de levier dont la position dépend de la rigidité des boulons tendus et de la semelle fléchie. Par contre, la rigidité importante de la semelle dans le troisième mode conduit à une répartition des efforts sans apparition des efforts de levier.

En réalité, les têtes des boulons, les écrous et les rondelles possèdent des diamètres non négligeables et les efforts transmis à la semelle sont répartis sur une certaine zone de contact entre le boulon et la semelle, voir figure 14. Cet effet est traduit dans l'Eurocode 3 sous une forme alternative d'évaluation de la résistance plastique de la semelle. Cette formule est basée sur l'hypothèse d'une distribution uniforme de contraintes sous la tête du boulon, de l'écrou ou de la rondelle. Dans ce cas, la résistance du tronçon en T en mode 1, doit être modifiée en intégrant l'effet de ( $n$  et  $d_w$ ). Nous retrouvons la charge de ruine des tronçons seuls en mode 1.







**Figure 14** : Répartition des moments dans un tronçon en T

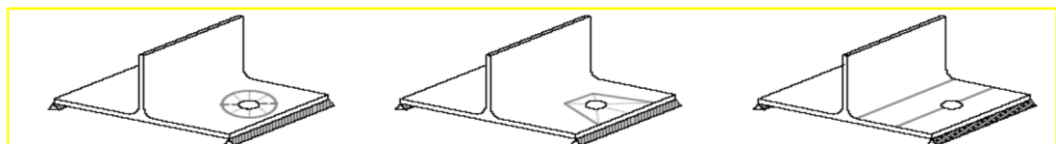
L'avantage de cette procédure est de fournir le mode de ruine associé qui permettrait d'éviter les modes de ruine fragiles.

### 2.2.3 Longueur efficace du tronçon en T

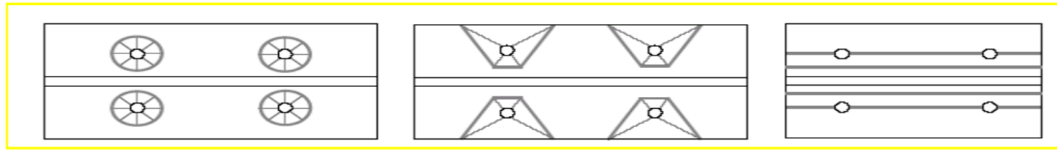
L'équivalence entre le tronçon en T et composante d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité se traduit par la détermination d'une longueur équivalente dite longueur efficace. La longueur efficace d'un tronçon en T équivalent est une longueur théorique et ne comprend pas nécessairement la longueur physique de la composante de base qu'il représente.

La longueur efficace est définie par les schémas des lignes de plastification des différentes rangées de boulons, prises en compte séparément ou en groupe selon la figure 15. Ces lignes de plasticité dépendent de la configuration de l'assemblage et de la disposition des trous.

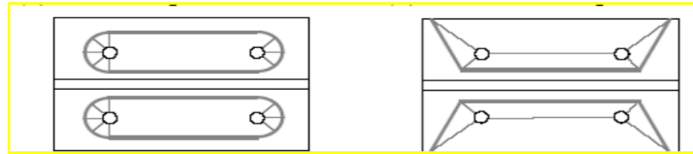
L'approche de l'Eurocode 3 fournit les longueurs efficaces à adopter dans le calcul de la rigidité et de la résistance pour la plupart des assemblages utilisés dans la pratique.



(a) mécanisme circulaire (b) mécanisme non circulaire (c) mécanisme poutre



(a) mécanisme circulaire (b) mécanisme non circulaire (c) mécanisme poutre

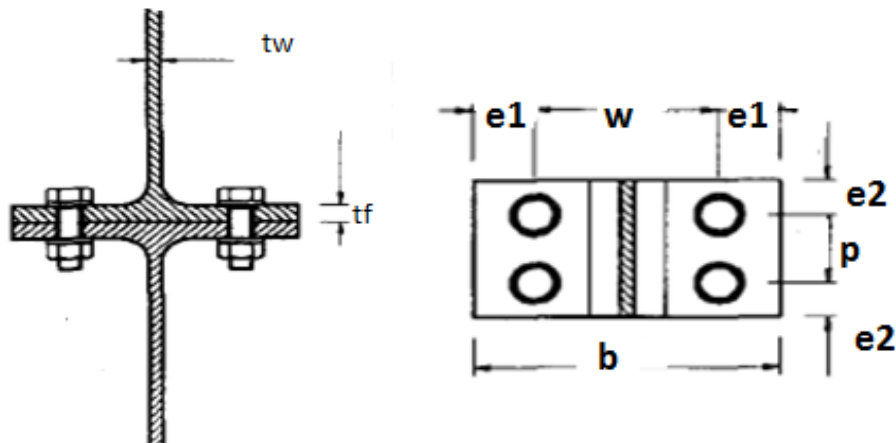


(d) mécanisme circulaire (e) mécanisme non circulaire

**Figure 15:** Schémas des lignes de plastification des tronçons en T (mécanisme individuel et de groupe)

Les longueurs efficaces du tronçon en T associées aux différents types de ruine sont données dans des tableaux dans l'Annexe A

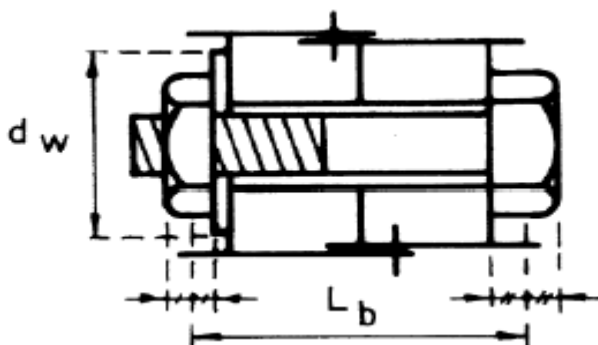
### 3 EXEMPLES D'APPLICATION



#### 3.1 IPE300 [4]

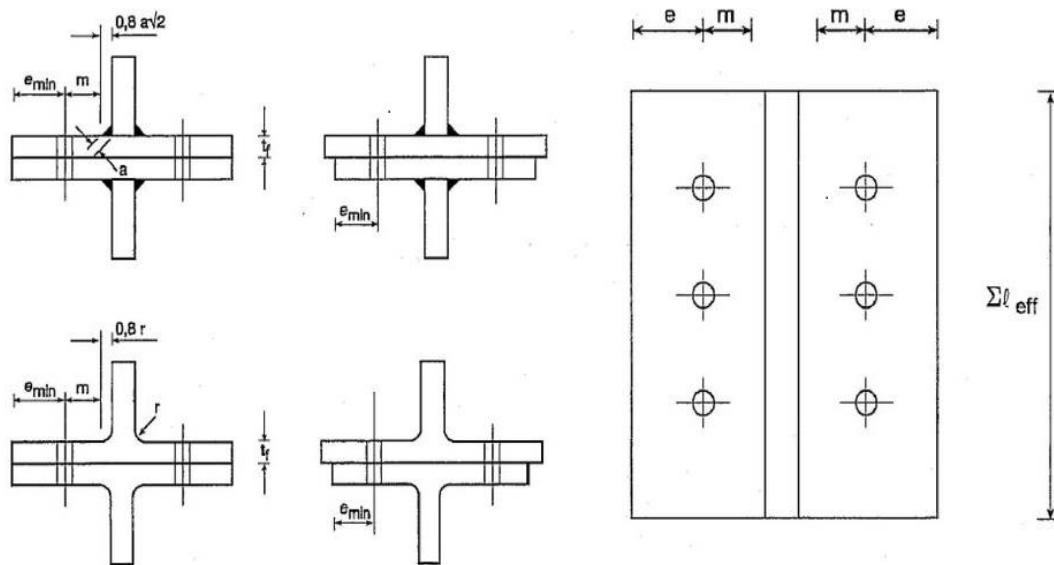
Données :

- $e_1=30$  mm;  $w=90$  mm;  $e_2=40$  mm;  $p=80$  mm;  $b=150$  mm
- Epaisseur de la semelle :  $t_f = 10.7$  mm
- Epaisseur de l'âme :  $t_w = 7.1$  mm
- Diamètre de boulon  $d=12$  mm avec une classe de 8.8
- Epaisseur de rondelle  $t_r = 2,4$  mm
- Epaisseur de la tête et de l'écrou :  $t_h = t_e = 8$  mm
- Longueur utile du boulon :  $L_b = \sum t_f + 2t_r + 0.5(t_h + t_e)=34,2$  mm



##### 3.1.1 Calcul de résistance des tronçons en T

La résistance de calcul du tronçon en T ( $F_{Rd}$ ) est donnée par la plus petite des valeurs correspondant aux trois modes de ruine donnée par (Eq2)



**Figure 16** : Variétés de caractéristiques géométriques des tronçons en T

Les trois modes de ruine peuvent apparaître si la rigidité du boulon est grande par rapport à celle de la semelle en flexion. Cette condition est traduite selon l'Eurocode 3 par l'inégalité suivante ( $L_b < L_b^*$ ). Si les effets de levier n'existent pas, un mode de ruine supplémentaire est à considérer ou les rotules plastiques apparaissent au niveau du congé de raccordement.

Les composantes concernées sont la semelle en flexion et les boulons en traction, pour les rigidités, 2 tronçons en T disposés en série sont considérés. L'acier de tronçon est de nuance Fe360.

#### Tronçon à une rangée de boulons

- $e_2 = 40$  mm.
- $e_1 = e = 30$  mm.
- $m = b/2 - e_1 - 0,8r - t_w/2 = 150/2 - 30 - 0,8(15) - 7,1/2 = \mathbf{29,45}$  mm.
- $n = \min(e; 1,25m) = \mathbf{30}$  mm.

Pour les tronçons en té, une étape importante concerne le calcul des longueurs efficaces en considérant les mécanismes de ruine, individuelles ou en groupe, et de forme circulaires ou non circulaires. Les formules de calcul pour le tronçon traité ici sont celles des semelles des poteaux non raidies (**Annexe A**).

- $l_{eff,cp} = \min(2\pi m; \pi m + 2e_2) = \min(185,04; 132,5) = \mathbf{132,5}$  mm

- $l_{\text{eff,nc}} = \min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + e_2) = \min(155,3 ; 97,65) =$   
**97,65 mm**
- $l_{\text{eff,1}} = \min(l_{\text{eff,cp}} ; l_{\text{eff,nc}}) =$  **97,65 mm**
- $l_{\text{eff,2}} = l_{\text{eff,nc}} =$  **97,65 mm**

Le mécanisme non circulaire se développe pour une énergie plus faible que le mécanisme circulaire. Ainsi, la même longueur efficace est obtenue pour les modes 1 et 2. A noter que cette longueur est supérieure à la longueur réelle du tronçon en T. C'est cette dernière que sera prise en compte ( $l_{\text{eff}} =$  **80 mm**).

Les formules de calcul de résistance avec les trois modes cités ci-dessus sont basées sur des mécanismes avec développement de l'effet de levier. L'effet de levier se produit si le rapport entre la rigidité axiale du boulon et la rigidité flexionnelle de la platine (semelle) dépasse une certaine valeur, ce qui est le cas de la majorité des assemblages de structures. Ceci est traduit par une longueur « seuil » du boulon donnée par l'expression suivante :

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 \cdot A_s}{\sum l_{\text{eff},1} \cdot t_f^3} = \frac{8,8 \times 29,45^3 \times 84,3}{80 \times 10,7^3} = \mathbf{193,3 \text{ mm}}$$

Avec  $A_s$  est la section de la partie fileté (Annexe B)

Dans notre cas,  $L_b < L_b^*$  l'effet de levier doit être pris en compte.

**3.1.1.1 Le moment résistant plastique** « d'une rotule » du tronçon en T est donnée par l'expression suivante :

$$M_{\text{pl},1,\text{Rd}} = M_{\text{pl},2,\text{Rd}} = \frac{0,25 \sum l_{\text{eff}} t_f^2 f_y}{\gamma_{\text{mo}}} = \frac{0,25 \times 80 \times 10,7^2 \times 235}{1,0} = \mathbf{538,1 \text{ kN.mm}}$$

**3.1.1.2 La résistance de calcul à la traction d'un boulon** est donnée par :

$$B_{\text{t,Rd}} = \frac{k_2 f_{\text{ub}} A_s}{\gamma_{\text{m2}}} = \frac{0,9 \times 800 \times 84,3}{1,0} = \mathbf{48,6 \text{ kN}}$$

**3.1.1.3 Résistance de la semelle du tronçon en T (3modes de ruine)**

Mode1 :

$$F_{\text{T Rd1}} = \frac{4M_p}{m} = \frac{4 \times 538,1}{29,45} = \mathbf{73,1 \text{ kN}}$$

Mode2 :

$$F_{\text{T Rd2}} = \frac{2 \cdot M_p + n \cdot \sum B_{\text{t,Rd}}}{m + n} = \frac{2 \times 538,1 + 30 \times 2 \times 48,6}{29,45 + 30} = \mathbf{116,2 \text{ kN}}$$

Mode3 :

$$F_{T Rd3} = \sum B_{t,Rd} = 2 \times 48,6 = \mathbf{97.2 \text{ kN}}$$

Le mode1 est dominant pour le tronçon calculé avec:  $F_{Rd} = F_{T Rd1} = \mathbf{73.1 \text{ kN}}$

### 3.1.2 Calcul de rigidité

L'assemblage considéré est constitué de deux tronçons mis dos à dos et assemblés par deux ou quatre boulons, les trois composantes sont donc disposées en série. Leurs rigidités se calculent de la façon présentée ci-après. Le calcul effectué en considérant une rangée de deux boulons.

– Rigidité de la semelle du tronçon en flexion

$$k_f = \frac{E \cdot 0,9 I_{\text{eff}} t_f^3}{m^3} = \frac{210 \times 0,9 \times 80 \times 10,7^3}{29,45^3} = \mathbf{725.2 \text{ kN/mm}}$$

– Rigidité du boulon en traction (elle dépend de la section et de la longueur utile du boulon)

$$k_b = E \cdot 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 1,6 \times 210 \times \frac{84,3}{34,2} = \mathbf{828.2 \text{ kN/mm}}$$

– Rigidité équivalente de deux tronçons attachés par deux boulons

$$k_{\text{ini}} = \frac{1}{\frac{2}{k_f} + \frac{1}{k_b}} = \frac{1}{\frac{2}{725.2} + \frac{1}{828.2}} = \mathbf{213.2 \text{ kN/mm}}$$

### 3.1.3 Force de Levier

$$Q = \frac{F}{2} \frac{\left[ \frac{n \cdot m^2}{2} \right]}{\left[ \frac{n^2}{3} (n + 3m) \right]} = \frac{73.1}{2} \left[ \frac{\frac{30 \times 29,45^2}{2}}{\frac{30^2}{2} (30 + 3 \times 29,45)} \right] = \mathbf{8.9 \text{ kN}}$$

### 3.1.4 Force élastique

$$F_{\text{el}} = \frac{4M_p}{m} \left( \frac{3m + n}{3m + 2n} \right) = \frac{4 \times 538.1}{29,45} \times \frac{3 \times 29,45 + 30}{3 \times 29,45 + 2 \times 30} = \mathbf{113 \text{ kN}}$$

## 3.2 HEA 260

Données :

- $e_1=58.1 \text{ mm}$ ;  $w=143.8 \text{ mm}$ ;  $e_2=59.4 \text{ mm}$ ;  $p=118.8 \text{ mm}$ ;  $b=260 \text{ mm}$

- Epaisseur de la semelle :  $t_f = 12.5 \text{ mm}$
- Epaisseur de l'âme :  $t_w = 7.5 \text{ mm}$
- Diamètre de boulon  $d = 24 \text{ mm}$  avec une classe de 8.8
- Epaisseur de rondelle  $t_r = 2 \text{ mm}$
- Epaisseur de la tête et de l'écrou :  $t_h = t_e = 5 \text{ mm}$
- Longueur utile du boulon :  $L_b = \sum t_f + 2t_r + 0.5(t_h + t_e) = 49 \text{ mm}$ 
  - $m = 48.95 \text{ mm}$
  - $n = \min(e ; 1.25m) = 58.1 \text{ mm}$
  - $l_{\text{eff}} = 118.8 \text{ mm}$
- $L_b^* = \frac{8,8m^3 \cdot A_s}{\sum l_{\text{eff},1} \cdot t_f^3} = \frac{8,8 \times 48.95^3 \times 353}{237.6 \times 12.5^3} = 785.1 \text{ mm}$ . ( $L_b < L_b^*$ ) l'effet de levier doit être pris en compte. [2]

### 3.2.1 Calcul de résistance

#### 3.2.1.1 Le moment résistant plastique

$$\begin{aligned} M_{pl,1,Rd} = M_{pl,2,Rd} &= \frac{0.25 \sum l_{\text{eff}} t_f^2 f_y}{\gamma_{m0}} \\ &= \frac{0.25 \times 237,6 \times 12,5^2 \times 235}{1,0} = 2181.1 \text{ kN.mm} \end{aligned}$$

#### 3.2.1.2 La résistance de calcul à la traction d'un boulon

$$B_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 \times 800 \times 353}{1,0} = 254.3 \text{ kN}$$

#### 3.2.1.3 Résistance de la semelle du tronçon en T (3modes de ruine)

Mode 1 :

$$F_{T,Rd1} = \frac{4M_p}{m} = \frac{4 \times 2181.1}{48.95} = 178.2 \text{ kN}$$

Mode2 :

$$F_{T,Rd2} = \frac{2 \cdot M_p + n \cdot \sum B_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 2181.1 + 58.1 \times 2 \times 254.3}{48.95 + 58.1} = 261.5 \text{ kN}$$

Mode 3 :

$$F_{T,Rd3} = \sum B_{t,Rd} = 2 \times 254.3 = 508.6 \text{ kN}$$

Le model est dominant pour le tronçon calculé avec:  $F_{Rd} = F_{T Rd1} = 178.2 \text{ kN}$

### 3.2.2 Calcul de rigidité

– Rigidité de la semelle du tronçon en flexion

$$k_f = \frac{E 0,9 I_{\text{eff}} t_f^3}{m^3} = \frac{210 \times 0,9 \times 237.6 \times 12.5^3}{48.95^3} = 747.8 \text{ kN/mm}$$

– Rigidité du boulon en traction (elle dépend de la section et de la longueur utile du boulon)

$$k_b = E 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 1,6 \times 210 \times \frac{353}{49} = 2420.6 \text{ kN/mm}$$

– Rigidité équivalente de deux tronçons attachés par deux boulons

$$k_{\text{ini}} = \frac{1}{\frac{2}{k_f} + \frac{1}{k_b}} = \frac{1}{\frac{2}{747.8} + \frac{1}{242.1}} = 281.9 \text{ kN/mm}$$

### 3.2.3 Force de Levier

$$Q = \frac{F}{2} \frac{\left[ \frac{n \cdot m^2}{2} \right]}{\left[ \frac{n^2}{3} (n + 3m) \right]} = \frac{178.2}{2} + \left[ \frac{\frac{58.1 \times 48.95^2}{2}}{\frac{58.1^2}{2} (58.1 + 3 \times 48.95)} \right] = 89.2 \text{ kN}$$

### 3.2.4 Force élastique

$$F_{el} = \frac{4M_p}{m} \left( \frac{3m + n}{3m + 2n} \right) = \frac{4 \times 2181.1}{48.95} \times \frac{3 \times 48.95 + 58.1}{3 \times 48.95 + 2 \times 58.1} = 239.6 \text{ kN}$$

## 3.3 HEA300

Données :

- $e_1=71.7\text{mm}$ ;  $w=156.6\text{mm}$ ;  $e_2=61.4\text{mm}$ ;  $p=122.8\text{mm}$ ;  $b=300\text{mm}$ .
- Epaisseur de la semelle :  $t_f = 14\text{mm}$ .
- Epaisseur de l'âme :  $t_w = 8.5\text{mm}$ .
- Diamètre de boulon  $d=27\text{mm}$  avec une classe de 8.8.
- Epaisseur de rondelle  $t_r = 5.1\text{mm}$  .
- Epaisseur de la tête et de l'écrou :  $t_h = t_e = 17\text{mm}$ .

Longueur utile du boulon :  $L_b = \sum t_f + 2t_r + 0.5(t_h + t_e)=55.2\text{mm}$

- $m = 52.45\text{mm}$ .



- $n = \min(e ; 1.25m) = 65.56 \text{ mm}$

- $l_{\text{eff}} = 122.8 \text{ mm}$

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 \cdot A_s}{\sum l_{\text{eff}} \cdot t_f^3} = \frac{8,8 \times 52.45^3 \times 459}{122.8 \times 14^3} = 1729.6 \text{ mm. } (L_b < L_b^*) \text{ L'effet de levier doit}$$

être pris en compte

### 3.3.1 Calcul de résistance

#### 3.3.1.1 Le moment résistant plastique

$$\begin{aligned} M_{\text{pl},1,\text{Rd}} = M_{\text{pl},2,\text{Rd}} &= \frac{0.25 \sum l_{\text{eff}} t_f^2 f_y}{\gamma_{m0}} \\ &= \frac{0.25 \times 122.8 \times 14^2 \times 235}{1,0} = 1414.1 \text{ kN.m} \end{aligned}$$

#### 3.3.1.2 La résistance de calcul à la traction d'un boulon

$$B_{\text{t,Rd}} = \frac{k_2 f_{\text{ub}} A_s}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 \times 800 \times 459}{1,0} = 264.4 \text{ kN}$$

#### 3.3.1.3 Résistance de la semelle du tronçon en T (3modes de ruine)

Mode1 :

$$F_{\text{T Rd1}} = \frac{4M_p}{m} = \frac{4 \times 1414.1}{52.45} = 215.7 \text{ kN}$$

Mode2 :

$$F_{\text{T Rd2}} = \frac{2 \cdot M_p + n \cdot \sum B_{\text{t,Rd}}}{m + n} = \frac{2 \times 1414.1 + 65.56 \times 2 \times 264,4}{52.45 + 65.56} = 341.7 \text{ kN}$$

Mode3 :

$$F_{\text{T Rd3}} = \sum B_{\text{t,Rd}} = 2 \times 264.4 = 565,62 \text{ kN}$$

Le mode1 est dominant pour le tronçon calculé avec  $F_{\text{Rd}} = F_{\text{T Rd1}} = 215.7 \text{ kN}$

### 3.3.2 Calcul de rigidité

– Rigidité de la semelle du tronçon en flexion

$$k_f = \frac{E 0,9 l_{\text{eff}} t_f^3}{m^3} = \frac{210 \times 0,9 \times 245.6 \times 14^3}{52.45^3} = 882750.14 \text{ mm}$$

– Rigidité du boulon en traction (elle dépend de la section et de la longueur utile du boulon)

$$k_b = E 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 1,6 \times 210 \times \frac{459}{55.2} = 2793913.04 \text{ mm}$$

– Rigidité équivalente de deux tronçons attachés par deux boulons

$$k_{ini} = \frac{1}{\frac{2}{k_f} + \frac{1}{k_b}} = \frac{1}{\frac{2}{882.8} + \frac{1}{279.4}} = 165 \text{ kN/mm}$$

### 3.3.3 Force de Levier

$$Q = \frac{F}{2} \frac{\left[ \frac{n \cdot m^2}{2} \right]}{\left[ \frac{n^2}{3} (n + 3m) \right]} = \frac{215.7}{2} + \left[ \frac{\frac{65.56 \times 52.45^2}{2}}{\frac{65.56^2}{2} (65.56 + 3 \times 52.45)} \right] = 107.8 \text{ kN}$$

### 3.3.4 Force élastique

$$F_{el} = \frac{4M_p}{m} \left( \frac{3m + n}{3m + 2n} \right) = \frac{4 \times 1414.1}{52.45} \times \frac{3 \times 52.45 + 65.56}{3 \times 52.45 + 2 \times 65.56} = 396 \text{ kN}$$

## 4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques distincts assemblages répandues dans les constructions en acier, à savoir, les assemblages poutre-poteau, assemblages de continuité de poutres, assemblages de continuité de poteaux et assemblages pied du poteau, ainsi que la classification des assemblages. Nous avons également analysé le comportement des tronçons en T qui constituent des composantes majeures dans la zone tendue des assemblages soumis à la flexion, une analyse du fonctionnement de tronçon en T.

Ensuite, nous avons donné les formules qui permettent de calculer la rigidité, la résistance et les efforts internes d'un tronçon en T.

D'après les résultats analytiques nous avons remarqué que la force résistante et la rigidité initial des tronçons T1 T2 et T3 augmente selon les caractéristiques de chaque tronçon court et long.

# **Chapitre 2**

## **ETAT ACTUEL SUR LES ASSEMBLAGES EN T**

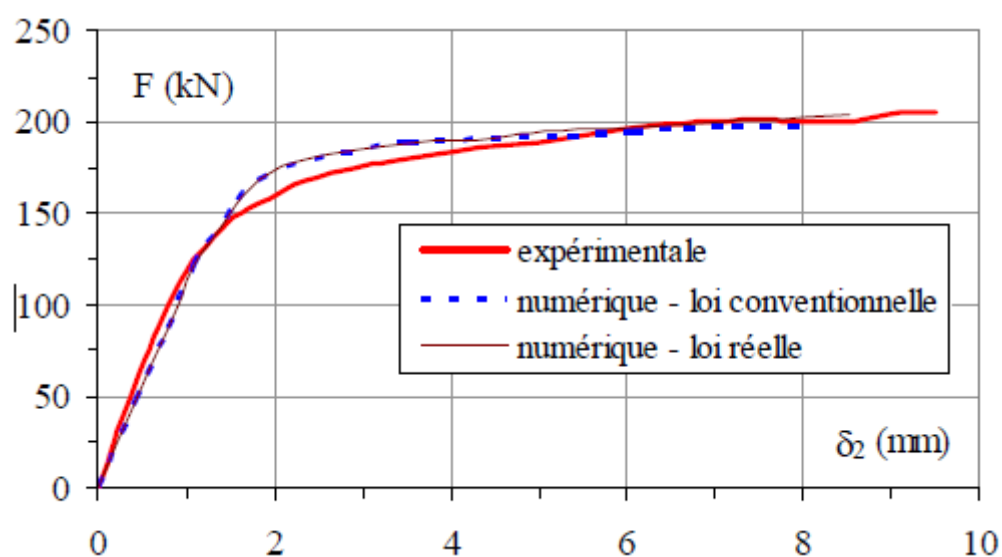
# 1 INTRODUCTION

Les tronçons en T ont fait l'objet de plusieurs travaux de recherche qu'ils soient expérimentaux où en modélisation. Toutefois, les études expérimentales ne fournissent dans certains cas que des informations limitées, notamment, en ce qui concerne l'évolution des efforts de levier, des efforts de contact et des zones de plastification en cours de chargement. Par conséquent, la méthode des éléments finis représente un outil efficace qui permet d'approfondir les connaissances dans ce domaine et de fournir le complément nécessaire pour calibrer l'approche actuelle de l'Eurocode 3. La modélisation des tronçons en T seuls par la méthode des éléments finis a fait l'objet de plusieurs travaux de recherches. C'est ainsi que dans le cadre du groupe de travail "Civil Engineering Structural Connections", cette tâche a été proposée comme référence pour modéliser les assemblages métalliques boulonnés. Dans ce chapitre, nous présentons quelques résultats publiés afin de justifier le choix de notre modélisation.

## 2 Travaux de « O. S. Bursi a 1997 » [8]

### 2.1 INTRODUCTION

Ils ont simulé le comportement non linéaire des tronçons en T relativement court par l'utilisation du logiciel LAGAMINE d'éléments finis volumiques pour le tronçon et le boulon en considérant trois éléments dans l'épaisseur de la semelle.



*Figure1 : Courbe Force-Déplacement du tronçon.*

Ils ont effectué une analyse numérique pour montrer l'influence de plusieurs paramètres numériques et physiques sur le comportement global.

## **2.2 CONCLUSION**

Dans ce contexte, les conclusions suivantes ont été tirées :

La prise en compte de la courbe réelle de traction des matériaux ne modifie pas significativement les résultats par rapport à la courbe conventionnelle. Cela est dû au fait que les zones soumises aux grandes déformations dans le tronçon en T sont limitées.

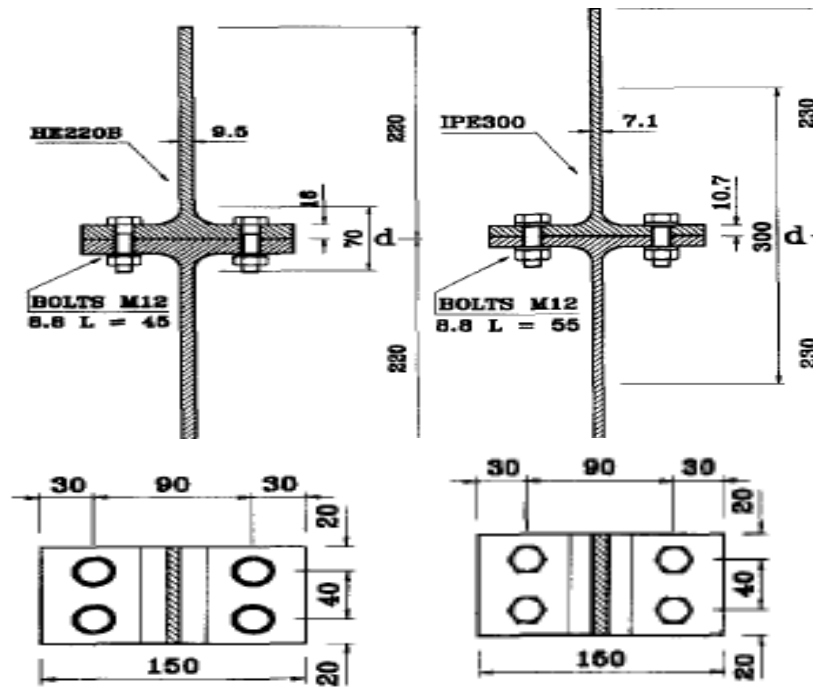
Les courbes force-déplacement obtenues à partir de la simulation numérique ne montrent pas une différence significative lorsque les éléments de contact entre le bas de la semelle et la fondation sont remplacés par des appuis simples sur la partie de la semelle située entre l'axe du boulon et l'extrémité de la semelle. Cela signifie que la réponse globale du tronçon en T est seulement pilotée par le comportement des éléments volumiques.

La réponse globale n'est pas sensible aux conditions de frottement entre la tête de boulon et la semelle du tronçon, que le boulon soit précontraint ou non.

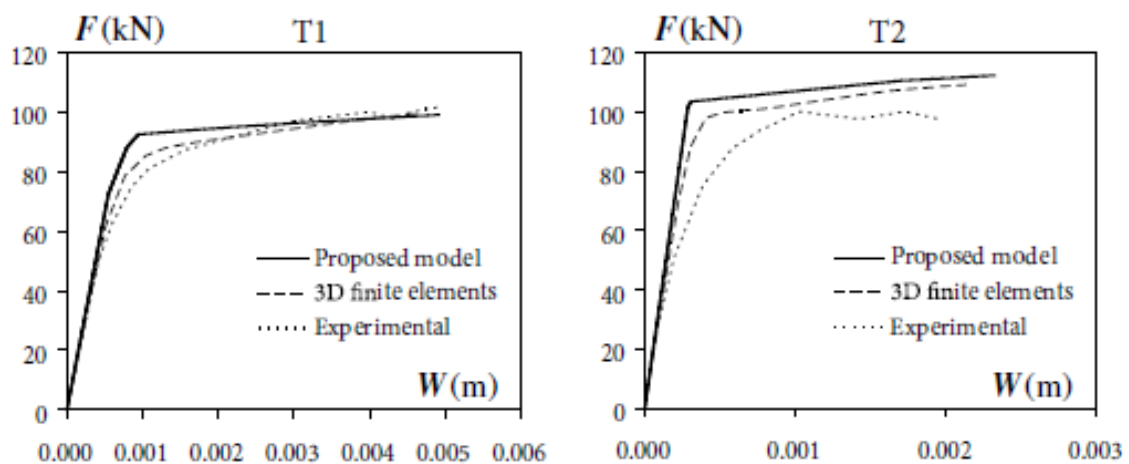
## **3 Travaux de «Minas E. Lemonis and Charis J. Gantes 2006 » [6]**

### **3.1 INTRODUCTION**

Un modèle analytique incrémental est proposé pour la prédiction de la courbe force déplacement d'un assemblage en T. Ce modèle est conçu dans un programme informatique plutôt que sur le calcul manuel. Les tests qu'ils ont utilisés sont ceux de Tronçons T1 et T2 menés par [8].qu'ils sont aussi modélisés par simulation d'éléments finis 3D réalisée avec ADINA v.8 [ADINA 2004].

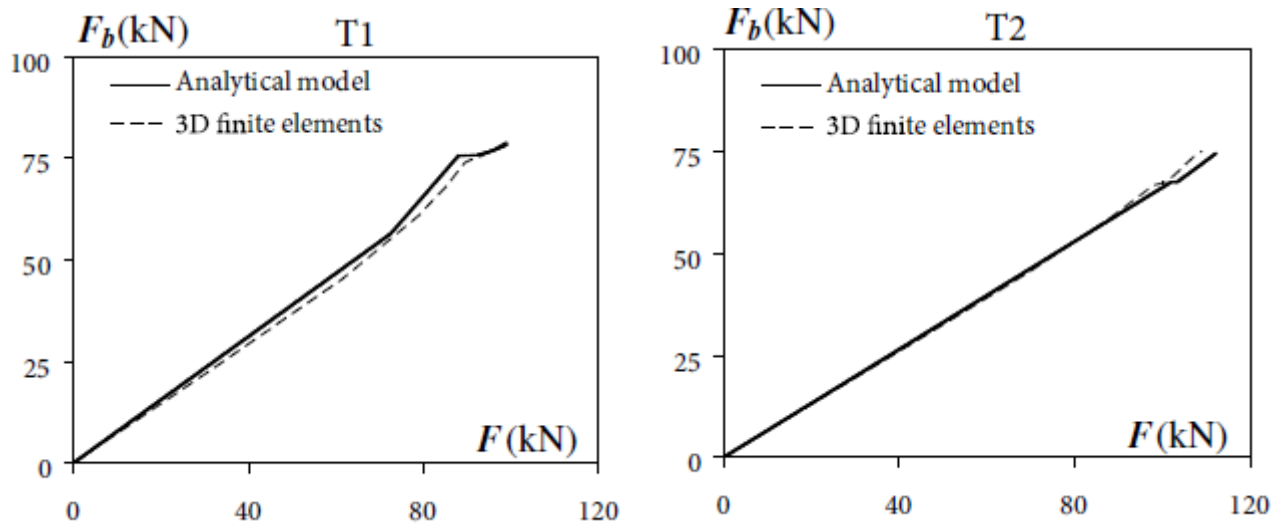


*Figure 2 : Caractéristiques géométriques des tronçons T1 (IPE300) et T2 (HE220B)*



*Figure 3 : Courbe Force-Déplacement des Tronçons T1 et T2*

Pour la rigidité initiale T1, La gamme de genoux est plus nette dans le modèle proposé ainsi que dans le Modèle 3D à éléments finis. Pour T2, la courbe du modèle proposé est assez proche de l'élément fini 3D.



**Figure4 :** Force dans le boulon en fonction de la force appliquée

La force axiale pour le boulon donné par son modèle est comparé aux résultats des éléments finis 3D pour les deux tests. Le modèle proposé semble très performant dans ce contexte, compte tenu notamment de la méthode simplifiée pour inclure la contribution du boulon, par rapport à la méthode des éléments finis plus complexe.

Pour l'étude paramétrique, ils ont pris 12 tronçons avec des différentes caractéristiques géométriques et ils ont utilisés cinq éléments finis, Le chargement a été appliqué par des déplacements prescrits sur la surface supérieure de l'âme.

### 3.2 CONCLUSION :

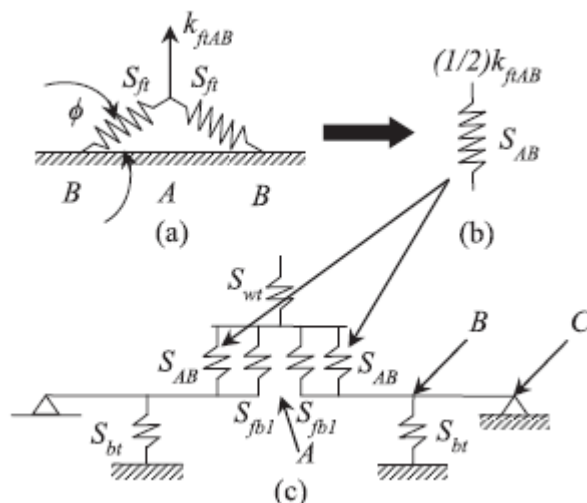
La courbe analytique correspond étroitement à celle numérique. Les caractéristiques de la rigidité initiale, de la force ultime et du déplacement final sont prédites dans une marge d'erreur assez étroite. Pour le déplacement ultime, qui est La caractéristique la plus difficile à calculer de manière analytique, l'erreur maximale ne dépasse pas 30% pour l'un des Tronçons et est beaucoup plus faible pour la plupart d'entre eux. Ce modèle offre plusieurs avantages dans ce contexte, l'efficacité du modèle s'est révélée très satisfaisante dans les évaluations comparant les résultats expérimentaux et numériques. Globalement, le modèle proposé constitue un outil précieux pour l'estimation du comportement de Tronçon en T, produisant des résultats comparables à des approches beaucoup plus complexes et coûteuses telles que 3D fini Analyse des éléments.

## 4 Travaux de “ZhenyuWang, Jinfan Zhang and Jianqun Jiang 2016 » [7]

### 4.1 INTRODUCTION

Un nouveau modèle de composant multi ressorts (MSC) est proposé pour évaluer le comportement non linéaire des tronçons en T à la traction. La précision du modèle proposé est vérifiée par une série de tests à la traction. En outre, des modèles numériques ont également été construits et d'autres discussions sont faites en comparant les prévisions des éléments finis par rapport au test et aux résultats analytiques.

- **MODELE MSC POUR LES TRONÇONS EN T :** Le Tronçon en T a été analysé et divisé en plusieurs composants, les propriétés mécaniques de chaque composant ont été calculées. En utilisant des ressorts avec ces propriétés mécaniques, le modèle MSC pourrait être établi. Et la courbe de force déplacement du Tronçon en T peut être réalisée.

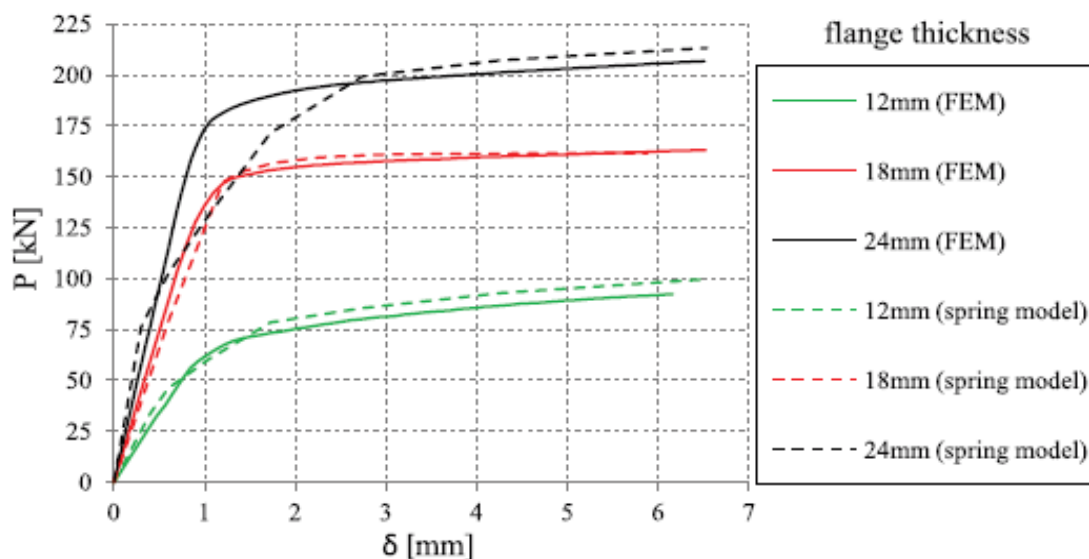


**Figure 5:** modèle MSC d'un tronçon en T à la traction

- **MEF TRIDIMENSIONNELLE PAR ABAQUS :** Le modèle 3D tridimensionnel peut être construit en utilisant le logiciel d'analyse ABAQUS
- **VALIDATION DU MODELE MSC :** Afin de vérifier le modèle MSC proposé, les résultats analytiques sont comparés à ceux de l'analyse EF et les tests La rigidité initiale du modèle MSC et les résultats de la méthode EF sont légèrement supérieurs aux résultats du test, cette différence peut également être due au manque d'interactions transversales entre les ressorts. Ces performances sont bien saisies par le modèle MSC et de bons accords sont observés entre les prévisions expérimentales, numériques et analytiques
- **ÉTUDES PARAMETRIQUES DU MODELE MSC :** Les courbes de force-déplacement avec différentes épaisseurs de la semelle ont démontrées que la capacité de



charge du tronçon en T est sensible à l'épaisseur de la semelle. Les études paramétriques montrent que les résultats du modèle MSC correspondent bien aux résultats MEF 3D

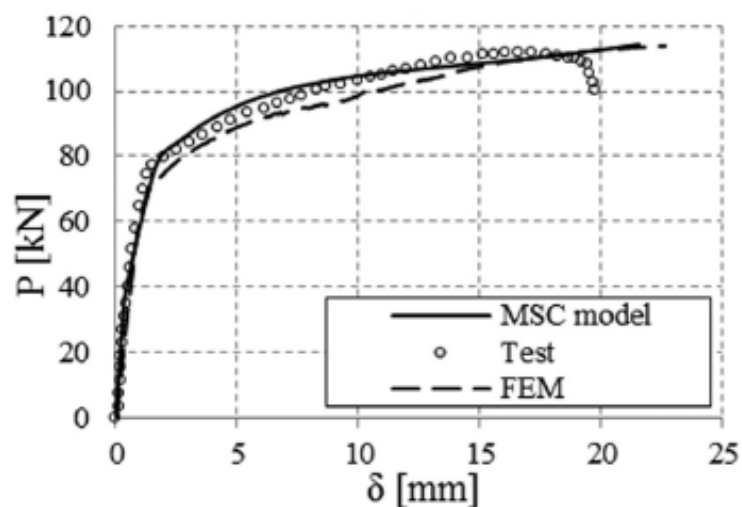


**Figure 6:** Courbe force déplacement des tronçons avec différents épaisseurs de semelle

#### 4.2 CONCLUSION :

Le développement du modèle analytique et l'étude expérimentale ainsi que l'analyse EF ont été présentés dans cet article, et les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- (1) Un système multi-ressort, est proposé pour la modélisation des composants. C'est un moyen plus précis et efficace de simuler le comportement non linéaire du tronçon en T.
- (2) Une série d'expériences sur les assemblages en T ont été effectuées pour vérifier et étalonner le modèle proposé. Les résultats, y compris les courbes de force déplacement, les tests, le modèle 3D MEF et MSC correspondent les uns aux autres.



**Figure 7 :** courbe force déplacement d'un spécimen

# **Chapitre 3**

## **MODES D'ASSEMBLAGES**

## 1 INTRODUCTION

En construction métallique, nous disposons de plusieurs modes d'assemblages, à savoir, le soudage, le rivetage, le boulonnage par boulons ordinaires non précontraints et le, boulonnage par boulons précontraints.

**La soudure** assure une liaison de matière qui permet d'assurer la continuité directe entre deux éléments et de ce fait, elle garantit une bonne transmission des sollicitations. Les soudures se caractérisent par une rigidité importante car le métal constituant les soudures possède des caractéristiques mécaniques au moins égales à celles des matériaux qu'elles assemblent. Cependant, la soudure présente certains inconvénients.

Le premier est que son refroidissement crée à son voisinage des contraintes résiduelles.

Le deuxième est que le métal de base doit être soudable. Le troisième est que le soudage nécessite une main d'œuvre qualifiée et un matériel spécifique.

**Le rivet** a aujourd'hui laissé la place aux boulons. Son installation était plus complexe que celle des procédés d'assemblage par vissage et il présente une difficulté de démontage par des moyens usuels.

**Le boulon** ordinaire est de nos jours, le procédé d'assemblage parmi les plus couramment utilisé en construction métallique. Il offre, en effet, trois avantages importants : d'une part un coût réduit et d'autre part un allongement important avant rupture sans oublier un démontage des pièces assemblées.

Les boulons précontraints à haute résistance possèdent des caractéristiques mécaniques élevées. De plus, ils se caractérisent par une bonne résistance aux efforts de cisaillement par frottement.

Une attention particulière est portée aux boulons et à leurs spécificités dimensionnelles et technologiques. Dans ce contexte, nous allons présenter les différents modes de transmission des efforts vis-à-vis des assemblages boulonnés. Nous distinguons deux types d'assemblages boulonnés qui dépendent de la direction des efforts appliqués par rapport à l'axe des boulons, les premiers sont ceux où les boulons sont ordinaires, les seconds sont ceux où les boulons sont précontraints.

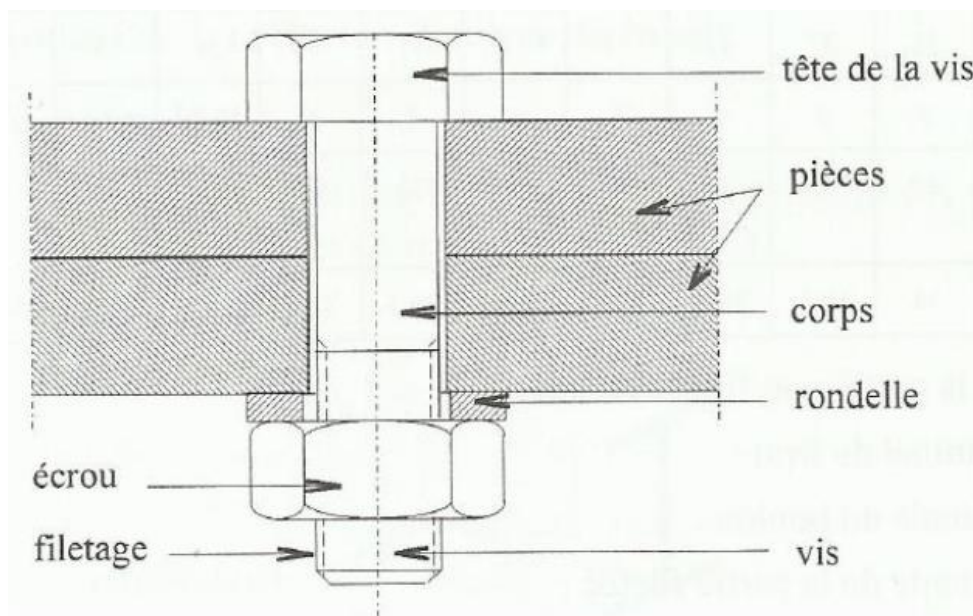
## 2 DEFINITION D'UN BOULON

Un boulon est un organe d'assemblage constitué d'une vis à filetage uniforme et extrémité plate (ou tige filetée), et d'un écrou (et éventuellement d'une rondelle). Dans le langage commun, le mot «boulon» est souvent employé à tort pour désigner un écrou seul.

Boulon = Vis +Écrou

Boulonnage : Action d'assembler plusieurs pièces entre elles à l'aide de boulons.

### 2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques des boulons



*Figure1 : Différents composantes de pièces boulonnées*

La désignation d'un boulon se fait par le diamètre **d** en *millimètre* de la partie non filetée du corps du boulon précédé de la lettre majuscule **M**. (exemple, si  $d=24\text{mm}$ , le boulon est désigné par **M24**).

#### 2.1.1 Caractéristiques Géométriques

Plusieurs caractéristiques géométriques sont indispensables à la conception et à la vérification des assemblages boulonnés. Pour les diamètres les plus utilisés, les caractéristiques principales sont données dans le tableau. (Annexe B).

### 2.1.2 Caractéristiques Mécaniques

Pour éviter une multitude de boulon, l'EC3 n'autorise qu'une série finie de classe mécaniques de boulons. Les caractéristiques mécaniques des boulons nécessaires aux calculs sont : la limite d'élasticité  $f_{yb}$  et la résistance à la traction  $f_{ub}$ . Chacune des sept classes autorisées est désignée par deux nombres. Pour une classe X.Y donnée,  $f_{yb}$  est égale à 10 XY et  $f_{ub}$  à 100 X, toutes deux exprimées en MPA .Le tableau 3(Annexe B) donne les valeurs de  $f_{yb}$  et  $f_{ub}$  pour chaque classe.

### 2.2 Formes et dimensions

Il existe un grand nombre de boulons ayant des formes différentes :

- Boulons à tête hexagonale,
- Boulons à tête cylindrique,
- Boulons à tête ronde,
- Boulons à tête fraisée,
- Boulons à œil etc. ....

Les formes et dimensions des écrous, vis et rondelles, sont normalisées.

En construction métalliques, les plus employés sont les boulons à tête hexagonale. Les boulons à tête fraisée sont à éviter. Les autres boulons sont très rarement (ou pas du tout) utilisés.

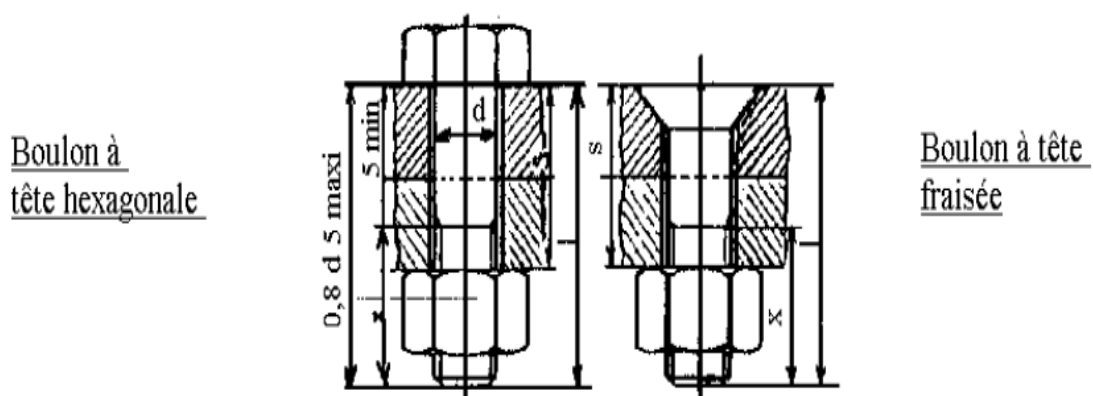


Figure2 : Quelques formes des boulons

Le diamètre nominal ( $\emptyset$ ) d'un boulon est celui de sa tige lisse. En construction métallique on emploie les  $\emptyset$  normalisés suivants, qui correspond à ceux des rivets normalisés :

Ø- 10 - 12 - 14 - 16 - 18 - 20 - 24 (courant).

Ø- 27 - 30 - 33 - 36 - 39 - 42 - 45 - 48 (pour boulons d'ancrage ).

Les dimensions des trous présentant un jeu allant de 0,5 à 2 mm, doivent être choisies parmi les Ø normalisés de forets.

### 2.3 La fabrication

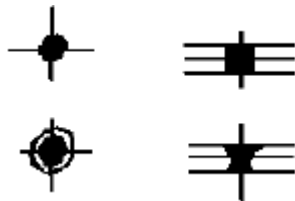
On distingue les boulons bruts et les boulons calibrés.

1°) Boulons bruts : la partie filetée seule est usinée, la tige est laissée à l'état brut. Ces boulons se posent avec un jeu, variant selon le Ø, de 0,5 à 2mm par rapport au trou. Ces boulons s'emploient dans tous les travaux courants de constructions métalliques.

2°) Boulons calibrés : Ils sont matricés ou tournés. La tige est parfaitement cylindrique et usinée avec un jeu presque nul (0,2 mm). Ces boulons sont employés dans des ouvrages d'exécution parfaitement soignée, tels ponts, joints de montage, très souvent en remplacement des rivets ou lorsque le glissement dans l'assemblage doit être limité.

### 2.4 Représentation symbolique

- Boulons de chantier :
  - Boulon à tête et écrou hexagonaux
  - Boulon à tête fraisée et ergot



- Boulon d'atelier :
  - Pas de représentation symbolique normalisée.

### 2.5 Désignation d'un boulon

1) Enonciation : Enoncer les caractéristiques dans l'ordre suivant :

- a) Désignation de la pièce en langage clair. Ex : Boulon
- b) Symbole de la forme principal
- c) Symbole de forme complémentaire
- d) Symbole de dimension relative
- e) Eventuellement, forme de l'extrémité (ex. bout pointu)

f) Dimensions (en mm)

g) Symbole de finition

h) Qualité d'acier

**Note :** S'il y a risque d'erreur indiquer, le symbole M du filetage métrique, après le b, ci - dessus.

## 2) Symboles courants pour vis, écrous

a) Symboles de forme principaux

Hexagonale.....H

Carrée.....Q

Cylindrique .....C

Ronde.....R

Fraisée .....F

b) Symboles de forme complémentaire

Ergot.....E

c) Symboles de dimension relative

Haut.....h (Pour les écrous plus hauts que la série usuelle)

Minimum .....m (Pour les écrous moins hauts que la série usuelle)

Usuel.....u (Pour écrous H de hauteur = 0,8d)

d) Symboles de finition

Brute.....M (Pour boulonnerie brute).

### **Exemple :**

Boulon à tête hexagonale, Ø18, L 90, avec écrou hexagonal usuel. Boulon et écrou finition brute qualité 6.8.

Boulon H, M 18 - 90, M écrou Hu, M qualité 6.8 Hexagonal, Métrique, Ø, la finition brute, Usuel.

En pratique pour des boulons ordinaires en constructions métalliques : Boulons H 18-90 qualités 6.8.

## 2.6 Longueurs de tiges nécessaires

La longueur minimum nécessaire de la tige de boulon est donnée par :  
L'épaisseur totale "e" des éléments à assembler (longueur de serrage), +Éventuellement l'épaisseur d'une ou de deux rondelles, + hauteur de l'écrou, +Un dépassement de 5 mm environ de la tige de boulon. La longueur sera arrondie à 0 ou 5 mm

## 3 PROCEDES D'EXECUTION

1) L'exécution des trous peut être réalisée de 3 façons :

Perçage (éventuellement + alésage)

Poinçonnage

Poinçonnage avec alésage

Alésage avec un alésoir pour obtenir une tolérance mini, et des trous alignés au travers des pièces.

2°) Le serrage des boulons peut être réalisé au moyen d'une clef ordinaire (de monteur).

3°) Le desserrage peut être évité.

a) Par l'emploi des rondelles "GROWER (ou similaire) ou de contre -écrous.

b) Par matage des filets, par application de points de soudure ou de goupilles traversant le boulon et l'écrou.

**Note :** Pour les assemblages boulonnés dont la partie lisse du boulon a été retenue pour les calculs, il faut s'assurer que de 1 à 3 mm environ dans l'épaisseur à serrer. Si le filetage ne rentre pas dans la partie à serrer, il faut intercaler entre écrous et fers à assembler une rondelle de façon à faire porter le boulon exclusivement sur la tige pleine. En aucun cas la partie filetée ne doit se trouver sur le plan de cisaillement.



4

## DISPOSITIONS CONSTRUCTIVES REGLEMENTAIRES :

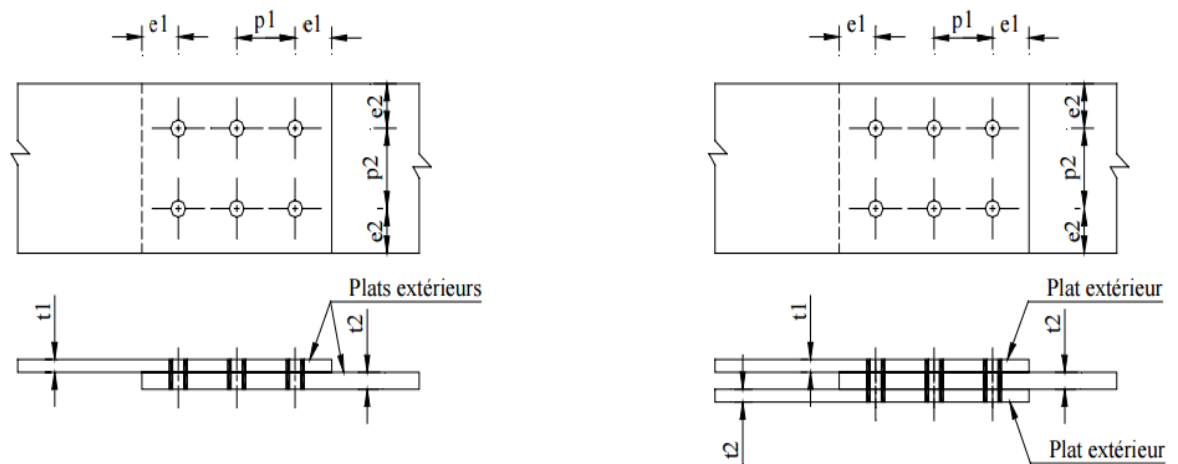


Figure 3 : Dispositions constructives

Les paramètres sont donnés dans le tableau 4. (Annexe C). La valeur minimale de  $e_1$  doit être augmentée s'il est nécessaire d'obtenir une résistance adéquate à la pression diamétrale.

## 5 SOLLICITATIONS DES BOULONS

Les boulons ordinaires ne remplissant pas les trous, ils ne pourront pas transmettre des efforts de compression. Pour le calcul des sections des pièces, on peut prendre un  $\emptyset$  fictif des trous.  $d = \emptyset \text{ boulon} + 1 \text{ mm}$

Le calcul de résistance de l'assemblage au simple et au double cisaillement fait intervenir :

- Soit la section A, de la tige,
- Soit la section résistante  $A_r$ , de la partie fileté

La traction ou " arrachement des têtes" se fait avec la section résistante (section à fond de filet).

### Remarque :

Quel que soit le type de boulons, le jeu normal entre la tige du boulon et le trou des pièces assembler est fixé à 2mm pour les diamètres de boulons inférieurs ou égaux à 24mm, et à 3mm pour les diamètres de boulons égaux ou supérieurs à 27mm. Le diamètre  $d_0$  du trou vaut donc :

$$d_0 = d + 2 \text{ mm pour } d \leq 24 \text{ mm.}$$

$d_0 = d + 3\text{mm}$  pour  $d \leq 27\text{mm}$ .

L'Eurocode 3 propose les mêmes diamètres de trous, sauf pour les diamètres de boulons  $d \leq 14\text{mm}$ , pour lesquels  $d_0 = d + 1\text{mm}$ .

## 6 RESISTANCE DE CALCUL DES BOULONS ORDINAIRES [8]

### 6.1 Résistance au cisaillement

Si  $f_{ub}$  est la résistance à la traction de l'acier du boulon, la valeur de la résistance ultime au cisaillement est égale à  $0,6f_{ub}$ . Cette valeur est une approximation du critère de Von Mises qui donne, en toute rigueur,  $\tau_{ub} = f_{ub}/\sqrt{3}$

Si le plan de cisaillement passe par la partie non filetée du corps du boulon, l'aire  $A$  qui résiste au cisaillement vaut  $A = \pi d^2/4$ .

En revanche, si le plan de cisaillement passe par la partie filetée, il convient alors de considérer une aire réduite  $A_s$ .

#### Remarque :

Les boulons de classe 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9 présentent des capacités de déformation plus faibles (donc un comportement moins ductile) que les boulons de classe 4.6, 5.6 et 8.8. En conséquence, la résistance au cisaillement des premiers est égale à  $0,5 f_{ub}$  au lieu de  $0,6f_{ub}$ .

### 6.2 Pression diamétrale

La valeur de la résistance à la pression diamétrale est fonction de la masse de matière des pièces dans laquelle peuvent se diffuser les contraintes engendrées par le boulon. Pour des épaisseurs de tôles données, il faut prévoir des pinces et des pas (entraxes des boulons) suffisamment grands pour que la pression diamétrale puisse être équilibrée.

■ Résistance au cisaillement :  $f_{v,Rd} = (0,6 f_{ub} A_s) / \gamma_{Mb}$  (Eq 1)

■ Résistance à la pression diamétrale :  $f_{b,Rd} = (2,5 \alpha f_u d t) / \gamma_{Mb}$  (Eq 2)

Avec :

$$\alpha = \min (e_1/3d_0 ; p_1/3d_0 - 0,25 ; f_{ub}/f_u ; 1)$$

$\gamma_{Mb}$ : Coefficient partiel de sécurité sur l'acier

$\gamma_{Mb} = 1.50$  pour la résistance de boulons sollicités en traction

$\gamma_{Mb} = 1.25$  dans les autres cas (cisaillement, cisaillement par poinçonnement de la tête du boulon et de l'écrou, ..)

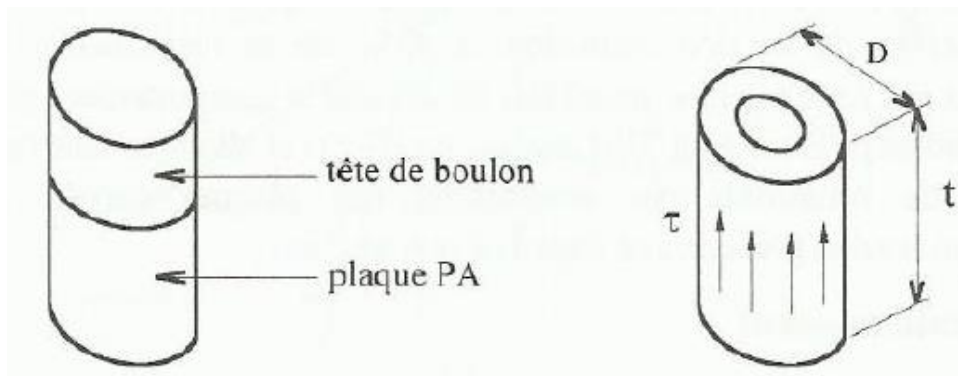
### 6.3 Résistance à la traction

La traction est une sollicitation parallèle à l'axe longitudinale de la vis. Les fonctionnements mécaniques des boulons précontraints et des boulons ordinaires n'étant pas identiques du fait de la présence d'une précontrainte pour les premiers, il y a lieu d'étudier séparément la résistance à la traction des deux familles d'assembleurs.

Pour un boulon ordinaire sollicité en traction, la partie soumise à la plus forte contrainte normale est celle dont la section est la plus faible, c'est-à-dire la section  $A_S$  de la partie filetée de la vis. L'effort de traction admissible vaut alors  $f_t = A_S f_{ub}$  mais les nombres résultats d'essais (bibliographie) conduisent à pondérer cette valeur par un coefficient de 0,9 entraînant alors la formulation réglementaire de la résistance à la traction  $f_{t,Rd}$  d'un boulon ordinaire

$$f_{t,Rd} = 0,9 A_S f_{ub} / \gamma_{Mb} \quad (Eq 3)$$

### 6.4 Résistance au Poinçonnement



*Figure 4 : Poinçonnement de la plaque*

Pour qu'il n'y ait pas de découpe de la plaque sous la tête de la vis ou sous l'écrou, il suffit que la contrainte de cisaillement résistante,  $\tau_u$  à la périphérie du cylindre puisse s'opposer à l'action du boulon sur la plaque. La contrainte de cisaillement ultime de la plaque vaut :

$\tau_u = 0,6 f_u$ . L'aire sur laquelle se développe le cisaillement vaut  $\pi \cdot D \cdot t$ . L'effort résistant au cisaillement vaut alors  $0,6 \pi \cdot D \cdot t \cdot f_u$ .

La valeur de la résistance de calcul au cisaillement par poinçonnement :

$$b_{p,Rd} = 0,6 \pi \cdot D \cdot t \cdot f_u / \gamma_{Mb} \quad (Eq 4)$$

Où :

$t_p$  est l'épaisseur de la plaque sous la tête de la vis ou de l'écrou ;

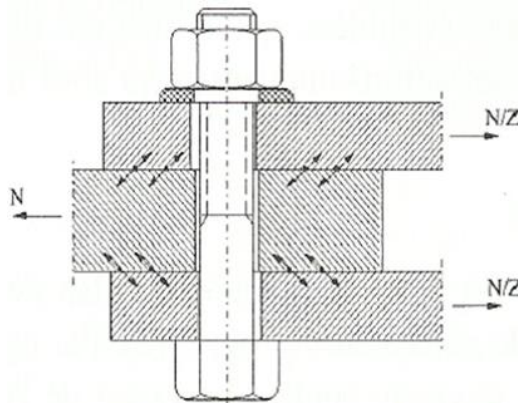
$d_m$  est le diamètre moyen calculé entre les cercles inscrits et circonscrits de la tête de la vis ou de l'écrou.

## 7 BOULONS PRECONTRAINTS

Sans qu'il soit soumis à une force extérieure de traction, un boulon précontraint est néanmoins sous tension par la présence de la précontrainte  $f_{p.cd}$  qui représente environ 90% de sa résistance à la traction  $f_{ub}$ . Partant de cette constatation et en ne raisonnant que sur les efforts, on peut être amené à penser qu'un boulon précontraint ne peut équilibrer qu'un effort de traction équivalent à % de sa résistance à la traction. Ce raisonnement n'est pas juste car il ne prend pas en compte le comportement global du boulon et des plaques (pincées) à la traction. Une analyse en effort et allongement ou en contraintes et déformations de l'ensemble des boulons et des plaques permet d'approcher le comportement d'un boulon précontraint soumis à une traction.

L'intérêt est d'avoir une résistance à la traction  $f_{ub}$  la plus élevée possible. C'est pourquoi seuls les boulons de classe 8.8 et 10.9 sont autorisés pour les assemblages par boulons précontraint.

### 7.1 Principe de Fonctionnement



*Figure5 : Boulon précontraint*

Les pièces sont pincées par un effort  $f_p$ , perpendiculaire au plan de contact. Le frottement est mobilisé.  $f_p$  est obtenu par serrage des boulons qui n'ont en fait que le rôle de pincer les pièces entre elles de manière à ce que l'assemblage se réalise par frottement.

Le boulon précontraint engendre une contrainte normale à l'interface des pièces de l'assemblage. Chaque boulon possède une zone d'action limitée que l'on peut modéliser par un cône (cône de rotsher).

Plusieurs paramètres interviennent dans la résistance de l'assemblage :

- La force de précontrainte :
- L'état de surface des pièces en contact
- La forme et les dimensions du trou
- Le nombre de plan de contact

### 7.1.1 La force de précontrainte

La force de précontrainte est la force normale au plan de cisaillement créée par le serrage du boulon. C'est aussi par principe d'action et de réaction l'effort de traction qui règne dans la vis du boulon. Valeur réglementaire de la force de précontrainte  $F_{p,cd}$

$$F_{p,cd} = 0,7 \cdot f_{ub} \cdot A_s \quad (Eq 5)$$

#### 7.1.1.1 Mise en œuvre de la force de précontrainte

Le serrage des boulons précontraints est une opération délicate sur le chantier. En effet un excès de précontrainte peut s'avérer aussi préjudiciable qu'un manque de précontrainte. Trois méthodes sont actuellement utilisées :

- Le contrôle du couple de serrage
- La méthode du « tour d'écrou »
- L'utilisation de rondelles de mesures.

### 7.1.1.2 Le couple de serrage

La relation entre le couple de serrage C et l'effort de précontrainte est :

$$C=0,9 K d F_p \quad (Eq 6)$$

Avec :

- K coefficient de frottement vis écrou au niveau du filet (valeur moyenne 0.2)
- d diamètre du boulon
- $F_p$  effort de précontrainte

C'est appliqué au moyen d'une clef dynamométrique manuelle ou pneumatique. Ces clefs déclenchent ou débrayent automatiquement lorsque la valeur C est atteinte. C'est la méthode la plus utilisée mais elle peut présenter une certaine imprécision.

### 7.1.1.3 La méthode du tour d'écrou :

Un premier pré serrage est fait à la clef dynamométrique (40 ou 60% par exemple). Puis le serrage sera terminé par une clef manuelle en appliquant une rotation de l'écrou d'un angle bien défini (60, 90 ou 120°).

### 7.1.1.4 La méthode par rondelles de mesures :

Elle consiste à utiliser des rondelles avec des bossages. Les bossages de l'écrou vont se déformer lors du serrage de l'écrou. L'évaluation du serrage se fait par la mesure de déformation des bossages ou plutôt du jeu après écrasement.

## 7.1.2 L'état de surface des pièces en contact

La transmission d'un effort perpendiculaire à l'axe du boulon repose sur le frottement à l'interface des pièces. L'état de surface des pièces en contact est donc un paramètre fondamental. L'effort transmis peut varier de 1 à 2.5 en fonction de l'état de surface, donc du type de traitement de surface des pièces. Seuls quatre types de traitement de surface ont été retenus, qualifiés et quantifiés réglementairement.

### 7.1.3 La forme et la dimension des trous

Les boulons sont toujours montés avec un jeu. Plus le jeu est grand, plus la surface de frottement est faible donc plus la résistance de l'assemblage est faible. Un coefficient de forme sera donc introduit réglementairement pour quantifier cette influence dans le calcul de la résistance de l'assemblage.

### 7.1.4 Le nombre de plan de contact

Comme la résistance au glissement de l'assemblage ne dépend que du frottement des pièces en contact, il apparaît évident que si le nombre de plans de frottement est multiplié, la résistance de l'assemblage l'est aussi (figure 6).

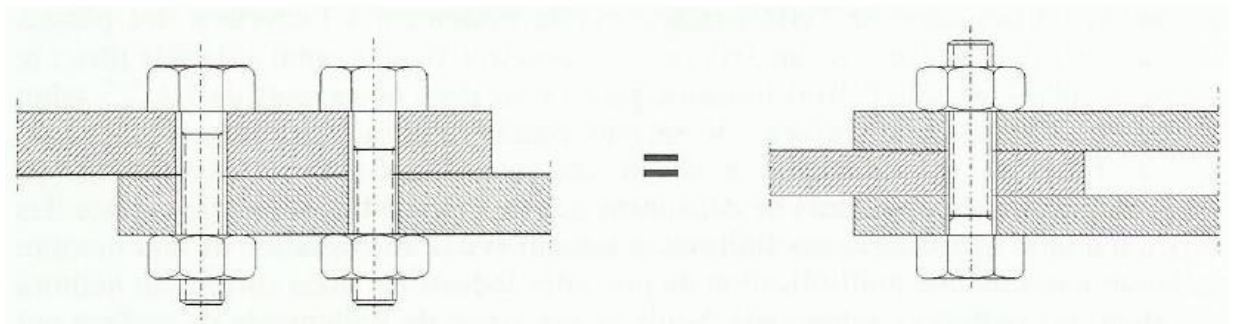
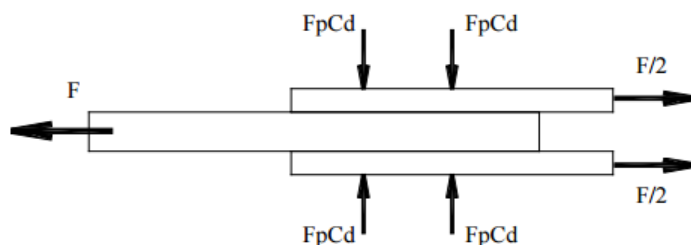


Figure 6 : Influence du nombre de plans de frottement

## 7.2 Résistance du boulon

### 7.2.1 Résistance au glissement d'un boulon précontraint :



La résistance de calcul au glissement d'un boulon précontraint sera égale à:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot n \cdot \mu \cdot F_{p,Cd}}{\gamma_{Ms}} \quad (Eq 7)$$

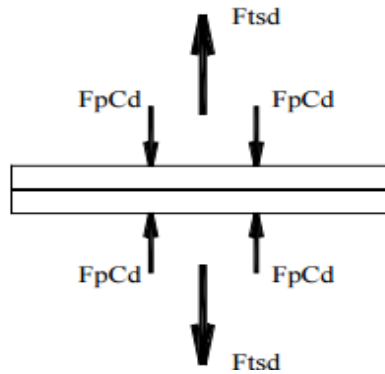
Avec :

$k_s$  : Coefficient de forme des trous n nombre de surfaces d'adhérence

$\mu$  : Coefficient de frottement

$F_{p,Cd}$ : Effort de précontrainte

### 7.2.2 Résistance à la traction d'un boulon précontraint :



Lorsque l'on applique un effort de traction  $F$  extérieur, les pièces vont se décompresser. La section comprimée des pièces est beaucoup plus grande que la section tendue du boulon. La déformation des pièces  $i$  (faible) sera égale à la déformation du boulon (compatibilité des déformations). En conséquence, l'accroissement d'effort de traction dans le boulon sera donc beaucoup plus faible que l'effort de traction appliqué à l'ensemble pièces-boulon

#### 7.2.2.1 Boulons soumis à des efforts combinés de traction et de cisaillement :

Assemblage résistant au glissement à l'ELS :

$$f_{s,Rd} = \frac{k_s \cdot \mu \cdot n (f_{p,Cd} - 0,8f_{t,Sd})}{\gamma_{Ms,ser}} \quad (Eq 8)$$

Assemblage résistant au glissement à l'ELU :

$$f_{s,Rd} = \frac{f_s \cdot \mu \cdot n (f_{p,Cd} - 0,8f_{t,Sd})}{\gamma_{Ms,ult}} \quad (Eq 9)$$

Avec :

$f_{t,Sd,ult}$ : Effort de traction à l'ELU

$f_{t,Sd,ser}$ : Effort de traction à l'ELS

La valeur des coefficients  $\gamma_{Ms,ser}$  et  $\gamma_{Ms,ult}$  sur le tableau 5 (Annexe C).



Dans ce chapitre nous avons disposé de plusieurs modes d'assemblages : soudage, rivetage, boulonnage par boulons ordinaires non précontraints, qui sont les plus utilisés en construction métallique et boulonnage par boulons précontraints à haute résistance qui possèdent des caractéristiques mécaniques élevées.

D'abord, nous avons présenté les caractéristiques mécaniques et géométriques d'un boulon, leurs formes, dimensions et la désignation dans la fabrication. Puis nous avons cité les étapes de procédés d'exécution sur chantier. Nous avons aussi représenté les dispositions constructives réglementaires des paramètres nécessaires avec les propositions de l'Eurocode 3.

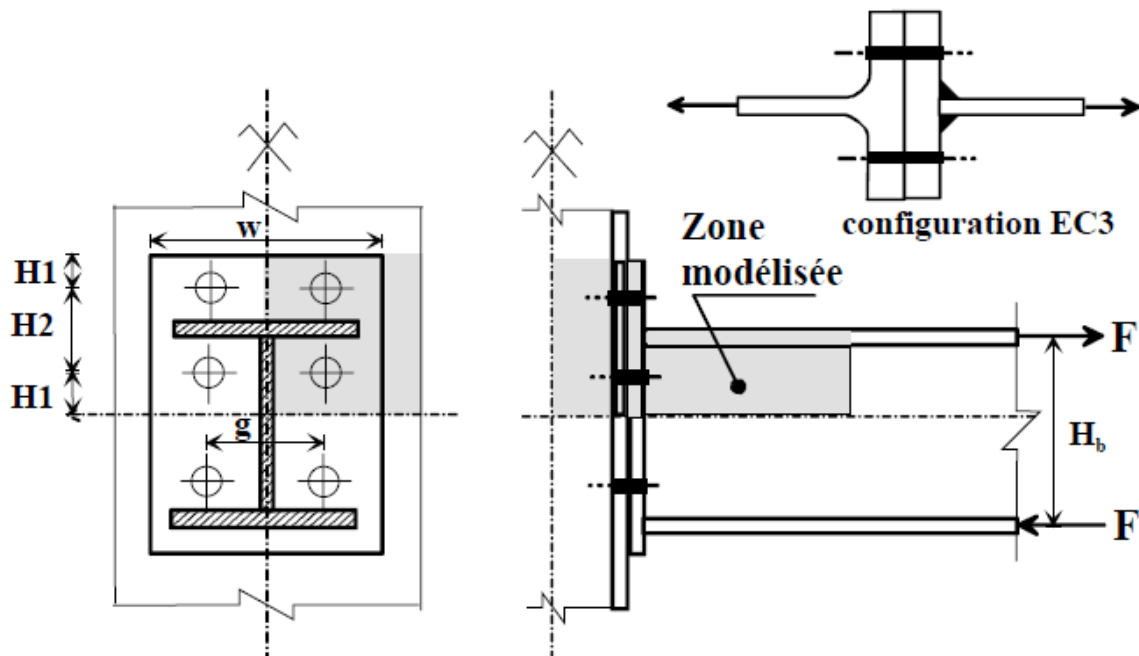
Enfin, nous avons présenté les différents modes de transmission des efforts vis-à-vis des assemblages boulonnés avec des boulons ordinaires et précontraints en citant leurs résistances aux des efforts de traction, cisaillement ou la combinaison de ces efforts avec des formules données par l'Eurocode 3.

# **Chapitre 4**

## **MODÉLISATION D'UN ASSEMBLAGE EN T**

## 1. INTRODUCTION

Avant d'introduire la modélisation numérique, nous présentons la configuration requise. La méthode adoptée par l'Eurocode 3 considère que le moment de flexion est transmis par l'assemblage par des forces de traction et de compression, dont le bras de levier est déterminé par la distance entre les demi-épaisseurs des semelles tendues et comprimées de la poutre (Figure 1). Pour faire une extension des résultats concernant les tronçons en T dans la zone tendue de l'assemblage à ceux d'un assemblage par platine d'extrémité boulonnée, nous considérons une configuration symétrique. Les deux rangées tendues de boulons sont considérées situées à distances égales par rapport à la semelle tendue de la poutre. C'est cette configuration qui va être utilisée pour la modélisation. La modélisation sera réalisée par un logiciel par élément finis Cast3M.



*Figure 1 : Modèles de tronçon en T correspondant à la partie tendue de l'assemblage*

### 1.1 PRÉSENTATION DE LOGICIEL DE CALCUL

Cast3M est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis pour la mécanique des structures et des fluides. Cast3M est développé au Département De Modélisation des Systèmes et Structures (DM2S) de la Direction de l'Énergie Nucléaire du Commissariat à

l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA). Les principales étapes considérées sont énumérées ci-dessous. En effet, ce sont des étapes classiques pour une étude numérique par éléments finis.

### 1.1.1. Organisation d'un calcul

Une analyse générale effectuée à l'aide de la méthode des éléments finis peut se décomposer en quatre grandes étapes et chacune des étapes peut également être décomposée en une série de processus élémentaires :

#### 1.1.1.1 Choix de la géométrie et du maillage

- Définition des points, lignes, surfaces et volumes.
- Discrétisation.

#### 1.1.1.2 Définition du modèle mathématique

- Définition des données caractérisant le modèle :
  - type d'analyse : déformations ou contraintes planes, asymétrie...
  - formulation : mécanique, thermique, fluide...
  - comportement du matériau : élastique, plastique (isotrope, parfait)...
  - type d'éléments : poutres, barres, coques...
- Définition des propriétés matérielles (constantes d'élasticité, masse volumique...).
- Définition des propriétés géométriques (section des poutres, inerties, épaisseur des coques...).
- Définition des conditions aux limites.
- Définition des sollicitations.
- Conditions initiales.

#### 1.1.2 Résolution du problème discrétisé

- Calcul des matrices de rigidité et de masse de chaque élément fini.
- Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- Application des conditions aux limites.
- Application des chargements.
- Résolution du système d'équations.

### 1.1.3 Analyse et post-traitement des résultats

– Quantités locales : déplacements, contraintes, déformations...– Quantités globales : déformation maximale, énergie de déformation ...

## 2. DÉVELOPPEMENT D'UN MODÈLE NUMÉRIQUE POUR L'ASSEMBLAGE EN T

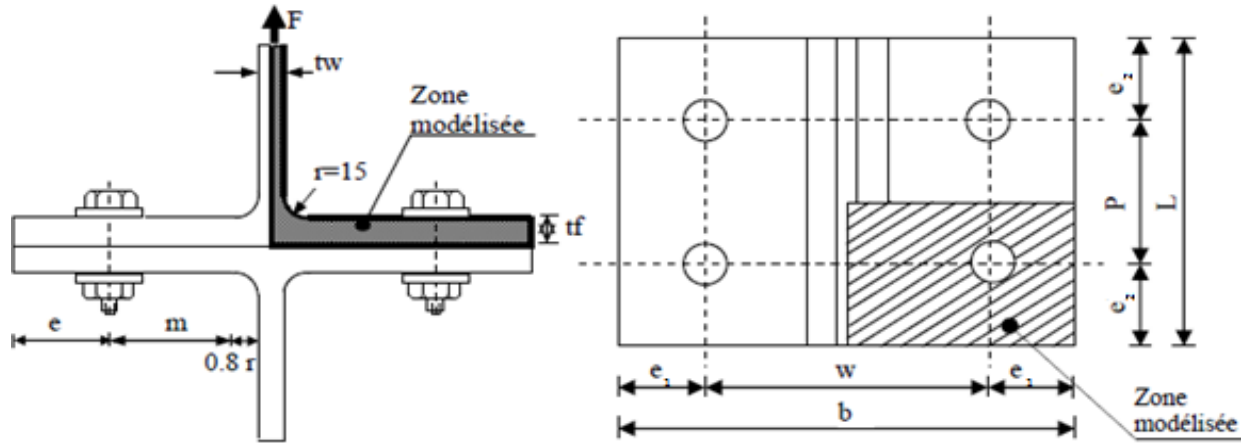
Nous développons un modèle basé sur la méthode des éléments finis pour un tronçon en T de façon à évaluer : son comportement global force-déplacement ainsi que le comportement des boulons. Le modèle éléments finis est validé sur la base de résultats expérimentaux. Dans ce contexte, une comparaison entre les modèles analytique, numérique et expérimental est effectuée en considérant des tronçons avec des configurations différentes. Cette comparaison permet d'évaluer le modèle analytique simplifié retenu par l'Eurocode 3 et d'utiliser la modélisation la plus simple. Un modèle numérique 3D en utilisant le logiciel CASTEM 2016 est ainsi réalisé.

Pour avoir les mêmes bases de comparaison, nous considérons les démarches retenues par les autres études numériques auxquelles nous faisons référence, et en particulier la plasticité, les grands déplacements et le contact unilatéral. Les résultats des différentes simulations sont comparés sur la base des courbes globales ( $F-\delta$ ), des courbes d'évolution de l'effort de traction dans le boulon et de la force de levier qui ne sont pas faciles à mesurer expérimentalement.

### 2.1 Données géométriques

Nous considérons plusieurs tronçons en T de différentes configurations géométriques pour lesquels nous disposons de résultats expérimentaux. Il s'agit des tronçons symétriques et boulonnés par l'intermédiaire de deux boulons (T1 et T2 et T3). Ces tronçons sont de géométries différentes ce qui permet de cerner l'effet de la longueur et de la position des boulons représentées par les paramètres (L, P, W).

Les tronçons sont également caractérisés par différentes valeurs du rapport entre la résistance en flexion des semelles et la résistance axiale des boulons. Les géométries des éléments testés expérimentalement sont données dans le Tableau 1



**Figure 2 : Géométrie du tronçon en T**

Essai	Profilé	Boulons	Dimensions (mm)						
			P	W	L	b	e1	e2	m
T1	IPE300	M12-8.8	40	90	80	150	30	20	29.45
T2	HEA260	M24-8.8	118.8	143.8	237.6	260	58.1	59.4	
T3	HEA300	M27-8.8	122.8	156.6	245.6	300	71.7	61.4	52.45

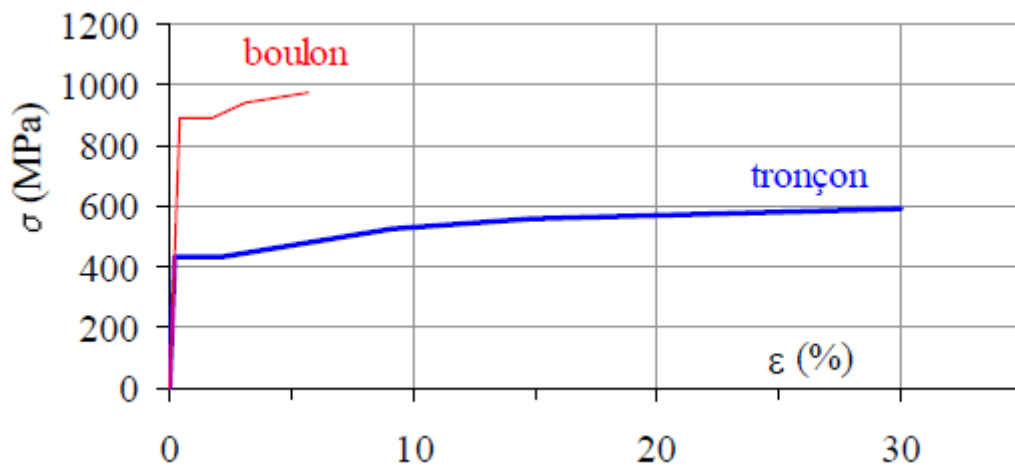
**Tableau 1 : Caractéristiques des tronçons utilisés dans la modélisation**

### 2.1.1 Propriétés matérielles

Dans le but d'introduire les propriétés du matériau dans les modèles numériques, nous définissons la courbe conventionnelle (loi de comportement  $\sigma$ - $\epsilon$ ) à partir des essais de traction. À titre d'exemple, nous donnons la courbe de traction utilisée dans la modélisation pour le tronçon T1 (Figure3) sachant que les courbes de traction d'autres tronçons modélisés ont la même allure avec des valeurs différentes.

La courbe conventionnelle suppose pour l'éprouvette une section constante. En effet, aucune modification significative n'a été remarquée sur la courbe de comportement global

(force-déplacement) lors de l'utilisation d'une courbe dite réelle qui tient compte de la diminution de la section droite de l'éprouvette avec l'augmentation de l'effort [8].

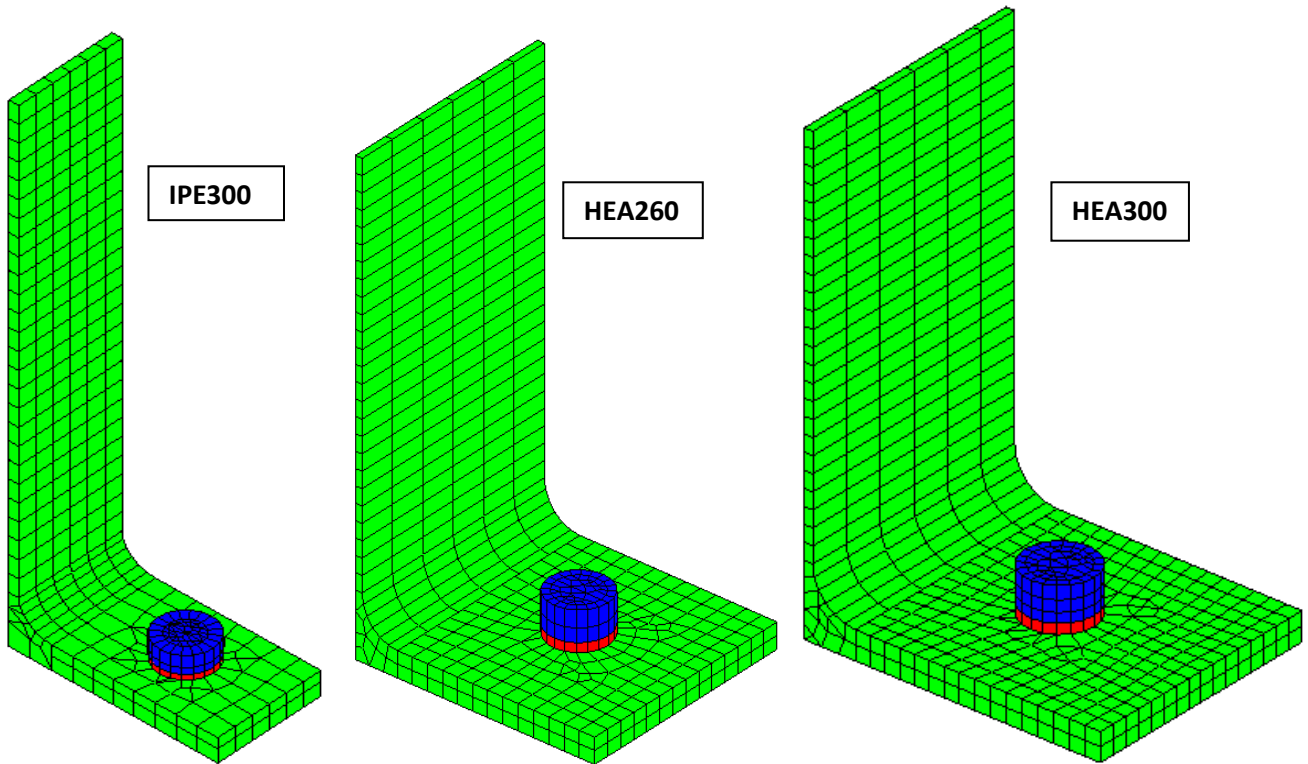


**Figure 3 :** Lois du comportement des matériaux (tronçon T1)

Pour prédire le comportement des tronçons en T, une modélisation tridimensionnelle est considérée.

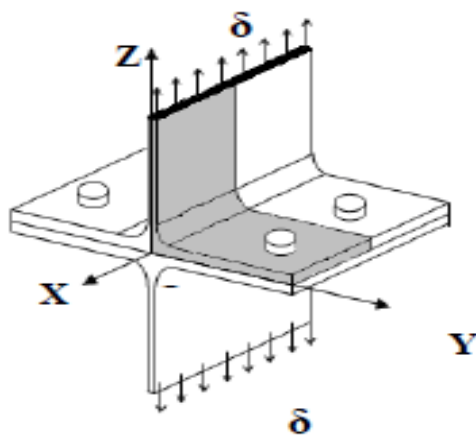
### 2.1.2 Maillage

La figure 4 montre le maillage en 3D des tronçons en T. Comme trois plans de symétrie caractérisent les tronçons en T analysés, seul un huitième est modélisé. En ce qui concerne le boulon, celui-ci est représenté par une tige de forme cylindrique de diamètre constant égal à celui de la partie non filetée avec une longueur équivalente de manière à prendre en compte l'effet du filetage et de la flexibilité de l'écrou. Les rondelles utilisées ont les mêmes dimensions que la tête du boulon. Le tronçon, le boulon et la rondelle sont modélisés à l'aide d'éléments volumiques iso paramétriques hexaédriques à 8 nœuds (CUBE8).



**Figure 4 : les tronçons en T**

Les conditions aux limites considérées dans les modèles sont un blocage des déplacements dans la direction Y dans le plan ZOY, un blocage des déplacements dans la direction X dans le plan ZOY ainsi qu'un contact sans frottement d'une part entre la rondelle et la partie supérieure de la semelle du tronçon en T et d'autre part, entre la partie inférieure de la semelle et la fondation. Le problème de contact se traduit par l'utilisation de conditions d'appuis unilatéraux caractérisées par la possibilité de décollement. Le chargement est réalisé par déplacement imposé monotone croissant appliqué sur la partie supérieure de l'âme du tronçon de la figure 5.



**Figure 5 : Déplacement imposé**



### 3. ANALYSE DES RÉSULTATS

Dans l'analyse des résultats, nous présentons, tout d'abord, les courbes (F- $\delta$ ) globales qui servent de base de comparaison entre les modèles numérique, analytique et les résultats des tests expérimentaux sans et avec précontrainte.

#### 3.1. Étude sans Précontrainte

##### 3.1.1. Réponses globales (force-déplacement)

Les courbes de capacité (courbes Force-Déplacement des tronçons (T1 ; T2 ; T3) de l'analyse numérique (MEF), analytique et des tests expérimentaux sont comparées dans la figure 6,7 et 8 pour les tronçons T1, T2 et T3 respectivement. Une bonne concordance est obtenue.

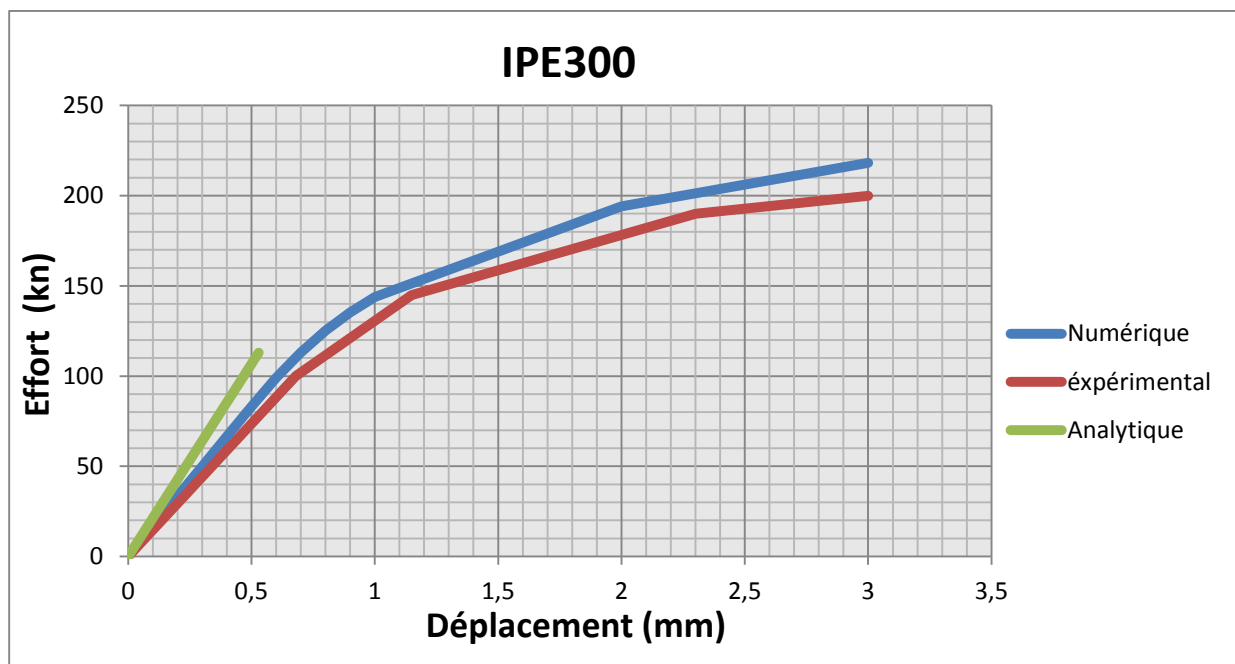
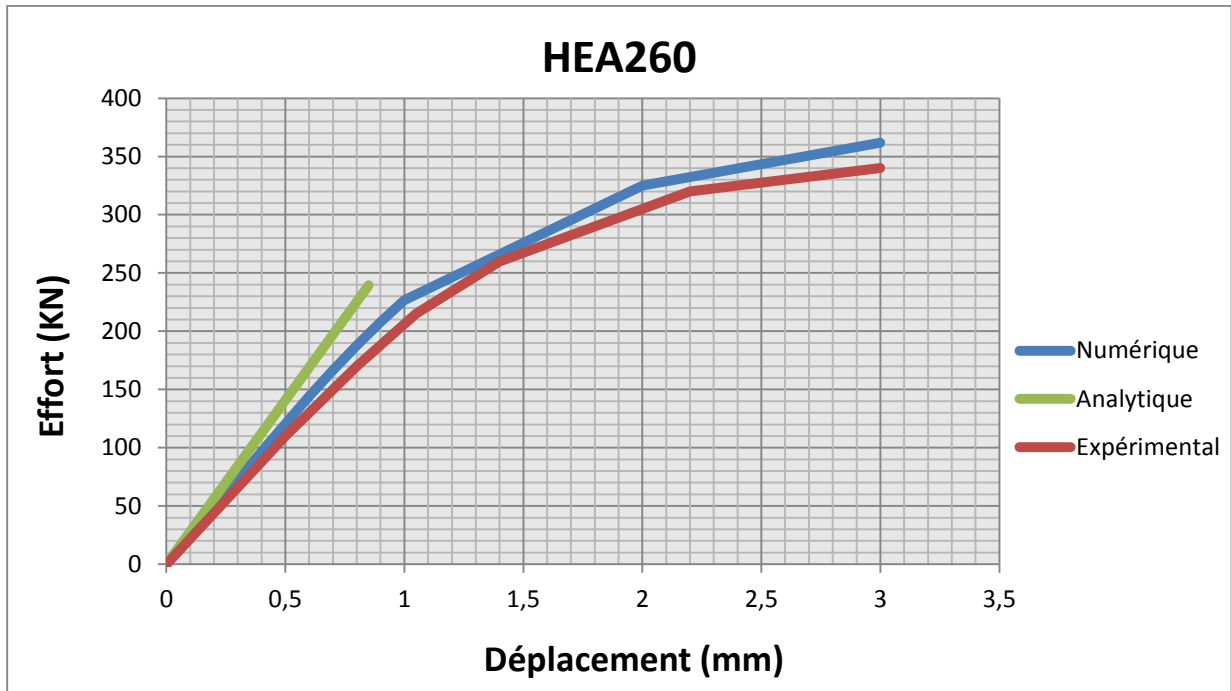
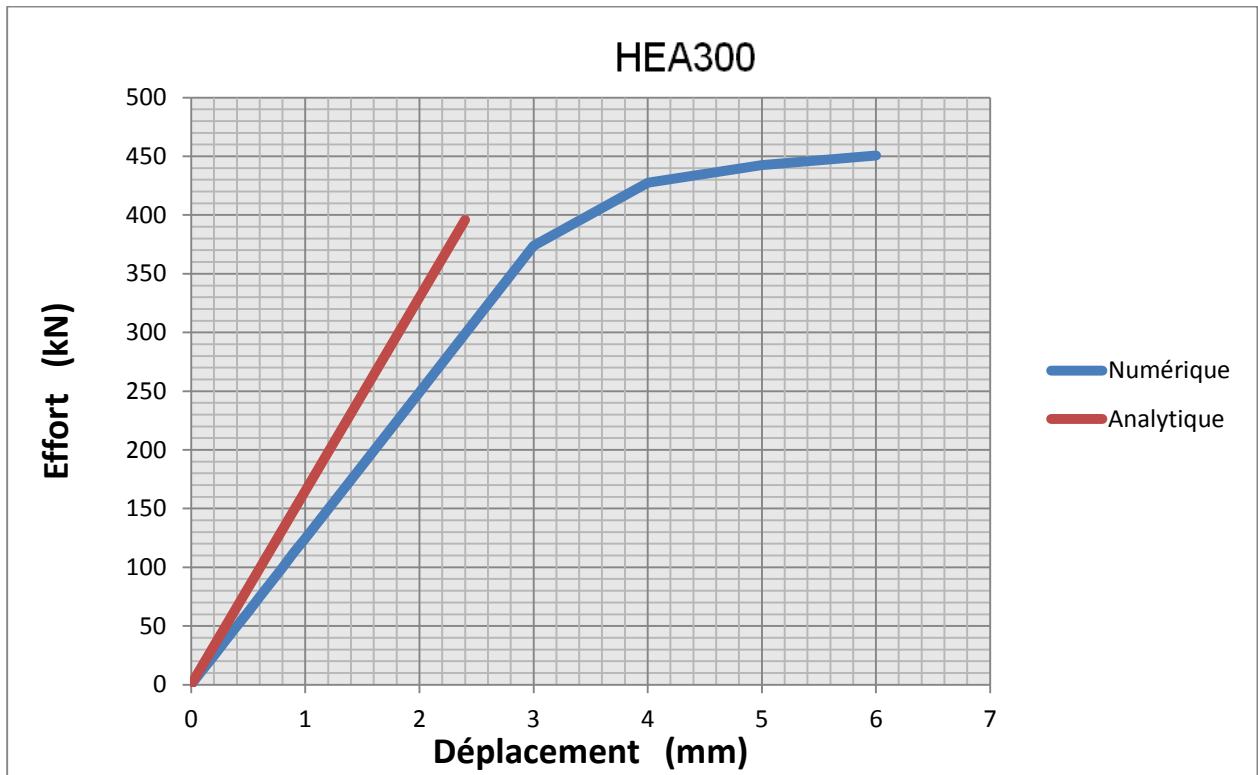


Figure 6 : Courbe Force-Déplacement (T1)



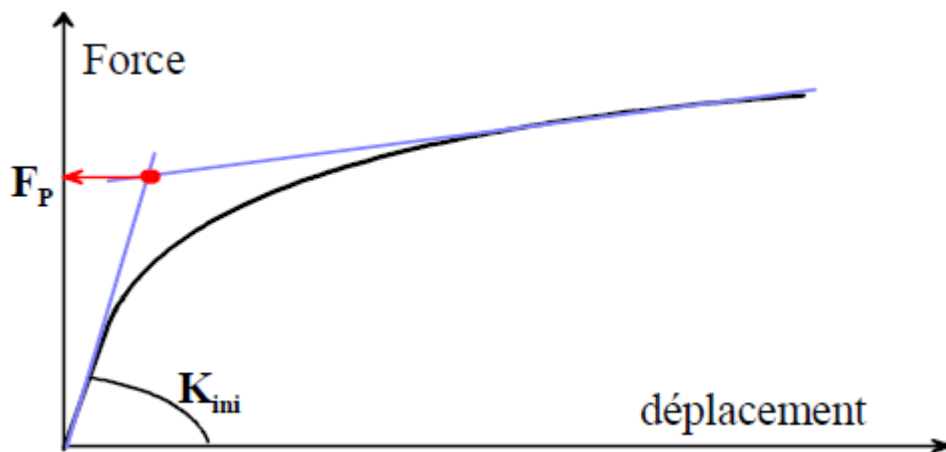
*Figure 7 : Courbe Force-Déplacement (T2)*



*Figure 8 : Courbe Force-Déplacement (T3)*

### 3.1.2 Comparaison des résultats numériques et expérimentaux avec l'approche "Eurocode3"

Pour pouvoir comparer les rigidités et les résistances obtenues par la modélisation (MEF) et les tests expérimentaux à celles des modèles analytiques proposés par l'Eurocode 3 (chapitre.1), nous déterminons des valeurs de calcul à partir des courbes globales Force-Déplacement. Pour la rigidité initiale, nous considérons celle donnée par le rapport entre l'ordonnée et l'abscisse des courbes et pour la résistance nous considérons celle qui correspond à l'intersection de deux droites tangentes aux extrémités de la courbe (Figure8). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau2 pour les rigidités et dans le Tableau3 pour les résistances.



*Figure 9 : Définition de la rigidité et de la résistance pour un tronçon en T à partir d'une courbe Force-Déplacement*

Dans le calcul analytique, nous considérons les valeurs géométriques réelles de  $m$  et  $n$  de la limite d'élasticité. La longueur efficace pour une rangée de boulons est prise égale au minimum des valeurs proposées par l'Eurocode3 soit en mécanisme individuel soit en mécanisme de groupe pour une semelle du poteau non raidi. Pour les détails voir annexe A de ce mémoire

Pour les trois tronçons étudiés la longueur efficace pour une rangée est égale la distance entre deux rangées des boulons

Tronçons		T1	T2	T3
$\Sigma l_{\text{eff}}$		80	118.8	122.8
$k_{\text{ini}}$ (kN/mm)	EC3	220	281	166.7
	MEF	165	237	141.3
	T.exp	157	234	/

**Tableau2** : Rigidité initiale des tronçons : comparaison MEF/EC3/T.exp

Tronçons		T1	T2	T3
$\Sigma l_{\text{eff}}$		80	118.8	122.8
$F_p$ (kN)	EC3	113	239.6	269.8
	MEF	135	260	330
	T.exp	142	250	/

**Tableau3** : Résistance des tronçons : comparaison MEF/EC3/T.exp

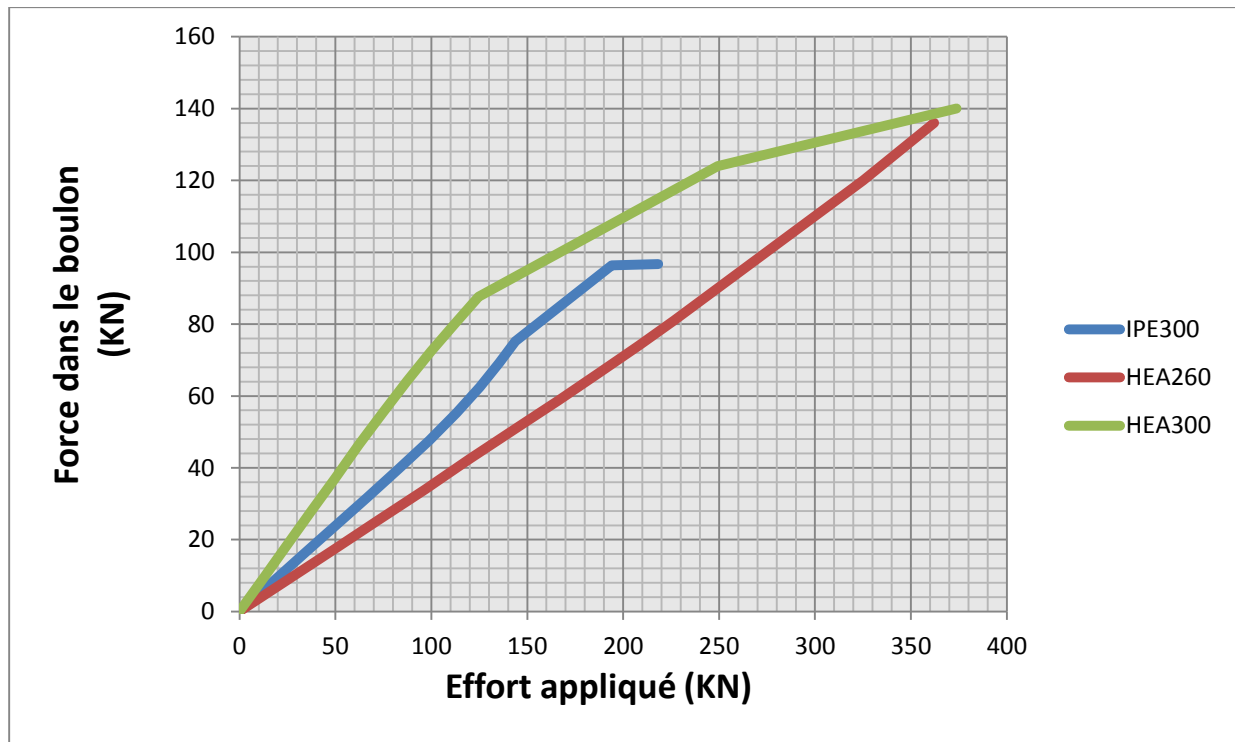
La comparaison entre les rigidités des tronçons obtenues par la modélisation (MEF), les tests et les formules de l'EC3 montre que la formule de l'Eurocode3 donne des valeurs plus élevées pour les trois tronçons.

À titre d'exemple, pour le tronçon T1, le calcul numérique et expérimental donne des rigidités initiales égales respectivement à 135kN/mm, 142kN/mm alors que l'Eurocode3 donne une rigidité égale à 113kN/mm

Les résistances plastiques des tronçons étudiés par l'Eurocode3 (Tableau 3) donnent des estimations proches de valeurs numériques et expérimentales.

### 3.1.3 Comportement du boulon

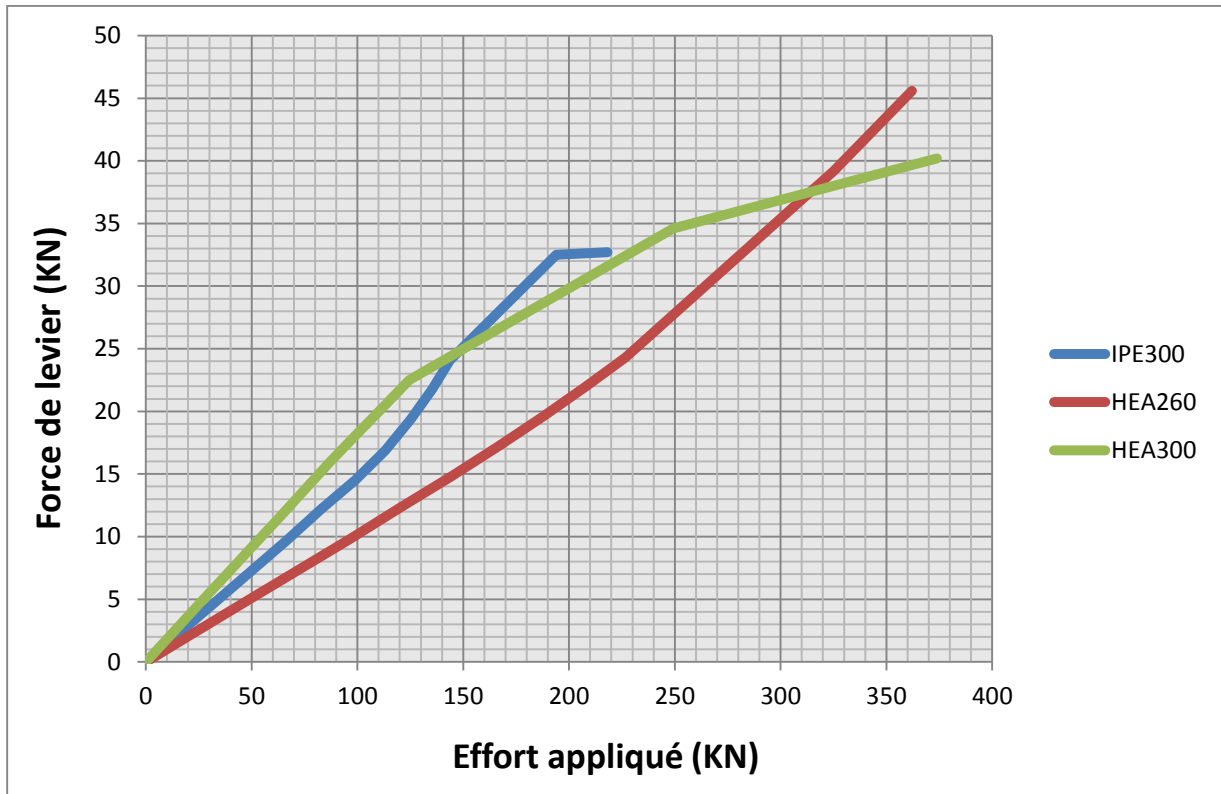
Concernant l'évolution de l'effort dans le boulon en fonction de la force extérieure appliquée (Figure10), les courbes montrent, que pour la charge appliquée dans les tronçons (T1 ; T2 et T3). L'effort est plus important dans les tronçons longs (T2 et T3) que le tronçon court(T1).



**Figure 10** : Force dans le boulon en fonction de la force extérieure appliquée

### 3.1.2. Force de levier

La Figure 11 montre l'évolution de la force de levier en fonction de la charge appliquée pour les trois tronçons. L'influence de cette force qui existe depuis le début du chargement devient très important en phase ultime. L'évolution est linéaire, mais devient exponentielle au niveau de charge correspondant à l'apparition de la première rotule plastique dans la semelle du tronçon.



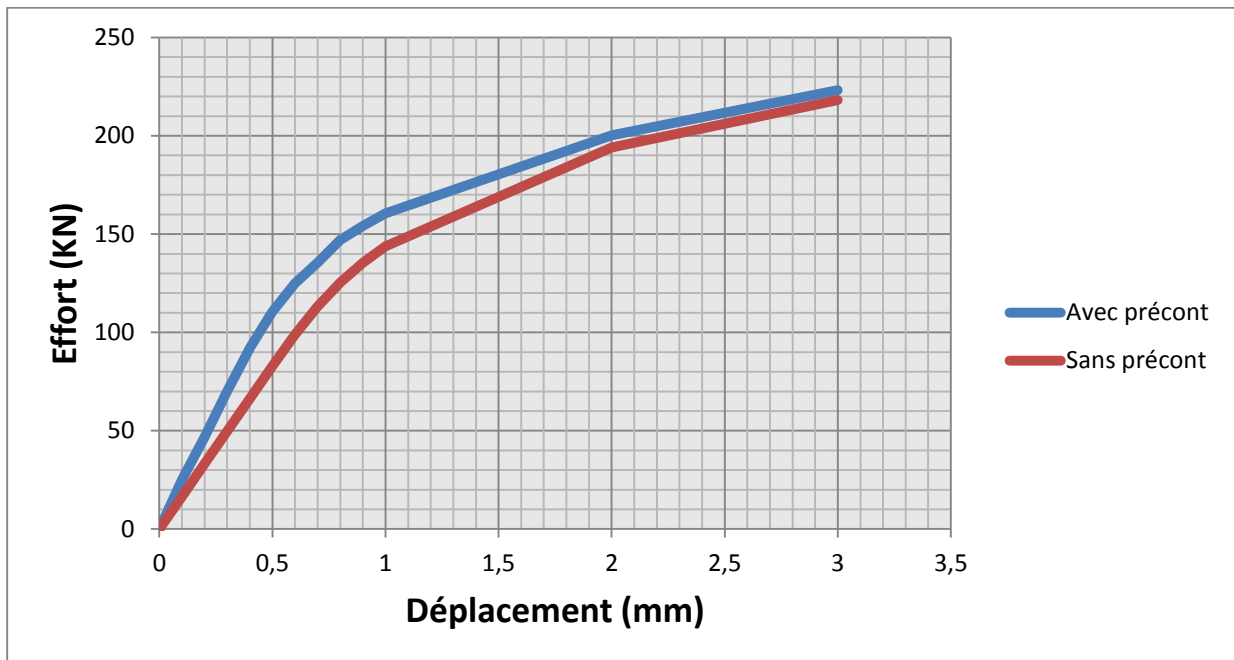
**Figure11** : Évolution de la force de levier résultante

Il est clair qu'en phase élastique de comportement, le rapport entre la force de levier et la force appliquée  $[Q/F]$  est presque constant. , en phase ultime ce rapport augmente relativement pour les tronçons T1 et T2, par contre le tronçon T3 son rapport diminue à l'état plastique.

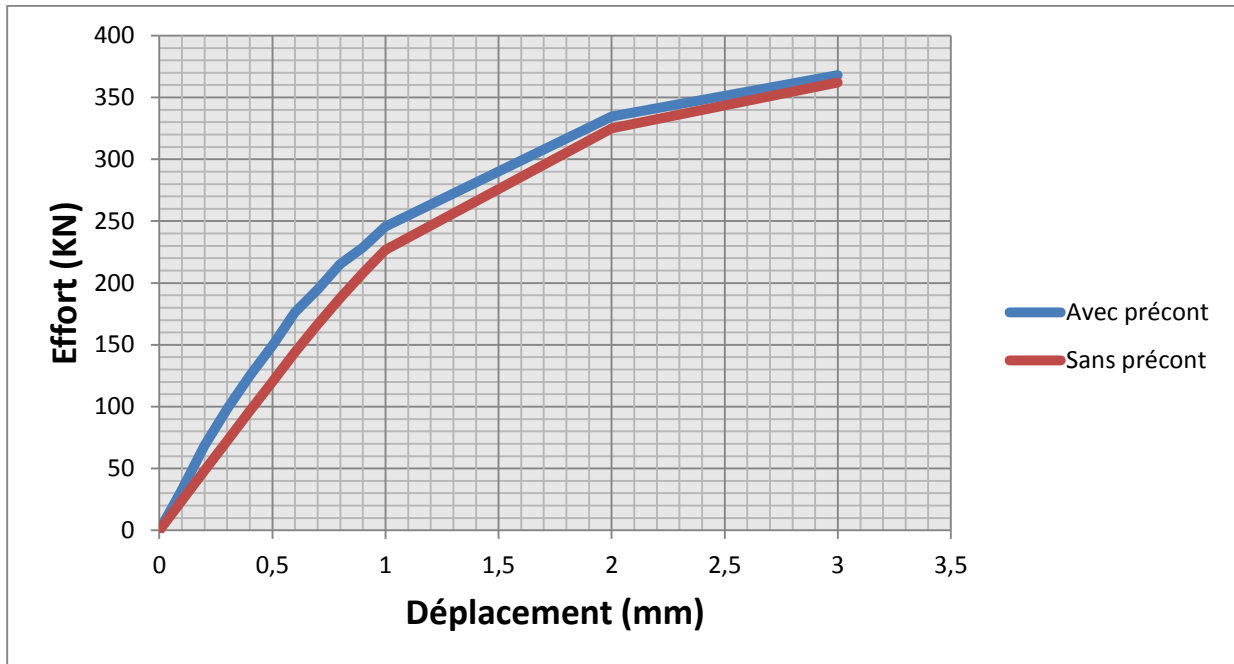
## 3.2. Étude avec Précontrainte

### 3.2.1. Effet de la précontrainte

Pour mieux cerner l'effet de la précontrainte sur le fonctionnement mécanique des tronçons en T, les mêmes tronçons analysés précédemment sont maintenant modélisés numériquement, mais avec des boulons précontraints. Pour tous les tronçons, la valeur de la précontrainte est prise égale à celle dite nominale proposée par l'Eurocode (Eq5 – Chapitre3), mais avec des valeurs réelles de la résistance ultime du boulon.



*Figure 12 : Courbe Force-Déplacement avec et sans précontrainte (T1)*



**Figure 13** : Courbe Force-Déplacement avec et sans précontrainte (T2)

Tronçons		T1	T2
F <sub>p.Cd</sub> (kN)		57.5	240.7
k <sub>ini</sub> (kN/mm)	Sans précont	165	237
	Avec précont	222	298
Différence(%)		34.6	25.7

**Tableau4** : Rigidité initiale (MEF) sans et avec précontrainte

Les résultats des différentes simulations sont comparés sur la base des courbes force déplacement. Elles montrent que l'influence du précontraint est certaine dans la phase élastique où la rigidité initiale est beaucoup plus importante que pour le cas non précontraint. (Figure 13) et (Tableau 4). Ces résultats sont plus proches de ceux obtenus par la formule qui donne la rigidité initiale du tronçon en T selon l'Eurocode3 (Eq1) (Tableau2).



## 4 CONCLUSION

Dans cette étude numérique, différentes configurations géométriques de tronçons en T ont été étudiées afin de cerner leur comportement. Nous avons étudié l'effet de quelques paramètres numériques tels que le type des profilés et de boulons qu'ils soient précontraints ou non. Cette analyse a permis d'observer et d'analyser le comportement global du tronçon en T ainsi que l'effet de l'effort de levier et celui développé par les boulons.

Compte tenu de certaines géométries de tronçons en T, il était clair que seul un modèle 3D par des éléments finis à 8 nœuds, en prenant en compte les propriétés non-linéaires matérielles et géométriques, peut être utilisé pour modéliser de manière assez précise le comportement de la zone tendue d'assemblages poutre-poteau par platine d'extrémité boulonnée.

La comparaison des rigidités des tronçons obtenues soit par la modélisation numérique ou par le calcul analytique nous a montré que l'Eurocode 3 surestime généralement la rigidité des tronçons courts et longs.

Enfin, nous avons remplacé les boulons ordinaires par des boulons précontraints afin de voir l'effet de la précontrainte sur l'assemblage. Les courbes force-déplacement montrent une différence entre ces deux modes d'assemblages (. En effet, les boulons précontraints réduisent le déplacement dans pièces (30% pour l'IPE300 et 25% pour le HEA260) et augmentent la rigidité (33% pour l'IPE300 et 25% pour le HEA260).

D'une manière générale, la modélisation est assez représentative de la réalité, ce qui permet d'envisager d'autres analyses numériques prédictives.

## CONCLUSION GENERALE

Le comportement d'un assemblage d'une poutre à un poteau (ou poteau à une semelle de fondation) est extrêmement complexe en utilisant la méthode des composante ; une méthode utilisée dans l'Eurocode 3 et plus particulièrement pour les assemblages semi-rigides.

Cette méthode qui repose sur la modélisation d'un assemblage en éléments de tronçons en T qui caractérisent la zone tendue est adoptée pour un calcul manuel que l'on désigne par « Méthode analytique » ou par éléments finis.

Le travail qui a été mené dans ce projet de fin d'études consisté à modéliser sur le logiciel CASTEM des assemblages en T issus des essais expérimentaux et de les comparer avec la littérature.

Le calcul d'un tronçon en T peut se faire à la main par la méthode analytique qui est développée dans L'Eurocode 3, soit par des essais ou par éléments finis. C'est cette dernière qui a représenté l'essentiel de notre travail.

Cette étude numérique sur plusieurs exemples qu'ils soient par boulons ordinaires ou précontraints et avec des configurations géométriques variées du tronçon en T a été menée.

La comparaison des rigidités des tronçons en T a montré que la formule de l'Eurocode 3 « Méthode analytique » doit être plus raffinée pour qu'elle s'adapte mieux aux résultats numériques et expérimentaux.

La comparaison des résultats avec des boulons ordinaires et précontraints montrent que l'influence de la précontraint est significative dans la phase élastique où la rigidité initiale est beaucoup plus importante que pour le cas non précontraint. L'ensemble des résultats des rigidités initiales pour ces deux types d'assembleur sont plus proches de ceux obtenus par la formule de l'Eurocode 3 pour tronçon en T.

## ANNEXE A

Position de la rangée de boulons	Rangée de boulons considérée individuellement		Rangée de boulons considérée comme une partie de groupes des rangées des boulons	
	circulaire $L_{eff,cp}$	non circulaire $L_{eff,nc}$	circulaire $L_{eff,cp}$	non circulaire $L_{eff,nc}$
Rangée intérieure	$2\pi m$	$4m+1,25e$	$2P$	$P$
Rangée extérieure	La plus petite de : $2\pi m$ $\pi m+2e_1$	La plus petite de : $4m+1,25e$ $2m+0,625e+e_1$	La plus petite de : $\pi m+P$ $2e_1+P$	La plus petite de : $2m+0,625e+0,5P$ $e,+0,5P$
Mode 1	$L_{eff,1} = L_{eff,nc}$ mais $L_{eff,1} \leq L_{eff,cp}$		$\sum L_{eff,1} = \sum L_{eff,nc}$ mais $\sum L_{eff,1} \leq \sum L_{eff,cp}$	
Mode 2	$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$		$\sum L_{eff,2} = \sum L_{eff,nc}$	

**Tableau1** : Valeurs de la longueur efficace de la semelle du poteau non raidi

Position de la rangée de boulons	Rangée de boulons considérée Individuellement		Rangée de boulons considérée comme une partie de groupes des rangées des boulons	
	circulaire $L_{eff,cp}$	non circulaire $L_{eff,nc}$	circulaire $L_{eff,cp}$	non circulaire $L_{eff,nc}$
Rangée extérieure de la semelle tendue de la poutre	la plus petite valeur de : $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	la plus petite valeur de : $4m + 1,25e$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5 b_p$ $0,5 w + 2m_x + 0,625e_x$	-	-
1 <sup>er</sup> rangée en dessous de la semelle tendue de la poutre	$2\pi n$	$am$	$\pi m + p$	$0,5P + am$ $-(2m + 0,625 e)$
Autre rangée intérieure	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2P$	$P$
Autre rangée extérieure	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + P$	$2m + 0,625e + 0,5P$
Mode 1	$L_{eff,1} = L_{eff,nc}$ mais $L_{eff,1} \leq L_{eff,cp}$		$\sum L_{eff,1} = \sum L_{eff,nc}$ mais $\sum L_{eff,1} \leq \sum L_{eff,cp}$	
Mode 2	$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$		$\sum L_{eff,2} = \sum L_{eff,nc}$	

**Tableau2** : Valeurs de la longueur efficace de la platine d'extrémité

## ANNEXE B

Désignation	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d (mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
( $d_0$ ) (mm)	9	11	13	15	18	20	22	24	26	30	33
A (mm <sup>2</sup> )	50.3	78.5	113	154	201	254	314	380	452	573	707
( $A_s$ ) (mm <sup>2</sup> )	36.6	58	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561
( $\phi$ ) rondelle (mm)	16	20	24	27	30	34	36	40	44	50	52
( $\phi$ ) clé (mm)	21	27	31	51	51	51	58	58	58	58	58
Tôle usuelle (mm)	2	3	4	5	6	7	8	10-14	>14	-	-
Cornière usuelle (mm)	30	35	40	50	60	70	80	120	>120	-	-
( $d_m$ ) (mm)	14	18.3	20.5	23.7	24.58	29.1	32.4	34.5	38.8	44.2	49.60

**Tableau3** : Caractéristique géométrique des boulons

Classe des boulons	Limite d'élasticité $f_{yB}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Résistance à la traction $f_{u.B}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	Allongement de rupture $\varepsilon_r$ [%]
10.9	900	1000	9
8.8	640	800	12

**Tableau4** : Caractéristique mécanique des Boulons

### ANNEXE C

Distances et entraxes voir Figure 3.1	Minimum	Maximum <sup>1) 2) 3)</sup>		
		Structures réalisées en aciers conformes à l'EN 10025 à l'exception des aciers conformes à l'EN 10025-5		Structures réalisées en aciers conformes à l'EN 10025-5
		Acier exposé aux intempéries ou autres influences corrosives	Acier non exposé aux intempéries ou autres influences corrosives	Acier utilisé sans protection
Pince longitudinale $e_1$	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Maximum de $8t$ ou 125 mm
Pince transversale $e_2$	$1,2d_0$	$4t + 40$ mm		Maximum de $8t$ ou 125 mm
Entraxe $p_1$	$2,2d_0$	Minimum de $14t$ ou 200 mm	Minimum de $14t$ ou 200 mm	Minimum de $14t_{\min}$ ou 175 mm
Entraxe $p_2$ <sup>5)</sup>	$2,4d_0$	Minimum de $14t$ ou 200 mm	Minimum de $14t$ ou 200 mm	Minimum de $14t_{\min}$ ou 175 mm

**Tableau5** : Pinces longitudinales et transversales, entraxes minimum et maximum

Coefficients	trou nominal	trou surdimensionné	trou oblong
$k_s$	1	0.85	0.7
$\gamma_{Ms,ser}$ ELS	1.20	1.20	1.20
$\gamma_{Ms,ult}$ ELU	1.10	1.25	1.25

Classe de surface	$\mu$ coefficient de frottement	état de surface
A	0.5	Grenaillé ou sablé
B	0.4	Grenaillé, sablé et peint
C	0.3	Brossé
D	0.2	Non traité

**Tableau5** : valeurs des coefficients  $\mu$  et  $k_s$