

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID – TLEMCEEN



Faculté De Technologie
Département De Génie Civil

Mémoire De Master En Génie Civil

Option : Construction Métallique Et Mixte

Présenté Par :

LAHOUEL Naima

DJELLOULI Wafa Chaima

Thème :

***Calcul Analytique et Numérique
d'un Tronçon en T_e dans un
Assemblage Boulonné***

Soutenu le 04/07/2019

devant le jury composé de :

Dr. BENADLLA Zahira
Dr. MISSOUM Abdelghani
Pr. BOUMECHRA Nadir
M. MERAD BOUDIA Sofiane

Présidente
Examineur
Encadrant
Encadrant

Année universitaire : 2018/2019

Remerciement

Tout d'abord, nous remercions Allah, le Tout-Puissant de nous avoir bénis avec de nombreuses personnes formidables qui ont été nos plus grands soutiens dans notre vie personnelle et professionnelle.

*Nous aimerions saisir cette occasion pour exprimer nos plus sincères salutations et notre gratitude à nos encadrants, **Pr. BOUMECHRA Nadir** et **M. MERAD BOUDIA Sofiane** pour leur grand engagement et leurs efforts sincères tout au long des étapes de la mise en lumière de ce projet.*

Nous tenons à exprimer nos sincères gratitudes aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre modeste travail.

Enfin, nous remercions nos amis qui leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Dédicace

Ma mère la source et l'espoir

Je dédie ce modeste mémoire pour m'avoir patience et encouragement.

! Mon père le repère et l'exemplaire !

Je le remercie pour leur confiance et que « dieu » leur prêt bonheur

Et longue vie.

Je dédie ce travail à : à mes chers frères... Mohamed, Youcef, Rezki...

Et mes chères sœurs... Fatima, Khira, Nouria, Zahra...

A tous ma famille Lahouel et Zenasni.

A mes amis...Ibtissem, Houda, Assma, Hayat, Maroua, Setti...

*Sans oublier tous les enseignants et étudiants de la filière construction
métallique et mixte 2019.*

LAHOUEL Naima

Dédicace

Ce travail humble est entièrement dédié à mes parents, à la famille BENAÏRED et DJELLOULI, qui ont été notre source d'inspiration et nous ont donné de la force, qui nous apportent continuellement leur soutien moral, spirituel, émotionnel et financier.

À mes frères, à mes sœurs, à mes professeurs, à mes amis et camarades de la filière construction métallique qui ont partagé leurs conseils et leurs encouragements pour que je puisse arriver jusqu'au bout.

Je suis reconnaissante pour tout ce que j'ai.

DJELLOULI Wafa Chaima

Résumé

Les assemblages boulonnés sont la méthode la plus répandue pour relier plusieurs éléments structuraux. Ce travail est consacré au calcul analytique et numérique d'un tronçon en té d'un assemblage boulonné. Afin d'évaluer le comportement de l'assemblage on servira de la norme EN 1993-1-8 et CCM97, une introduction générale sera fournie à propos, ensuite on adoptera la méthode des composantes. Un tronçon en Té peut être utilisé qui sert à décrire la zone tendue de l'assemblage en déterminant la longueur efficace de chaque mécanisme circulaire et non circulaire à son rôle nous permet de calculer différentes forces de traction et déterminer les modes de ruine. Ensuite on va présentera dans chapitre 3 quelques recherches expérimentales, Le 4^{ème} chapitre est consacré pour la modélisation de notre tronçon en té un IPE300 est utilisée pour extraire les courbes force-déplacement qui vont être comparé avec les résultats analytiques et expérimentaux. On terminera ce travail par une étude paramétrique ou on va varier l'épaisseur de la semelle et le diamètre du boulon. Enfin une conclusion.

Mots clés : Eurocode 3 ; méthode des composantes ; tronçon en té, zone tendue ; assemblage boulonné ; modélisation éléments finis ; CCM97

Abstract

Bolted connections are a popular way different component of steel structure. The aim of this work is to evaluate the tension zone of a joint. Different methods are applied to calculate tension resistance one of them component method according to Eurocode 3 part 1-8 and CCM97. This work focuses only on calculating the resistance of components located in the tension zone of an IPE300 section. In order to design the resistance of components subjected to tensile forces, a simple substitute mode, the so-called T-stub is adopted to determine resistance, stiffness and rotation capacity. At first design, procedure is briefly presented. In chapter 2, we presented how to calculate the effective length in circular mechanism an non-circular one and the failure modes. The equation of L_{eff} depends on the configuration of the T-stub like the number of bolts, the distance of the bolts to the edge, the proximity of stiffeners.... Chapter 3 is dedicated to the researches the state of art of several T-stubs. Chapter 4 the analytical results are compared with 2D FE predictions and experimental results to be able to describe the force-displacement response of the T-stub model. At the end a parametric study is carried out and a conclusion.

Keys words: Eurocode 3, Components method, T-stub, T-stub in tension, finite elements, bolted joints, CCM97

التلخيص

تعتبر الوصلات المعدنية الموصولة بالبراعي الأكثر استعمالاً في المنشأة المعدنية. سنتطرق في هذا المشروع الى دراسة القطاعات المعرضة لشد وتحديد سلوكها. لإتمام هذا العمل سنستعين بالقوانين الأوروبية اوكود3 والجزائرية CCM97 .

الطريقة المتبعة لدراسة سلوك الوصلة المعدنية هي نظرية المكونات هي احدى الطرق الميكانيكية التي تمثل سلوك الوصلة وتنص على تقسيم العقدة الى ثلاث مناطق منطقة الضغط منطقة القص ومنطقة الشد ويتم دراسة كل منطقة بشكل منفرد وفي هذا البحث سنتطرق لمنطقة الشد بأخذ جزء على شكل (T) ثم سنقوم بعدها بحساب **الطول الفعال** L_{eff} بحسب خطوط الانكسار. مما يمكننا من حساب المقاومة المرنة للشد وعزم المقاوم المرن بعدها معامل الصلابة. ننتقل الى الجزء الثالث حيث سنقوم بتناول بعض الدراسات المرجعية حول تجارب على وصلات مماثلة يليها نمذجة الوصلة واستخلاص منحنيات القوة-انتقال و مقارنتها مع النماذج التجريبية والتحليلية. في الفصل الخامس سنقوم بتغيير بعض العناصر مثل سمك الصفيحة و قطر البراعي. ثم سنختتم العمل بملخص وتوصيات

الكلمات المفتاحية: الكود الأوروبي، الوصلة المعدنية، نظرية المكونات، مطاوعة العقدة المعدنية، سعة الوران، المقاومة اللدنة، نظرية العناصر المحدودة.

Table des matières

Dédicaces

Résumé

Liste des figures.....	i
Liste des tableaux.....	iv
Liste des notations.....	v
Introduction générale.....	1

Chapitre I : ASSEMBLAGES METALLIQUES

1.1 Introduction.....	3
1.2 Définition et rôle d'un assemblage.....	3
1.3 Différentes modes et moyens d'assemblages.....	3
1.3.1 Les rivetages.....	3
1.3.2 Le boulonnage	4
1.3.3 Le soudage.....	6
1.4 Fonctionnement des assemblages.....	7
1.5 Classification générale des assemblages.....	7
1.5.1 Selon le type.....	7
1.5.2 Selon le mode constructif.....	8
1.6 Classification des assemblages selon l'EC3.....	9
1.6.1 Classification des assemblages par rigidité.....	9
1.6.2 Classification des assemblages par la résistance.....	10
1.7 Caractérisation du comportement des assemblages.....	11
1.8 Renforcement d'assemblages.....	12
1.9 Approche analytique des assemblages boulonnés selon l'EC3.....	14
1.9.1 Présentation des méthodes des composantes.....	14
1.9.2 Identification des composantes.....	15
1.9.3 Résistance de l'assemblage.....	16
1.10 Conclusion.....	17

Chapitre II : Approche analytique de la zone tendue

2.1 Introduction.....	18
2.2 Comportement de la zone tendue (tronçon en T).....	18
2.3 Longueurs efficaces du tronçon en T.....	18
2.4 Comportement général d'un tronçon en T.....	19
2.5 Résistance en traction du tronçon en T.....	20
2.6 Rigidité axiale du tronçon en T.....	24
2.7 Conclusion.....	25

Chapitre III : Recherche bibliographique

3.1 Introduction.....	26
3.2 Bursi et Jaspert (1995).....	28

3.3 Sherbourne et Bahaari (1996).....	29
3.4 Mistakidis et al (1998).....	29
3.5 Swanson (Swanson et Leon, 2002).....	30
3.6 Lemonis et Gantes (2006).....	33
3.7 Kim et al (2007).....	34
3.8 Sethil Abdel Aziz (2015).....	35
3.9 Merad Boudia Sofiane et al (2018).....	36
3.10 Conclusion.....	37

Chapitre IV : Etude Paramétrique

4.1 Introduction.....	38
4.2 Présentation de l'outil de calcul ANSYS.....	38
4.3 Géométrie de l'étude.....	38
4.3.1 Géométrie.....	38
4.3.2 Matériaux.....	39
4.4 Développement du modèle en élément finis.....	39
4.4.1 Eléments de maillage.....	39
4.4.2 Conditions aux limites et contact.....	40
4.5 Résultats numériques.....	40
4.5.1 Loi force-déplacement.....	40
4.5.2 Mode de ruines.....	42
4.5.3 Effet de la déformation de l'âme.....	42
4.5.4 Comparaison avec l'EC3.....	43
4.5.5 Etude de l'effort dans le boulon.....	45
4.5.6 Etude de l'effort de levier.....	45
4.6 Conclusion.....	48

Chapitre V : Modélisation d'un assemblage en T

5.1 Introduction.....	49
5.2 Analyse de l'influence de la semelle du tronçon en T.....	49
5.2.1 Comportement global.....	49
5.2.2 Comparaison avec l'Eurocode 3.....	51
5.2.3 Effort dans le boulon.....	51
5.2.4 Force de levier.....	52
5.3 Analyse de l'influence de diamètre de boulon.....	52
5.3.1 Comportement global.....	52
5.3.2 Comparaison avec l'Eurocode 3.....	53
5.3.3 Effort dans le boulon.....	54
5.3.4 Force de levier.....	54
5.4 Synthèses.....	54
5.5 Conclusion.....	55
Conclusion générale.....	56
Référence bibliographique.....	57
Annexe.....	60

Liste des Figures

- Figure 1** : Configuration d'assemblages dans le plan.
- Figure 2** : Rivet et rivet à anneau.
- Figure 3** : Constituant d'un boulon d'assemblage.
- Figure 4** : Boulon de charpente métallique et boulon à haute résistance.
- Figure 5** : Entraxes pour trous en parallèle et en quinconce.
- Figure 6** : Assemblages poteau poutre soudés.
- Figure 7** : Assemblages dans une structure métallique.
- Figure 8** : Assemblages par platine d'extrémité boulonnée.
- Figure 9** : Assemblage de continuité de poutre et poteau.
- Figure 10** : Assemblage pied de poteau.
- Figure 11** : Assemblages par cornières d'âme et/ou des semelles.
- Figure 12** : Comportement des assemblages métalliques.
- Figure 13** : Classification des assemblages poteau-poutre par rigidité.
- Figure 14** : Limite de classification en résistance.
- Figure 15** : Assemblages à pleine résistance.
- Figure 16** : Comportement des assemblages métallique.
- Figure 17** : Courbe moment-rotation pour un assemblage.
- Figure 18** : Moyens de renforcement des assemblages selon l'EC3.
- Figure 19** : Assemblages avec raidisseurs de platine d'about débordante.
- Figure 20** : Zones critiques dans les assemblages poutre-poteau.
- Figure 21** : Composantes de base de l'assemblage par platine d'about boulonnée.
- Figure 22** : Répartition des efforts dans un assemblage poutre-poteau par platine d'about boulonnée.
- Figure 23** : Tronçon en T_e : assemblage par platine d'about boulonnée.
- Figure 24** : Schémas des lignes de plastification des tronçons en T (Mécanisme individuel).
- Figure 25** : Schémas des lignes de plastification des tronçons en T (Mécanisme de groupe).
- Figure 26** : Effet de levier dans un tronçon en T.
- Figure 27** : Deux tronçons en T par quatre boulons.
- Figure 28** : La longueur de boulon à allongement.

Figure 29 : Plastification totale de la semelle.

Figure 30 : Ruine de boulons avec plastification de la semelle.

Figure 31 : Ruine de boulons.

Figure 32 : Plastification de l'âme et allongement de boulon.

Figure 33 : Plastification de la semelle et ruine de boulon.

Figure 34 : Approche 'EC' pour calculer la rigidité initiale d'un assemblage.

Figure 35 : Caractéristiques géométriques des tronçons en Té.

Figure 36 : Différents modes de ruine.

Figure 37 : Courbes contraintes-déformations.

Figure 38 : Distribution des contraintes.

Figure 39 : L'évolution des contraintes dans le boulon et rondelle.

Figure 40 : Courbe force-déplacement.

Figure 41 : Contraintes dans la semelle et l'âme.

Figure 42 : Courbes expérimentales F-dép.

Figure 43 : Un model 2D d'un tronçon en Té typique.

Figure 44 : courbes de contraintes-déformation.

Figure 45 : Préparation d'expérience.

Figure 46 : Rigidité de la semelle.

Figure 47 : model du ressort d'un tronçon en Té.

Figure 48 : Model ABAQUS de l'échantillon.

Figure 49 : Rigidité du boulon.

Figure 50 : Comparaison entre la force analytique et numérique.

Figure 51 : (a) Composants du tronçon en Té dans un assemblage poutre-poteau et (b) définition du model analytique.

Figure 52 : Approximation matérielle bilinéaire du premier tronçon (a) et (b) T2.

Figure 53 : Courbes force- déplacement pour T1 (a) et T2 (b).

Figure 54 : Géométrie du tronçon Té de l'expérience.

Figure 55 : Courbe force-déplacement de V1 et l'expérience de Sethi.

Figure 56 : Courbes force-déplacement de résultats numériques de T1.

Figure 57 : La déformé du tronçon T1 numérique.

Figure 58 : Géométrie des tronçons étudiés.

Figure 59 : Validation du modèle- loi forces déplacements et déformées au dernier pas de chargement.

Figure 60 : Effet de la précontrainte sur l'évolution de F, B et Q.

Figure 61 : Géométrie du tronçon en T.

Figure 62 : Donnée matérielles.

Figure 63 : Modèle de maillage de tronçon.

Figure 64 : Contacte entre deux tronçons.

Figure 65 : Courbes force-déplacement de tronçon T1 (modèle numérique et expérimentale).

Figure 66 : Détermination des résistances (F_e , F_p , F_u) et la rigidité K_{ini} .

Figure 67 : La distribution de contrainte de Von mises.

Figure 68 : Contraintes plastiques de chaque élément isolé.

Figure 69 : Courbes force-déplacement de tronçon en Té (modèle numérique).

Figure 70 : Courbes force-déplacement de tronçon T1 (modèle analytique, numériques et expérimental).

Figure 71 : L'effet sur chaque nœud.

Figure 72 : Force dans le boulon en fonction de la force extérieure appliquée.

Figure 73 : L'effet de levier sur chaque nœud.

Figure 74 : Evolution de la force levier résultante.

Figure 75 : Evolution du rapport $[Q/F]$ et $[B/F]$ en fonction de F.

Figure 76 : Les contraintes (F_e , F_p , F_u).

Figure 77 : Les paramétriques du tronçon.

Figure 78 : Effet de t_f sur le comportement global avec déformation de l'âme.

Figure 79 : Effet de t_f sur l'évolution de contraintes plastique.

Figure 80 : Effet de t_f sur l'effort dans le boulon.

Figure 81 : Effet de t_f sur la force de levier.

Figure 82 : Effet de d_b sur le comportement global.

Figure 83 : Effet de d_b sur l'évolution de contraintes plastique.

Figure 84 : Effet de d_b sur l'effort dans le boulon.

Figure 85 : Effet de d_b sur la force de levier.

Liste des tableaux

Tableau 1 : Valeurs nominales de la limite d'élasticité et de la résistance ultime à la traction.

Tableau 2 : Caractéristiques dimensionnelles des boulons.

Tableau 3 : Les zones sollicitations.

Tableau 4 : Caractéristiques du tronçon en Té.

Tableau 5 : Caractéristiques des boulons

Tableau 6 : Model du rigidité des boulons.

Tableau 7 : Détails matériels et géométriques.

Tableau 8 : Effet de la précontrainte sur la rigidité initiale.

Tableau 9 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des tronçons en Té.

Tableau 10 : les résistances (F_e, F_p, F_u) et la rigidité de la modèle Num et Exp.

Tableau 11 : Rigidité initiale du tronçon avec/sans âme.

Tableau 12 : Résistance de tronçon en Té (valeurs analytiques et numérique).

Tableau 13 : Résistance de tronçon : comparaison EC3/MEF/T.exp.

Tableau 14 : Rigidité initiale de tronçon : comparaison EC3/MEF/T.exp.

Tableau 15 : Les géométries du tronçon.

Tableau 16 : Les propriétés matérielles des aciers et des boulons.

Tableau 17 : Les résistances et les rigidités avec une variation de t_f (modèle MEF et EC3).

Tableau 18 : Les résistances et les rigidités avec d_b est change (modèle MEF et EC3).

Liste des Notation

A_s : La section de la partie filetée.

d : diamètre du boulon.

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.

F_{el} : Force élastique.

F_{Rd} : la résistance à la traction.

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

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

f_t : Effort de traction admissible.

F_{ub} : La résistance ultime du boulon.

F_{yb} : La résistance élastique du boulon.

F_{yt} : La résistance élastique du tronçon.

F_{ut} : La résistance ultime du tronçon.

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

f_y : la limite d'élasticité.

K : Coefficient de frottement vit écrou au niveau de la file.

K_{ini} : La rigidité initiale.

k_f : Rigidité de la semelle du poteau.

k_b : Rigidité axiale des boulons.

K_w : Rigidité de l'âme du poteau.

k_p : Rigidité de la platine d'extrémité.

k_s : Coefficient de forme des trous.

L_b^* : La longueur seuil de boulon.

L_b : La longueur utile de boulon.

L_{eff} : La longueur efficace.

MEF : Méthode élément finie.

$M_{pl,RD}$: Moment plastique de la semelle.

Q : Force de levier.

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

t_e : Epaisseur de l'écrou.

t_f : Epaisseur de la semelle.

t_h : Epaisseur de la tête

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

t_r : Epaisseur de rondelle.

t_w : Epaisseur de l'âme.

γ_{Mb} : La résistance des boulon à la traction.

Introduction générale

Les assemblages boulonnés sont principalement utilisés pour relier une poutre à un poteau ou pour raccorder deux poutres ensemble et plusieurs d'autres éléments. Ils servent aussi à transférer les forces supportées par un élément de structure à d'autres parties d'une structure ou aux supports. Les assemblages par platine d'extrémité sont de plus en plus utilisés comme assemblages résistants aux moments dans les structures en acier en raison de leurs facilités de fabrication et de la rapidité du montage sur site.

Actuellement, la conception des assemblages en acier sous charge monotone est basée sur la "méthode des composants" établie dans l'Eurocode 3, partie 1.8 [24]. La méthode exige la caractérisation précise (rigidité, résistance et ductilité) de chaque composant actif (représentant une partie spécifique d'un assemblage) qui contribue à une ou plusieurs de ses propriétés structurelles. Alors, chaque composant est caractérisé comme un ressort bilinéaire.

À la fin, tous les ressorts sont assemblés dans un modèle de liaisons et le comportement de l'assemblage est calculé. Le modèle tronçon en T est utilisé pour décrire les composants dans la zone tendue des assemblages, comprenant la platine d'extrémité en flexion, la semelle de poteau en flexion. La formule pour la caractériser (résistance théorique et rigidité initiale) est présentée dans les chapitres 6.2.4 et 6.3.2 de l'Eurocode 3, partie 1.8 [24]. En ce qui concerne la capacité de rotation, au chapitre 6.4 de la même norme se réfère au fait que les composants précédents, en plus de l'âme du poteau en cisaillement, sont les composants qui procurent la capacité de rotation à l'assemblage poutre-poteau en flexion. Le présent document porte sur l'élaboration de procédures analytiques pour décrire le comportement dynamique du modèle en té. Les formules permettant de calculer la résistance d'un élément en T conformément à l'Eurocode 3, partie 1.8 [24] sont présentées par des équations, chaque équation décrit un mode de ruine. La résistance du tronçon en té est la valeur minimale obtenue à partir de ces différentes modes. Pour calculer la résistance des rotules plastique formées il faut tenir en compte la longueur efficace qui peut être calculée conformément aux tableaux 6.4, 6.5 et 6.6 de l'Eurocode 3, partie 1.8 [24]. En ce qui concerne la rigidité, la même norme [6] fournit une estimation de la rigidité élastique, une fois les rigidités élastiques de chacun des composants est assemblés dans le modèle à ressort, il est possible d'obtenir la rigidité de rotation initiale des assemblages.

La simulation par éléments finis des assemblages expérimentalement testés a été modélisée à l'aide du logiciel ANSYS, afin de comprendre bien le comportement des tronçons en té. Dans la pratique, les logiciels de calcul par éléments finis sont des aides pour l'ingénieur. La mise au point de pré et post-processeurs conviviaux et rendu l'utilisation d'un code de calcul très simple. Le maillage automatique offre des possibilités très intéressantes, mais la construction du maillage par éléments finis dépend encore largement des choix de l'ingénieur. Cette étape est fondamentale dans le développement du modèle des éléments finis.

Dans notre projet de fin d'études, on s'intéresse principalement à l'étude d'un tronçon en T ayant une configuration de boulons. Dans les attaches boulonnées, un tronçon en T équivalent tendu peut être utilisé pour modéliser la résistance des composants de base.

Le mémoire de notre projet de fin d'études est structuré comme suit :

Chapitre 1 : Une introduction sur les assemblages est établie et qui basée sur la partie 1-8 de l'EN 1993 (Eurocode 3) qui donne des règles pour la conception et le calcul des assemblages.

Chapitre 2 : Une introduction concernant la méthode des composantes (tronçon en té) sera établie ensuite pour déterminer la longueur efficace et les différents modes de ruine. Un modèle analytique sera traité suivant les règles d'Eurocode 3.

Chapitre 3 : Il contient les résultats des recherches expérimentales sur différents exemples de tronçon en té

Chapitre 4 : On va introduire une modélisation numérique à l'aide du logiciel Ansys, en utilisant des éléments finis plans à 4 nœuds ayant 2 degrés de libertés ; en vue de la symétrie, seul un quart de l'assemblage est modélisé et on fait une comparaison entre les résultats numériques, analytiques et expérimentaux.

Chapitre 5 : Dans une autre partie on va faire une étude paramétrique en variant l'épaisseur de la semelle t_f et le diamètre du boulon d_b et on finira par comparer les résultats. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous présenterons les recommandations et les résultats de cette étude paramétrique. Ce travail est fait afin d'établir le moment résistant $M_{j,Rd}$ qui est déterminé à partir le calcul de la force de traction de chaque rangées de boulon.

On termine notre mémoire par une conclusion générale où est présentée une synthèse globale du travail accompli.

CHAPITRE I

Assemblages Métalliques

1.1 Introduction

L'Eurocode 3 s'applique aux calculs des bâtiments et ouvrages en génie en civil en acier. Il est conforme aux principes et exigences concernant la sécurité et l'aptitude au service des structures. L'Eurocode est subdivisé en différentes parties, il comprend : EN 1993-1-8 calcul des assemblages.

Les assemblages de structures en acier permettent d'assurer la continuité entre les éléments, tels que les poteaux et les poutres. Ces assemblages, qui constituent des zones de discontinuité, ont une influence sur le comportement global de la structure. La caractérisation du comportement des assemblages n'est pas aisée à cause de leur complexité géométrique et mécanique. Cette complexité résulte du nombre d'éléments intermédiaires utilisés (boulons, platine, cornière...) ainsi que des formes géométriques variées et propriétés matérielles différentes. Elle engendre de fortes discontinuités et conduit à un comportement global non linéaire de l'assemblage. Habituellement, les assemblages sont considérés rigides ou articulés.

1.2 Définition et rôle d'assemblage

Un assemblage est un dispositif qui permet de réunir et solidariser plusieurs pièces entre elles, en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitation entre les pièces assemblées sans générer des sollicitations parasites [1].

Pour les assemblages, selon le nombre et la position des éléments assemblés entre eux dans le plan, nous définissons des configurations d'assemblages unilatérales (sur un seul côté) (**Figure 1-a**), ou bilatérales (sur deux côtés) (**Figure 1-b**) [1].

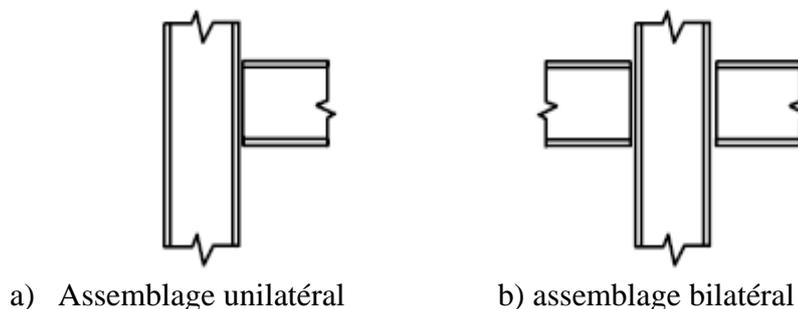


Figure 1 : Configurations d'assemblages dans le plan

1.3 Différents modes et moyens d'assemblages

1.3.1 Les rivetages [2]

i. Rivets simples

Les rivets ont été le premier moyen d'assemblage utilisé en construction métallique. Actuellement, l'emploi des rivets est limité et on leur préfère, dans la plupart des pays industrialisés, les boulons et la soudure. On les rencontre donc essentiellement dans les structures anciennes, datant du début du 20^{ème} siècle (**Figure 2**).

ii. Rivets à anneau

Les rivets à anneau (rivelons) sont des éléments de connexion mécanique qui tiennent à la fois du rivet et du boulon. L'acier des rivets à anneau est un acier à haute résistance de types 8.8. Ils sont utilisables sur tous dans les ponts. Les rivelons sont utilisés dans les ponts pour éviter la torsion.

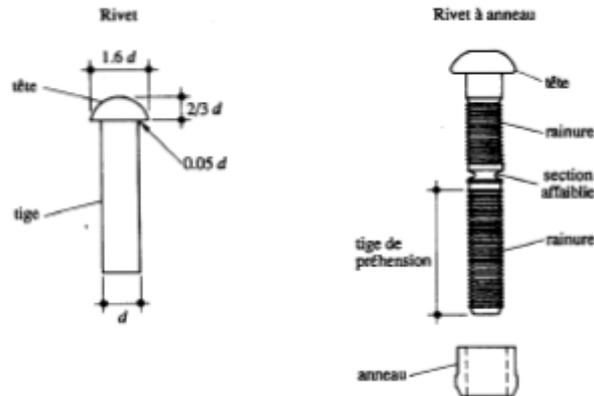


Figure 2 : Rivet et rivet à anneau.

1.3.2 Le boulonnage [3]

Le boulonnage constitue le moyen d'assemblage le plus utilisé en construction métallique du fait de sa facilité de mise en œuvre et des possibilités réglage qu'il ménage sur site.

i. Les boulons :

Un boulon est un ensemble d'une vis, écrou le cas échéant, d'une ou deux rondelles.

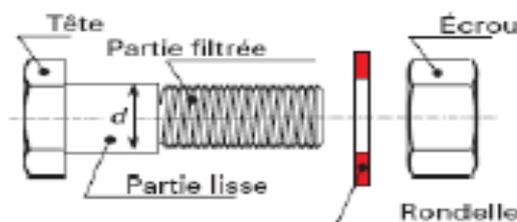


Figure 3 : Constituant d'un boulon d'assemblage

iii. Caractéristiques mécaniques des boulons :

Les caractéristiques mécaniques de leurs aciers constitutifs sont données dans le **tableau 1**. Le tableau présente les types du boulon avec ses limites d'élasticité f_{yb} et leur résistance à la traction f_{ub} .

	Boulons ordinaires					Boulons HR	
Classe de boulon	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} (MPa)	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} (MPa)	400	400	500	500	600	800	1000

Tableau 1 : Valeurs nominales de la limite d'élasticité et de La résistance ultime à la traction

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

iii. Caractéristiques dimensionnelles des boulons :

Les caractéristiques dimensionnelles principales des boulons ordinaires sont données dans le tableau 2.

	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d (mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
d₀ (mm)	9	11	13	15	18	20	22	24	26	30	33
A (mm²)	50.3	78.5	113	154	201	254	314	380	452	573	707
A_s (mm²)	36.6	58	84.3	115	157	192	245	303	353	459	561
Φ_{rondelle}(mm)	16	20	24	27	30	34	36	40	44	50	52
Φ_{clé} (mm)	21	27	31	51	51	51	58	58	58	58	58
d_m (mm)	14	18.3	20.5	23.7	24.58	29.1	32.4	34.5	38.8	44.2	49.6

Tableau 2 : Caractéristiques dimensionnelles des boulons

d : Diamètre de la partie lisse de la vis ;

d₀ : Diamètre nominal du trou ;

A : Section nominale du trou ;

A_s : Section résistance de la partie fileté ;

d_m : Diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit à la tête du boulon.

La figure suivante montre les différentes parties composant un boulon ordinaire et un boulon haute résistance. Ces derniers se distinguent des boulons de charpente métallique par l'inscription de la classe de qualité de l'acier du boulon sur leur tête et leurs rondelles.

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

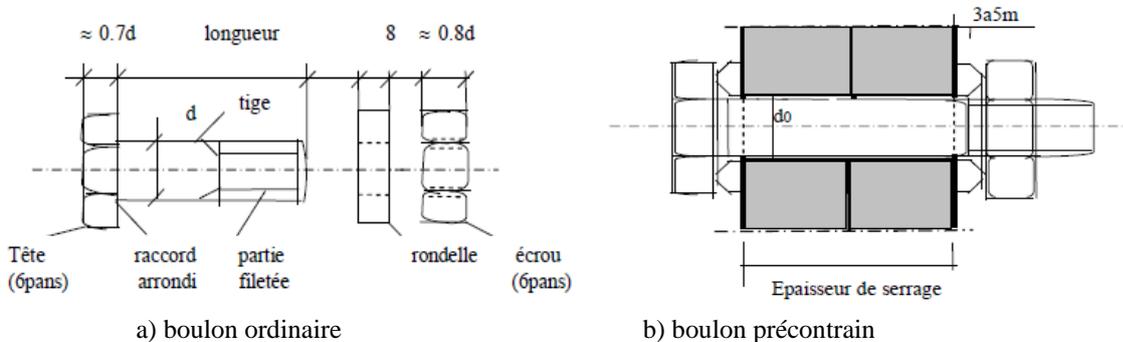
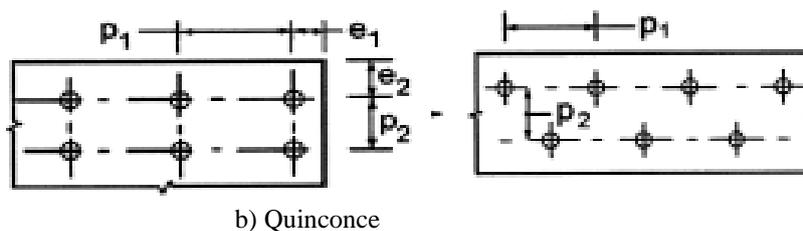


Figure 4 : Boulon de charpente métallique et boulon à haute résistance

La disposition des boulons dans une pièce est réglementée par l'EC3, suivant la nature de l'effort appliqué et la disposition des trous (en parallèle ou en quinconce) **figure 5**.



a) Parallèle

b) Quinconce

Figure 5 : Entraxes pour trous en parallèle et en quinconce.

Avec :

EC3

e_1 : Pince longitudinale = $1.2 d_0$

e_2 : Pince transversale = $1.2 d_0$

p_1 : Entraxe = $2.2 d_0$

p_2 : Entraxe = $2.4 d_0$

CCM97

$e_1 = 1.2 d_0$

$e_2 = 1.5 d_0$

$p_1 = 2.2 d_0$

$p_2 = 3 d_0$

1.3.3 Le soudage

Le soudage est un procédé qui permet d'assembler en ajoutons de la matière qui obtenue par fusion ou plastification.

Le soudage implique donc : [4]

- L'existence d'une source de chaleur suffisante pour obtenir la fusion du matériau, elle peut être d'origine électrique (résistance, arc, friction), chimique (combustion de gaz), mécanique (friction) ;
- Une aptitude du matériau à être soudé, appelée soudabilité La soudabilité à haute température dépend des qualités propres du matériau, mais également de divers paramètres limitatif, tels que :
 - ✓ Les modifications de la structure physico-chimique du matériau ;
 - ✓ L'apparition de fissurations et de critiques au refroidissement ;
 - ✓ L'apparition de déformations géométriques dues aux effets de dilatation et retrait ;
 - ✓ La naissance de contraintes internes.

Le soudage présente, par rapport au boulonnage, plusieurs avantages :

- Il assure la continuité de la matière, et de ce fait garantit une bonne transmission des sollicitations ;
- Il dispense de pièces secondaire (goussets attaches,...) ;
- Il est de moindre encombrement et plus esthétique que le boulonnage.

En revanche, il présente divers inconvénients :

- Le métal de base doit être soudable ;
- Le contrôle des soudures est aléatoire ;
- Le soudage exige une main-d'œuvre qualifiée et un matériel spécifique.

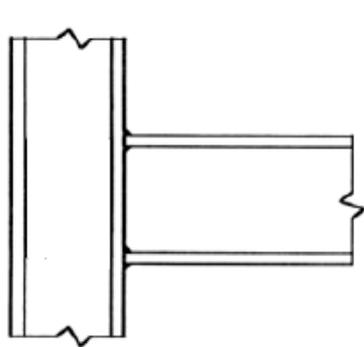


Figure 6 : Assemblages poteau poutre soudés

1.4 Fonctionnement des assemblages

L'assemblage fonctionne en trois types sont : par obstacle, adhérence et mixte.

i. Fonctionnement par obstacle :

C'est le cas des boulons ordinaires, non précontraints dont les tiges reprennent les efforts et fonctionnement en cisaillement.

ii. Fonctionnement par adhérence :

Dans ce cas, la transmission des efforts s'opère par adhérence des surfaces des pièces en contact. Cela concerne le soudage, et le boulonnage par boulons HR.

iv. Fonctionnement mixte :

C'est le cas du rivetage (et dans les cas extrêmes, du boulonnage HR) à savoir que les rivets assurent la transmission des efforts par adhérence des pièces jusqu'à une certaine limite, qui lorsqu'elle est dépassé, fait intervenir les rivets par obstacle au cisaillement. [5]

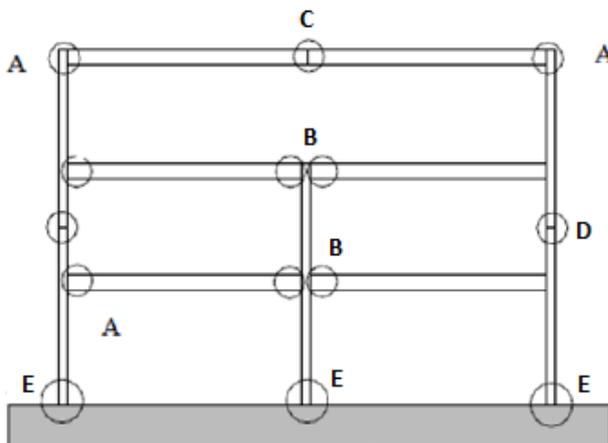
1.5 Classification générale des assemblages

On peut classer les assemblages en acier selon leur type ou leur mode constructif

1.5.1 Selon le type

Dans les ossatures des bâtiments métalliques, les éléments structuraux sont reliés par des assemblages. Suivant la nature des éléments assemblés, on distingue (**Figure 7**) entre les liaisons suivantes :

- Assemblages poutre-poutre
- Assemblages poutre-poteau ;
- Assemblages poteau-fondation « pied pote-au ». [6]



- A : poutre-poteau de rive
- B : poutre-poteau intermédiaire
- C : continuité de poutre
- D : continuité de poteau
- E : pied de poteau

Figure 7 : Assemblages dans une structure métallique

1.5.2 Selon le mode constructif

A propos de ce mode en possèdent deux types d'assemblages : assemblages par platine et l'autre par cornière.

i- Assemblages par platine d about

➤ **Assemblage poutre-poteau**

Dans ce type d'assemblages, la transmission des moments fléchissant de la poutre au poteau se fait par l'intermédiaire d'une platine d'about soudés 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 débordante (**Figure 8**). [7]

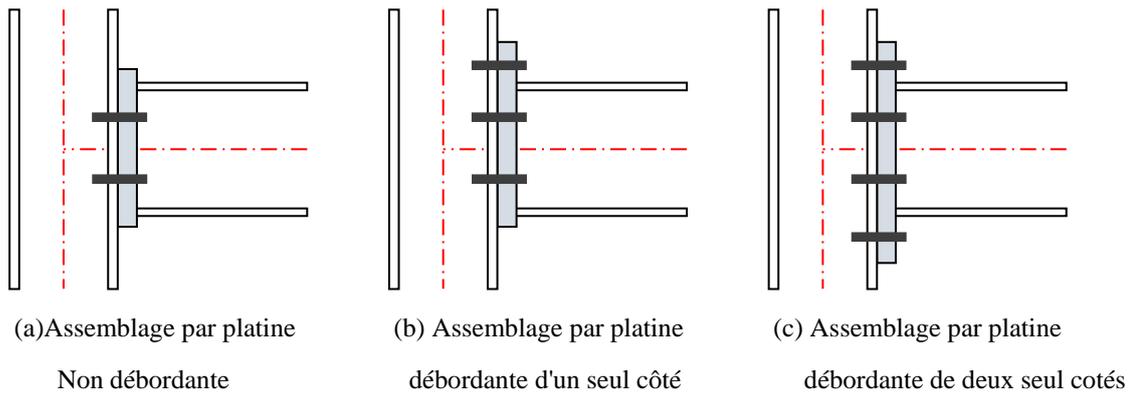


Figure 8 : Assemblages par platine d'extrémité boulonnée

➤ **Assemblages de continuité de poutre ou de poteaux**

La figure (9) montre des assemblages avec platines d'about qui assurent la continuité de poutres ou de poteaux. Les platines peuvent être débordantes ou non débordantes.

Une alternative à l'utilisation de platines d'about fait appel aux assemblages par couvre-joint (Figure 9a) avec des zones d'attaches boulonnées réalisées sur les âmes et les semelles des poutres.

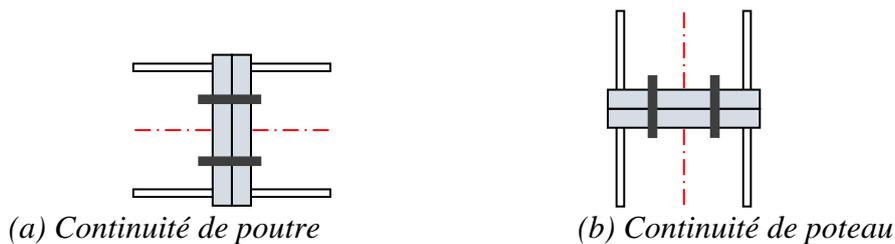


Figure 9 : Assemblage de continuité de poutre et de poteau.

➤ **Assemblages pied poteau**

Les pieds de poteaux sont souvent les derniers éléments de charpente métalliques à être conçus, mais les premiers éléments demandés sur chantier, par conséquent la conception de ces dernières connexions font partie du chemin critique.

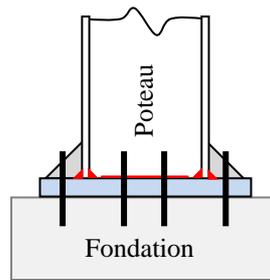
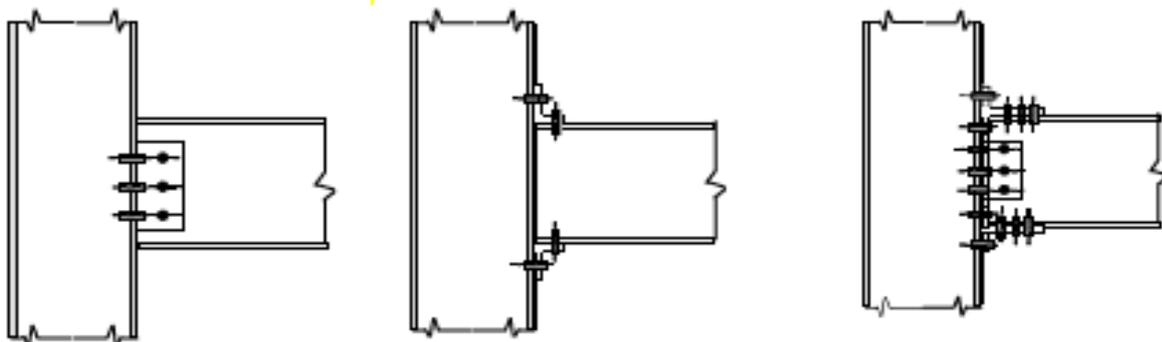


Figure 10 : Assemblage pied de poteau

ii- Assemblages par cornières

Dans ce type d'assemblage (**figure 11**), les cornières sont boulonnées sur les semelles et les âmes du poteau et de la poutre. L'assemblage de type (figure 11a) avec une simple cornière sur l'âme de la poutre est considéré comme articulé. Ce type d'assemblage ne peut transmettre que des efforts tranchants et éventuellement un effort axial de la poutre. Il doit être capable de subir une rotation significative sans développer des valeurs élevées de moment fléchissant. Les assemblages articulés sont utilisés dans une ossature de poutres et poteaux lorsque la rigidité latérale est assurée par d'autres moyens comme les contreventements. [8]



(a) Assemblage par
Cornières d'âme

(b) Assemblage par
cornières de semelles

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

Figure 11 : Assemblages par cornières d'âme et/ou des semelles

Les assemblages boulonnés les plus couramment utilisés sont ceux avec platine d'about ou avec cornière d'âme et/ou de semelle.

1.6 Classification des assemblages selon l'EC3

Selon l'EC3 [24], les assemblages doivent être modélisés en vue d'une analyse globale de la structure. Le type de modélisation des assemblages à adopter dépend de la classification en termes de rigidité (rigide, semi-rigide et articulé), de résistance (résistance complète ou partielle). Les critères de cette classification sont décrits ci-dessous. [7]

1.6.1 Classification des assemblages par rigidité

La rigidité de l'assemblage intervient dans la phase initiale de l'analyse globale des structures en acier. Ainsi lors de la modélisation de la structure en acier, une attention particulière doit être accordée à la rigidité de l'assemblage. Elle influe directement sur le niveau de sollicitation et la flèche dans les poutres, comme illustré sur la figure 11. En particulier, la rigidité des assemblages peut également avoir des effets significatifs sur le comportement de la structure et sur sa stabilité globale. La classification des assemblages, établie par l'approche de l'EN 1993-1-8 [7], distingue

l'assemblage articulé, l'assemblage semi-rigide et l'assemblage rigide et donne les limites de rigidités pour chaque type d'assemblage résumées sur la figure 12. [7,9]

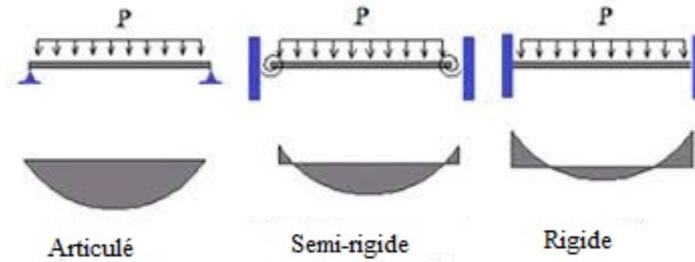
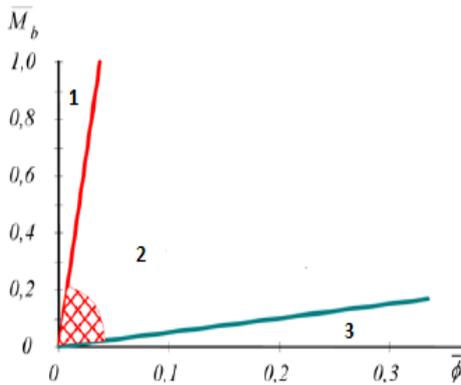


Figure 12 : Comportement des assemblages métalliques



- 1- assemblage rigide si $S_{j,ini} > \alpha EI_b / L_b$
- 2- assemblage semi rigide si $0.5 EI_b / L_b < S_{j,ini} < \alpha EI_b / L_b$
- 3- assemblage articulé si $S_{j,ini} < 0.5 EI_b / L_b$
- $\alpha = 8$ (ossatures contreventées)
- $\alpha = 25$ (ossatures non contreventées)

Notation :

I_b : moment d'inertie de la poutre

L_b : portée de la poutre (entre les axes des poteaux)

$S_{j,ini}$: rigidité initiale de la courbe moment-rotation de l'assemblage

Figure 13 : Classification des assemblages poteau-poutre par rigidité

1.6.2 Classification des assemblages par la résistance

La classification par la résistance fait apparaître les notions d'assemblage à résistance complète, à résistance partielle ou articulé (Figure 14). [10]

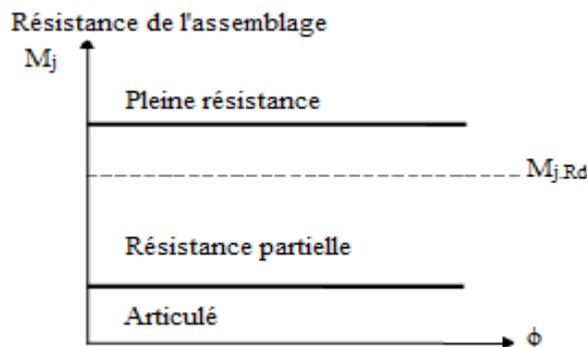
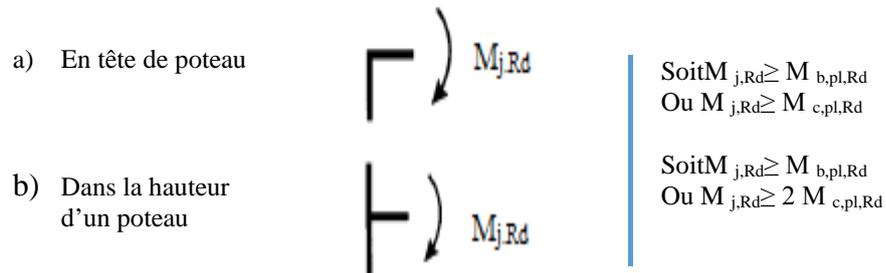


Figure 14 : Limite de classification en résistance

i. Assemblage à résistance complète

Un assemblage à résistance complète possède une résistance plus grande que la résistance des éléments structuraux assemblés [10]. Autrement dit, une éventuelle rotule plastique se formera plutôt dans les éléments structuraux (poutre, poteau), comme illustré sur la **figure 15**.



Légende

$M_{b,pl,Rd}$: Moment résistant plastique d'une poutre.

$M_{c,pl,Rd}$: Moment résistant plastique d'un poteau.

$M_{j,Rd}$: Moment résistant plastique sollicité.

Figure 15 : Assemblages à pleine résistance

ii. Assemblage à résistance partielle

Un assemblage à résistance partielle représente la solution intermédiaire. L'assemblage doit posséder une capacité de rotation suffisante pour assurer la formation de la rotule plastique.

L'assemblage est considéré à résistance partielle si :

$$0,25M_{pl,Rd} \leq M_{j,Rd} \leq M_{pl,Rd}$$

iii. Assemblage articulé

Un assemblage articulé possède une faible résistance, au maximum 25% de la résistance minimale requise pour avoir un assemblage à pleine résistance. [6]

$$M_{j,Rd} < 0,25 M_{pl,Rd}$$

1.7 Caractérisation du comportement des assemblages

Lors de l'analyse structurale, les assemblages entre les éléments structuraux sont traditionnellement modélisés comme rigides ou articulés. Les nœuds articulés ne transmettent aucun moment de flexion et n'empêchent pas la rotation des éléments assemblés. Quant aux nœuds rigides, ils interdisent toute rotation relative entre les éléments assemblés et assurent ainsi la transmission intégrale des efforts appliqués. [11]

Toutefois, le comportement réel des assemblages est situé entre les deux cas extrêmes, généralement supposés rigides ou articulés. Les assemblages les plus flexibles sont capables de transmettre un certain moment de flexion tandis que les assemblages les plus rigides autorisent toujours une certaine rotation relative des pièces assemblées [12, 13, 14, 15, 16, 17]. L'acceptation de cette réalité a conduit à l'introduction du concept de la semi-rigidité dans les approches de calcul et de dimensionnement des structures (EN 1993-1-8). Ce concept permet de tenir compte du comportement réel de l'assemblage situé entre l'articulation et l'encastrement (**Figure 16**). Il est

modélisé au moyen d'un ressort en rotation placé au d'intersection entre les axes de la poutre et du poteau.

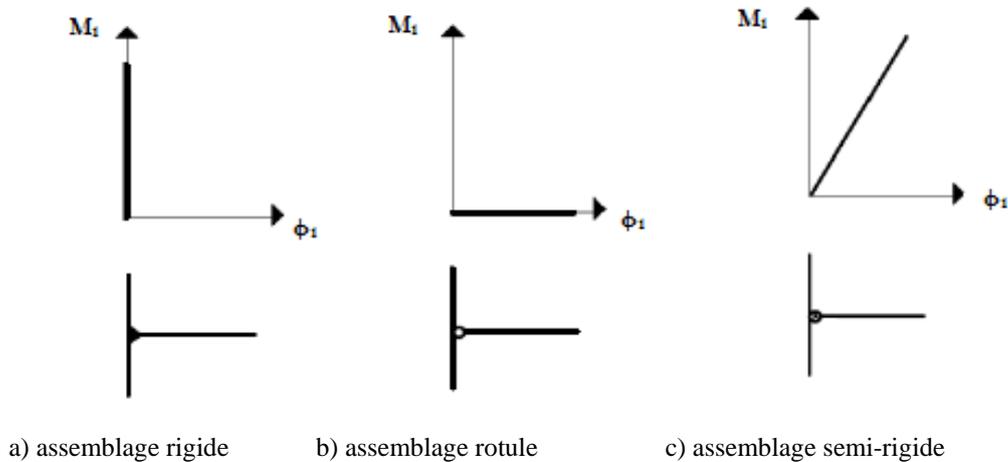


Figure 16 : Comportement des assemblages métalliques

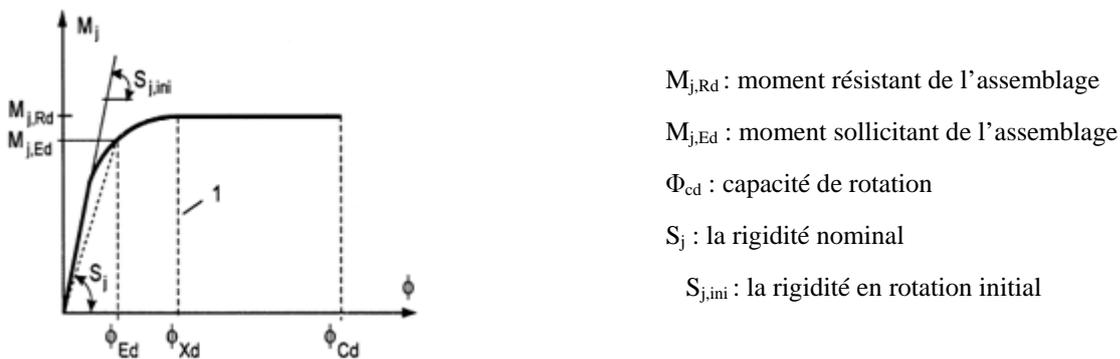


Figure 17 : Courbe Moment-Rotation pour un assemblage

Il a été démontré que l'introduction du concept d'assemblage semi-rigide dans les ossatures permettait par un calcul plus précis et plus réaliste, d'effectuer une vérification plus sûre des critères de dimensionnement de l'ossature et d'aboutir à une configuration structurale moins couteuse. [18,19]

1.8 Renforcement d'assemblages

L'assemblage par platine d'about est largement utilisé dans les structures métalliques et sa popularité est attribuée à la simplicité et l'économie de sa fabrication [12, 13, 14]. Toutefois, ces assemblages sont extrêmement complexes dans leur analyse et comportement structural, particulièrement quand ils sont soumis à des efforts très importants. Il convient donc d'être particulièrement vigilant sur les détails de conception des assemblages car c'est en cet endroit que se concentrent toutes les difficultés par suite de la présence de pièces intermédiaires. De surcroit, ces zones à brusque changement de géométrie induisent des efforts localisés et des concentrations de contraintes. Ainsi, des ajustements peuvent être faits à un assemblage par platine d'about simple pour répondre aux exigences de différentes situations[20]. Par exemple, des raidisseurs de platine d'about peuvent être ajoutés pour augmenter la rigidité de la platine et/ou sa résistance tout en réduisant son épaisseur. Trois moyens de renforcement sont actuellement couverts dans l'EN 1993-1-8 : les raidisseurs transversaux de poteau les contre-plaques et doublures d'âme.

- **Les raidisseurs transversaux de poteau** : ils sont soudés, au niveau des semelles en zones tendue et comprimé du poteau (**Figure 18a**), pour augmenter la rigidité et la résistance de l'âme du poteau en traction et en compression et de la semelle du poteau en flexion. Des raidisseurs diagonaux peuvent aussi être utilisés pour améliorer la résistance de l'âme du poteau en cisaillement, en combinaison avec les raidisseurs transversaux (**Figure 18b**).
- **Les renforcements par contre-plaques** : ce sont de platines boulonnées contre la semelle du poteau en recouvrant au moins deux rangées de boulons dans la zone tendue de l'assemblage (**Figure 18c**). Elles permettent d'augmenter la résistance de la semelle du poteau pour certains modes de ruine ainsi que la rigidité dans certains cas, comme en présence de la précontrainte [21, 22]. Dans l'EC3, seule la partie résistante est considérée.
- **Les doublures d'âme** : une doublure d'âme, soudée sur tout son pourtour (**Figure 18d**) est utilisée pour augmenter la résistance de l'âme du poteau vis-à-vis de la traction, de la compression et du cisaillement. Dans le cas où la largeur de la doublure est très grande, des boulons sont nécessaires pour la solidariser à l'âme du poteau.

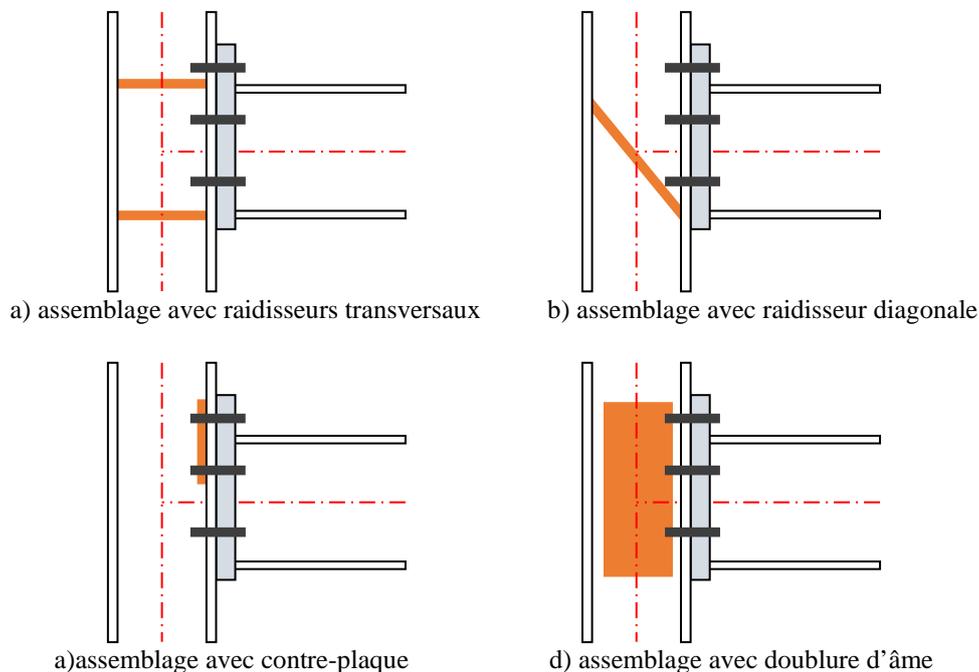


Figure 18 : Moyens de renforcement des assemblages selon l'EC3

Durant la dernière décennie, de nombreuses recherches expérimentales, analytiques et numériques ont été entreprises afin de mieux maîtriser le comportement d'assemblages de conceptions existantes ou nouvelles. L'assemblage avec raidisseurs de platine d'about débordante est relativement courant en France dans les continuités de poutre ou les liaisons poteau-poutre (**Figure 19**). Ces raidisseurs sont sous forme d'un plat de gousset soudé entre la semelle de la poutre et la platine d'about pour raidir la partie prolongée de la platine d'about et au Japon surtout après les séismes de Nothridge (USA, 1994) et Hyokogen-Nanbu (Japon, 1995) tout en respectant en partie les traditions de conception et de fabrication des assemblages de ces mêmes pays [6].

Ces raidisseurs peuvent être utilisés dans les zones tendue et comprimée de l'assemblage, simultanément ou de façon séparée. La présence de ces raidisseurs peut modifier la distribution des efforts et par conséquent le mode de déformation et de ruine de l'assemblage [23]. Cependant,

l'EC3 ne donne aucune indication quant à la façon dont les composants se déforment et ne fournis pas d'aide pour améliorer la conception de ce type d'assemblages.

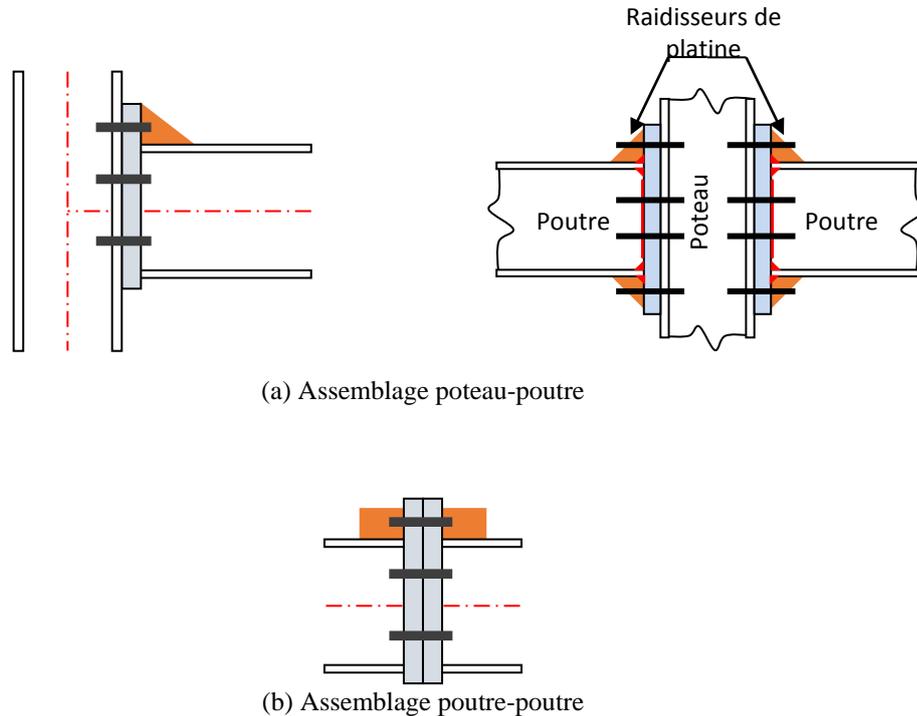


Figure 19 : Assemblage avec raidisseurs de platine d'about débordante

1.9 Approche analytique des assemblages boulonnée selon l'EC3

1.9.1 Présentation de la méthode des composantes

La méthode des composantes considère un assemblage quelconque comme un ensemble de composantes élémentaires individuelles [24].

Le concept fondamental, sur lequel est basée cette méthode se décompose selon étapes suivantes :

- Identification des composantes ;
- Evaluation des caractéristiques (résistance et rigidité) de ces composantes ;
- Association des composantes pour obtenir la résistance et la rigidité de l'assemblage entier et ϕ_{cd} éventuellement.

Des hypothèses sont à respecter pour la distribution des efforts internes dans les composantes de chaque assemblage :

- Les efforts internes sont en équilibre avec les efforts appliquées ;
- Chaque composante est capable de résister aux efforts internes ;
- La déformation due à la distribution d'efforts est supposée ne pas dépasser la capacité de chaque composante (boulons, soudure,...) ;
- La distribution doit être réaliste au regard des distributions de rigidités.

1.9.2 Identification des composantes

L'EC3 définit une composante de l'assemblage comme une partie spécifique de celui-ci dont la contribution est identifiée à une ou plusieurs propriétés mécaniques.

Lors de l'indentification des composantes il est possible de distinguer celles en traction, en compression, en flexion et en cisaillement.

La figure 20 représente les régions de différentes sollicitations qui existent au niveau de l'assemblage et les zones constituant l'assemblage.

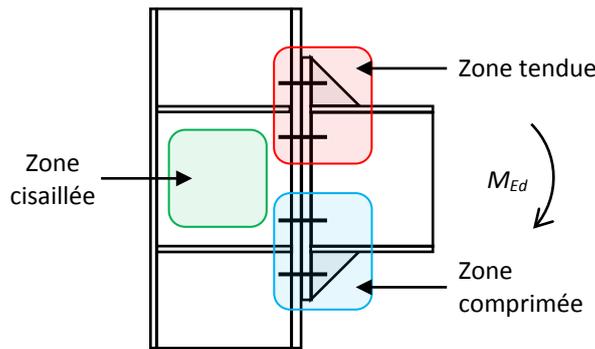


Figure 20 : Zones critiques dans les assemblages poutre-poteau

Le tableau suivant présent les résistances sollicitant de chaque zone :

Zones de sollicitations	Eléments	Numéro de composant dans l'EC3	Composants	Résistance	Rigidité
Zone cisailée	Poteau*	1	Ame cisailée	$V_{wp,Rd}$	k_1
Zone comprimée	Poteau*	2	Ame comprimée	$F_{c,wc,Rd}$	k_2
	Poutre	7	Semelle et âme en compression	$F_{c,b,Rd}$	-
Zone tendue	Poteau*	3	Ame tendue	$F_{t,wc,Rd}$	k_3
	Poteau*	4	Semelle fléchie	$F_{t,fc,Rd}$	k_4
	Platine	5	Platine d'about fléchie	$F_{t,ep,Rd}$	k_5
	Poutre	8	Ame tendue	$F_{t,wb,Rd}$	-
	Boulons	10	Boulons en traction	$F_{T,Rd}$	k_{10}

Tableau 3 : Les zones sollicitations.

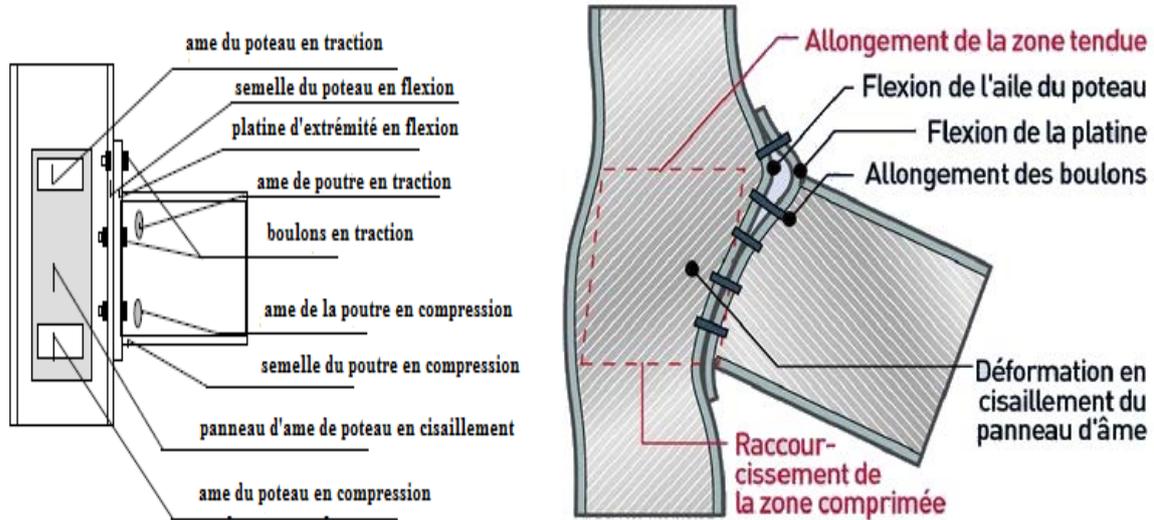
➤ **Remarque :**

*: Les composants relatifs au poteau nos sont pas pris en compte dans les assemblages de continuité de poutre.

Pour un assemblage par platine d'about boulonnée soumis à la flexion, les composantes de base qui peuvent être identifiées selon le type de sollicitations qu'elles subissent sont les suivantes :

- Zone comprimée : Ame de poteau, semelle et âme de poutre ;

- Zone tendue : Ame de poteau, boulons et âme de poutre en traction, semelle de poteau et platine d'about en flexion ;
- Zone de cisaillement : Panneau d'âme de poteau. [24]



(a) Avant la déformation

(b) Après la déformation

Figure 21 : Composantes de base de l'assemblage par platine d'about boulonnée.

L'application de la méthode des composants exige une connaissance suffisante du comportement des composants élémentaires (Tableau 1). La combinaison de ces composants permet de couvrir plusieurs configurations d'assemblages, telles que les assemblages poutre-poteau et les assemblages de continuité de poutres fléchies. Des exemples de tels assemblages sont donnés dans la (figure 21).

1.9.3 Résistance de l'assemblage

Le moment résistant de l'assemblage est déterminé à partir des résistances de chaque rangée des boulons en traction.

$$M_{j,Rd} = \sum F_i h_i \tag{Eq-1}$$

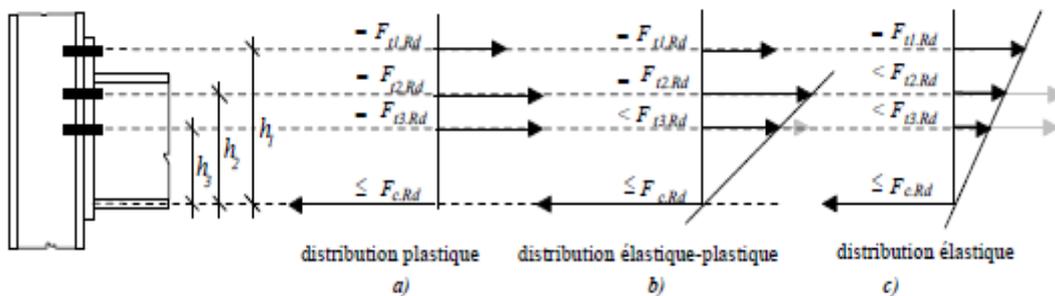


Figure 22 : Répartition des efforts dans un assemblage poutre-poteau par platine D'about boulonné.

Le moment de résistance des rangées en traction est limité par le moment de résistant à la compression $F_{c,Rd}$.

1.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents modes d'assemblage : assemblages rivetages, boulonnages et soudures. Et différents fonctionnement des assemblages : fonctionnement par obstacle, fonctionnement par adhérence et fonctionnement mixte.

Les différentes formes d'assemblages les plus répandues en construction métallique : divise en deux selon type et selon mode constructif. Mode constructif il y a deux types : Assemblages par platine d'about et par cornières d'âme. Les assemblages par plaine : assemblage poutre-poteau, assemblages de continuité de poutres ou de poteaux, et assemblages pied du poteau. Pour chaque type d'assemblage, le transfert des efforts et les principales sources de déformabilité ont été brièvement décrits.

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.

Nous avons présenté les différents moyens de renforcement des assemblages retenus par l'Eurocode 3 : les raidisseurs, les contre-plaques et les doublures d'âme. Une attention particulier a été donné aux contre-plaques et leurs avantages par rapport aux raidisseurs d'âme traditionnels, car elles constituent l'objet principal de la présente étude.

Finalement, les composantes de base qui peuvent être identifiées selon le type de sollicitations : zone comprimée, zone tendue et zone de cisaillement.

CHAPITRE II

***Approche analytique de la zone tendue
d'un assemblage boulonné par
platine d'about selon l'EC3***

2.1 Introduction

Le tronçon en té est l'un des composants structurels les plus importants dans les charpentes en acier, car il influe sur le comportement et la stabilité de l'ensemble de la structure. La présente étude est consacrée à l'étude analytique du comportement de ce composant et principalement de la flexion qui se produit sur les boulons en raison de la déformabilité de la semelle de raccordement en T. De plus, l'influence sur sa résistance ultime est étudiée. [25]

2.2 Comportement de la zone tendu (tronçon en T)

Dans les assemblages boulonnés, le tronçon en té peut être considéré comme un assemblage élémentaire unique ou comme une partie d'une configuration plus complexe. Dans ce dernier cas, le tronçon en té qui représente la partie tendue de l'assemblage est considéré comme une des composantes principales qui contribuent à la résistance de l'assemblage tout entier [26]. Dans ce contexte, la platine d'extrémité et la semelle du poteau renforcé ou non par contreplaques avec les boulons en zone tendue peuvent être représentés par des tronçons équivalents (Figures 23).

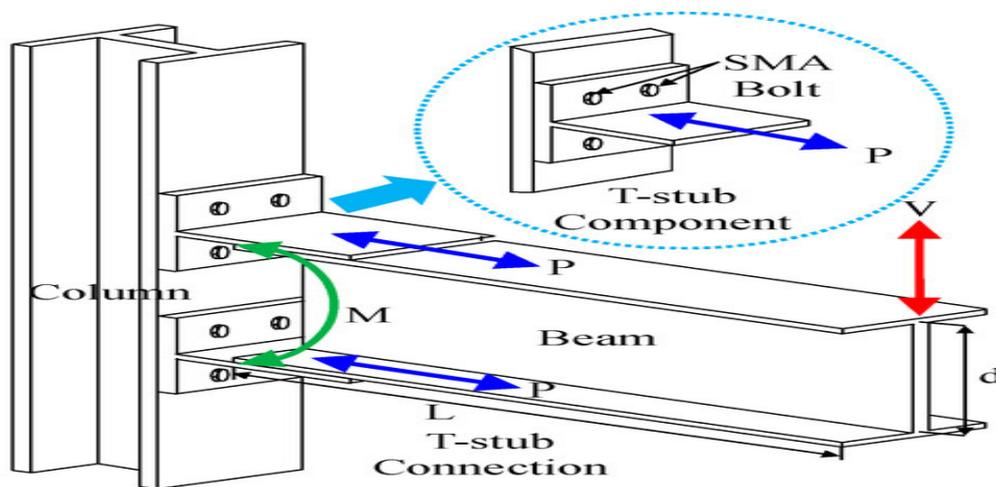
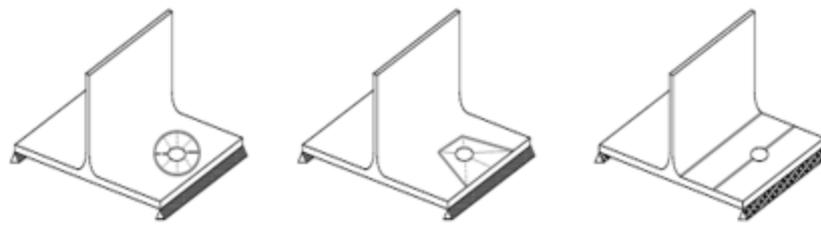


Figure 23 : Tronçon en Té : assemblage par platine d'about boulonnée.

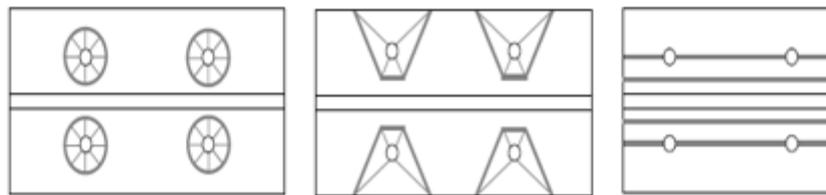
2.3 Longueurs efficaces du tronçon en T

L'équivalence entre le tronçon en T et la zone tendue d'un assemblage métallique se traduit par la détermination d'une longueur équivalente dite longueur efficace (voir annexe A), notée L_{eff} . Cette longueur est définie selon les schémas des lignes de plastification des différentes rangées de boulons, prises séparément lorsque la distance entre les rangées de boulons est importante (Figure 24) ou en groupe lorsque les rangées de boulons sont proches (Figure 25). Il est à signaler que 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. Les valeurs à adopter pour la longueur efficace dépendent de la configuration de l'assemblage et de la disposition des trous. L'EC3 propose des valeurs de L_{eff} pour la plupart des cas rencontrés dans la pratique avec leurs schémas correspondants de ruine. [8]

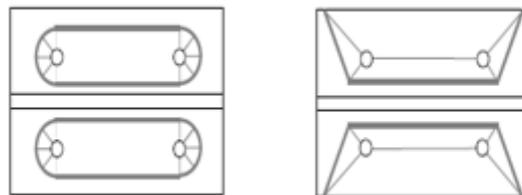


a) mécanisme circulaire b) mécanisme non circulaire c) mécanisme poutre

Figure 24 : Schémas des lignes de plastification des tronçons en T
(Mécanisme individuel)



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



d) mécanisme circulaire e) mécanisme non circulaire

Figure25 : Schémas des lignes de plastification des tronçons en T
(Mécanisme de groupe)

2.4 Comportement général d'un tronçon en T 8]

La déformation du 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 platine sollicitée en flexion. Une caractéristique importante du comportement des tronçons en T est le développement de forces de levier sous la semelle. Ces forces secondaires, qui sont introduites dans les boulons en plus de la traction directe, peuvent provoquer une ruine prématurée. Une illustration du mécanisme de levier dans un tronçon en T est présentée dans la figure 26. Pour une force F appliquée sur l'âme du tronçon, des forces de levier Q se développent en raison de la flexion de la semelle.

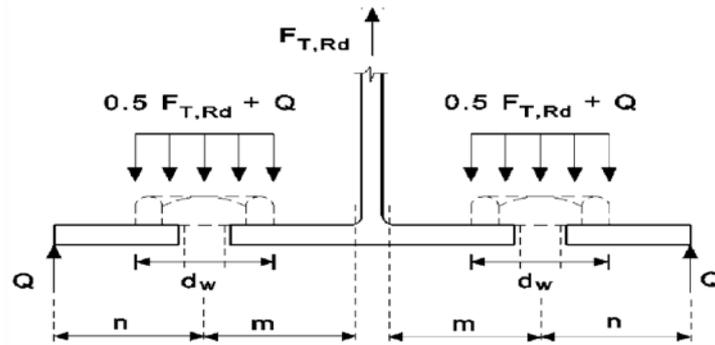


Figure 26 : Effet de levier dans un tronçon en T

Selon l'EC3 : $n/m = 1.25$ ou (n) est a priori inconnue.

Q : Force de levier.

L'équation de l'équilibre statique des forces verticales montre que la force B dans un boulon est égale à :

$$B = \left(\frac{F}{2} + Q\right) \quad (\text{Eq.2})$$

2.5 Résistance en traction du tronçon en T

Dans le domaine plastique, trois modes de ruines sont envisagés. Ces modes de ruines sont conditionnés par la résistance de la semelle du tronçon en flexion, des boulons en traction et l'âme est traction. Ces cinq modes de ruine sont représentés d'une manière simple par la ruine plastique de la semelle (mode 1), la ruine mixte de la semelle et des boulons (mode 2) ou la ruine des boulons (mode 3), la plastification de l'âme (mode 4), et Plastification de la plaque d'assise (mode 1-2).[24]

Exemple :

La zone tendue dans ce cas, de deux tronçons en T attachés par quatre boulons comme représenté sur la figure 27.

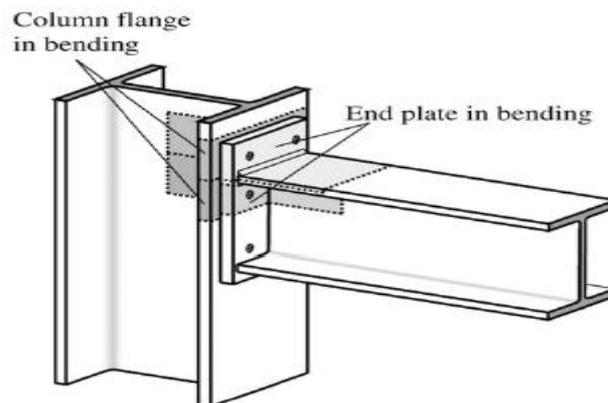


Figure 27 : Deux tronçons en T par quatre boulons.

Tronçon N°01 : semelle et âme poteau.

Tronçon N°02 : platine et âme poutre.

Modes de ruine

La résistance à considérer est celle donnée par la valeur minimale de ruine des cinq modes ($F_{t,1,Rd}$, $F_{t,2,Rd}$, $F_{t,3,Rd}$, $F_{t,4,Rd}$, $F_{t,1-2,Rd}$).

Avec :

- d : Diamètre du boulon ;
- A : Aire de la tige du boulon non fileté ;
- A_s : Aire de la tige du boulon fileté ;
- t_h : Epaisseur de la tête du boulon ;
- t_e : Epaisseur de l'écrou ;
- t_r : Epaisseur de la rondelle ;
- t_{fc} : Epaisseur de la semelle du poteau ;
- t_p : Epaisseur de la platine d'about ;
- L_b : Longueur efficace de serrage du boulon.

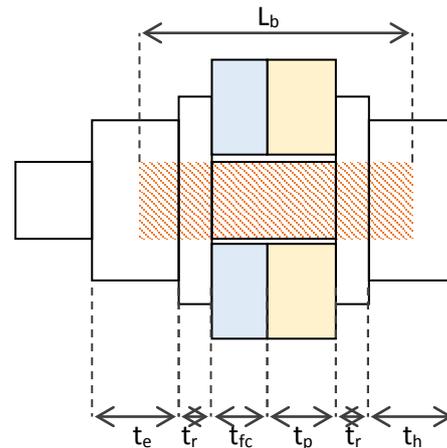


Figure 28 : La longueur de boulon à allongement

Si le boulon dispose des rondelles $L_b = \sum t_f + 2t_r + 0.5 (t_h + t_e)$

Si le boulon ne dispose pas de rondelles $L_b = \sum t_f + 0.5 (t_h + t_e)$

$$L_B^* = \frac{8,8m^3 \cdot A_s}{\sum L_{eff} \cdot t_f^3}$$

$L_b < L_B^*$ pas flexibleil y a un effort de levier ;

$$F_{t,Rd} = \min (F_{t,1,Rd}, F_{t,2,Rd}, F_{t,3,Rd}, F_{t,4,Rd}).$$

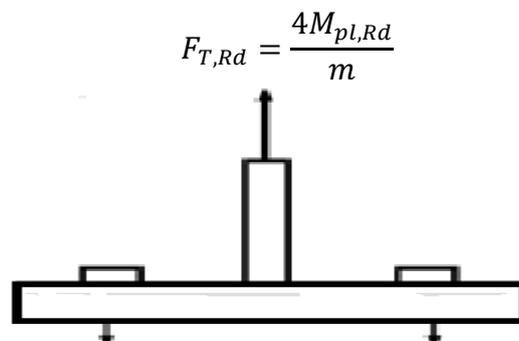
$L_b > L_B^*$ flexibleil n'y a pas un effort de levier ;

$$F_{t,Rd} = \min (F_{t,3,Rd}, F_{t,4,Rd}, F_{t,1-2,Rd}).$$

- **Mode 1** : Plastification totale de la semelle (mécanisme total)

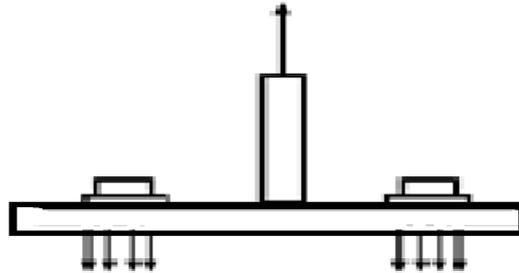
Dans le cas de semelle de tronçon, des articulations plastiques sont créés dans les axes des boulons et près de l'âme de poutre sans atteindre l'effort de ruine de boulon. La capacité porteuse de la semelle du tronçon en T équivalent peut être calculée selon deux méthodes différentes, à condition que les efforts de contact puissent avoir lieu.[38]

Méthode 1 : pour la formule simplifiée on ne tient pas de l'effet de la rondelle. La force appliquée par le boulon est supposée ponctuelle.



Méthode 2 : méthode alternative on tient en compte du paramètre de la rondelle e_w .la charge est répartie sur la rondelle.

$$F_{t,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w)M_{pl,1,Rd}}{(2mn) - e_w(m + n)}$$



Avec :

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0.25\Sigma l_{eff,1}t_f^2 f_y}{\gamma_{m0}}$$

$$e_w = d_w/4$$

$F_{t,Rd}$: Résistance à la traction d'une semelle de tronçon en T.

$M_{pl,1,Rd}$: Le moment de résistance plastique de calcul pour la platine d'extrémité ou la semelle de poteau relatif au premier mode de ruine.

$\Sigma l_{eff,1}$: Valeur de Σl_{eff} pour le mode 1.

m, n : Les distances entre l'axe des boulons et l'âme d'une part, et l'extrémité extérieure du profilé d'autre part.

$$n = e_{min} \text{ mais } n \leq 1.25 m.$$

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

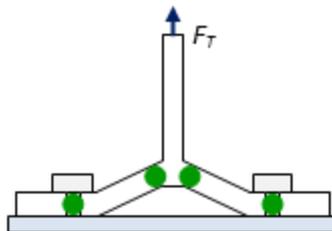


Figure 29 : Plastification totale de la semelle.

Avec :

B : L'effort dans le boulon.

Q : L'effort de levier.

- **Mode 2** : Ruine de boulons avec plastification de la semelle (mécanisme partiel)

Dans le cas d'une combinaison optimale entre l'épaisseur de platine d'about et diamètre de boulon, une articulation plastique à lieu du tronçon en T, ainsi le boulon est en ruine.[38]

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

Avec :

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0.25\Sigma l_{eff,2} t_f^2 f_y}{\gamma_{m0}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{m2}}$$

$M_{pl,2,Rd}$: Le moment de résistance plastique de calcul pour la platine d'extrémité ou la semelle de poteau relatif au premier mode de ruine.

$\Sigma l_{eff,2}$: Valeur de Σl_{eff} pour le mode 2.

$F_{t,Rd}$: La résistance à la traction d'un ensemble boulons-semelles.

$\Sigma F_{t,Rd}$: La valeur totale de $F_{t,Rd}$ pour les boulons du tronçon en T.

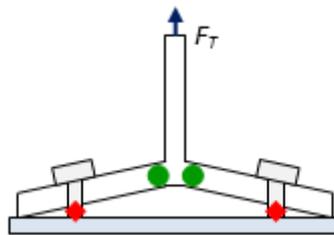


Figure 30 : Ruine de boulons avec plastification de la semelle.

- **Mode 3** : Ruine de boulons

Dans le cas d'une platine d'about rigide et des boulons sous-dimensionnés, ceux-ci sont en ruine sans apparition d'articulation plastique. Ce mode de ruine doit être évité tant que possible car il rend l'assemblage inefficace. [38]

$$F_{t,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd}$$

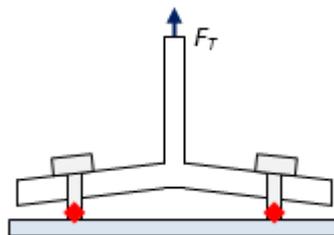


Figure 31 : Ruine de boulons.

▪ **Mode 4 :** Plastification de l'âme tendue

Dans le cas de l'âme de tronçon, des articulations plastiques sont créés dans l'âme de poutre et un allongement dans les boulons [38], la capacité de l'âme du tronçon en T en calcul selon la méthode suivante :

$$F_{t,4,Rd} = \frac{l_{eff} t_w f_y}{\gamma_{m0}}$$

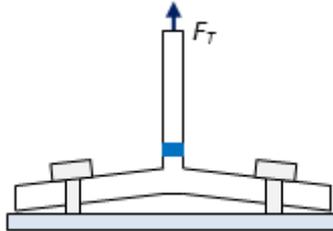


Figure 32 : Plastification de l'âme et allongement de boulon

▪ **Mode 1-2 :** Plastification de la semelle et ruine des boulons

Si les boulons sont flexibles, ils ne peuvent pas plaquer suffisamment la semelle pour imposer un mode 1 ou un mode 2 [38]. On obtient dans ce cas un mode 1-2.

$$F_{t,1.2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$$

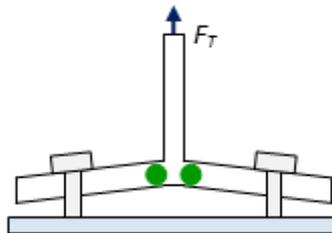


Figure 33 : Plastification de la semelle et ruine de boulon.

2.6 Rigidité axiale du tronçon en T

Selon l'EC3 [24], 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 (1^{er} tronçon), de la platine d'extrémité (2^{eme} 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 :

$$k_{ini} = \frac{1}{\left[\frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_p} + \frac{1}{k_b} \right]} \quad \text{(Eq. 3)}$$

Où :

K_f : La rigidité de la semelle du poteau ;

K_p : La rigidité de la platine d'extrémité

K_b : La rigidité des boulons.

Avec :

$$K_f = K_p = \frac{0.9 l_{\text{eff}} t_f^3}{m^3}$$

$$K_b = \frac{1.6 A_s}{L_b}$$

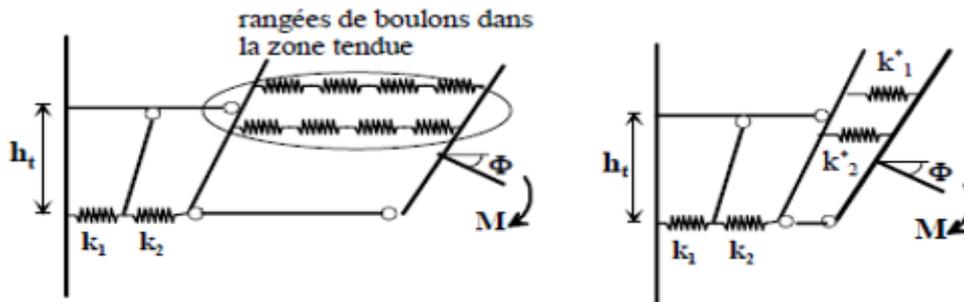


Figure 34 : Approche 'Eurocode' pour calculer la rigidité initiale d'un assemblage

2.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a étudié le comportement de la zone tendue c'est-à-dire le tronçon en T qui peut être considéré comme un assemblage élémentaire dans un assemblage boulonné. Dans le cas de calcul on a calculé leur longueur efficace selon deux mécanismes (individuel, groupe). En effet, la semelle du tronçon en flexion, les boulons et l'âme en traction résistent selon 5 modes de ruines, leur rigidité était calculer en fonction de la rigidité de la semelle, l'âme et des boulons.

CHAPITRE III

Recherche bibliographique

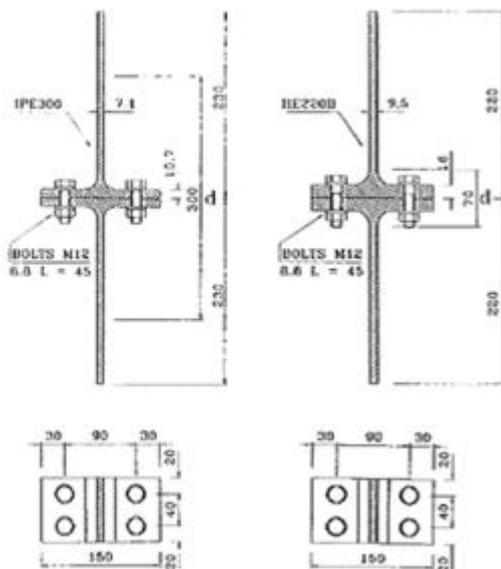
3.1 Introduction :

Au cours des dernières décennies, des chercheurs du monde entier ont travaillé sur la prédiction du comportement réel des assemblages en acier. Les composants boulonnés, en particulier de nombreuses études ont été consacrées à la caractérisation du comportement non linéaire des composants du tronçon en té (Bursi et Jaspert, 1997a, b, 1998 ; Girao Coelho et al., 2006). [27]

3.2 Bursi & Jaspert (1995) :

Bursi et Jaspert ont réalisé des progrès significatifs dans la compréhension des composants du tronçon en té à travers des modèles élément fins en 3D. [27]

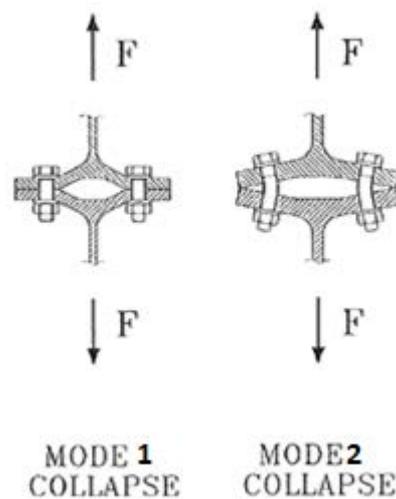
Les échantillons ont été testés à l'université de Trento sous charge monotone (Bursi).ils sont désormais marqués T1 et T2 et sont représentés avec leurs caractéristiques géométriques et détails dans les figures (35a) et (35b).ils ont été spécialement conçus pour se déformer selon le mécanisme cinématique présenté dans les figures (36a) et (36b). [26]



(a)

(b)

Figure 35 : Caractéristiques
Géométriques



(a)

(b)

Figure 36 : Différentes modes de ruine.
des tronçons en té.

La traction moyenne des contraintes de déformation f_y et la contrainte ultime f_u de la semelle et âme du matériau sont indiquées dans le tableau (4). Les éléments de fixation étaient des boulons de nuance M12 et de classe 8.8, caractérisés par une limite d'élasticité et une contrainte ultime comme indiqué dans le tableau (5) dans les éprouvettes T1 et T2, des boulons précontraints et non précontraints ont été utilisés, en particulier une force de pré-charge $S=60,7\text{KN}$ a été appliquée. Afin de réaliser une simulation réelle par éléments finis, les données des matériaux sont reproduites avec les lois linéaires par éléments du type montré dans la figure (37).

TEE-STUB	t_p (mm)	Yield stress f_y (MPa)	Tensile stress f_u (MPa)
Flange (T1) Web	10.7	431	595
Flange (T2) Web	16.0	282	483
	9.5	290	498

BOLT	Φ (mm)	Yield stress $f_{y,s}$ (MPa)	Tensile stress $f_{u,s}$ (MPa)
Shank (T1)	12	893	974
Shank (T2)	12	833	947

Tableau 4 : Caractéristiques des tronçons

Tableau 5 : Caractéristiques des boulons

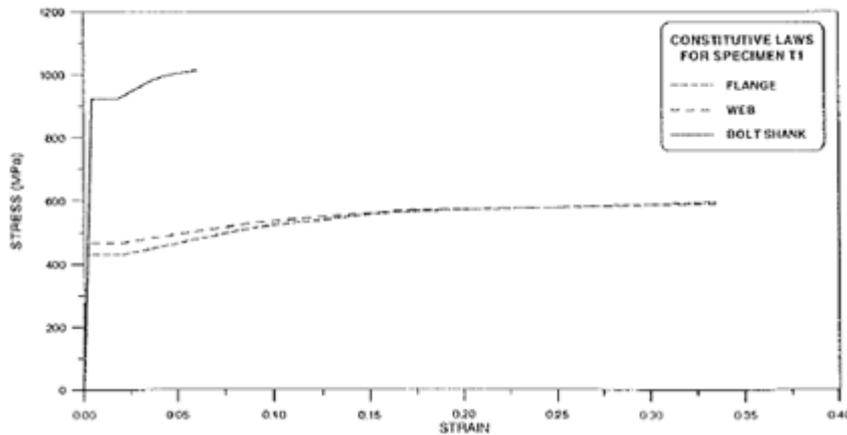


Figure 37 : Courbes contraintes-déformations.

Le déplacement à l'état limite ultime tracé par l'analyse par éléments finis est indiqué sur la figure (38a) pour l'échantillon T1. La distribution correspondante des contraintes effectives est rapportée dans la figure (38b). La zone de contraintes élevées près du trou de boulon et l'angle de la semelle identifient deux lignes de contraintes qui déterminent le mécanisme cinématique observé à la rupture.

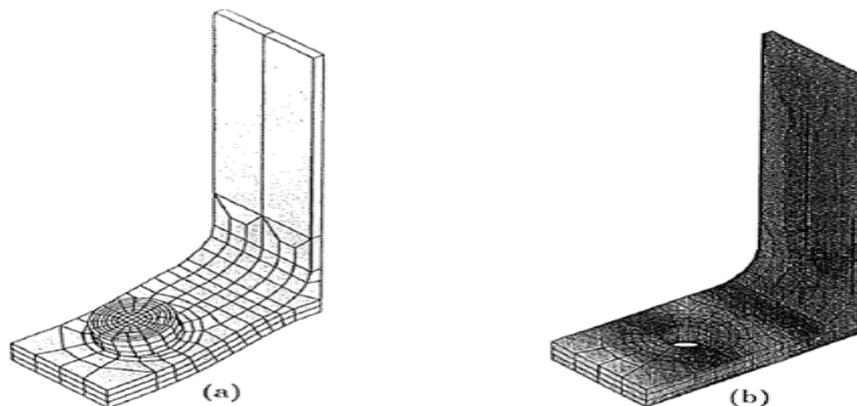


Figure 38 : Distribution des contraintes.

L'évolution des contraintes effectives dans chaque boulon et rondelle peut être observée à la fois en régime élastique (fig39a) et à la rupture (fig39b). Des contraintes effectives élevées dans la tige du boulon peuvent être observées. La précision du modèle peut être appréciée en superposant le déplacement chargement calculé ($f-\Delta d$) à celui mesuré comme indiqué en figure (40). La comparaison est réalisée à la fois sur une figure (40a) non précontraint et de

figure (40b) précontraints et les prévisions du modèle par éléments finis semblent assez bonnes.

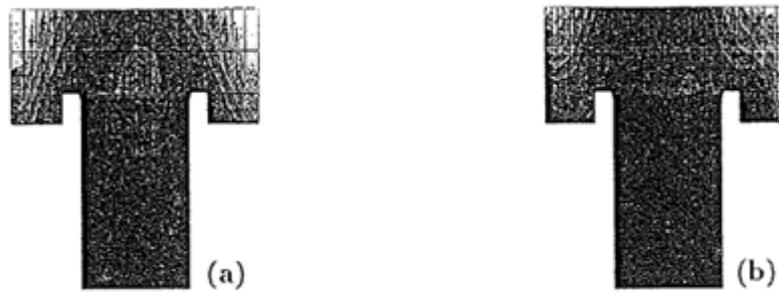


Figure 39 : Evolution des contraintes dans le boulon et rondelle.

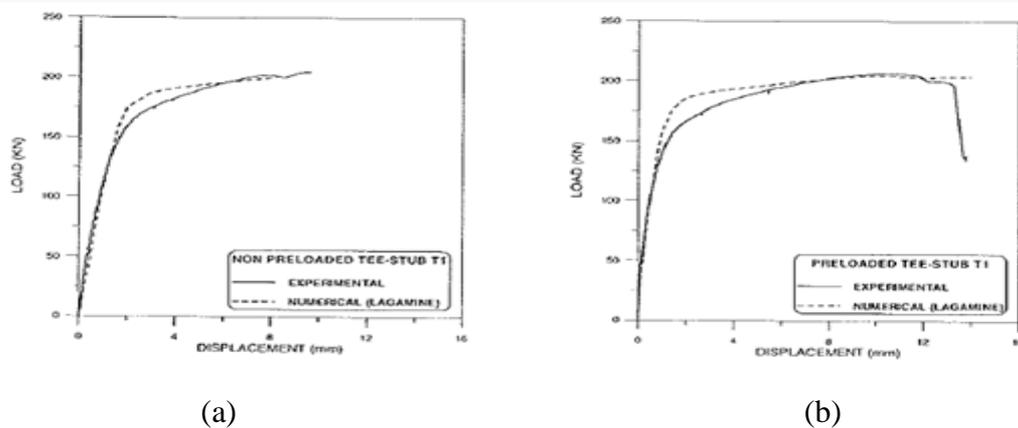


Figure 40 : Courbe Force-déplacement.

La zone de déplacement et de contrainte à l'effondrement pour le tronçon T2 précontraint caractérisé par une semelle avec une épaisseur $t_p=16\text{mm}$ sont représentés dans la figure (7). On peut observer comment le code LAGAMINE est capable de reproduire un déplacement dans la réalité (figure 41a) et son mécanisme cinématique, caractérisé par de grandes contraintes effectives dans la semelle et l'âme figure (41b).

Les relations chargement-déplacement ($p-\Delta d$) engendrées par le modèle sont superposées aux courbes expérimentales correspondantes de la figure(42). [28]

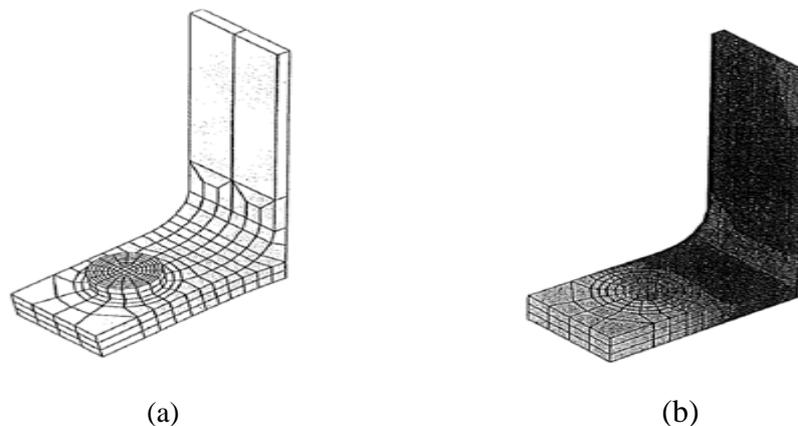


Figure 41 : Contraintes dans la semelle et l'âme.

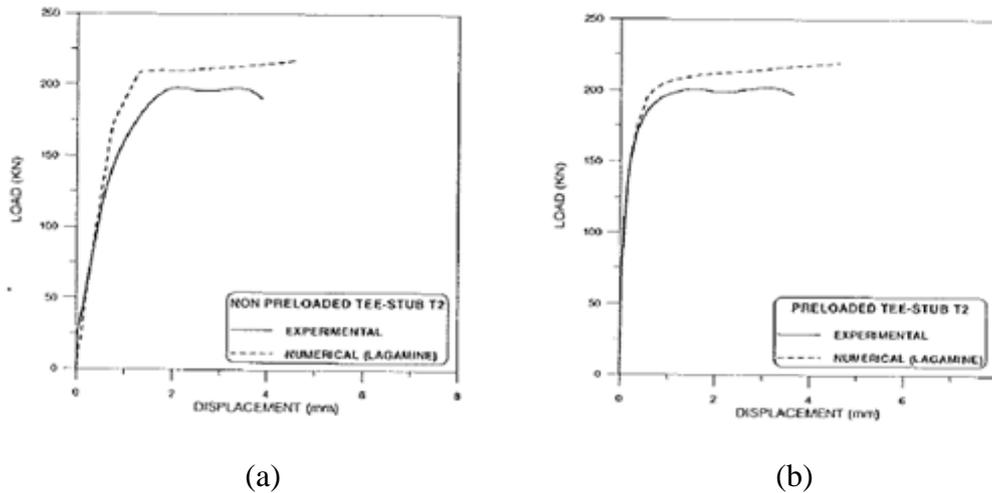


Figure 42 : Courbes expérimentales F - $dép$.

La comparaison entre les valeurs calculées et mesurées a mis en évidence l'efficacité et le degré de précision que ces modèles permettent d'atteindre.[28]

3.3 Sherbourne & Bahaari (1996) :

Sherbourne & Bahaari, d'autre part, ont proposé un modèle element finis en 3D qui avait pour objectif d'étudier la rigidité et la résistance du tronçon en té. L'aspect innovant de cette étude est que le T-stub a été boulonné sur une base flexible afin de simuler des conditions similaires à une semelle de colonne non raidi.

The state of the art of the characterisation of t-stub connections has pointed some potential improvements.

3.4 Mistakidis & al (1998) :

Une méthode est présentée qui s'est imposée comme méthode particulièrement appropriée pour l'analyse des assemblages de charpentes métalliques sous charges statiques. Cette méthode a été proposée par Mistakidis et al (1998).

La méthode proposée dans la présentation vise à contribuer à l'étude du comportement structural des assemblages en acier en proposant une simplification géométrique 2D efficace de l'assemblage qui prend en compte à la fois la plasticité et les effets de contact unilatéraux. Le modèle 2D conduit à des résultats numériques précis.[29]

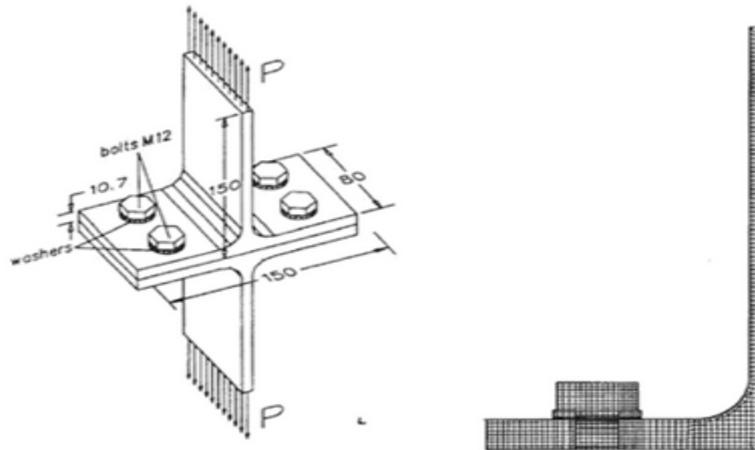


Figure 43 : Model en éléments finis 2D proposé.

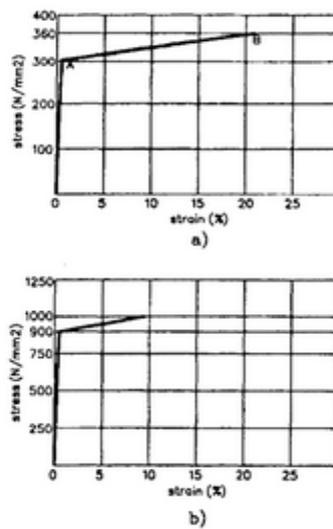


Figure 44 : Courbes de contraintes-déformation.

3.5 Swanson (Swanson & Leon, 2002) :

Plusieurs études numériques sur le composant T-stub sous charge monotonique ont été développées au cours des dernières années. En 2002, Swanson (Swanson & Leon, 2002) a utilisé le logiciel ABAQUS pour effectuer une analyse par éléments finis tenant compte du contact, des matériaux non linéaires et des caractéristiques géométriques. De bons résultats dans la description du comportement expérimental ont été obtenus avec un modèle tridimensionnel (3D).[30]

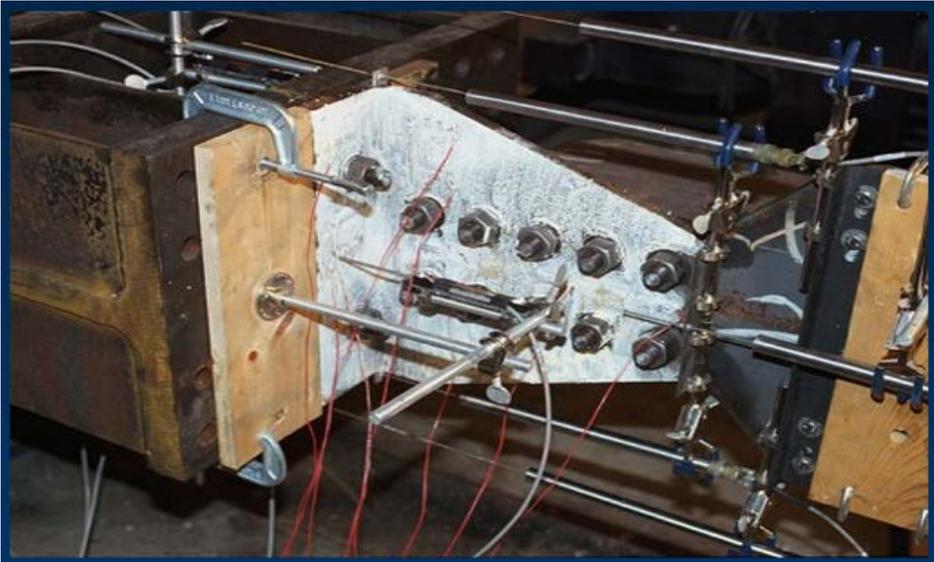


Figure 45 : Préparation d'expérience.

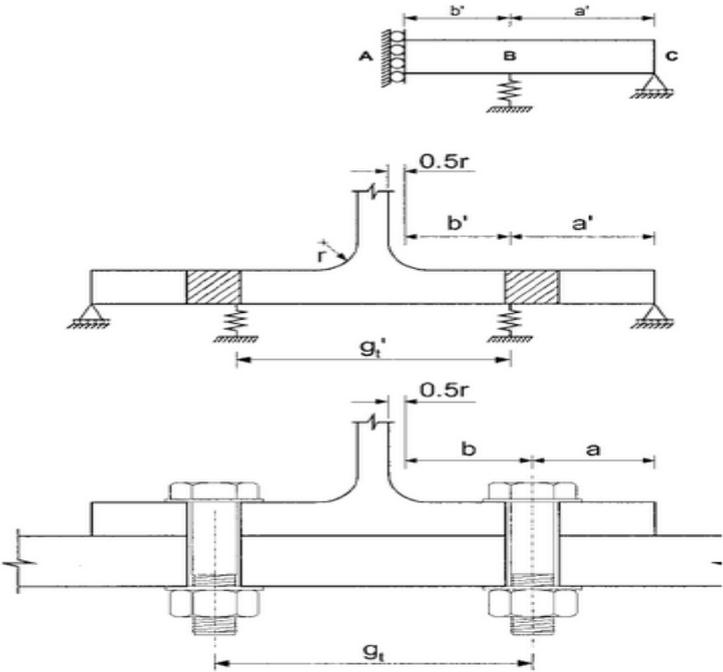


Figure 46 : Rigidité de la semelle.

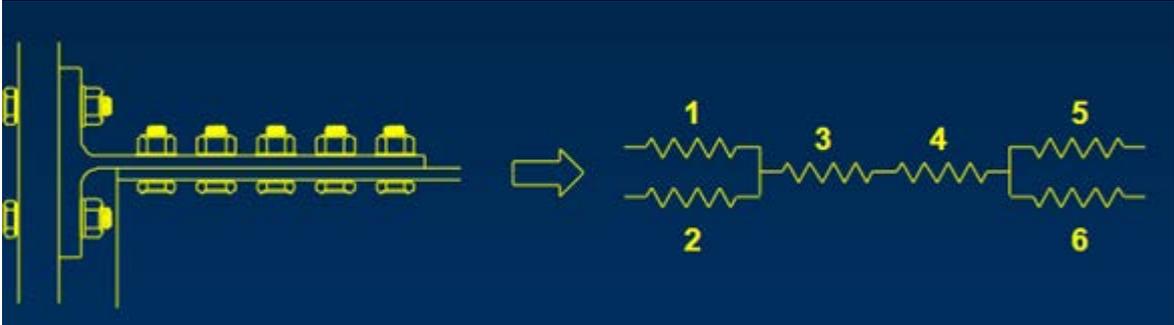


Figure 47 : Modèle ressort Tronçon en Té.

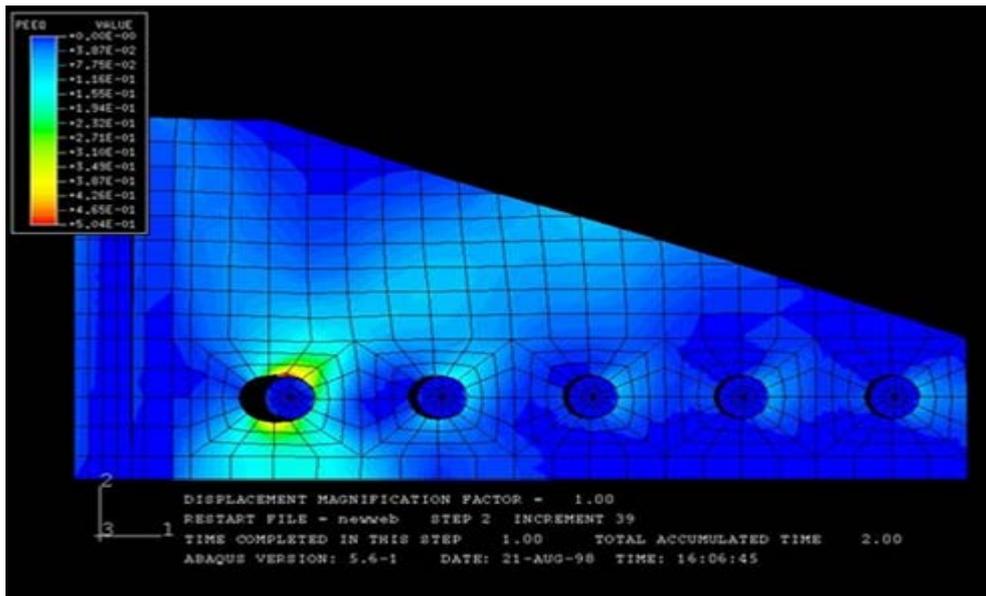


Figure 48 : Model ABAQUS de l'échantillon.

Bolt force bolt stiffness	
$0 \leq B < B_0$	$K_{b,1} = 1.00 K_b$
$B_0 \leq B < 0.85 B_n$	$K_{b,2} = K_b$
$0.85 B_n < B < 0.90 B_n$	$K_{b,3} = 0.10 K_b$
$0.90 B_n < B < B_{forct}$	$K_{b,4} = 0.02 K_b$

Tableau 6 : Rigidité de boulon

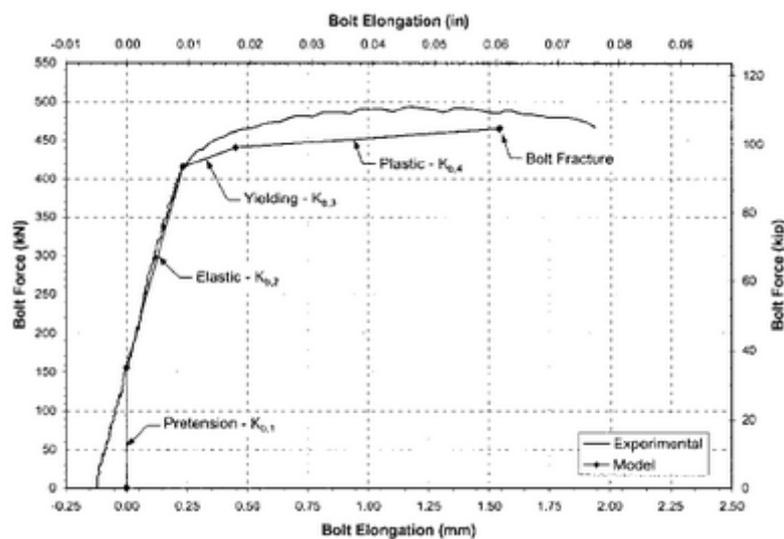


Figure 49 : Rigidité de boulon.

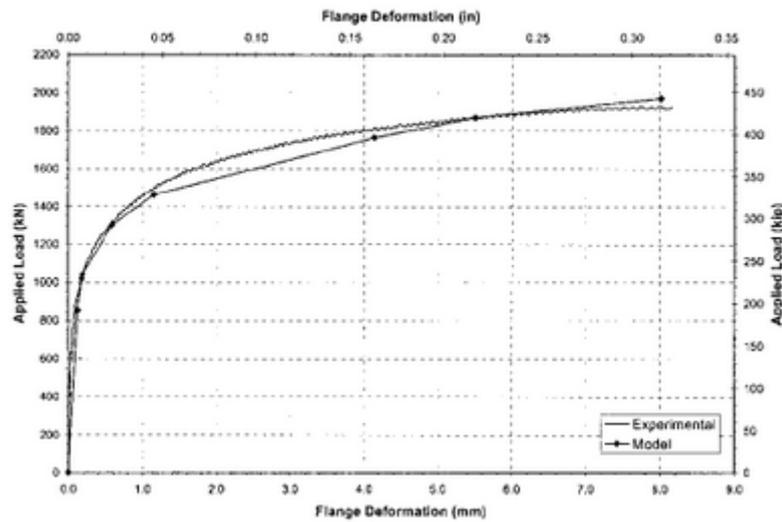


Figure 50 : Comparaison entre force-déplacement expérimentale et analytique de la semelle.

Le modèle d'éléments finis T-stub décrit dans cet ouvrage s'est avéré fiable pour la description du comportement non linéaire des T-stub. Des améliorations peuvent cependant être obtenues par une caractérisation plus poussée des matériaux. [31]

3.6 Lemonis & Gantes (2006) :

D'autre part, la proposition présentée par Lemonis & Gantes (2006) est également pertinente, car elle comprend une procédure d'analyse incrémentale pour évaluer l'ensemble de la réponse force-déplacement du tronçon en té. Le modèle était basé sur une représentation simple de la poutre pour la semelle et sur un ressort déformable pour le boulon. [27]

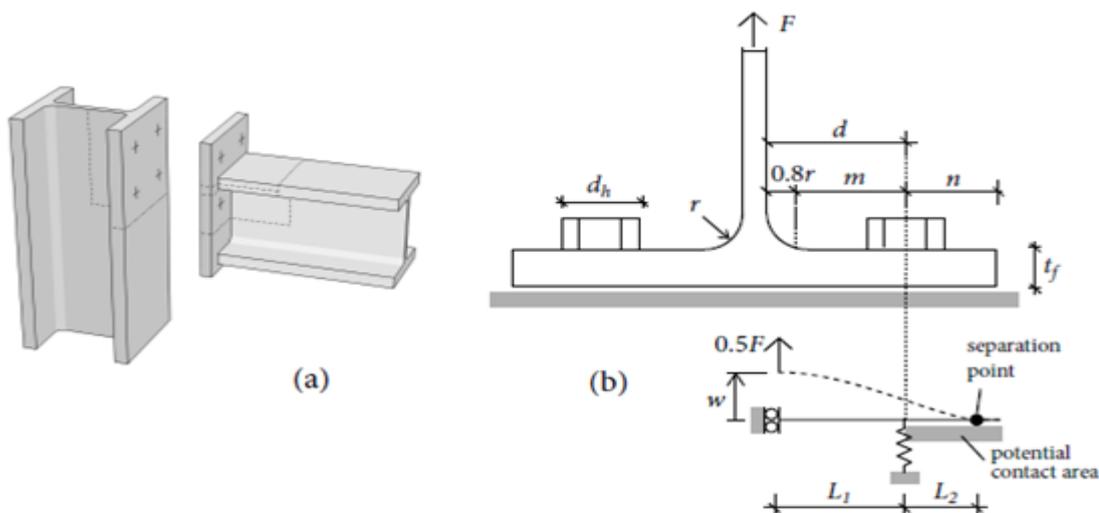


Figure 51 : (a) Composants du tronçon en Té dans un assemblage poutre-poteau et (b) définition du model analytique.

Les tests publiés utilisés sont ceux des tronçons T1 et T2 (Bursi et Jaspert 1997). L'approximation bilinéaire des matériaux appliquée pour les modèles incrémentaux est présentée aux **figures (52a) et (52b)**.

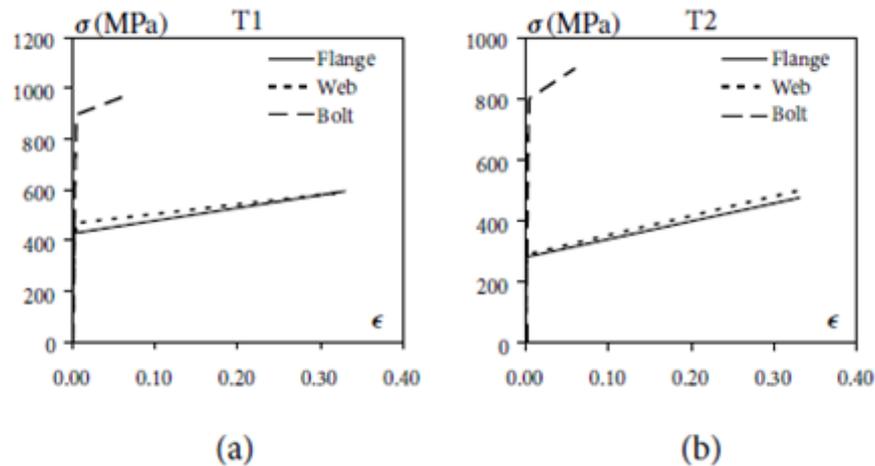


Figure 52 : Approximation matérielle bilinéaire du premier tronçon (a) et (b) T2.

Dans les figures (53a) et (53b), les courbes force F vs déplacement w pour les essais analytiques et expérimentaux T1 et T2 proposés sont représentées, ainsi que les courbes dérivées au moyen de la simulation en 3-D par éléments finis réalisée avec ADINA v.8 [32].

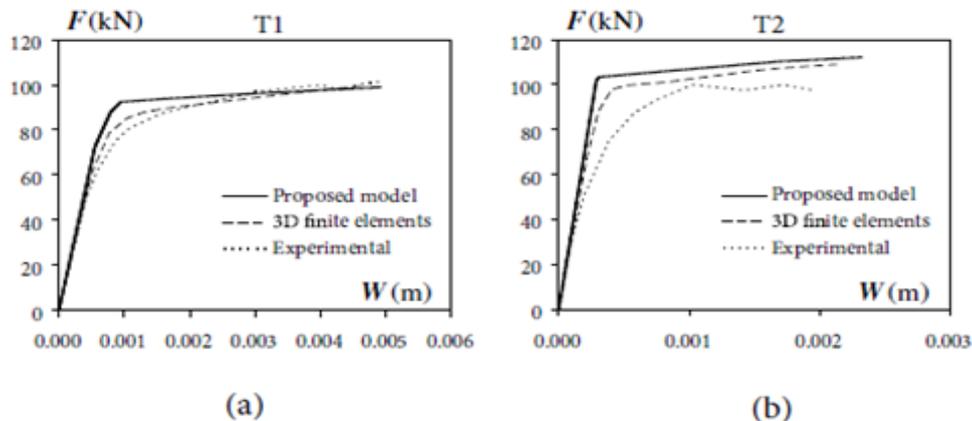


Figure 53 : Courbes force- déplacement pour T1 (a) et T2 (b).

Un nouveau modèle T-stub incrémental pour la prédiction de la courbe complète force/déplacement a été présenté. Ce modèle est conçu pour être implémenté dans un programme informatique, et offre plusieurs avantages. [32, 33]

3.7 Kim & al (2007) :

Ont développé quatre types de modèles d'éléments finis pour analyser l'effet de précontrainte et le comportement de contact de la structure des joints boulonnés. [34]

3.8 Sethi Abdel Aziz et al (2015) :

Une série de 9 assemblages des tronçons en té ont été étudiée afin d'analyser le comportement de la zone tendue. L'assemblage a été réalisé par Sethi. Le comportement expérimental a été comparé avec un modèle d'éléments finis. Les résultats des analyses ont montré que la courbe de force-déplacement représentée par ABAQUS avait une évolution similaire à celle de la courbe force-déplacement expérimentale. [35]

- Les résultats de la première expérience (premier tronçon) :

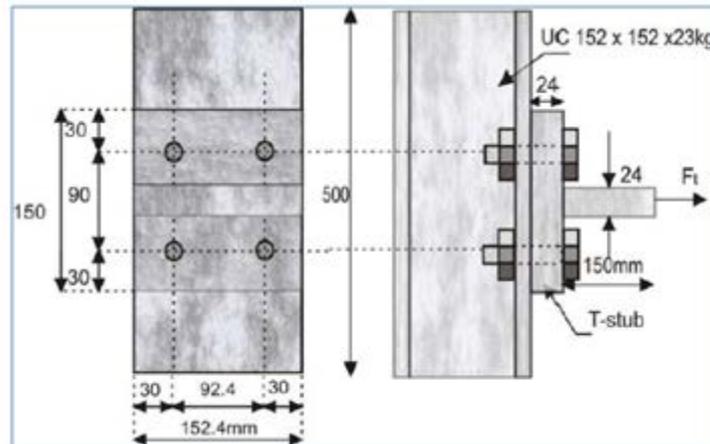


Figure 54 : Géométrie du tronçon Té de l'expérience.

- Comparaison entre le test expérimental et ABAQUS :

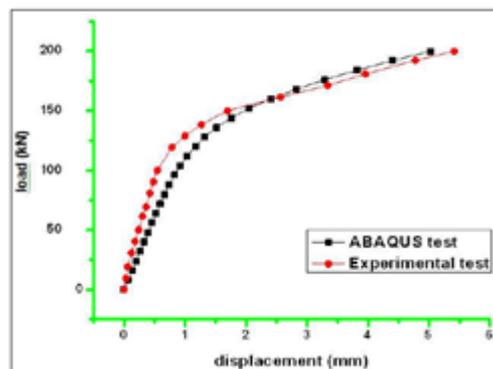


Figure 55 : Courbe force-déplacement de VI et l'expérience de Sethi.

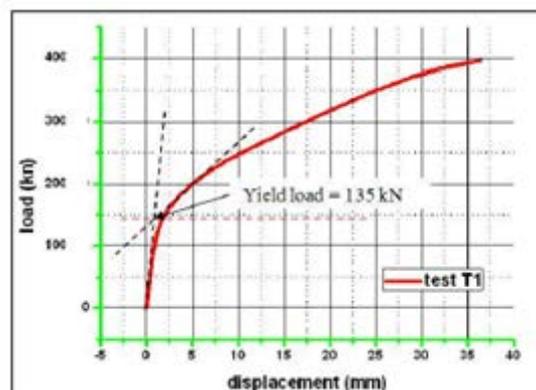


Figure 56 : Courbes force-déplacement de résultats numériques de T1.

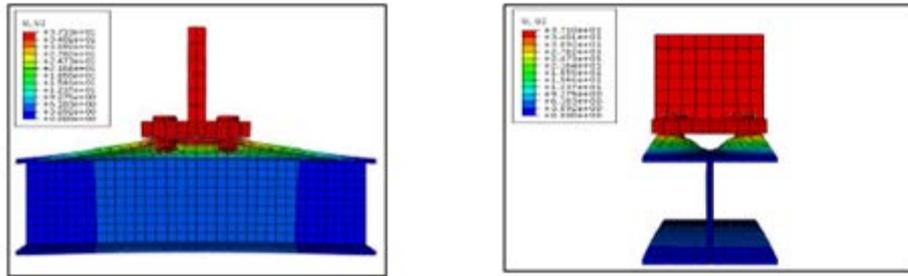


Figure 57 : La déformé du tronçon T1 numérique..

3.9 Merad Boudia Sofiane & al (2018) :

Les résultats expérimentaux [PIL 01, JAS 94 et COE 04] sont obtenus à partir d'un IPE300 et sont assemblés par deux rangées de boulons ordinaires. Les détails de chaque section sont présentés à la figure 1 et au tableau 1 ci-dessous. [36]

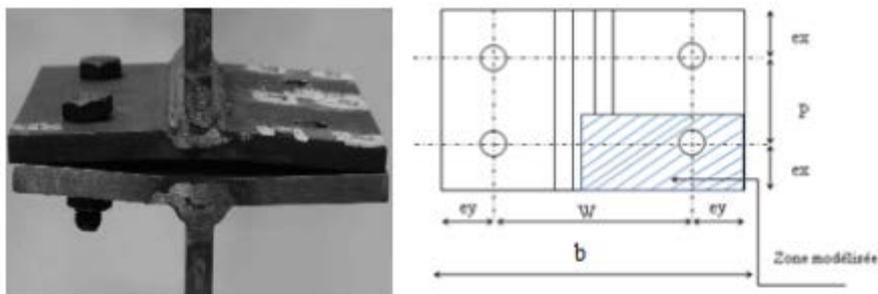


Figure 58 : Géométrie des tronçons étudiés

Tronçons	fy (MPa)	Dimensions (mm)						Boulons	
		b	L	P	W	ex	ey	db (mm)	Nuance
T1	431	150	80	40	90	20	30	M12	8.8
T2	270	150	210	90	100	60	25	M16	8.8

Tableau 7 : Détails matériels et géométriques.

• Validation du modèle :

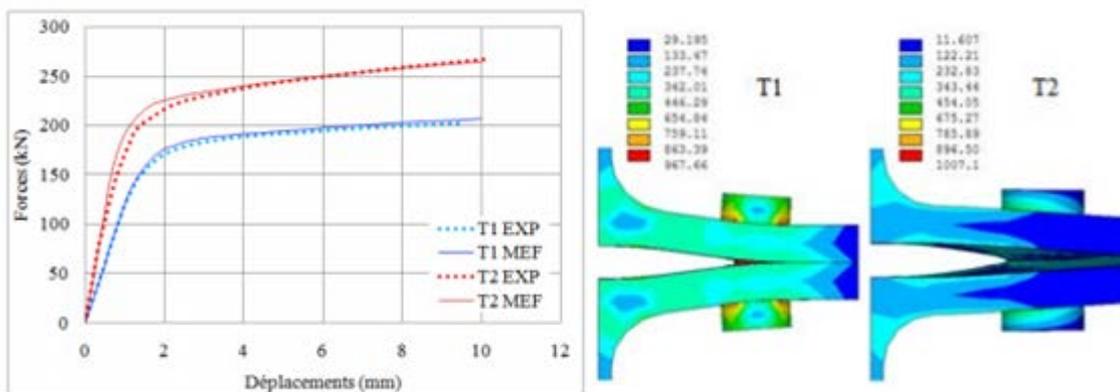
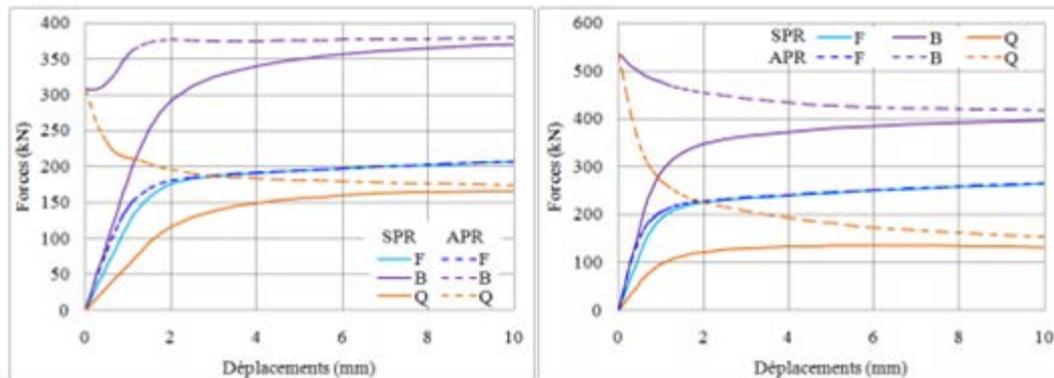


Figure 59 : Validation du modèle –Loi forces déplacements et déformées Au dernier pas de chargement.

Les résultats des forces de déplacement précontraintes (APR) sont comparés aux résultats précédents sans précontrainte (SPR) :

Tronçons	Précontrainte (KN)	K_{ini} (KN/mm)		
		SPR	APR	Différence %
T1	77	122	148	+21%
T2	133	224	261	+17%

Tableau 8 : Effet de la précontrainte sur la rigidité initiale.



(a) - Tronçon court T1

(b) – Tronçon long T2

Figure 60 : Effet de la précontrainte sur l'évolution de F, B et Q.

les mêmes tronçons analysés précédemment le sont maintenant, mais avec une précontrainte dans le boulon. Elle est prise égale à celle dite nominale proposée par l'Eurocode 3. [26] Dans cette étude, deux tronçons de té ayant des propriétés géométriques et matérielles différentes ont été modélisées. La différence de comportement d'un tronçon court et d'un tronçon long a été mise en évidence dans la première partie de l'étude. La seconde partie de l'étude a permis de simuler la précontrainte dans le boulon. Elle montre que son influence est non négligeable.

3.10 Conclusion :

Les tests expérimentaux et les modèles d'éléments finis offrent une fiabilité et une précision ; ils sont donc réservés aux activités de recherche et utilisés comme outil de validation des méthodes théoriques.

Les modèles FE fournissent des variables internes pour le comportement des assemblages, telles que les contraintes et les déformations, ainsi que des effets locaux tels que les forces d'arrachement et la précontraintes des boulons.

Les modèles analytiques présentent un contexte théorique qui permet l'influence des paramètres géométriques et mécaniques sur le comportement général des assemblages à étudier, la plupart d'entre eux sont également adaptés au calcul manuel, tandis que la simplification supposée par ce type de modèle conduit généralement à des résultats imprécis.

Pour résumer de nouvelles approches sont encore nécessaires pour améliorer la précision de l'ensemble des résultats forces-déplacement. [27]

CHAPITRE IV

Modélisation numérique d'un tronçon en Té

4.1 Introduction

Ces dernières années, les techniques de calcul structurel ont subi un changement majeur. Un développement considérable dans l'outil numérique qui répond aux besoins de plusieurs industriels, professionnels et chercheurs. Ces outils s'appuient sur la méthode des éléments finis notée (MEF). Dans ce chapitre, l'étude de base sur un modèle numérique d'un tronçon en Té comportant deux rangées de boulons non précontraints afin de déterminer son comportement. Le modèle MEF est validé sur la base des essais physiques dont nous disposons les résultats expérimentaux [38]. Une comparaison entre les modèles numérique et expérimental est illustrée ainsi qu'une approche analytique selon l'Eurocode 3 est effectuée. Les différents résultats des simulations sont comparés sur la base des courbes globales (F- δ), des courbes d'évolution de la contrainte de traction dans le boulon et de la force du levier qui ne sont pas mesurées facilement par des moyens expérimentaux.

4.2 Présentation de l'outil de calcul ANSYS

Actuellement plusieurs logiciels de calcul par MEF peuvent être utilisés, le logiciel qu'on a utilisé c'est ANSYS. [37]. En 1971, ANSYS a été publié pour la première fois. ANSYS est un programme informatique complet d'éléments finis à usage général qui contient plus de 100.000 lignes de codes. ANSYS est capable d'effectuer des essais statiques, dynamiques, de transfert de chaleur, de débit de fluide, etc. Aujourd'hui, ANSYS est utilisé dans de nombreux domaines de l'ingénierie. [37]. Parmi ces produit, nous pouvons citer :

ANSYS Structural : ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques en calcul de structures. Ses principales capacités sont :

- Analyse statique linéaire
- Analyse statique non linéaire (contact, plasticité et grands déplacements).
- Analyse modale
- Analyse harmonique (réponse forcée)
- Analyse temporelle

Les étapes de base de l'analyse par éléments finis sont les suivants :

- phase de préprocessing : Donnée géométriques, matérielles et maillage.
- phase de solution : Condition aux limites et options de calcul.
- phase de postprocessing : Extraction des résultats et post traitement.

4.3 Géométrie de l'étude

4.3.1 Géométrie

Il s'agit d'un tronçon en Té comportant deux rangée de boulons M12, non précontraints, obtenu à partir d'un IPE 300. Les dimensions du tronçon ainsi que des boulons sont données dans le **tableau 9** et la **figure 61**. En raison de symétrie, seul le quart de ce tronçon sera étudié.

Té	fy (N/mm ²)	Dimensions (mm)								Boulon M12	
		b	L	P	W	e ₁	e ₂	t _r	m	fyb (N/mm ²)	fub (N/mm ²)
T1	431	150	80	40	90	30	20	7.1	29.45	893	974

Tableau 9 : Caractéristiques géométriques et mécaniques des tronçons en Té.

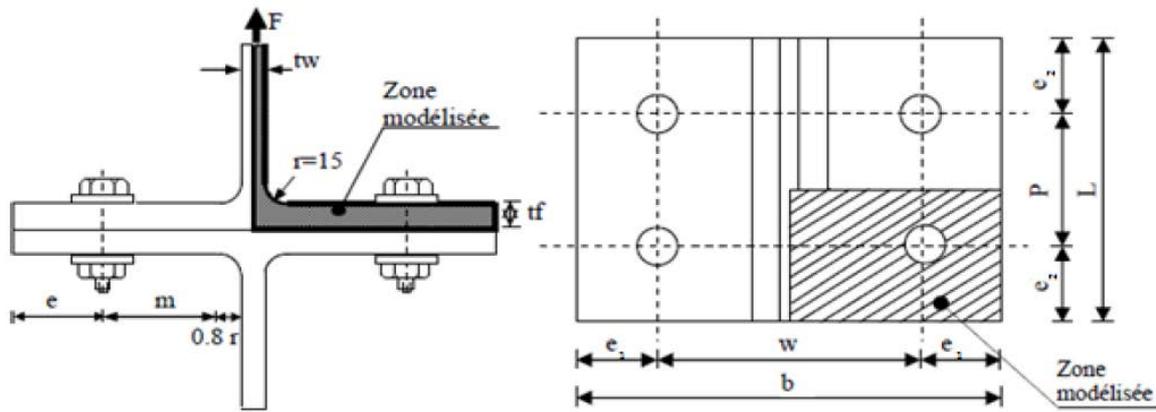


Figure 61 : Géométrie du tronçon en T.

4.3.2 Matériaux

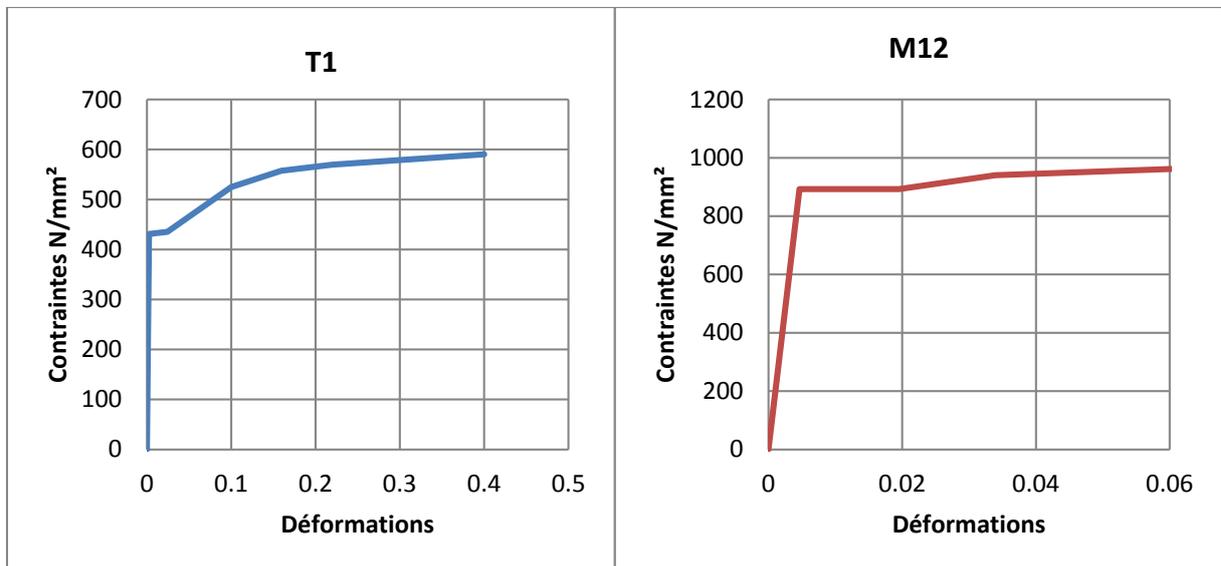


Figure 62 : Donnée matérielles.

4.4 Développement du modèle en élément finis

4.4.1 Eléments de maillage

Nous avons utilisé des éléments plans à 4 nœuds à 2 degrés de libertés (nommés plane 42 dans le code Ansys) dans le modèle. Le boulon est représenté par une tige de forme rectangulaire en tenant compte de sa surface dans la 3^{ème} dimension. La **figure 63** montre le maillage généré.

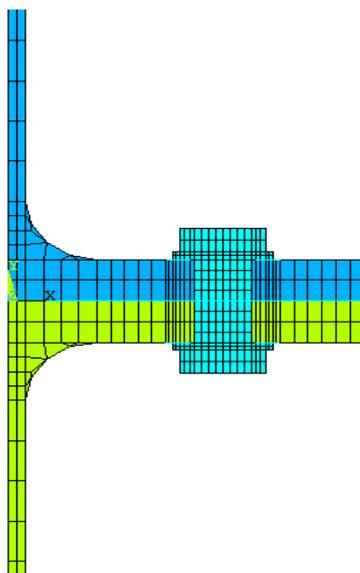


Figure 63 : Modèle de maillage de tronçon.

4.4.2 Conditions aux limites et Contact

Les conditions aux limites qui sont prises en compte dans les modèles : un déplacement bloqué dans la direction Z dans le plan YOX, un bloc de déplacement dans la direction Z pour représenter la symétrie du tronçon. Les zones de contacts sont représentées par des couleurs ci-dessus :

- ① Contact entre rondelle 1 - semelle 1.
- ② Contact entre semelle 1 - semelle 2.
- ③ Contact entre rondelle 2 - semelle 2.
- ④ Blocage symétrique selon Y.
- ⑤ Blocage en Z.
- ⑥ Déplacement imposé en Z.
- ⑦ Blocage latéral du boulon en Y.

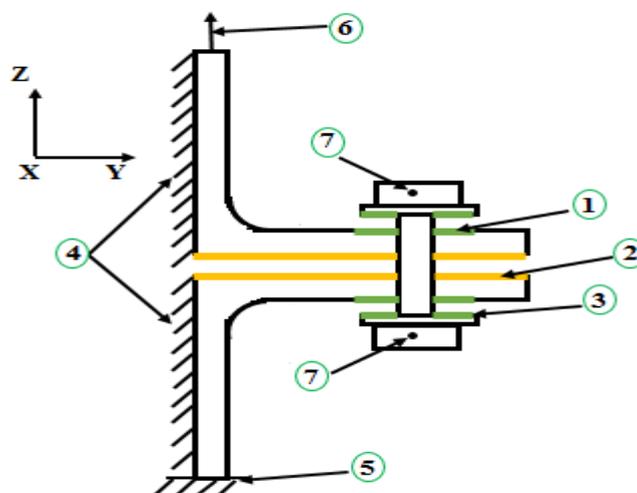


Figure 64 : Contacte entre deux tronçons

4.5 Résultats numériques

4.5.1 Loi force-déplacement

Dans cette analyse des résultats, nous présentons d'abord les courbes globales force-déplacement ($F-\Delta$). La force obtenue F est celle de la réaction d'appui dans le sens Z au point 5 ou 6 (voir **figure 65**) et le déplacement U_z est calculé entre les points 5 et 6 de la même figure. Le modèle est comparé avec les résultats expérimentaux [38]. La figure ci-dessous montre la courbe de réponse non linéaire obtenue par l'expérience comparée et la courbe Force-Déplacement obtenue avec ANSYS. Il est apparent que la performance du modèle MEF a correspondu étroitement à celle de l'essai expérimental. Les deux courbes ont des similitudes bien qu'il y ait une légère différence au niveau de la phase plastique.

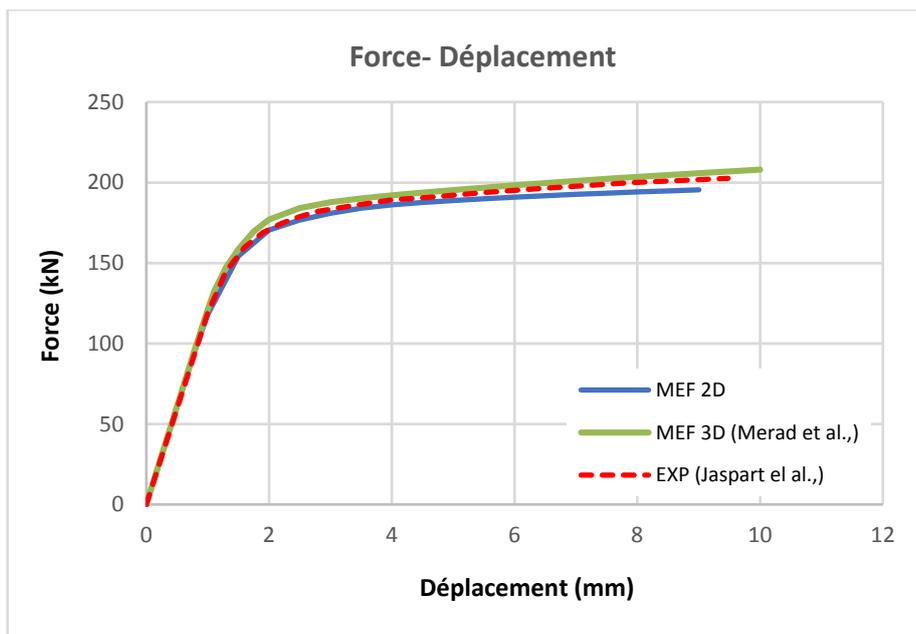


Figure 65 : Courbes force-déplacement de tronçon T1 (Modèle numérique et expérimentale).

Afin de pouvoir comparer les rigidités et résistances obtenues par modélisation (MEF) et essais expérimentaux avec celles des modèles analytiques proposés par l'Eurocode 3, nous déterminons les valeurs de calcul à partir de la Force- Déplacement. La rigidité initiale est déterminée par le rapport entre l'ordonnée et l'abscisse des courbes et, pour ce qui concerne la résistance, nous retenons celle qui correspond à l'intersection des deux lignes tangentes aux extrémités de la courbe Force-Déplacement. Les résultats pour les rigidités sont indiqués dans le tableau 10 et pour les résistances aussi dans le **tableau 10**.

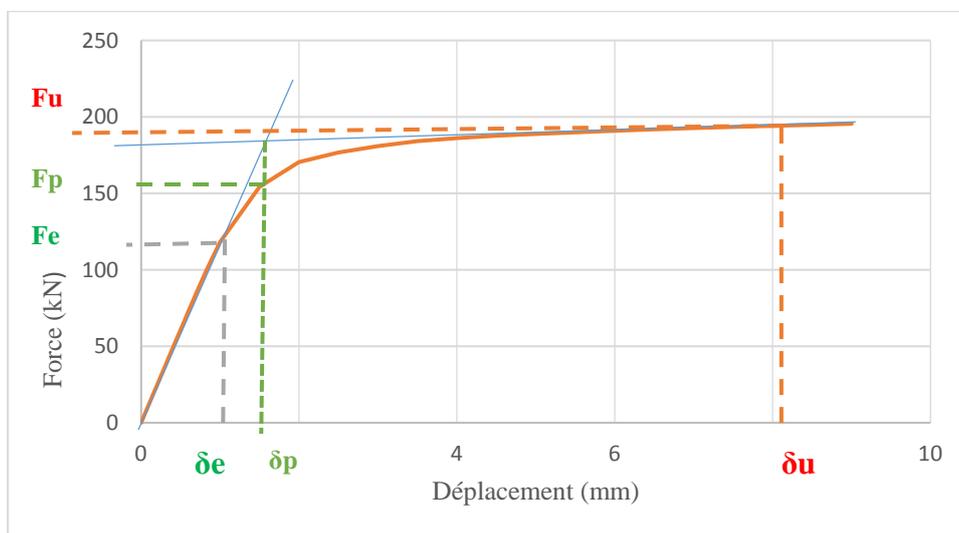


Figure 66 : Détermination des résistances (F_e, F_p, F_u) et la rigidité K_{ini} .

La résistance et la rigidité est obtenue à partir le calcul de la pente de la partie élastique. Elles sont données dans le tableau ci-dessus :

Résultats	F_e (kN)	F_p (kN)	F_u (kN)	F_p/F_e	K_{ini}
MEF	120	151	195	1.3	121
EXP	125	152	200.00	1.2	119
MEF/EXP	1.0	1.0	1.0	1.1	1.0

Tableau 10 : Les résistances (F_e, F_p, F_u) et la rigidité de la modèle Num et Exp.

4.5.2 Mode de ruines

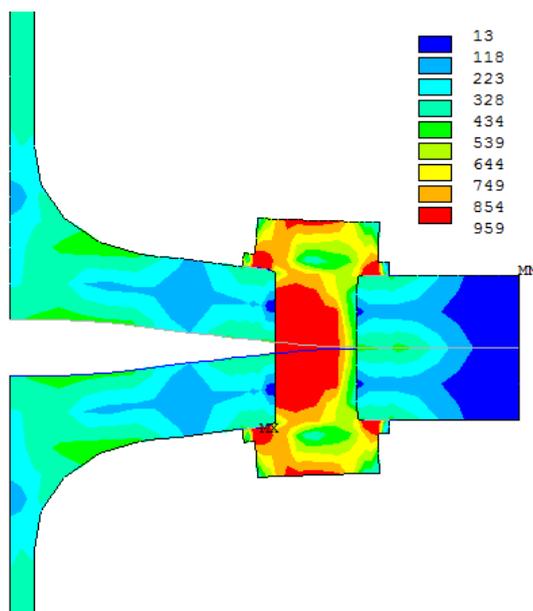


Figure 67 : La distribution de contrainte de Von mises.

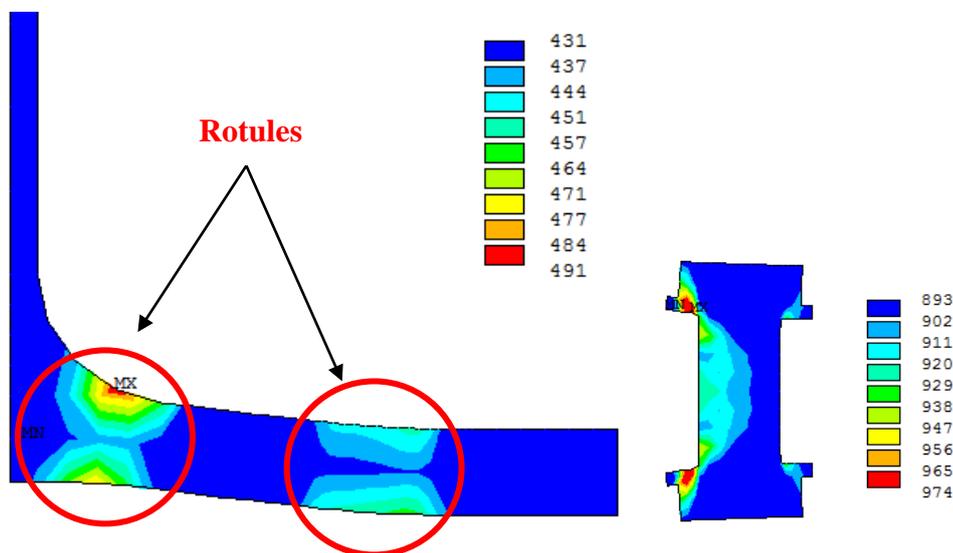


Figure 68 : Contraintes plastiques de chaque élément isolé.

Des rotules plastiques au niveau du congé et perçage sont pris place tandis que une légère plasticité dans le boulon été remarquée. Les figures montrent que le calcul analytique EC3 ça correspond aux résultats numériques. Le mode de ruine est le même (mode1).

4.5.3 Effet de la déformation de l'âme

Les courbes ci-contre représente le déplacement global en dépendant de la charge avec et sans considération de la déformation de l'âme à la surface d'application de la charge (Δ) et au

niveau du congé de raccordement (δ). On constate que la courbe qui prend en considération la déformation de l'âme se trouve en bas de celle non prise en compte.

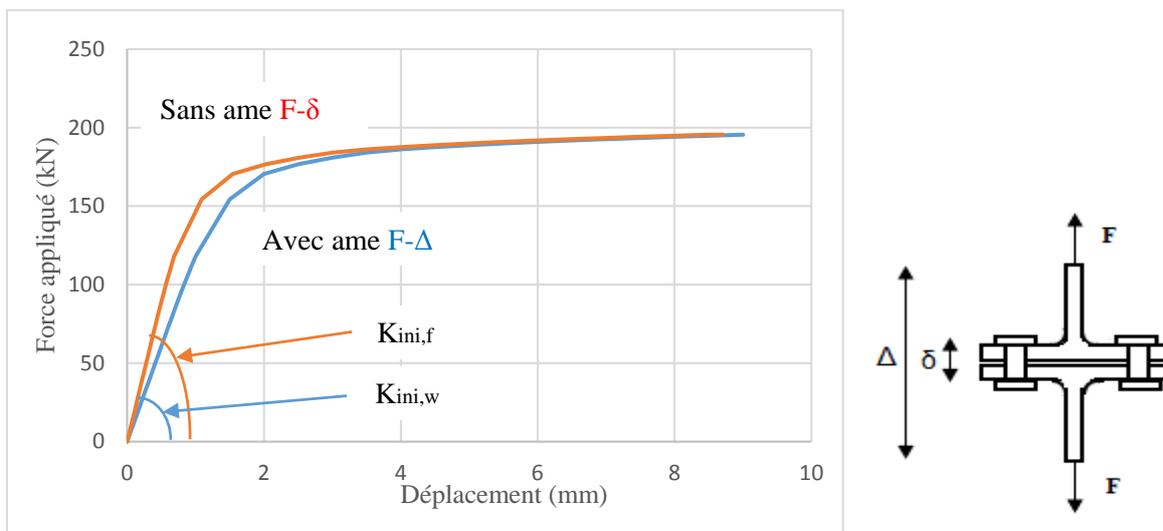


Figure 69 : Courbes force-déplacement de tronçon en T (Modèle numérique).

Avec :

$F_{t,Rd}$: Résistance plastique du tronçon

$K_{ini,f}$: Rigidité initiale sans tenir en compte de la déformation plastique de l'âme

$K_{ini,w}$: Rigidité initiale en tenant en compte de la déformation plastique de l'âme

La rigidité est obtenue à partir le calcul de la pente de la partie élastique. Elles sont données dans le tableau ci-dessus :

Rigidité	Déformation de l'âme		Sans Avec
	Sans	avec	
$K_{ini}(kN/mm)$	179	121	1.48

Tableau 11 : Rigidité initiale du tronçon avec/sans âme.

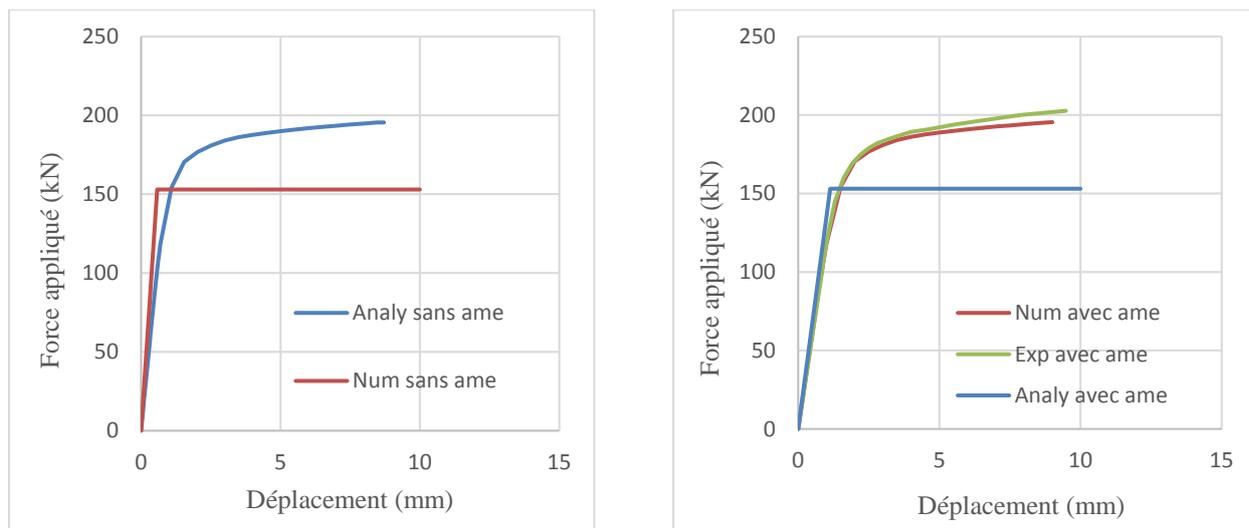
4.5.4 Comparaison avec l'EC3

Après validation du modèle MEF, une autre comparaison avec le calcul analytique du tronçon selon l'EC3 [24]. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure 69 et les tables (tableau 12, tableau 13 et tableau 14).

A rappeler que le calcul analytique détaillé selon l'EC3 du tronçon étudié est présenté dans l'Annexe B. Le tableau ci-dessus récapitule les résultats de notre calcul d'où nous avons remarqué que le mode 1 est le plus défavorable.

$L_{eff}(mm)$	Mode 1 (kN)	Mode 2 (kN)	Mode 3 (kN)	Mode 4 (kN)	F-min (kN)
80	153	216	325	245	153

Tableau 12 : Résistance de tronçon en T (valeurs analytiques et numérique).



(a) sans déformation de l'âme

(b) avec déformation de l'âme

Figure 70 : Courbes force-déplacement de tronçon T1 (Modèle analytique, numériques et Expérimental).

La figure 70 montre une différence entre le déplacement du tronçon avec âme et sans âme et cela est justifiées car le calcul analytique EC3 ne tient pas en compte la déformation flexionnelle du boulon contrairement au model numérique.

F _p (kN)	EC3	153
	MEF	151
	EXP	152

Tableau 13 : Résistance de tronçon : comparaison EC3/MEF/T.exp.

	Déformation de l'âme	Sans	Avec
K _{ini,total} (kN/mm)	MEF	179	121
	EXP	-	119

Tableau 14 : Rigidité initiale de tronçon : comparaison EC3/MEF/T.exp.

Le model numérique prend en compte la déformation de la semelle et déformation flexionnel du boulon, ce qui donne des résultats précises, en revanche analytiquement cette dernière n'est pas prise en compte.

La force de plastification correspondant au calcul analytique est la plus grande avec une valeur 153 kN. A propos de la rigidité K_{ini, total} du tronçon en té en considérant la déformation de l'âme calculé selon l'Eurocode 3 représente la grande valeur : 179 kN/mm. Concernant les d'autre résultats (numérique et expérimentale), ils prennent respectivement les valeurs suivantes K_{num}=172.101kN/mm et K_{exp}=118.8 kN/mm.

4.5.5 Etude de l'effort dans le boulon

L'effort dans le boulon noté B est la résultante des efforts sur chaque nœud dans la zone du contact figure 71. L'évolution de l'effort B en fonction de la charge appliquée est représentée dans la figure 72. La force ultime de la traction vaut 96.4 kN et calculé à partir $F_{tr}=0.9 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{M2}$

Avec :

$\gamma_{M2} = 1$ et $A_s = A$

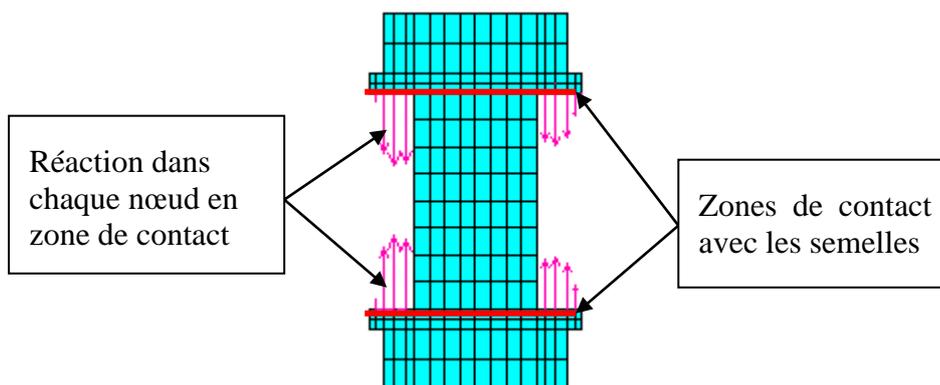


Figure 71 : L'effort sur chaque nœud.

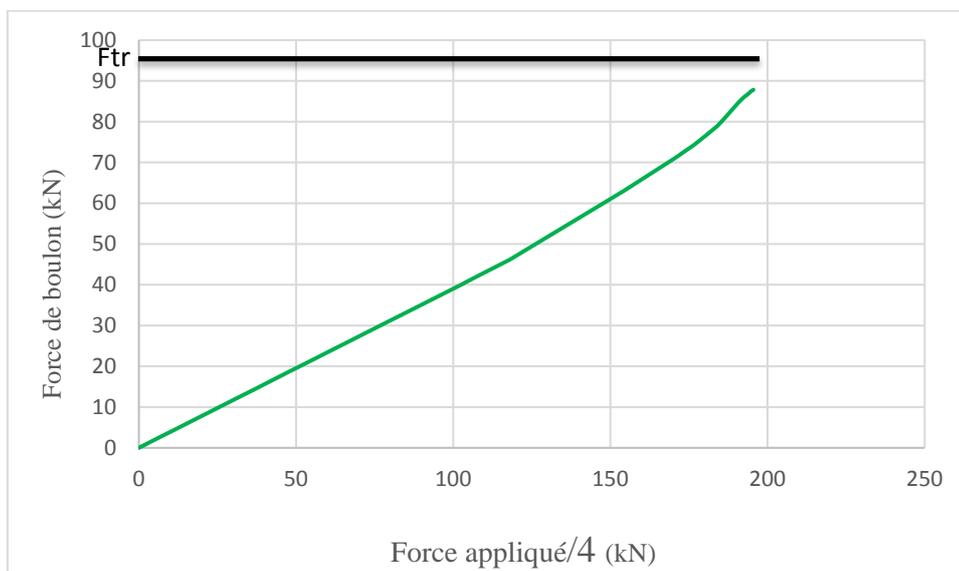


Figure 72 : Force dans le boulon en fonction de la force extérieure appliquée.

4.5.6 Etude de l'effort de levier

L'effort sur la semelle notée Q est la résultante des efforts sur chaque nœud dans la zone du contact figure 73. L'évolution de l'effort Q en fonction de la charge appliquée est représentée dans la figure 73.

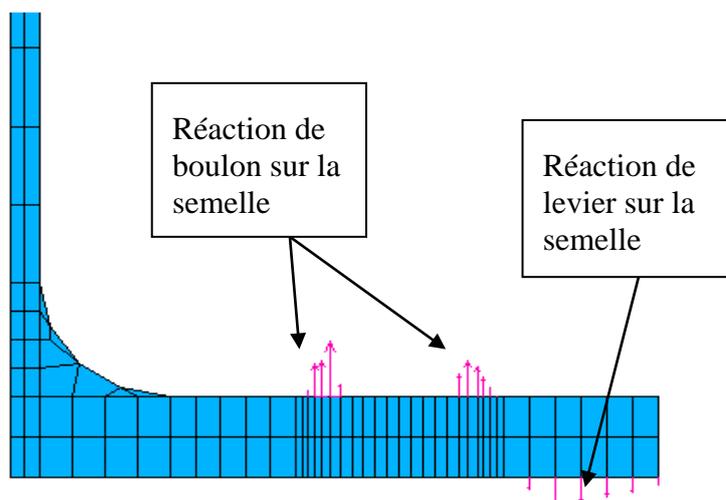


Figure 73 : L'effort de levier sur chaque nœud.

La figure ci-contre représente l'évolution de la force du levier en fonction de la charge sur le tronçon. Cette force, qui existe depuis le début du processus de chargement, devient très importante dans la phase finale. L'évolution est Linéaire, mais elle est exprimée exponentiellement dans le niveau de charge reflétant l'apparence de la première rotule plastique dans la semelle du tronçon. Il est certain que dans la phase élastique du comportement, le rapport entre la force du levier et la force appliquée $[Q/F]$ est quasiment constant. Dans la phase finale, ce rapport est relativement plus élevé à l'état plastique.

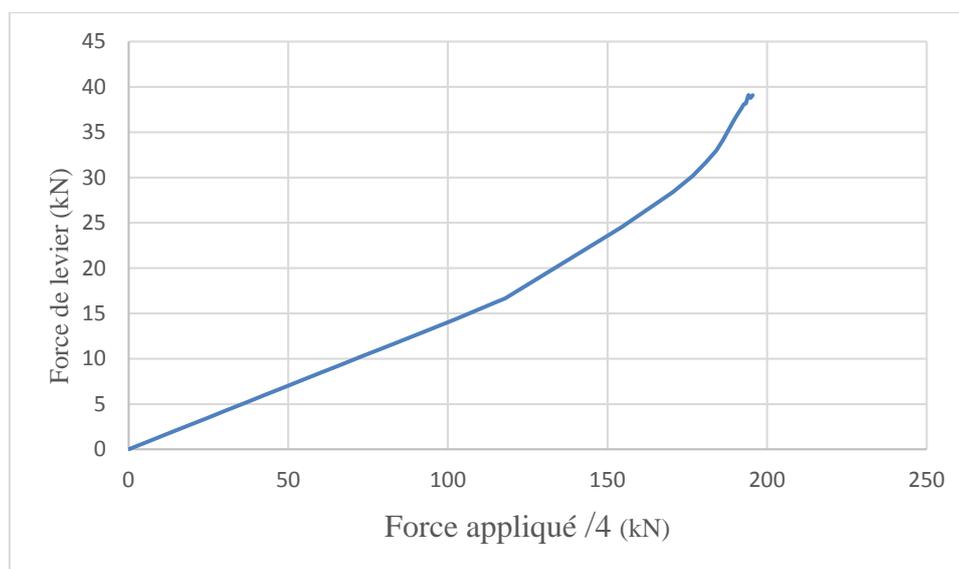


Figure 74 : Evolution de la force de levier résultante.

La figure ci-dessous, qui montre l'évolution de l'effort dans le boulon (B/F_{app}) qui induit la force du levier (Q/F_{app}) en proportion de l'effort appliquée.

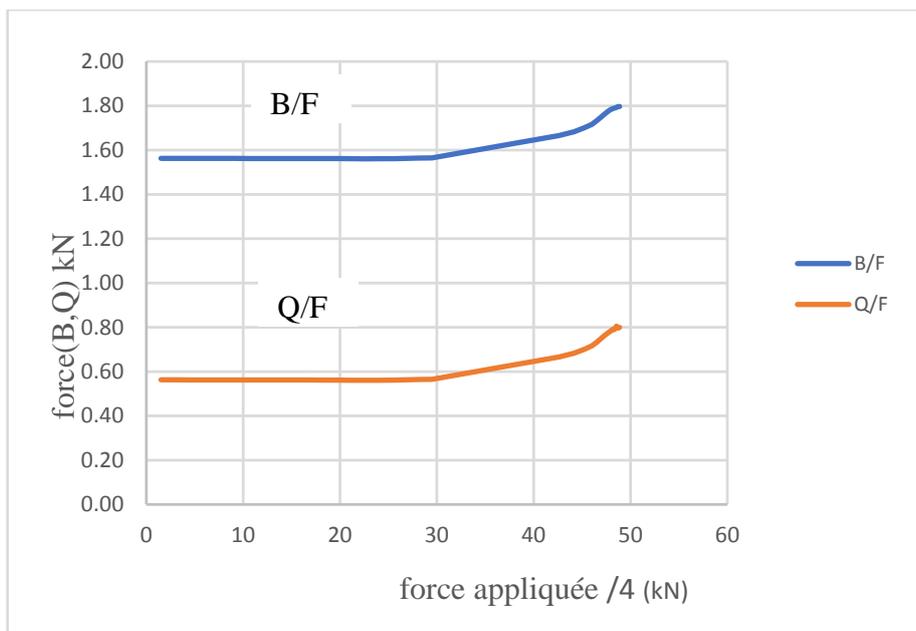


Figure 75 : Evolution du rapport $[B/F]$ et $[Q/F]$ en fonction de F .

▪ Evolution de l'effort de contact :

Les contraintes augmentent proportionnellement avec le contact entre les nœuds. Contact entre semelle.

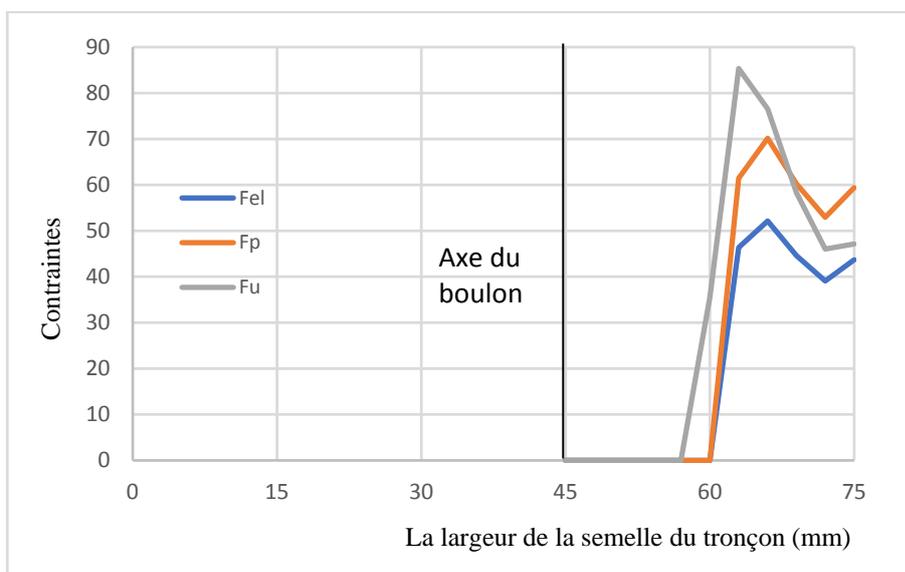


Figure 76 : Les contraintes (F_e, F_p, F_u).

Les résultats de notre tronçon.

A partir des courbes illustrées plus haut, on peut observer que tous les tests répondent de la même manière avec des charges croissantes et ont deux régions dissimilaires : au début les courbes sont linéaires et quand la force atteint certain point devient non linéaire, ce qui donne initialement les assemblages à comportement élastique et quand ils atteignent une certaine charge l'assemblage perd progressivement sa rigidité et agit comme plastique. La charge limite de traction, est la valeur minimum de la force de traction appliquée ou les rotules plastiques commencent à se produire.

4.6 Conclusion :

Après la modélisation et validation de model, les courbes $F-\Delta$ ont été comparé avec des résultats analytiques et expérimentales .Les résultats numériques correspond au calcul analytiques et le mode de ruine 1 est survenu et les rotules plastiques se sont produites. Une étude paramétrique aura lieu dans le chapitre suivant.

CHAPITRE V

Etude Paramétrique

5.1 Introduction

Dans cette partie, nous allons voir l'effet de certains paramètres géométriques ayant une influence sur le comportement mécanique des assemblages en Té. Parmi ces paramètres, nous citons l'épaisseur de la semelle t_f et le diamètre du boulon d_b .

Une nouvelle géométrie de base du tronçon, illustrée dans le **tableau 15** et la **figure 77**, est choisie dans cette partie. Les propriétés matérielles nominales des aciers S235 et des boulons 8.8 sont utilisées (**tableau 16**).

Dimensions (mm)												
Tronçon										Boulon		
b	l	h	t_f	t_w	e_x	e_y	P	W	m	d_b	A (mm ²)	Lb
200	200	200	12	10	40	40	120	120	55	12	113.04	35.5

Tableau 15 : Géométrie du tronçon.

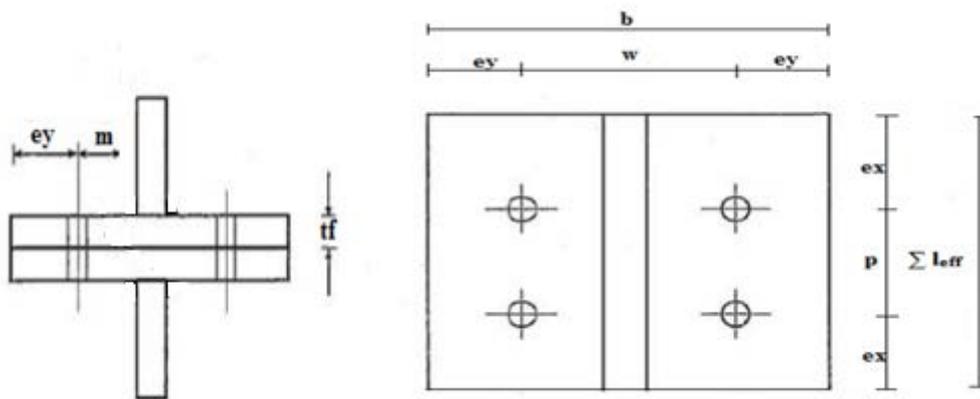


Figure 77 : Géométrie du tronçon.

	Matériaux		
	f_y (N/mm ²)	f_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)
Tronçon S235 ($t \leq 16$ mm)*	235	360	210000
Boulon 8.8	640	800	210000

Tableau 16 : Propriétés matérielles des aciers et des boulons.

*: Pour les épaisseurs supérieures à 16 mm, voir Annexe C

5.2 Analyse de l'influence de la semelle du tronçon en Té

5.2.1 Comportement global

Cinq épaisseurs de la semelle du tronçon sont étudiées (8, 10, 12, 16 et 20 mm). Les résultats force déplacement obtenus sont présentés dans figure 78.

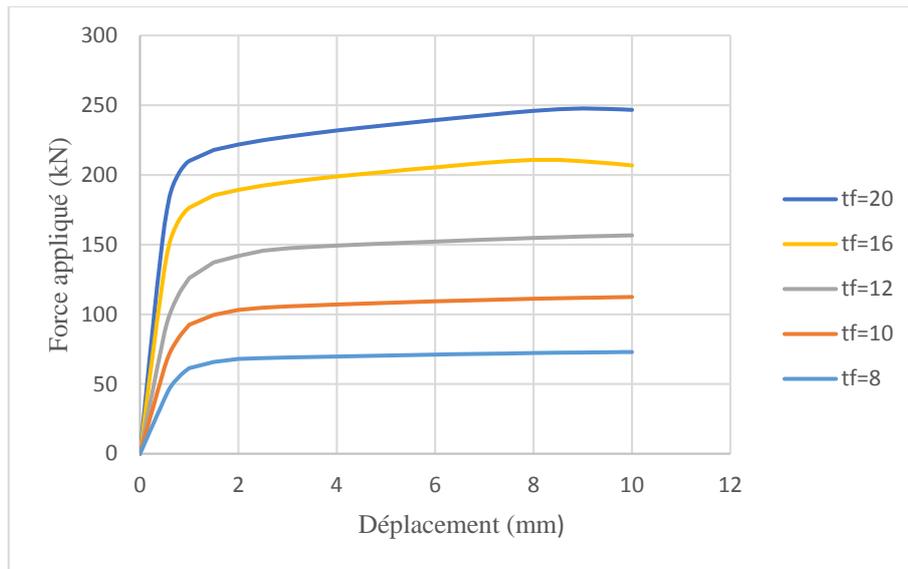


Figure 78 : Effet de t_f sur le comportement global avec déformation de l'âme.

Nous remarquons que l'épaisseur de la semelle a un effet significatif sur la résistance du tronçon.

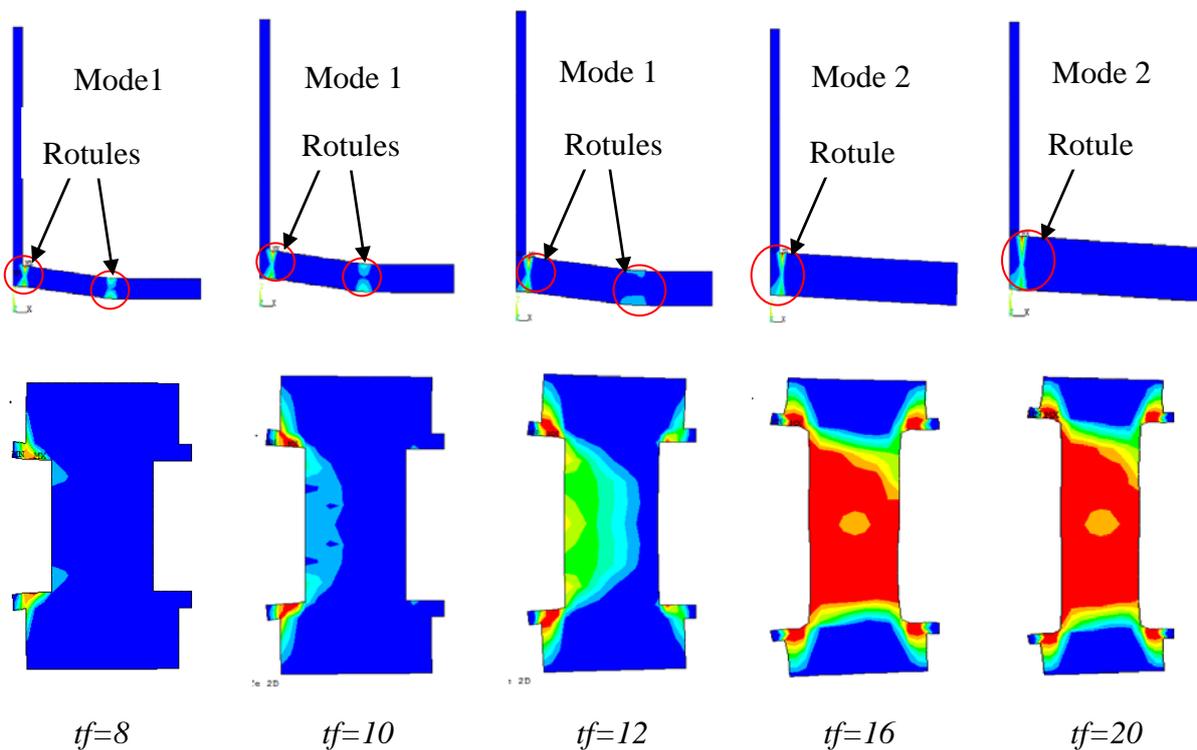


Figure 79 : Effet de t_f sur l'évolution de contraintes plastiques

5.2.2 Comparaison avec l'Eurocode 3

Le tableau ci dessous montre la variation de forces et rigidités en fonction d'épaisseur de semelle :

tf (mm)	8		10		12		16		20	
	MEF	EC3								
Fp (kN)	59	60	85	93	113	134	162	201	190	231
Mode	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
Kini,f	67	47	106	90	154	150	269	310	353	483
Kini,w	38	46	102	84	144	134	177	251	308	356

Tableau 17 : Les résistances et les rigidités avec une variation de tf (modèle MEF et EC3).

Les variabilités des épaisseurs de la semelle montre une résistance plus élevée pour le model numérique par rapport le model analytique avec une variation d'épaisseurs atteignant les 20mm.

5.2.3 Effort dans le boulon

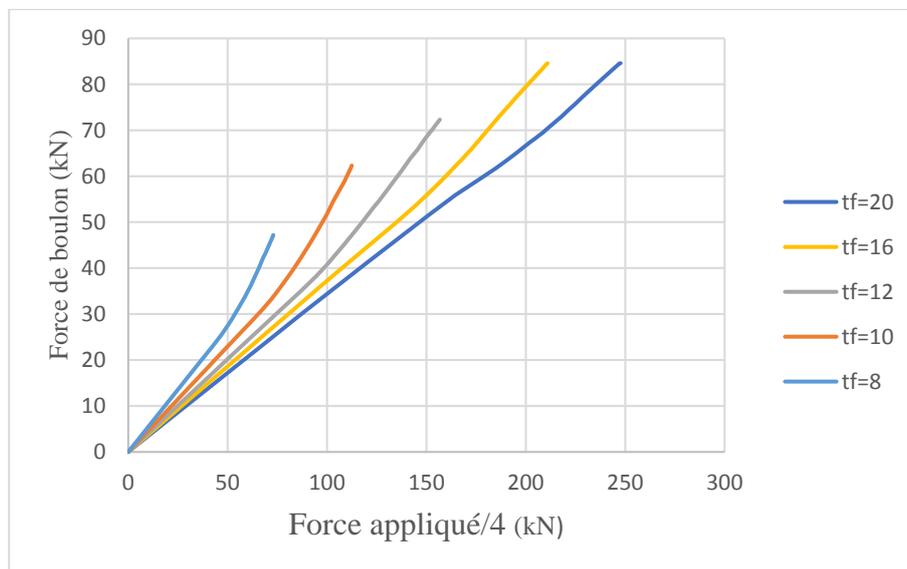


Figure 80 : Effet de tf sur l'effort dans le boulon

La force dans le boulon est significative et proportionnelle avec l'augmentation des épaisseurs.

La plus grande valeur de la force est environ 85 kN correspondant à tf=20mm.

5.2.4 Force de levier

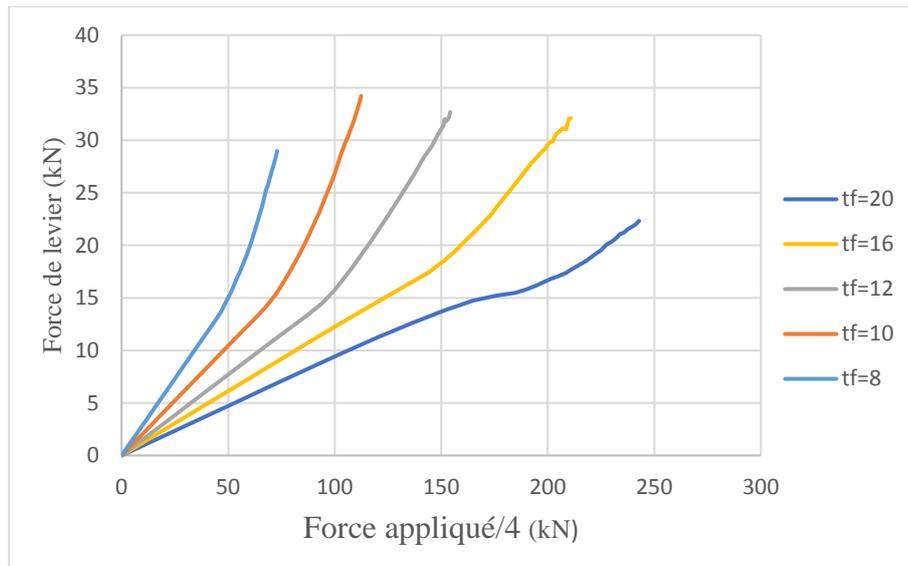


Figure 81 : Effet de t_f sur la force de levier

La force de levier notée Q est influée par la variabilité des épaisseurs. En observant la figure 80 les courbes montrent que la force appliquée augmente avec l'augmentation d'épaisseurs.

5.3 Analyse de l'influence de diamètre du boulon

5.3.1 Comportement global

Cinq diamètres de boulon sont étudiés (8, 10, 12, 16 et 20 mm). Les résultats force déplacement obtenus sont présentés dans figure 82.

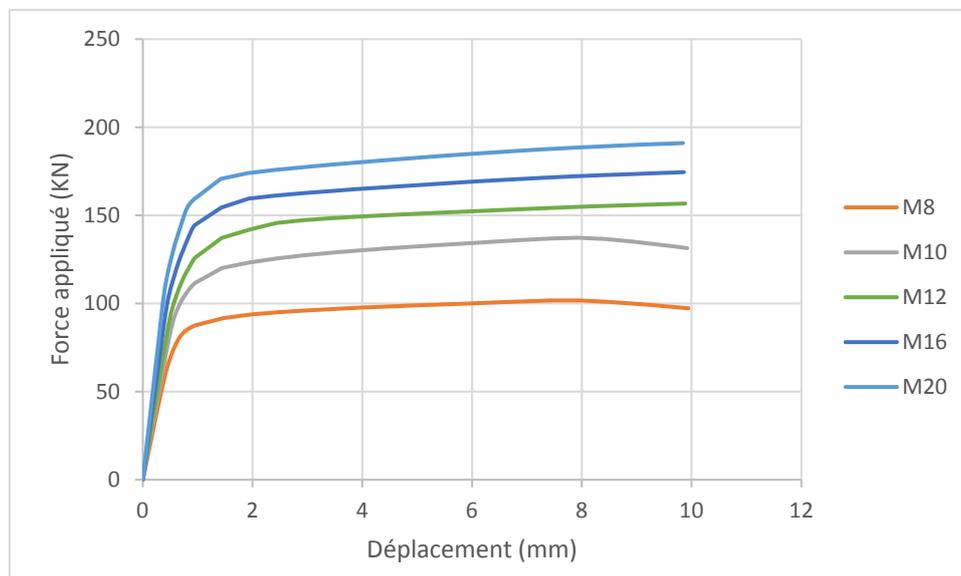


Figure 82 : Effet de d_b sur le comportement global.

Nous remarquons que le diamètre du boulon a un effet moins significatif sur la résistance du tronçon.

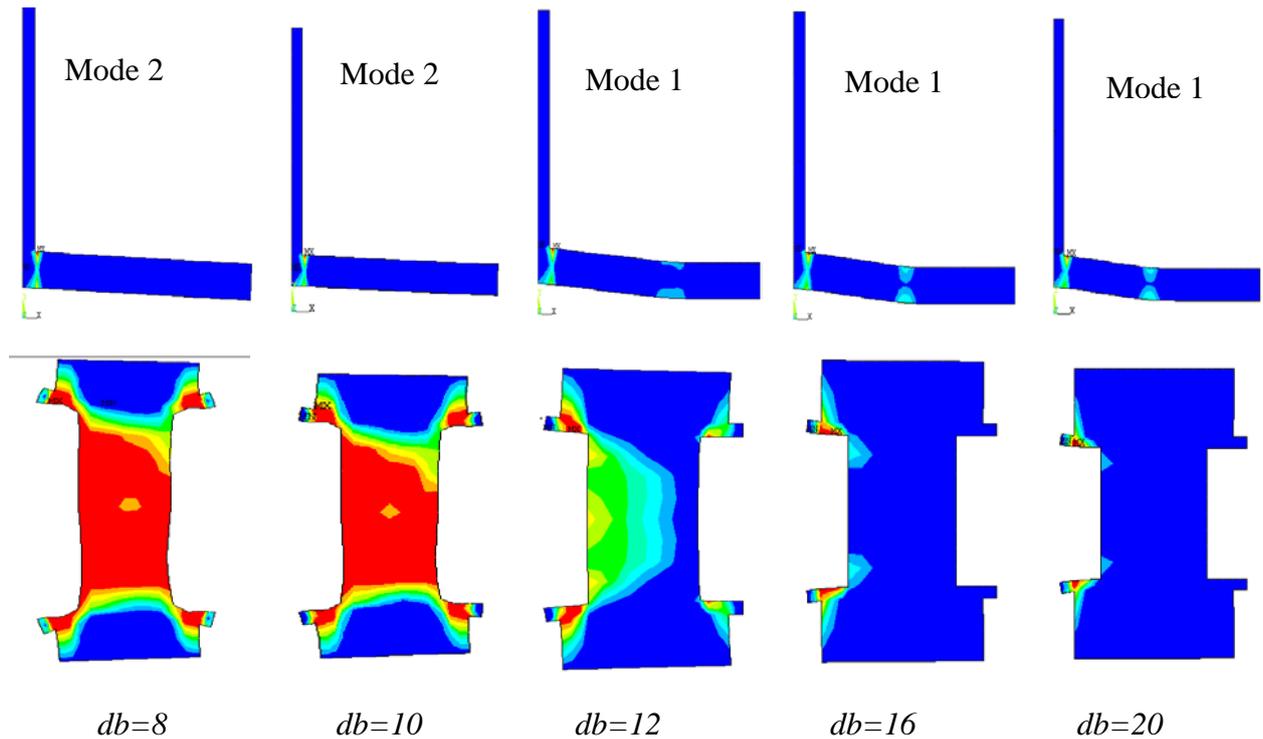


Figure 83 : Effet de db sur l'évolution de contraintes plastiques

5.3.2 Comparaison avec l'Eurocode 3

Le tableau montre l'influence du diamètre du boulon sur la force et rigidité pour le modèle MEF et EC3

db	8		10		12		16		20	
	MEF	EC3								
Fp	78	97	108	134	118	134	138	139	197	143
Mode	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1
Kini,f	116	138	123	146	143	150	161	155	197	157
Kini,w	110	125	116	131	134	134	149	138	180	140

Tableau 18 : Les résistances et les rigidités avec db est change (modèle MEF et EC3).

La variation des diamètres des boulons révèle une résistance plus importante pour le modèle numérique que pour le modèle analytique avec une variation de diamètre allant jusqu'à 20 mm.

5.3.3 Effort dans le boulon

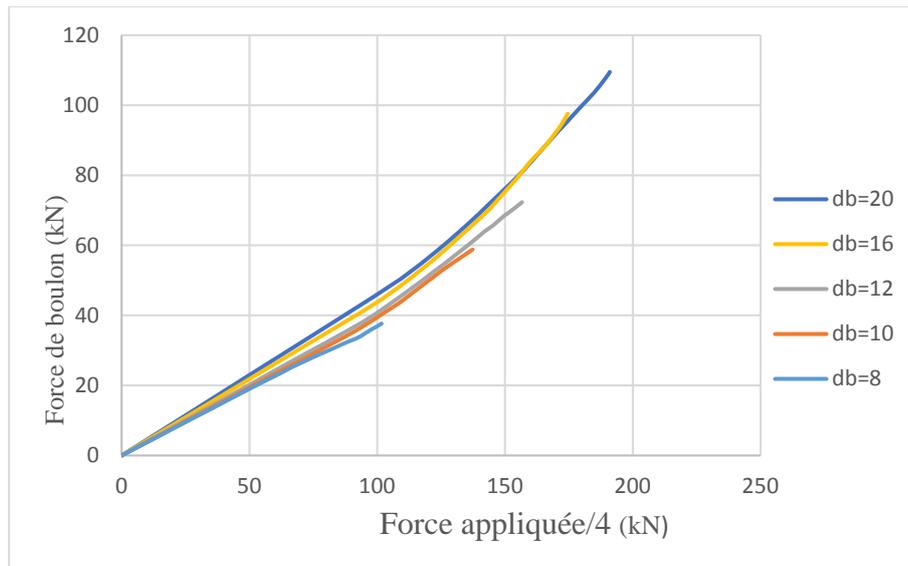


Figure 84 : Effet de db sur l'effort dans le boulon

La force du boulon notée B est influencée par la variabilité des diamètres. On observe que la force du boulon accroît proportionnellement avec l'accroissement de la force appliquée.

5.3.4 Force de levier

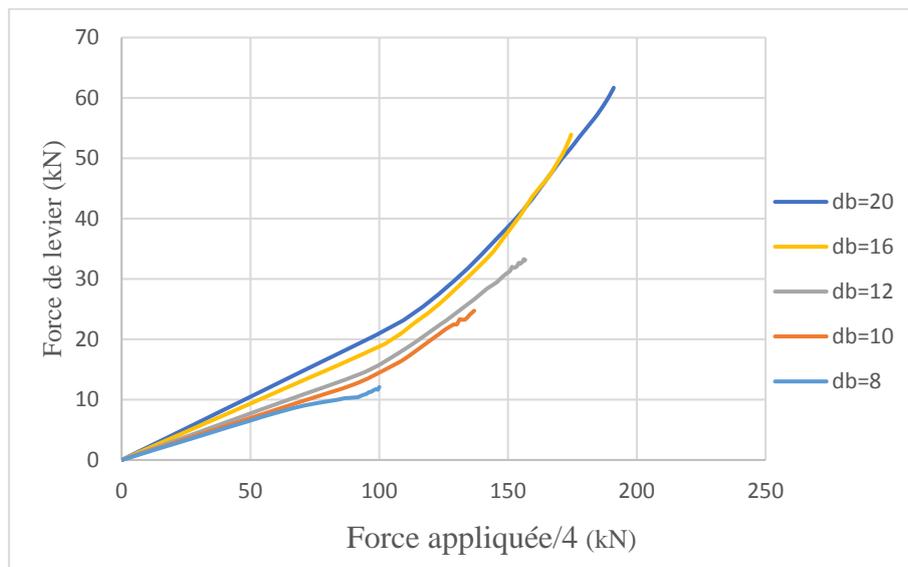


Figure 85 : Effet de db sur la force de levier

La force du boulon notée Q est influencée par la variabilité des diamètres. On observe que la force de levier augmente proportionnellement avec l'augmentation de la force appliquée.

5.4 Synthèse

Les changements des paramètres géométriques contribuent au comportement du tronçon et influent sur les forces, déplacements. À partir des courbes illustrées ci-dessus, il est clair que la résistance la plus élevée c'est celle du modèle analytique car seule la déformation de la semelle est prise en compte sans contrairement à la déformation flexionnelle du boulon.

5.5 Conclusion

L'étude paramétrique a révélé que la simulation numérique peut refléter de manière appropriée le comportement réel d'un assemblage métallique, y compris les relations force-déplacement et les différents force telles que l'effort du boulon et celle du levier.

Ceci ouvre des perspectives pour une étude plus approfondie afin de mieux maîtriser l'effet de tels types de modifications sur les assemblages.

Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est réservé à l'étude de l'assemblage boulonné particulièrement dans la zone tendue.

Les méthodes adoptées pour réaliser ce travail consiste à utiliser le code européen **l'EN 1993-1-8 et CCM97**, un outil numérique en élément finis ANSYS et des résultats expérimentaux.

La méthode des composantes nous a servi à localiser la zone tendue en la représentant par un tronçon en té et en déterminant les longueurs efficaces de ce dernier. Ceci nous a permis de calculer les différentes forces de traction de chaque rangée et déterminer les modes de ruine, ce qui permet par la suite de calculer le moment résistant et la rigidité initiale de l'assemblage.

La modélisation du tronçon par élément finis avec le logiciel ANSYS nous a aidée à développer les courbes force-déplacement et les comparer avec les courbes $F-\Delta$ analytique et expérimentaux où on a obtenu le même mode de ruine ce qui signifie que le calcul est satisfaisant. Une étude paramétrique par la suite a eu lieu qui va révéler l'influence de ces paramètres sur le comportement mécanique de l'assemblage. Cette étude nous a permis de mieux comprendre le comportement réel d'un assemblage.

Nous aurions bien aimé de fournir aussi une étude sur la variation de l'espacement du boulon et son influence sur le comportement du tronçon. Afin de mieux comprendre le comportement de l'assemblage une étude expérimentale peut être développée en se servant des différentes recherches et résultats récents.

Références bibliographiques

- [1] HIRT M. et BEZ R. – Construction métallique. Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement. Traité de Génie Civil de l'École Polytechnique Fédérale de Lausanne. Volume 10. 498 p. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes. Lausanne 1994.
- [2] CFF, Directive pour l'évaluation des ponts rails en construction rivetée. CFF chemins de fers fédéraux. Direction des travaux, Berne, 1992.
- [3] Mr Benyessad, M1-cours de construction métallique : conception et calcul des assemblages.
- [4] MOREL J. – Calcul des Structures métalliques selon l'Eurocode3. Editions Eyrolles.1994.
- [5] MUZEAU J.P. – Constructions métalliques-Moyens d'assemblages. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II. Novembre 2010
- [6] CIUTINA L. A. – Assemblage et comportement sismique de portiques en acier et mixtes acier-béton : Expérimentation et simulation numérique. Thèse de doctorat : Institut National des Sciences Appliquées de Rennes. 2003
- [7] JASPART J.P. –Elément de stabilité des structures de bâtiments métalliques. Notes des tinées aux étudiants de CUST de Clermont-Ferrand. 1998
- [8] Abidelah A, Analyse numérique du comportement d'assemblages métalliques - Approche numérique et validation expérimentale-, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont II, 2009,195p.
- [9] Frye M.J., Morris G.A. (1975), Analysis of flexibly connected steel frames. Canadian Journal of Civil Engineering; 2(3):280–91.
- [10] Krishnamurthy N. (1978), Fresh look at bolted end-plate behavior and design, Engineering Journal; 15(2):39–49.
- [11] Jaspert J.P., (2000). 'General report: session on connections', Journal of Constructional Steel Research 55, p.p. 69–89.
- [12] Trahair N.S., Bradford M.A., Nethercot D.A. and Gardner L., (2007)."The behavior and design of steel structures to EC3".4th edition British, London, Spon Press.
- [13] Owens, G. W. and Cheal, B. D.(1989),"Comprehensive coverage of several aspects of connection behavior and design Structural Steelwork "Connections, 1st Edition.
- [14] Kulak G.L., Fisher J.W. and Struik J.H.A., (1987)."Guide to design criteria for bolted and riveted joints", 2nd edition, New York, John Wiley and Sons.
- [15] Attiogbe E. and Morris G., (1991). 'Moment–rotation functions for steel connections'. Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 117, N° 6, pp. 1703–1718.
- [16] Chen W.F. and Lui F.M., (1991). 'Stability design of steel frames', Boca Raton (FL): CRC Press.
- [17]Chen W.F., (2000). 'Practical analysis for semi-rigid frame design', Singapore, World Scientific.

- [18] American Institute of Steel Construction (AISC), (1986)."Load and resistance factor design specification for structural steel buildings". Chicago.
- [19] Colson A and Bojorhovde R., (1992)."Intérêt économique des assemblages semi-rigide", Construction Métallique N° 2, pp. 37-41.
- [20] Moore D.B. and Sims P.A.C., (1983)."The influence of backing plates on the behavior of extended end plate connections". Building Research Establishment, N° 179.
- [21] Al-Khatab. Z. (2003) "« Analyse de comportement des assemblages métalliques renforcés par contre-plaques -Approche numérique et validation expérimentale", Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand.
- [22] Al-Khatab Z., Bouchaïr A., (2007)."Analysis of a bolted T-stub strengthened by backing plates with regard to Eurocode 3", Journal of Constructional Steel Research", Vol. 63, pp.1603–1615.
- [23] Mimoune M. et Mimoune F.Z. – Analyse du comportement des assemblages boulonnés par platine d’about sollicité en traction. Revue Canadienne de Génie Civil, 30 (4), pp.615-624. 2003
- [24] EN 1993-1-8 – Eurocode 3 : Calcul des structures en aciers Partie 1-8 : Calcul des assemblages
- [25] (<https://link.springer.com/article/10.1007/BF03249513>)
- [26] Eurocode 3 (1997) – Revised annex J - Joints in building frames, Draft, CEN.
- [27] Numerical information methodology for characterizing steel bolted components coupling finite element simulation and soft computing techniques
- [28] À refined finite element model for t-stub and end –plate steel connections).
- [29] Semi -Rigid joints in structural steelwork page 311.
- [30] T-stub connection component tests, James A Swanson and Roberto T Leon, school of civil and environmental engineering. Georgia institute of technology. Atlanta, Ga.
- [31] Assessment of the behavior of T-stub joint under impact loading.
- [32] ADINA, “ADINA theory and modeling guide, I: ADINA solids and structures”, ADINA R&D Inc., Watertown, MA, 2004.
- [33] Incremental modeling of T-stub connections.
- [34] Analytical model of bolted joints structures and its nonlinear dynamic characteristics in transient excitation.
- [35] Finite element modeling of t-stub connections reinforced with threaded bars
- [36] Merad Boudia Sofiane : (Comportement Mécanique d'un Tronçon en T d'un Assemblage Boulonné avec et sans Précontrainte)
- [37] analyse de la capacité porteuse d’assemblage boulonné d’ossatures selon EN 1993-3-8

[38] Jaspart, J. P., Numerical simulation of a T-stub---experimental data. COST C1, Numerical Simulation Working Group, Doc. C1WD6/94-09, 1994

Annexe A – Longueurs efficaces (semelle de poteau et platine d’about)

Source : l’EUROCODE 3 [24]

Emplacement 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	$2\pi m$	$4\pi m + 1.25e$	$2p$	p
Rangée extérieure	La plus petite de : $2\pi m, \pi m + 2e_1$	La plus petite de : $4\pi m + 1.25e,$ $2m + 0.625e + e_1$	La plus petite de : $2\pi m + p,$ $2e_1 + p$	La plus petite de : $2\pi m + 0.625e + 0.5p,$ $e_1 + 0.5p$
Mode 1	$L_{eff,1} = L_{eff,nc}$ mais $L_{eff,1} \leq L_{eff,cp}$		$\Sigma L_{eff,1} = \Sigma L_{eff,nc}$ mais $\Sigma L_{eff,1} \leq \Sigma L_{eff,cp}$	
Mode 2	$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$		$\Sigma L_{eff,2} = \Sigma L_{eff,nc}$	

Tableau 1 : Valeurs de la longueur efficace de la semelle du poteau non raidi

Emplacement 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 Adjacente à un raidisseur	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0.5p + \alpha m - (2m + 0.625e)$
Autre rangée de boulons intérieurs	$2\pi m$	$4m + 1.25e$	$2p$	p
Autre rangée de boulons d’extrémité	Plus petite de : $2\pi m, \pi m + 2e_1$	Plus petite de : $4\pi m + 1.25e,$ $2m + 0.625e + e_1$	Plus petite de : $2\pi m + p,$ $2e_1 + p$	Plus petite de : $2\pi m + 0.625e + 0.5p,$ $e_1 + 0.5p$
Rangée de boulons d’extrémité adjacente à un raidisseur	Plus petite de : $2\pi m, \pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0.625e)$	Sans rapport	Sans rapport

Tableau 2 : Valeurs de la longueur efficace de la semelle du poteau raidi

Le paramètre α doit être de la figure suivante :

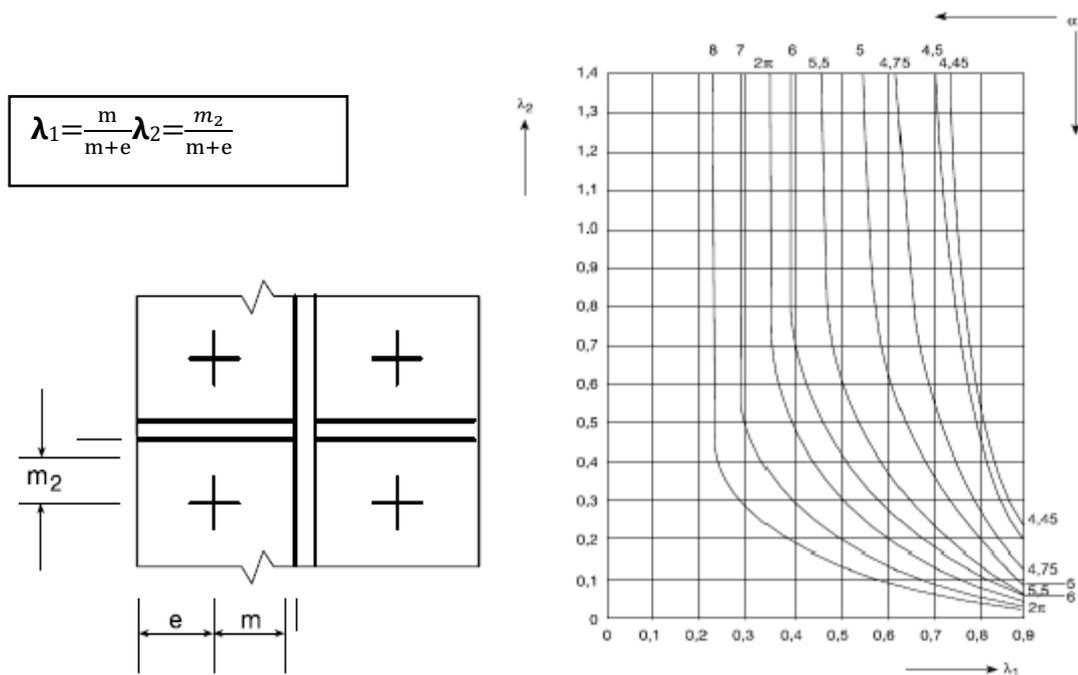


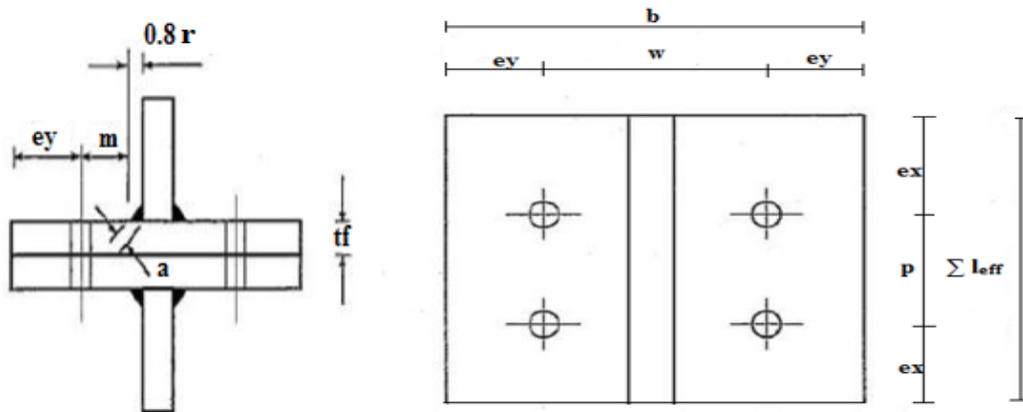
Figure 16 : Valeurs de α pour les semelles de poteau raidies et platines d'about

Emplacement 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 de boulons située sur la partie débordante de la platine d'about	Plus petite de : $2\pi m_x$, $\pi m_x + w$, $\pi m_x + 2e$	Plus petite de : $4\pi m_x + 1.25e_x$, $e + 2m_x + 0.625e_x$, $0.5b_p$, $0.5w + 2m_x + 0.625e_x$	--	--
Première rangée de boulons sous la semelle de poutre tendue	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0.5p + \pi m - (2m + 0.625e)$
Autre rangée de boulons intérieurs	$2\pi m$	$4\pi m + 1.25e$	$2p$	p
Autre rangée de boulons d'extrémité	$2\pi m$	$4m + 1.25e$	$\pi m + p$	$2m + 0.625e + 0.5p$

Tableau 3 : Valeurs de la longueur efficace de la platine d'about fléchie

Annexe B – Calcule analytique d'un tronçon en T

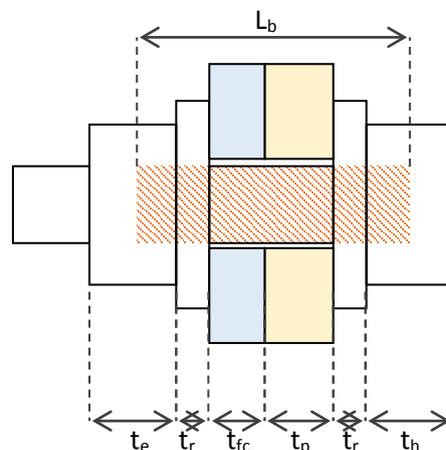
Tronçon d'un IPE 300



Donnée :

Pour le boulon :

- Diamètre de boulon $d_b = 12$ mm avec classe de 8.8 ;
- f_{ub} : la résistance ultime ; $f_{ub} = 800$ Mpa ;
- f_y : la limite d'élasticité ; $f_{yb} = 640$ Mpa ;
- $A_s = 113$ mm² ;
- $k_s = 0.9$;
- Epaisseur de la tête et de l'écrou : $t_h = t_e = 0.625 * d_b = 7.5$ mm ;
- Epaisseur de rondelle $t_r = 2$ mm ;
- Diamètre de rondelle $d_r = 1.75 * d_b = 21$ mm ;
- $e_w = d_r/4 = 21/4 = 5.25$ mm ;
- La longueur utile du boulon : $L_b = \Sigma t_f + 2t_r + 0.5 (t_h + t_e) = 32.9$ mm.



Pour la nuance d'acier :

- f_{ub} : la résistance ultime ; $f_{ub} = 974$ MPa ;
- f_y : la limite d'élasticité ; $f_y = 431$ MPa ;
- $e_y = e = 30$ mm ; $w = 90$ mm, $e_x = e_1 = 20$ mm ; $p = 40$ mm ; $b = 150$ mm ;
- $t_w = 7.1$ mm ; $t_f = 10.7$ mm ; $r = 15$ mm

$$m = w/2 - t_w/2 - 0.8r = 90/2 - 7.1/2 - 0.8*15 = 29.45 \text{ mm}$$

$$n = \min(e ; 1.25m) = 30 \text{ mm}$$

1. Calcul des longueurs efficaces :

Les étapes de calcul des longueurs efficaces en considérant les mécanismes de ruine, individuels ou en groupe, et de formes circulaires ou non circulaires. Les formules de calcul pour le tronçon traité ici sont celles des semelles de poteau fléchi non raidies (tableau 6.4 de l'EN 1993-1-8).

a. Mécanisme individuelle :

$$L_{eff, cp} = \min(2\pi m ; \pi m + 2e_1) = (2*3.14*29.45 ; 3.14*29.45 + 2*20) = \min(184.95 ; 132.47)$$

$$L_{eff, cp} = 132.47 \text{ mm}$$

$$L_{eff, nc} = \min(4m + 1.25e ; 2m + 0.625e + e_1) = \min(4*29.45 + 1.25*30 ; 2*29.45 + 0.625*30 + 20)$$

$$= \min(155.3 ; 97.65) \quad L_{eff, cp} = 97.65 \text{ mm}$$

$$L_{eff, 1} = \min(L_{eff, cp} ; L_{eff, nc}) = 97.65 \text{ mm et } L_{eff, 2} = L_{eff, nc} = 97.65 \text{ mm}$$

Cette longueur efficace est celle d'une seule rangée de boulons. Si les deux boulons sont considérés la somme de leurs longueurs efficaces est égale à 195.3 mm.

La longueur est supérieure à longueur réelle du tronçon en Té, c'est cette dernière qui sera prise en compte ($L_{eff} = 80$ mm).

b. Mécanisme groupe :

$$L_{eff, cp} = \min(\pi m ; 2e_1 + p) = (3.14*29.45 ; 2*20 + 40) = \min(92.47 ; 80)$$

$$L_{eff, cp} = 80 \text{ mm}$$

$$L_{eff, nc} = \min(2m + 0.625e + 0.5p ; e_1 + 0.5p) = \min(2*29.45 + 0.625*30 + 0.5*40 ; 20 + 0.5*40)$$

$$= \min(97.65, 40) \quad L_{eff, cp} = 40 \text{ mm}$$

$$L_{eff, 1} = \min(L_{eff, cp} ; L_{eff, nc}) = 40 \text{ mm et } L_{eff, 2} = L_{eff, nc} = 40 \text{ mm}$$

La longueur efficace d'une seule rangée de boulons, en mécanisme de groupe, est de 80 mm. Ainsi, pour les deux rangées de boulons, la longueur efficace est de $L_{eff, nc} (1+2) = 40+40 = 80$ mm.

	L_{cp}	L_{nc}	$L_{eff, 1}$	$L_{eff, 2}$
Mi	264.94	195.3	195.3	195.3
Mg	160	80	80	80

2. Calcul la résistance plastique :

$$L_B^* = \frac{8,8m^3 \cdot A}{\Sigma L_{eff} \cdot t_f^3} = \frac{8,8 \times 29,45^3 \times 113}{80 \times 10,7^3} = 259,16 \text{ mm}$$

Donc notre cas, $L_b < L_B^*$ l'effet de levier doit être prise en compte. Il y a quatre modes de ruines : $F_{min} = (F_{t1, Rd} ; F_{t2, Rd} ; F_{t3, Rd} ; F_{t4, Rd})$.

▪ Le moment résistant plastique :

$$M_{pl,1,Rd} = M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \Sigma l_{eff,1} t_f^2 f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{0,25 \times 80 \times 10,7^2 \times 431 \times 10^{-3}}{1,0} = 986,9 \text{ KN} \cdot \text{mm}$$

▪ La résistance à la traction de boulon :

$$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A}{\gamma_{m2}} = \frac{0,9 \times 974 \times 113 \times 10^{-3}}{1,0} = 81,4 \text{ KN}$$

➤ Mode 1 :

$$F_{t,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) M_{pl,1,Rd}}{(2mn) - e_w(m + n)} = \frac{(8 \times 30 - 2 \times 5) 986,9}{(2 \times 29,45 \times 30) - 5,25(29,45 \times 30)} = 153 \text{ KN}$$

➤ Mode 2 :

$$F_{t,2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd} + n \Sigma F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 986,9 + 30 \times 4 \times 81,4}{29,45 + 30} = 216 \text{ KN}$$

➤ Mode 3 :

$$F_{t,3,Rd} = \Sigma F_{t,Rd} = 4 \times 81,4 = 325 \text{ KN}$$

➤ Mode 4 :

$$F_{t,4,Rd} = \frac{l_{eff} t_w f_y}{\gamma_{m0}} = \frac{80 \times 7,1 \times 431 \times 10^{-3}}{1} = 245 \text{ KN}$$

Le mode 1 est plus défavorable pour le tronçon calculé avec $F_{t,Rd} = 153 \text{ KN}$

	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	M_{min}
$F_{t,Rd}$	153	216	325	245	153

3. Calcul la rigidité :



$K_{eq1} = K_{eq2} = K_{eq}$ ➡ il y a un symétrie

▪ **Rigidité de la semelle du tronçon en flexion :**

$$K_f = K_{ep} = \frac{0.9 l_{eff} t_f^3 E}{m^3} = \frac{0.9 \times 80 \times 10.7^3 \times 173532}{29.45^3} = 299.62 \text{ KN/mm}$$

▪ **Rigidité du boulon en traction :**

$$K_b = \frac{1.6 A E}{L_b} = \frac{1.6 \times 113 \times 192613}{32.9} = 1058.49 \text{ KN/mm}$$

▪ **Rigidité de l'âme du tronçon en traction :**

$$K_w = \frac{0.7 l_{eff} t_w E}{h_w} = \frac{0.7 \times 80 \times 7.1 \times 173532}{150} = 277.54 \text{ KN/mm}$$

➤ Sans tenant compte de la déformation de l'ame :

*Ressort en série :

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{2}{K_f} + \frac{1}{K_b}} = \frac{1}{\frac{2}{299.62} + \frac{1}{1058.49}} = 131.24 \text{ kN/mm}$$

*Ressort en parallele :

$$k_{in,t,f} = 2 \times k_{eq} = 2 \times 131.24 = 262.47 \text{ KN/mm}$$

➤ En tenant compte de la déformation de l'ame :

*Ressort en série :

$$k_{eq} = \frac{1}{\frac{2}{K_f} + \frac{2}{k_w} + \frac{1}{K_b}} = \frac{1}{\frac{2}{299.62} + \frac{2}{1058.49} + \frac{1}{277.54}} = 67.45 \text{ KN/mm}$$

*Ressort en parallele :

$$k_{in,t,w} = 2 \times k_{eq} = 2 \times 67.45 = 134.89 \text{ KN/mm}$$

	Sans	avec	Sans/Avec
K_{in, total}	262	135	1.94

4. Comportement de tronçon :

Nous avons $F = K.U$

F : La force appliqué ;

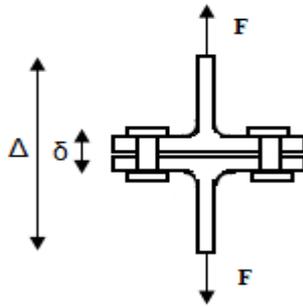
K : La rigidité ;

U : Le déplacement.

Nous allons déterminer deux déplacements relatifs :

1-Déplacement entre semelles δ .

2-Déplacement entre âme Δ .



Calcul de δ :

$$\delta = F_{t,Rd}/K_{ini,f} = 153/262.47$$

$$\delta = 0.58 \text{ mm}$$

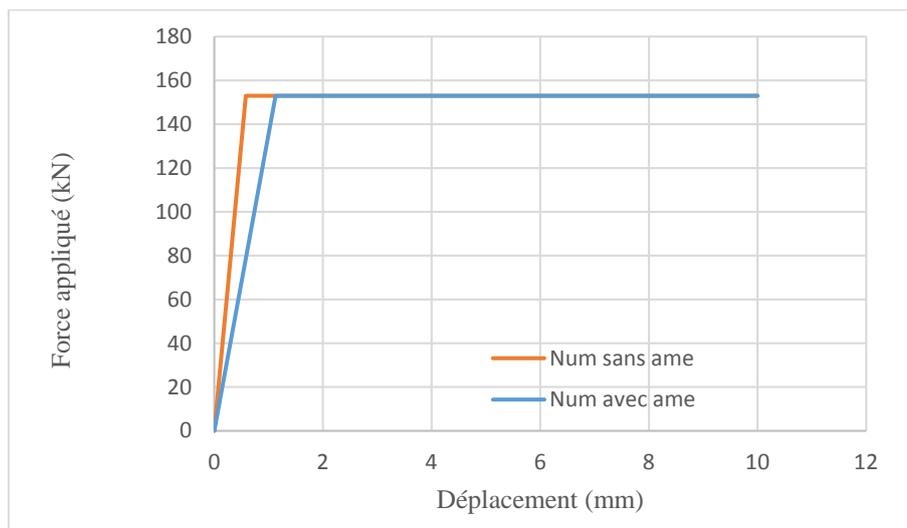
Calcul de Δ :

$$\Delta = F_{t,Rd}/K_{ini,w} = 153/134.89$$

$$\Delta = 1.13 \text{ mm}$$

Et prend le déplacement $d = 10 \text{ mm}$.

δ (mm)	Δ (mm)	$F_{t,Rd}$ (kN)
0	0	0
0.58	1.13	153
10	10	153



Courbe force-déplacement.

Annexe C – Nuances d'acier réglementaire

Norme EN 10025 : elle est tout à fait essentielle en construction métallique en ce qu'elle définit les aciers constitutifs de la très grande majorité des produits sidérurgique utilisés par la profession, soit les nuances S235, S275 et S355. Il s'agit d'aciers non alliés, prévus en principe pour la réalisation d'ouvrages destinés au service à température ambiante. La norme définit les nuances d'aciers, les classes de qualités, ainsi que les caractéristiques mécaniques en fonction de l'épaisseur :

