

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



UNIVERSITÉ ABOU BEKR BELKAID DE TLEMCEM
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

MÉMOIRE DE MASTER EN GÉNIE CIVIL

OPTION : CONSTRUCTIONS MÉTALLIQUES ET MIXTES

**Etude du comportement dynamique d'un assemblage boulonné
poteau-poutre (modèle analytique et numérique)**

Soutenu le 26 novembre 2020 devant le jury:

Président: Mme BENADLAZ

Examineur: M MERAD BOUDIA S.

Encadreur : M BOUMECHRA N.

Co-encadreur: M MISSOUM A.

Présenté par: **Bouzidi Mohamed Amine**
Dib Mohammed Yassine

Année académique: 2020-2021

Dédicaces

De la part de BOUZIDI MOHAMED AMINE

Tout d'abord je remercie "Allah " qui m'a donné le courage pour arriver à ce stade de fin d'étude.

Je dédié ce modeste travail à mes chers parents qui m'ont donné la vie pour profiter et qui m'ont permis d'arriver à ce stade de formation, et mes chers frères et ma sœur et mes amis, à mon binôme Dib Mohammed Yassine et sa famille.

De la part de Dib Mohammed Yassine

Tous mes remerciements au bon Dieu de m'avoir donné le courage d'accomplir mon stade de fin d'étude.

Je dédié mon travail au premier a mes chers parents pour leur soutien et leur bien vaillance ainsi qu'a mes frères et ma sœur, a mon binôme Bouzidi Mohamed Amine et sa famille

Remerciement

Nous remercions Dieu le tout puissant de nous avoir donné le privilège et la chance d'étudier et de suivre le chemin de la science et de la connaissance.

Nous adressons nos vifs remerciement à notre encadreurs MR BOUMACHRA N et Co encadreur MR MISSOUM A et pour ses compréhensions ; ses conseils et ses aides. Pour sa gentillesse et ses orientations efficaces.

Nous tenons également à remercier Pr BENADLA Z d'avoir accepté de présider le jury de notre projet de fin d'études.

Aussi, nous adressons également notre profonde gratitude à MR MERAD BOUDIA S. Qui il bien voulu examiné notre travail. Et leur présence va valoriser, de manière certaine, le travail que nous avons effectué.

Résumé

Le présent travail est consacré à l'étude d'un assemblage métallique boulonné de type poteau-poutre avec platine d'about non débordante et débordante sous charges cycliques et statique .

Notre étude répartie en quatre parties. D'abord on a commencé par une synthèse générale sur les assemblages poteau- poutre rencontrés dans les structures métalliques. Ensuite, on a présenté la méthode des composantes proposée par Eurocode 3 qui permet de déterminer les caractéristiques (Moment-Rotation) principales des assemblages poteau-poutre. Puis, on a appliqué la méthode des composantes selon l'Eurocode 3 sur deux cas d'exemples choisis. Enfin, on a développé un code de calcul sous MATLAB qui permet de présenter les résultats sous forme de courbe moment-rotation du model étudié.

Mots clés : assemblage, poteau, poutre, Eurocode3, charges, cycliques, MATLAB, méthode des composantes .

Abstract

This work is devoted to the study of a bolted metal connection of the column-beam type with an extended end plate under cyclic loads.

Our study is divided into four parts. First we started with a general summary of the column-beam connections encountered in metal structures. Then, we presented the component method proposed by Eurocode 3 which allows to determine the main characteristics (Moment-Rotation) of column-beam connections. Then, we applied the component method of Eurocode 3 on two selected example cases. Finally, a MATLAB computer code has been developed which allows the results to be presented in the form of a moment-rotation curve of the model studied.

Keywords: column, beam, connection, Eurocode3, cyclic, loads, MATLAB, component method.

ملخص

تم تخصيص هذا العمل لدراسة مجموعة معدنية مثبتة بمسامير ملولبة من نوع شعاع العمود مع لوحة نهاية غير بارزة تحت الأحمال الدورية.

دراستنا مقسمة إلى أربعة أجزاء. أولاً ، بدأنا بملخص عام لتوصيلات حزمة العمود التي تمت مواجهتها في الهياكل المعدنية. بعد ذلك ، قدمنا طريقة المكون التي اقترحتها Eurocode 3 والتي تسمح بتحديد الخصائص الرئيسية (لحظة الدوران) لتوصيلات الحزمة العمودية. بعد ذلك، طبقنا طريقة مكون Eurocode 3 على حالتين من الأمثلة المختارة. أخيراً، تم تطویر كود كمبيوتر MATLAB والذي يسمح بعرض النتائج في شكل منحنى دوران لحظة للنموذج المدروس.

الكلمات المفتاحية: وصلة شعاع العمود ، الكود الأوروبي 3 ، الأحمال الدورية ،

MATLAB، طريقة المكون

Table des matières

Dédicaces	i
Remerciements	ii
Résumé	01
Introduction générale.....	18

Chapitre 1 : Généralités

1.1 Introduction	22
1.2 Définition et rôle d'un assemblage.....	22
1.3 Types d'assemblages.....	23
1.3.1 Assemblage poutre-poteau par platine d'about.....	24
1.3.2 Assemblage poteau-poutre par cornières d'âme et /ou des semelles	25
1.3.3 Assemblages de continuité de poutres ou de poteaux.....	25
1.3.4 Assemblage de pied de poteau.....	26
1.4 Modes d'assemblages	27
1.4.1. Les types assemblages	27
1.4.1.1. Le rivetage.....	27
1.4.1.2. Le boulonnage.....	28
1.4.2. Les assemblages soudés	29

1.5. Fonctionnement des assemblages.....	30
1.6. Caractérisation du comportement des assemblages	31
1.7 Classification des assemblages.....	33
1.7.1 Classification des assemblages par la rigidité.....	34
1.7.2 Classification des assemblages par la résistance	35
1.7.3 Classification des assemblages par capacité de rotation.....	36
1.8 Conclusion	38

Chapitre 2 : Caractérisation d'un assemblage poutre-poteau par la méthode des composantes selon l'EUROCODE-3

2.1 Introduction	40
2.2 La méthode de composante	40
2.3 Application de la méthode des composantes aux assemblages poteau-poutre avec platine d'extrémité.....	41
2.3.1 Identification des composantes	41
2.3.2 Modèle mécanique à ressort.....	42
2.3.3 Approche pour le calcul de la rigidité.....	43
2.3.4 Approche pour le calcul de la résistance.....	46
2.3.5 Concept du tronçon en Té.....	48
2.4 Comportement des assemblages métalliques en zone sismique.....	52
2.5 Modes d'endommagement et de rupture.....	53
2.5.1 Modes de chargement.....	53

a) Chargement monotone.....	53
b) Chargement cyclique.....	53
c) Chargement constant.....	54
d) Chargements complexes.....	54
2.5.2 Modélisation phénoménologique.....	54
2.6 Conclusion.....	56

Chapitre 3 : Exemple de calcul

3.1 Introduction.....	58
3.2. Exemple de calcul.....	58
3.2.1 Assemblage par platine d'extrémité débordante (moment positif).....	58
3.2.1.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage.....	58
3.2.1.2 Zone cisailée.....	59
3.2.1.3 Zone comprimé.....	59
a. Coté poutre.....	59
b. Coté poteau.....	59
3.2.1.4 Zone tendue.....	60
a. Résistance de la zone tendue coté poutre.....	60
b. Résistance de la zone tendue coté poteau.....	66
3.2.1.5 Résistance de l'assemblage.....	72
a. Bilan des différents modes de ruine	72
b. Moment résistant de l'assemblage.....	72

c. Rigidité de l'assemblage.....	73
3.2.2 Assemblage par platine d'extrémité non débordante (moment négatif)	74
3.2.2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage.....	74
3.2.2.2 Zone cisailée.....	75
3.2.2.3 Zone comprimé.....	75
a. Coté poutre.....	75
b. Coté poteau.....	75
3.2.2.4 Zone tendue.....	76
a. Résistance de la zone tendue coté poutre.....	76
b. Résistance de la zone tendue coté poteau.....	81
3.2.2.5 Résistance de l'assemblage.....	89
a. Moment résistant de l'assemblage.....	89
b. Rigidité de l'assemblage.....	90
3.3 Conclusion.....	91

Chapitre 4 : Analyse numérique

4.1 Introduction.....	93
4.2 Assemblage sous charge cyclique.....	93
4.3 Description de l'assemblage.....	93
4.3.1 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (symétrique)	93
4.3.2 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (non symétrique)	94

4.3.3 Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage.....	95
4.4 Organigramme.....	96
4.5 Description du code.....	99
4.6 Interprétation des résultats.....	101
4.6.1 Assemblage poteau poutre courbe déplacement-temps (assemblage symétrique et non symétrique).....	101
4.6.2 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (symétrique)	102
4.6.3 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (non symétrique)	105
4.7 Conclusion.....	109
Conclusion générale.....	111
Références bibliographiques.....	113
Annexes.....	115

LISTE DES FIGURES

- Fig.1.1** Configurations d'assemblages dans le plan
- Fig.1.2** Définition de la zone d'attache et de l'assemblage (assemblage poutre-poteau)
- Fig.1.3** Assemblages boulonnés par platine d'extrémité dans une structure métallique
- Fig.1.4** Assemblage poteau poutre par platine d'about boulonnée
- Fig.1.5** Assemblage poutre-poteau par cornières d'âme et/ou des semelles
- Fig.1.6 .a** Assemblage de continuité par platine d'about
- Fig.1.6.b** Assemblage de continuité par couvre-joint
- Fig.1.7** Assemblage pied de poteau
- Fig.1.8** Rivet et rivet à anneau
- Fig.1.9** Boulon de charpente et boulon a haut résistance
- Fig.1.10** Modélisation d'un assemblage par un ressort en rotation
- Fig.1.11** Courbe moment-rotation d'un assemblage
- Fig.1.12** Limites de classification de rigidité
- Fig.1.13** Limites de la classification des assemblages par résistance
- Fig.1.14** Classification des assemblages par la capacité de rotation
- Fig.2.1** Composantes d'un assemblage poutre-poteau boulonné par platine d'extrémité
- Fig.2.2** Liste des composantes d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité
- Fig.2.3** Modèle à ressort pour un assemblage par platine d'about débordante boulonnée
- Fig.2.4** Composantes d'un assemblage poutre-poutre en acier représentées par des ressorts
- Fig.2.5** Approche EC3 pour le calcul de la rigidité initiale d'un assemblage poutre poteau par platine d'about boulonnée
- Fig.2.6:** Répartition des efforts dans un assemblage poteau-poutre boulonné
- Fig.2.7** Schémas des lignes de plastification des tronçons en té (mécanisme individuel)

Fig.2.8 Schémas des lignes de plastification des tronçons en té (mécanisme de groupe)

Fig.2.9 Définitions de m , e , e_1 , p

Fig.2.10 Valeurs de α pour les platines d'about

Fig.2.11 Définitions de b_p , w , m_x et e_x

Fig.2.12 Charge limite et mode de pilotage du chargement

Fig.2.13 Chargement cyclique

Fig.2.14 Comportement hystérétique d'un assemblage

Fig.3.1 Caractéristiques géométrique d'assemblage poutre-poteau

Fig.3.2 Caractéristiques géométrique d'assemblage poutre-poteau

Fig.4.1 Assemblage poutre-poteau symétrique vue 3D

Fig.4.2 Caractéristiques géométrique assemblage poutre-poteau symétrique

Fig.4.3 Assemblage poutre-poteau non symétrique vue 3D

Fig.4.4 Caractéristiques géométrique assemblage poutre-poteau non symétrique

Fig.4.5 Courbe déplacement- temps (assemblage symétrique)

Fig.4.6 Courbe déplacement- temps (assemblage non symétrique)

Fig.4.7 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique)

Fig.4.8 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-1)

Fig.4.9 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-2)

Fig.4.10 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-3)

Fig.4.11 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-4)

Fig.4.12 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-5)

Fig.4.13 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique)

Fig.4.14 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-1)

Fig.4.15 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-2)

Fig.4.16 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-3)

Fig.4.17 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-4)

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons.

Tableau 2.1 : Groupement en série et en parallèle des composantes.

Tableau 2.2 : Tableau récapitulatif de la méthode des composantes pour un assemblage avec platine d'extrémité débordante.

Tableau 2.3 : Valeurs de la longueur efficace de la semelle du poteau non raidi.

Tableau 3.1 : Bilan des modes de ruine.

Tableau 3.2 : Bilan des modes de ruines.

Tableau 3.3 : Bilan des modes de ruine poutre.

Tableau 3.4: Bilan des modes de ruine poteau.

LISTE DES NOTATIONS

Ω : Facteur de forme.

$K_{e,th}$: Rigidité élastique de l'assemblage.

$K_{p,th}$: Rigidité non élastique de l'assemblage.

$M_{p,th}$: Moment plastique de rupture de l'assemblage.

$M_{u,th}$: Moment ultime de l'assemblage.

K_I : Rigidité élastique de l'assemblage.

K_p : Rigidité non élastique de l'assemblage.

M_p : Moment plastique de rupture de l'assemblage.

M_0 : Moment de référence de l'assemblage.

F_{ext} : Charge extérieure totale.

F : Effort extérieur encaissé par les boulons.

n : Nombre total de boulons.

e_a et e_s : Sont respectivement l'épaisseur de l'âme et de la semelle de la poutre.

a : Épaisseur utile des cordons de soudure.

t : Épaisseur de la plaque (moyenne des deux épaisseurs).

m : Moment unitaire le long du cordon de soudure de l'âme et au droit de la ligne de trusquinage des boulons.

F_{ts} : Effort appliqué sur la semelle tendue.

D_r : Diamètre de rondelle.

ρ : Contrainte admissible de traction de la plaque.

c : étant la distance de la ligne de trusquinage des boulons à proximité du cordon du soudure.

n : Etant le coefficient de soulèvement dû à l'effet de levier agissant sur les bords transversaux intérieurs de la plaque.

$S_{j,ini}$: Rigidité initiale.

$M_{j,Rd}$: Moment résistant de calcul.

ϕ_{cd} : Capacité de rotation de calcul.

S_j : Rigidité en rotation.

$M_{j,Rd}$: Moment résistant de l'assemblage.

$M_{b,pl,Rd}$: Moment plastique de calcul de la poutre en flexion négative.

$M_{c,pl,Rd}$: Moment plastique résistant de calcul du poteau.

$f_{y,bp}$: Limite d'élasticité des contre-plaques.

t_{bp} : Epaisseur des contre-plaques.

$F_{t,Rd}$: Résistance à la traction d'un boulon.

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.

$B_{t,Rd}$: Résistance en traction de tous les boulons dans le tronçon en té.

$E=E_a$: Module d'élasticité longitudinal.

K_i : Le coefficient de rigidité en translation du ressort "i".

W_i : La déformation du ressort "i".

F_i : La force dans le ressort "i".

$M_{j,Rd}$: Le moment de calcul de l'assemblage.

\emptyset_j : La rotation dans l'assemblage.

F : L'effort agissant dans chaque ressort.

Z : Bras de levier.

$b_{eff,c}$: Hauteur efficace de l'âme qui assure la reprise de l'effort transversal de compression.

ρ : Facteur qui tient compte du flambement de l'âme du poteau.

$f_{y,wc}$: La limite d'élasticité de l'acier de l'âme de poteau.

K_{wc} : Coefficient de réduction qui tient en compte l'influence de la contrainte de Compression longitudinale exercée dans l'âme de poteau.

w_c : Coefficient de réduction qui tient en compte l'influence de la contrainte du Cisaillement dans le panneau d'âme.

t_{wc} : Épaisseur de l'âme de poteau.

γ_{m0} : Coefficient de la sécurité égale à 1,1.

a_f : Epaisseur utile (ou gorge) d'un cordon de soudure sur la semelle.

$s=r_c$: Pour les profilés laminés en I ou H.

$\sigma_{com,Ed}$: La contrainte maximale de compression longitudinale exercée dans l'âme du poteau à la racine de rayon en un point situé juste à l'extérieur de l'assemblage.

h_p : La hauteur totale de la poutre.

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

$M_{c,Rd}$: Moment résistant de la poutre.

w : La distance horizontale en les deux files des boulons.

e_{fc} : La distance entre les bords de la semelle du poteau et le centre des rangées de boulons.

e_{pl} : La distance entre les bords de la platine et le centre des rangées de boulon.

l_b : La distance entre le centre de l'écrou et le centre de la tête du boulon.

h_n : Hauteur de l'écrou.

h_h : Hauteur de la tête de boulon.

Z : la distance entre le centre de la semelle inférieur de la poutre et la position de la Force équivalente de la résistance de calcul de la région tendue.

INTRODUCTION GENERALE

Les assemblages des 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, soudures, platines ou cornières" ainsi que des formes géométriques variées. Elle engendre de fortes discontinuités et conduit à un comportement global non linéaire de l'assemblage.

La construction métallique utilise principalement deux types d'assemblages : les assemblages soudés et/ou les assemblages boulonnés. Les assemblages boulonnés par platine d'about sont largement utilisés dans les structures métalliques. En général, ces assemblages boulonnés par platine d'about ont des configurations géométriques variées du fait de la variation du nombre de rangées des boulons, de l'espacement des boulons, des dimensions de la platine d'about qui peut-être débordante ou non débordante, de la présence des raidisseurs, des dimensions des poteaux et des poutres, de la force de précontrainte dans les boulons, des propriétés mécaniques de l'acier et des surfaces de contact. Ces détails de conception entraînent des variations des caractéristiques de l'assemblage et affectent leur comportement, ce qui rend leur analyse extrêmement complexes.

Dans ce mémoire de master intitulé « étude du comportement dynamique d'un assemblage boulonné poteau-poutre modèle analytique et numérique » on a modélisé un assemblage métallique poteau poutre par platine d'extrémité sous une charge cyclique pour étudier le comportement de ce dernier.

Cette étude nous a permis d'établir un plan de travail comprenant les étapes suivantes :

-Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les assemblages rencontrés dans les ossatures de bâtiments métalliques.

-Le deuxième chapitre est consacré à l'étude et l'application détaillée de la méthode des composantes de l'EC3 qui considère un assemblage comme un ensemble de composantes individuelles.

-Le troisième chapitre se portera sur l'application de la méthode des composantes de l'EC3 sur deux exemples d'assemblages poteau-poutre avec platine d'about et sans raidisseurs, dont le premier exemple le moment est positif par contre dans le deuxième exemple le moment est négatif.

-Le quatrième chapitre est consacré au développement d'un modèle numérique qui permet de suivre le comportement réel d'un assemblage avec platine d'about boulonnée non raidies jusqu'à la ruine en traçons les courbe moments rotation, a l'aide d'un code développé sous MATLAB et on terminera notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE 1

Généralités sur les assemblages

1.1 Introduction

La réalisation d'une structure métallique est le résultat de la jonction d'éléments tels que les poutres avec les poteaux que l'on désigne par "Assemblage".

Ces assemblages possèdent des formes multiples liées à la nature des efforts à transmettre mais aussi aux moyens d'attaches utilisés. Ils sont considérés comme « Éléments sensibles ». Le rôle principal d'un assemblage est d'assurer la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces.

1.2 Définition et rôle d'un assemblage

Un assemblage en construction métallique est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles en assurant la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces.

Les éléments structuraux sont classifiés en fonction du type du chargement qu'ils supportent. Ils sont appelés poutres si la flexion est prédominante, poteaux si la charge axiale est prédominante. L'assemblage poutre poteau peut être sollicité à la fois à un moment, effort tranchant et normal. 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) ou bilatérales (sur deux côtés) comme il est représenté sur la **figure 1.1**. [1]

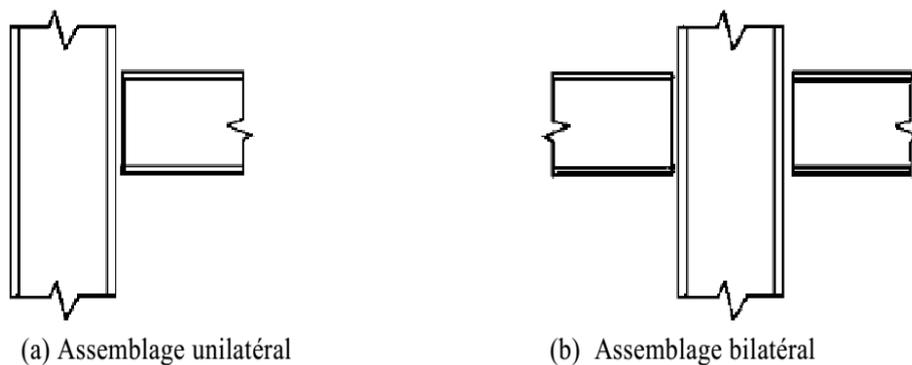


Fig.1.1 Configurations d'assemblages dans le plan

Avant de détailler les différents types d'assemblages, des exemples d'assemblages poutre poteau sont utilisés à titre d'illustration pour définir les zones d'attaches et d'assemblages (**Figure 1.2**) [1].

Une zone d'attache est définie comme l'ensemble des composantes qui fixent mécaniquement les éléments assemblés. Elle comprend la zone où l'action de fixation se produit, par exemple au niveau de l'interface extrémité poutre/poteau dans un assemblage poutre poteau selon l'axe de forte inertie.

Un assemblage comprend l'ensemble constitué de la zone d'attache et de la zone située entre les éléments assemblés.

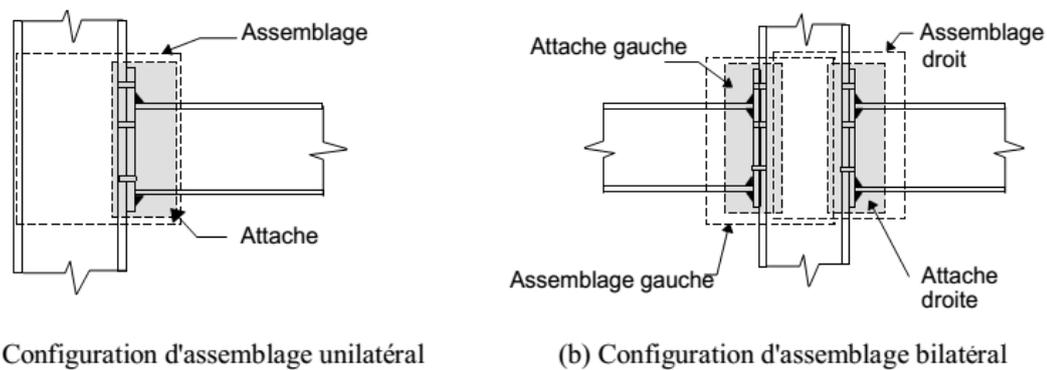


Fig.1.2 Définition de la zone d'attache et de l'assemblage (assemblage poutre-poteau)

1.3 Types d'assemblages (Poutre -Poteau)

Dans les portiques, les éléments structuraux linéaires (poutres et poteaux) sont attachés à leurs extrémités par des assemblages. Les emplacements possibles de ces assemblages sont présentés dans la (Figure 1.3). Le choix du type d'assemblage spécifique à adopter est en général lié au type d'équipements possédés par le fabricant et les exigences concernant le processus de montage sur site. Les assemblages boulonnés les plus couramment utilisés sont ceux utilisant des platines d'about, des cornières d'âme et/ou de semelles.

Dans le cas des assemblages boulonnés par platine d'extrémité, on distingue, d'une manière commode, les types d'assemblages suivants :

- Les assemblages poutre- poteau (A).

- Les assemblages poteau- poutre (B).
- Les assemblages de continuité poutre-poutre (C).
- Les assemblages de continuité poteau- poteau (D). [2]

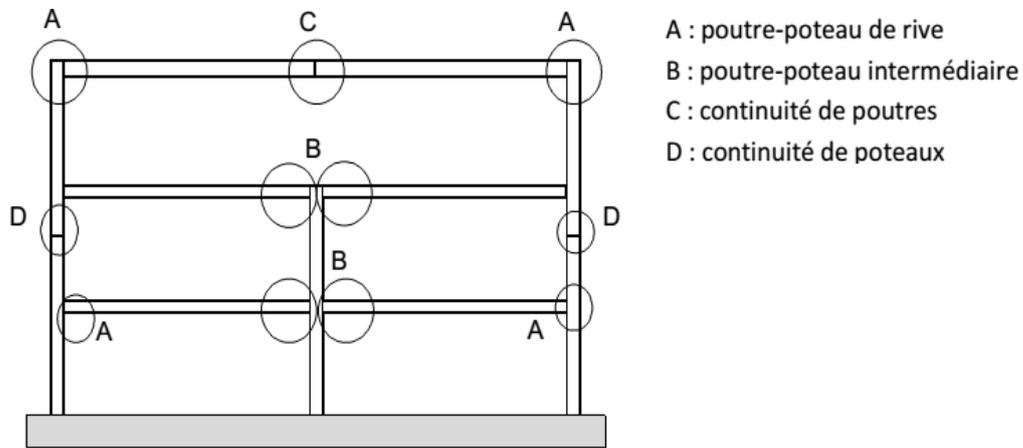


Fig.1.3 Assemblages boulonnés par platine d'extrémité dans une structure métallique.

1.3.1 Assemblage poutre-poteau par platine d'about

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 soudée à l'extrémité de la poutre et attachée au poteau par des boulons disposés en plusieurs rangées verticales.

Cette platine peut être débordante ou non débordante (**Figure 1.4**). La platine non débordante borde la poutre sur toute sa hauteur. Par contre, la platine débordante dépasse la hauteur de la poutre.

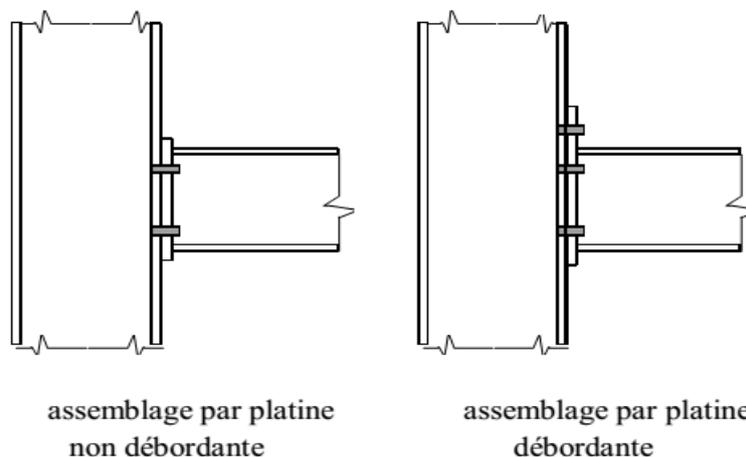


Fig.1.4 Assemblage poteau poutre par platine d'about boulonnée.

1.3.2 Assemblage poteau-poutre par cornière d'âme et ou de semelle

Dans ce type d'assemblages voir (**Figure 1.5**), les cornières sont boulonnées sur les semelles et les âmes des deux éléments "Poutre et Poteau". L'assemblage de type **(a)** 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 par exemple une palée de stabilité triangulée. Les assemblages de types **(b)** sont en général semi-rigides.

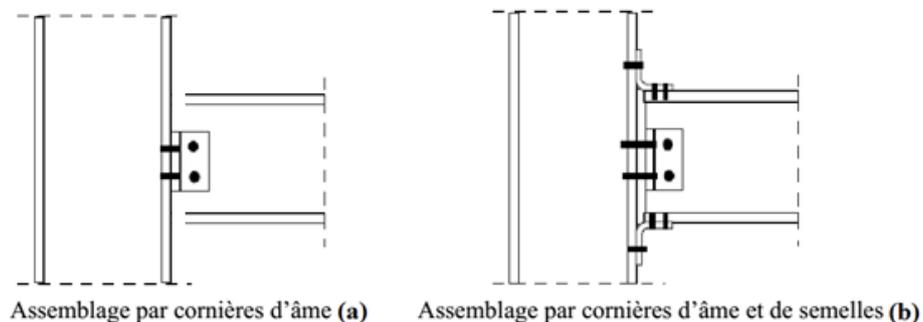


Fig.1.5 Assemblage poutre-poteau par cornières d'âme et/ou des semelles.

1.3.3 Assemblages de continuité de poutres ou de poteaux

La (**Figure 1.6.a**) montre deux assemblages avec platine d'about qui assurent la continuité des poutres ou des poteaux. Les platines peuvent être débordantes ou non.

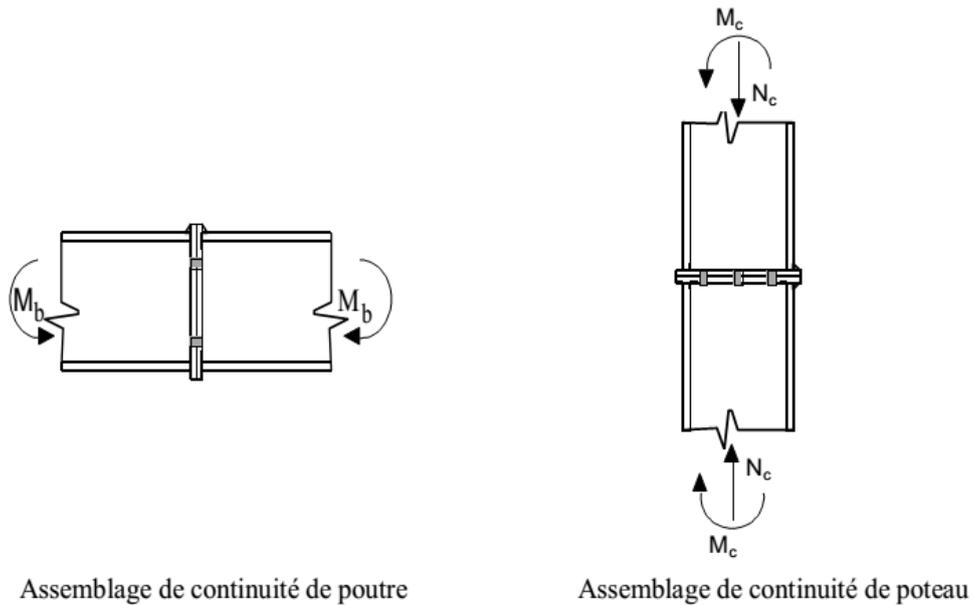


Fig.1.6 .a Assemblage de continuité par platine d'about

Une alternative à l'utilisation de platines d'about fait appel aux assemblages par couvre-joint (**Figure 1.6 b**) avec des zones d'attaches boulonnées réalisées sur les âmes et les semelles des poutres.

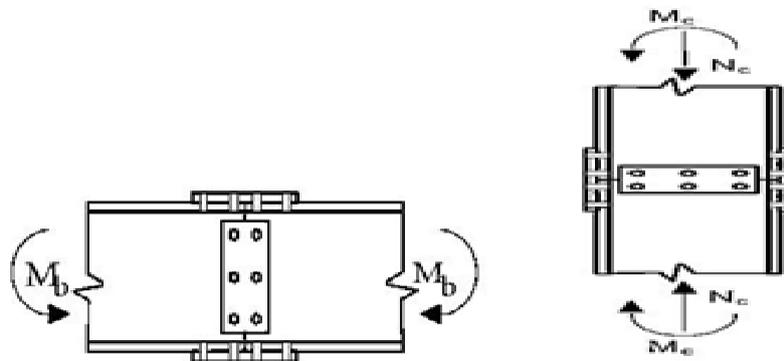


Fig.1.6.b Assemblage de continuité par couvre-joint

1.3.4 Assemblage de pied de poteau

Ce type d'assemblages est utilisé lorsqu'il s'agit de relier une structure en acier à un noyau de béton, voir (**Figure 1.7**). La base du poteau est soudée à une platine mince ou épaisse, boulonnée au noyau du béton à l'aide des tiges d'ancrage.

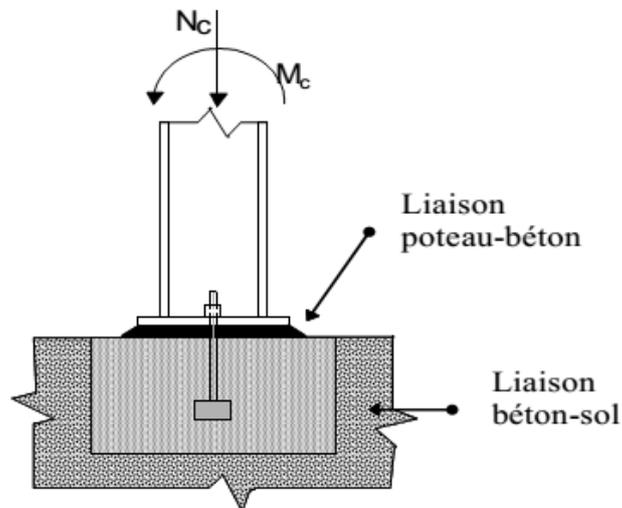


Fig.1.7 Assemblage pied de poteau

1.4 Modes d'assemblage

Les différentes formes d'assemblages ci-dessus mentionnés sont généralement réalisées par les principaux modes d'assemblages suivants :

- Les assemblages par rivet
- Les assemblages boulonnés.
- Les assemblages soudés. [3].

1.4.1. Les types assemblages

1.4.1.1. Le rivetage 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 20ème siècle [4].

- ❖ **Les rivets à anneau** sont des éléments de connexion mécanique qui tiennent (dans la mesure où il a une même forme de tête et qu'il introduit une force de précontrainte) et du boulon (car une partie de sa tige est rainurée). Les principales caractéristiques : la tige se compose de deux parties rainurées (et non pas filetées), séparées par une portion de tige dont la section est affaiblie. L'acier des rivets à anneau est un acier à haute résistance [4].

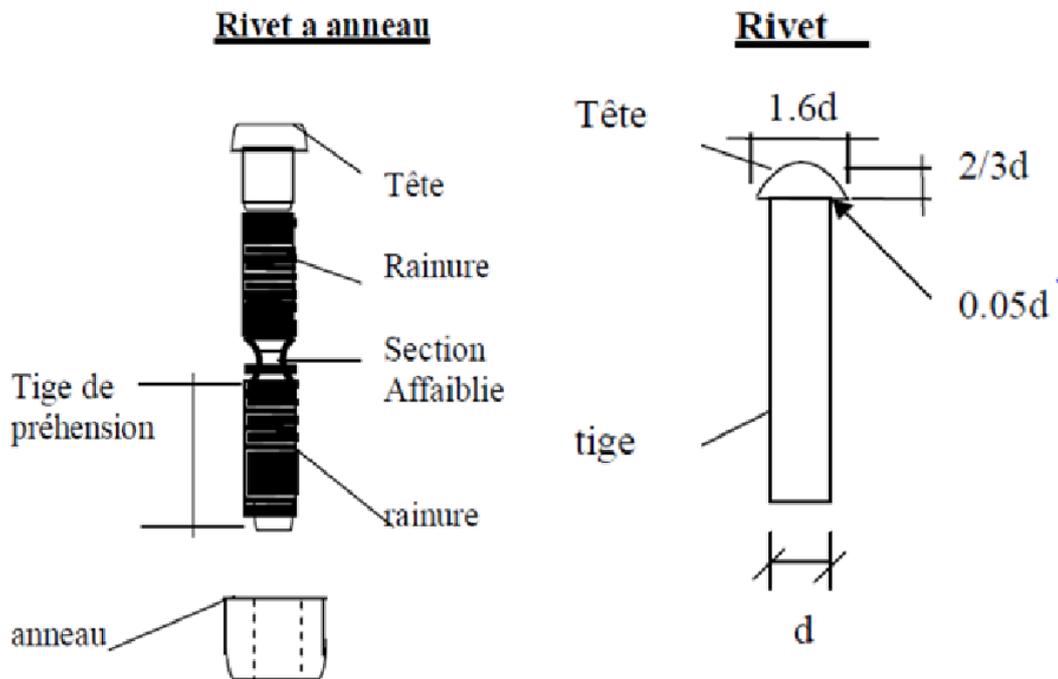


Fig.1.8 Rivet et rivet à anneau

1.4.1.2. Le boulonnage

Le vissage est un procédé d'assemblage permettant de réaliser une liaison démontable de deux ou plusieurs pièces à l'aide d'éléments de visserie. Ces éléments sont constitués d'une vis et d'un écrou et éventuellement une ou deux rondelles. L'écrou peut être formé par l'une des deux pièces de l'assemblage qui est alors taraudée. Un ensemble constitué d'une vis et d'un écrou s'appelle un boulon. Les caractéristiques des différents types d'aciers utilisés pour les boulons (**Tableau 1.1**) présentent les valeurs de la limite d'élasticité f_{yb} et de la résistance à la traction f_{ub} des quatre classes de qualité d'acier utilisées pour les boulons.

Boulon	Classe de qualité	f_{yb} (N/mm ²)	f_{ub} (N/mm ²)
Ordinaires	3.6	180	330
	4.6	240	400
	4.8	320	420
	5.6	300	500
	5.8	400	520
	6.8	480	600
A haute résistance	8.8	640	800
	9.8	720	900
	10.9	900	1040
	12.9	1080	1220

Tableau1.1: caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons.

Ce tableau montre également que l'on distingue deux types de boulons, qui se différencient par leurs caractéristiques mécaniques plus ou moins élevées.

❖ **les boulons Ordinaires** (aciers 4.6 4.8 5.6 5.8 et 6.8) : ils sont employés couramment pour réaliser les assemblages faiblement sollicités des halles et des bâtiments par exemple (assemblage d'élément secondaire).

les boulons à haute résistance (aciers 8.8 et 10.9) : ils sont généralement utilisés pour les assemblages de ponts, ainsi que pour les assemblages fortement sollicités ou soumis à des effets dynamiques. Seulement les boulons à Haute Résistance peuvent être précontraints.

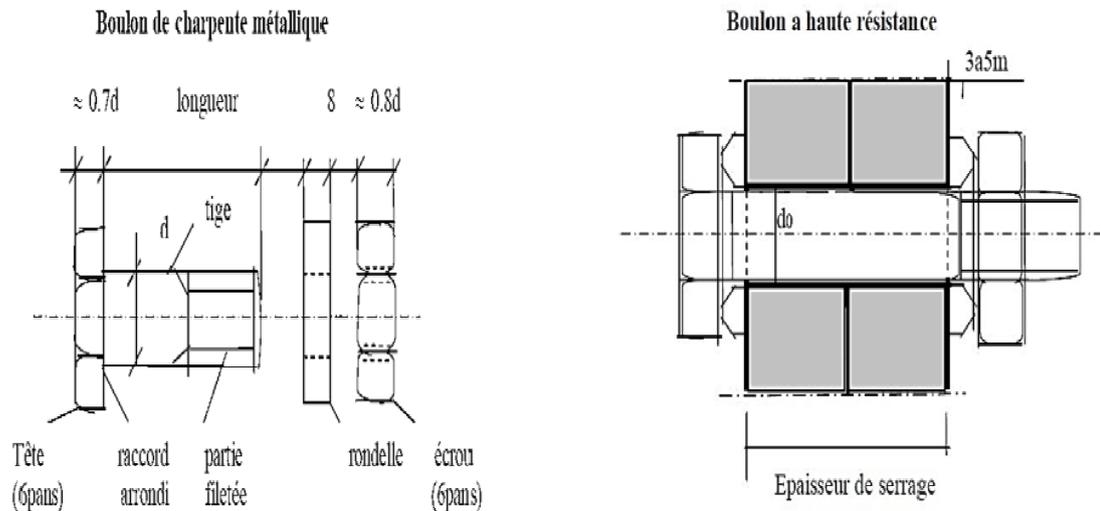


Fig.1.9 Boulon de charpente et boulon a haut résistance.

La **(Figure 1.9)** montre les différentes parties composant un boulon ordinaires et un boulon à 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.

1.4.2. Les assemblages soudés :

L'opération de soudage consiste à réunir ou rassembler deux pièces ou plusieurs parties constitutives d'un assemblage en perpétuant la continuité de la matière entre les parties à assembler par chauffage, par pression ou par combinaison des deux.

Le soudage implique donc :

- ❖ 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) et 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 criques 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 tel que:

- Il assure la continuité de 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.

Par contre, il présente divers inconvénients :

- Le métal de base doit être soudable.
- Le contrôle des soudures est nécessaire et onéreux.
- Le contrôle des soudures est aléatoire.
- Le soudage exige une main-d'œuvre qualifiée et un matérielles spécifiques.

1.5. Fonctionnement des assemblages

Les principaux modes d'assemblages correspondent à deux types de fonctionnement distincts : obstacle et/ou adhérence [5].

- a- Fonctionnement par obstacle :** C'est le cas des boulons ordinaires, non précontraints, dont les tiges reprennent les efforts et fonctionnent en cisaillement.
- b- Fonctionnement par adhérence :** Dans ce cas, la transmission des efforts s'opère par adhérence des surfaces des pièces en contact. Cela concerne le soudage, le collage, le boulonnage par boulon HR.
- c- 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 dépassée, fait intervenir les rivets par obstacle, au cisaillement.

1.6. Caractérisation du comportement des assemblages

Les caractéristiques mécaniques d'un assemblage en rotation peuvent être décrites par une courbe de comportement $M_j-\phi$ (moment-rotation), où M représente le moment fléchissant exercé sur l'assemblage par la poutre et ϕ la rotation totale enregistrée entre les axes du poteau et de la poutre. L'utilisation de ce type de courbes demande des programmes d'analyse de structures sophistiqués. Afin de permettre un calcul simple des structures, les courbes moment-rotation des assemblages peuvent être idéalisées, selon l'EC3, par des modèles tri linéaires, bilinéaires ou linéaires.

Lors d'une analyse structurale, un assemblage poutre-poteau en particulier peut être souvent modélisé au moyen d'un ressort en rotation placé au point d'intersection entre les axes de la poutre et du poteau, comme montré sur la **Figure 1.10**.

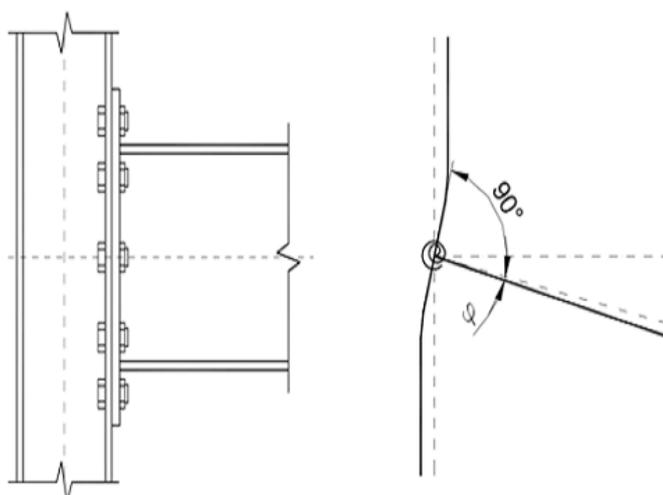


Fig.1.10 Modélisation d'un assemblage par un ressort en rotation

Trois catégories de méthodes de caractérisation du comportement d'un assemblage sont souvent mentionnées .

- ❖ **Les travaux expérimentaux** : permettent d'étudier le comportement de l'assemblage à l'échelle réel.
- ❖ **Les approches numériques** : permettent d'analyser le comportement de l'assemblage au travers de simulation numérique, le plus souvent aux éléments finis.

- ❖ **Les méthodes analytiques** : abordent le comportement de l'assemblage sous une analyse plus souvent théorique, parfois empirique [6].

Pour un assemblage métallique de type poutre-poteau, les réponses élastique et inélastique sous des forces monotonement croissantes sont complètement définies par la courbe moment-rotation ($M-\varphi$) voir (la Figure 1.11), Cette courbe de comportement se présente avec trois branches : une branche ascendante, une branche plus horizontale de plastification et une branche descendante.

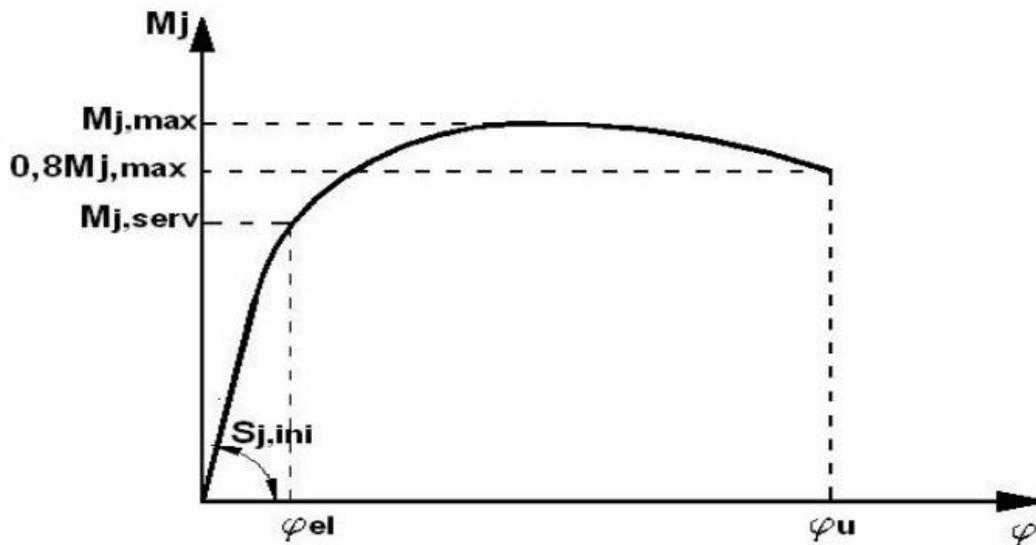


Fig.1.11 Courbe moment-rotation d'un assemblage.

- **Branche ascendante** : Celle-ci peut, être divisée en deux parties. La première partie correspond à la phase du comportement élastique entre l'origine et le point où les premières plastifications se produisent. La deuxième partie, non rectiligne, est due à la non-linéarité de comportement dans l'assemblage, avec des plastifications plus ou moins prononcées dans les composants les plus faibles. Le point entre les deux parties de courbe correspond en quelque sorte au moment limite de service de l'assemblage $M_{j, serv}$. La rigidité $S_{j, inti}$ de la première partie de courbe, représente un paramètre important du comportement de l'assemblage dans la mesure où il peut influencer le comportement structural global.

- **Branche plastique** : Cette partie de la courbe tend à devenir horizontale et représente le plein développement des plastifications dans l'assemblage. Cela se traduit par des plastifications successives dans ses divers composants. Le palier plastique peut être plus ou moins long, en fonction de plusieurs paramètres : le type d'assemblage, la nature du matériau des composants, le mode de chargement de l'assemblage etc. Dans l'intervalle de rotation qui peut définir le palier plastique, la valeur de la résistance maximale de l'assemblage est atteinte pour une valeur $M_{j,max}$.
- **Pente descendante** : Elle traduit l'approche de la ruine de l'assemblage et permet souvent de définir une ductilité convenable de celui-ci. La valeur ultime de la rotation φ_u doit représenter une valeur pour laquelle l'assemblage reste fonctionnel et résiste encore à des valeurs significatives du moment. Une définition usuelle pour φ_u en dimensionnement sismique est donnée par l'intersection du graphique de la courbe avec la ligne horizontale qui correspond à $0,8M_{j,max}$. Ainsi, on a la garantie qu'au stade ultime, l'assemblage résiste à 80% de sa capacité maximale. La ductilité en rotation d'un assemblage (au sens d'un chargement statique) est donnée par la relation suivante :

$$\mu = \frac{\varphi_u}{\mu_{el}} \quad (1.1)$$

1.7 Classification des assemblages

Les anciennes méthodes considèrent les assemblages soit comme des rotules parfaites au sens de la mécanique et que l'on considère comme des assemblages articulés, ou des encastremets parfaits que l'on considère comme des assemblages rigides.

- **Les Assemblages articulés** : transmettant uniquement les efforts normaux et tranchants.
- **Les assemblages rigides** : transmettant en outre les divers moments. Cette division est en fait une simplification pour mener les calculs, car, en réalité, les

assemblages ont un comportement intermédiaire (semi-articulés, semi-encastés).

Les articulations, réalisées par boulonnage, n'ont pas l'apparence d'articulations classiques. Le critère caractéristique réside en fait dans la flexibilité à proximité des nœuds. C'est pourquoi la nouvelle classification qui tient compte du comportement réel des assemblages définit trois caractéristiques principales suivantes :

- **Rigidité**
- **Moment résistant**
- **Capacité de rotation (ductilité)**

1.7.1 Classification des assemblages par la rigidité :

La rigidité initiale d'un assemblage caractérise sa réponse élastique et peut influencer d'une manière significative la réponse en déformation de la structure entière. L'EC3 est la seule norme qui offre une classification pratique des assemblages du point de vue de leur rigidité initiale.

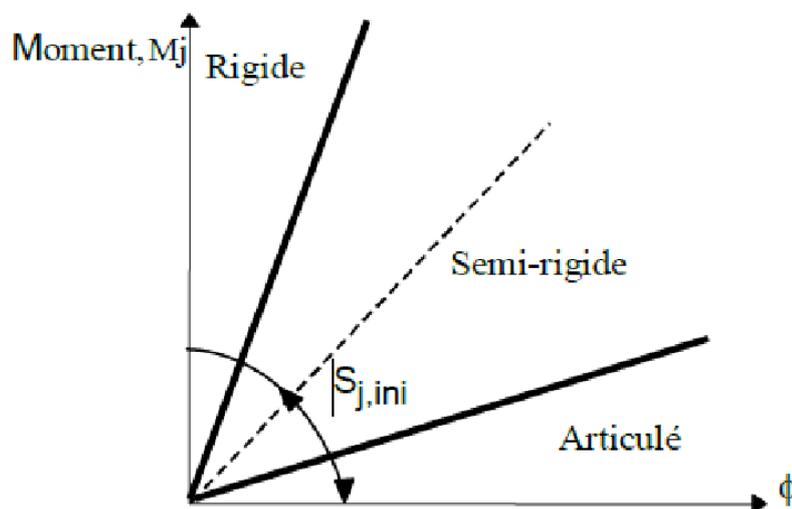


Fig.1.12 Limites de classification de rigidité

L'assemblage est considéré rigide si :

- $S_{j,ini} > 8 E I_B / L_b$ (structure contreventée).
- $S_{j,ini} > 25 E I_B / L_b$ (structure non contreventée).

Où $S_{J,ini}$, $E \cdot I_B$, L_b désignent, respectivement, la rigidité initiale de l'assemblage, la rigidité flexionnelle de la poutre assemblée et la longueur de la poutre.

L'assemblage est semi rigide si :

- $0.5 E I_B / L_b < S_{J,ini} < 8 E I_B / L_b$ (structure contreventée).
- $S_{J,ini} < 25 E I_B / L_b$ (structure non contreventée).

L'assemblage est considéré articulé si :

- $S_{J,ini} < 0.5 E I_B / L_b$

1.7.2 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 1.13**) :

- **Un assemblage à résistance complète** possède une résistance plus grande que la résistance des éléments structuraux assemblés. Autrement dit, une éventuelle rotule plastique se formera plutôt dans les éléments structuraux (poutre, poteau).

L'assemblage est considéré à résistance complète si :

- ❖ $M_{j,Rd} > M_{Pl,Rd}$ (avec vérification de la capacité de rotation).
- ❖ $M_{j,Rd} > 1.2 M_{Pl,Rd}$ (sans vérification de la capacité de rotation).

Où $M_{j,Rd}$ désigne le moment résistant de calcul de l'assemblage et $M_{Pl,Rd}$ le moment plastique de calcul de la poutre assemblée.

Il n'est pas rare que la limite d'élasticité du matériau dont est constituée la poutre assemblée soit élevée par rapport à celle de l'assemblage. Dans ce cas, le calcul conduit alors à une sous-estimation de la résistance de la poutre assemblée et la rotule plastique se formerait dans l'assemblage [1].

- **Un assemblage à résistance partielle** : Un assemblage à résistance partielle représente la solution intermédiaire. L'assemblage possède une capacité de rotation suffisante pour assurer la formation de la rotule plastique. L'assemblage est considéré à résistance partielle si :

$$0.25 M_{Pl,Rd} < M_{j,Rd} < M_{Pl,Rd}$$

- **Assemblage articulé** Un assemblage articulé possède une faible résistance, au maximum 25% de la résistance minimale requise pour avoir un assemblage résistance complète.

$$M_{j,Rd} < 0.25 M_{Pl,Rd}$$

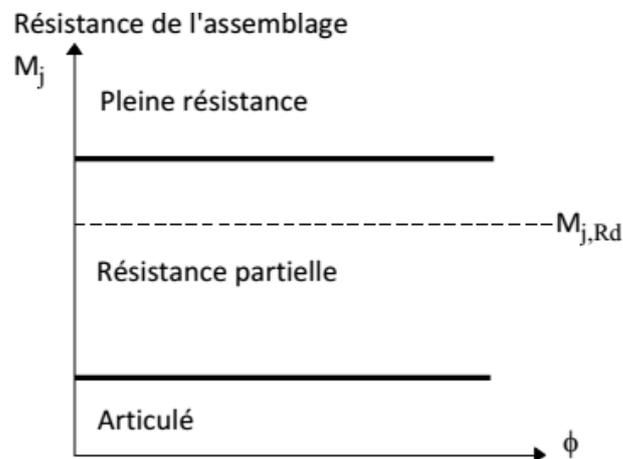


Fig.1.13: Limites de la classification des assemblages par résistance

1.7.3 Classification des assemblages par capacité de rotation

La capacité de rotation est une mesure de la déformation qui peut être atteinte avant que la ruine, dans l'assemblage ne provoque une chute de la résistance flexionnelle, la classification des assemblages en termes de leur capacité de rotation demeure toujours vague. Cette classification constitue en principe une mesure de l'aptitude des assemblages à résister à une rupture fragile ou à l'instabilité locale prématurée. Une application pratique de cette classification des assemblages consiste à vérifier si une analyse globale basée sur un calcul plastique peut être conduite.

Trois classes ont été définies à savoir, l'assemblage ductile, l'assemblage semi-ductile et l'assemblage fragile, voir **figure 1.14**.

- Le comportement ductile est caractérisé par une courbe moment-rotation avec un plateau étendu qui indique généralement l'apparition de déformations plastiques avant la rupture.
- Le comportement fragile est caractérisé par une rupture, avec une rotation limitée, généralement sans déformation plastique.
- le comportement semi-ductilité se situe entre le comportement fragile et le comportement ductile.

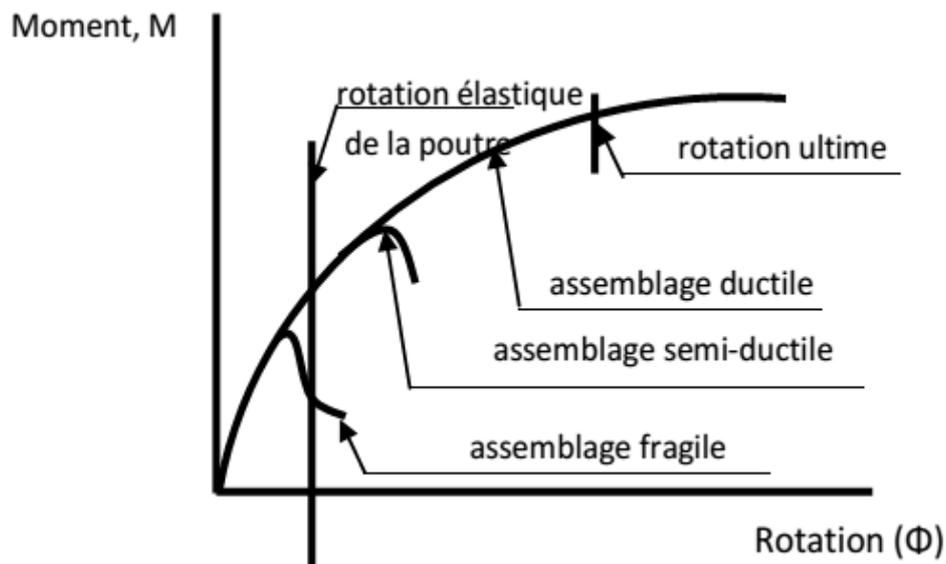


Fig.1.14 Classification des assemblages par la capacité de rotation.

1.8 Conclusion

De nos jours la construction métallique nous offre des avantages qui ne sont plus à démontrer, elle ouvre une large porte vers la modernisation et l'industrialisation de la construction. Ce pendant ce type de construction repose principalement sur les assemblages des différents éléments. Les problèmes apparaissent le plus souvent au niveau des assemblages de type poutre-poteau, qui nécessite une précaution supplémentaire, d'où les méthodes avancées de calcul qui considère l'assemblage comme un élément séparé.

Nous avons essayé dans ce chapitre de définir les assemblages et expliquer leur fonctionnement. Classer un assemblage selon sa rigidité ou résistance permet à l'ingénieur d'affiner sa modélisation afin de se rapproche de plus près de la réalité.

Chapitre 2

*Caractérisation d'un assemblage
poutre-poteau Par La méthode des
composantes selon
L'EUROCODE-3*

2.1 Introduction

Ce chapitre sera consacré à une recherche portant sur la connaissance des courbes de comportement (moment-rotation), Le but est de déterminer des courbes de comportement des assemblages sous forme moment-rotation (M-Ø) qui constituent des données nécessaires à la modélisation des assemblages par la méthode de composante.

L'utilisation de la méthode des composantes permet de déterminer les trois caractéristiques clés de l'assemblage mixte qui sont :

- Le moment résistant de l'assemblage (M_{jrd}).
- La rigidité initiale de l'assemblage (S_{jini}).
- La capacité de rotation de l'assemblage (ϕ).

2.2 La méthode des composants

Le comportement mécanique d'un assemblage mixte en terme, de résistance, rigidité et capacité de rotation est un phénomène complexe. Pour le déterminer, l'assemblage peut être décomposé en différents éléments appelés « composantes ». Le comportement mécanique de toutes ces composantes est étudié séparément. Quand toutes les composantes de l'assemblage sont caractérisées par leur résistance, rigidité et capacité de déformation, le comportement mécanique de l'assemblage peut être déterminé par l'assemblage des différentes composantes en s'aidant de modèle mécanique de ressort.

Les différentes composantes peuvent être vues comme des ressorts de translation avec un comportement force-déplacement non-linéaire. Chaque composante peut être testée séparément à l'aide d'essais peu coûteux pour obtenir à la fin des modèles théorique. Finalement, la réponse totale de l'assemblage (modélisation des assemblages pour l'analyse globale de la structure) peut être obtenue en assemblant toutes les composantes.

2.3 Application de la méthode des composantes aux assemblages poteau-poutre avec platine d'extrémité

2.3.1 Identification des composantes

L'Eurocode-3 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'identification des composantes, il est possible de distinguer celles en traction, en compression, en flexion et en cisaillement. **La Figure 2.1 [7]** représente les régions des différentes sollicitations qui existent au niveau de l'assemblage et les zones constituant l'assemblage.

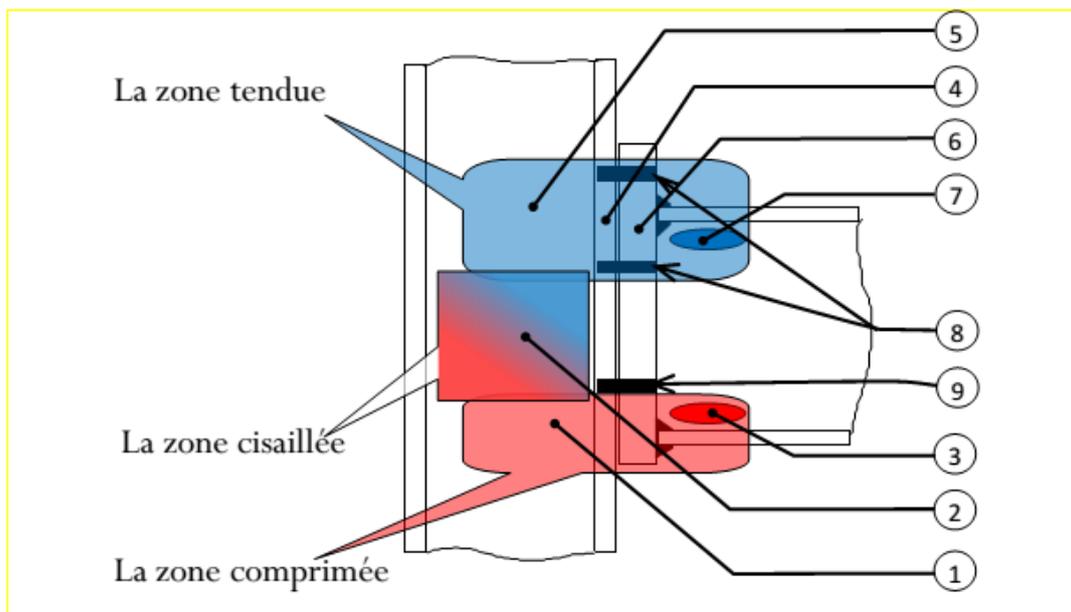


Fig.2.1 Composantes d'un assemblage poteau-poutre boulonné par platine d'extrémité.

Pour un assemblage par platine d'about débordante boulonnée soumis à la flexion, les composantes de base qui peuvent être identifiées selon le type de sollicitations qu'elles subissent sont les suivantes **la Figure 2.2. [8]** :

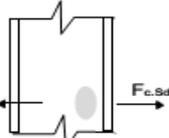
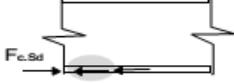
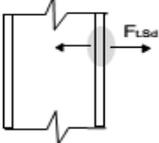
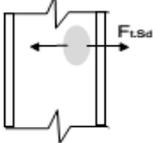
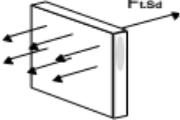
N°	Composante	
1	Ame de poteau en compression	
2	Panneau d'âme de poteau en cisaillement	
3	Semelle et âme de poutre en compression	
4	Semelle de poteau en flexion	
5	Ame de poteau en traction	
6	Platine d'extrémité en flexion	
7	Ame de poutre en traction	
8	Boulon en traction	

Fig.2.2 Liste des composantes d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité.

2.3.2 Modèle mécanique à ressort

Une fois les comportements des composantes principales de l'assemblage déterminé, chacune entre elle est modélisée par un ressort ayant sa propre loi de comportement. Les composantes sont ensuite associées en série ou en parallèle selon la configuration géométrique de l'assemblage, en respectant les compatibilités de déformation. Cette

association permet d'aboutir à un comportement en terme de courbe moment-rotation de l'assemblage.

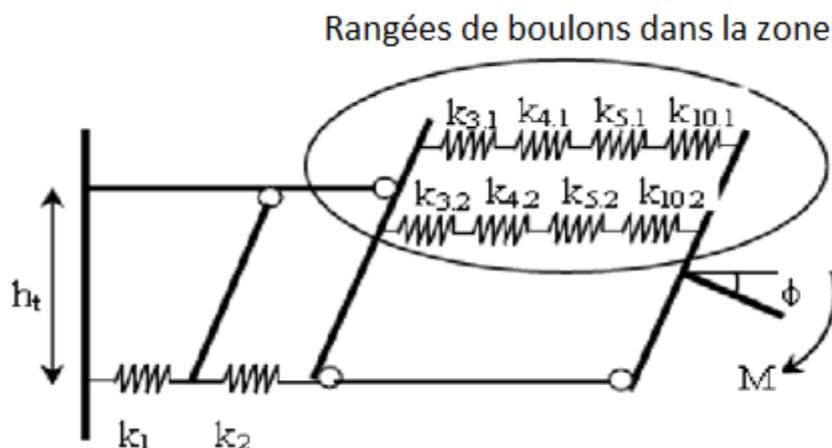


Fig.2.3 modèle à ressort pour un assemblage par platine d'about débordante boulonnée

2.3.3 Approche pour le calcul de la rigidité

Les composantes de l'assemblage boulonné par platine d'extrémité sont examinées séparément. Une fois les caractéristiques de chaque composante sont connues, le comportement de l'assemblage en termes de rigidité, résistance et capacité de rotation peut être déterminé.

Chaque composante est maintenant modélisée par un ressort et l'assemblage est représenté par un système des ressorts. **La Figure 2.4** donne une illustration détaillée. La réponse de l'assemblage dépend des efforts appliqués.

Dans les structures en acier continues et semi-continues, le principe adopté est que l'assemblage doit être capable de résister à la sollicitation principale due à la flexion, même si l'assemblage est appelé, en même temps, à transmettre un effort tranchant et parfois un effort normal. C'est la raison pour laquelle la plupart des modèles disponibles décrivent le comportement en rotation des assemblages.

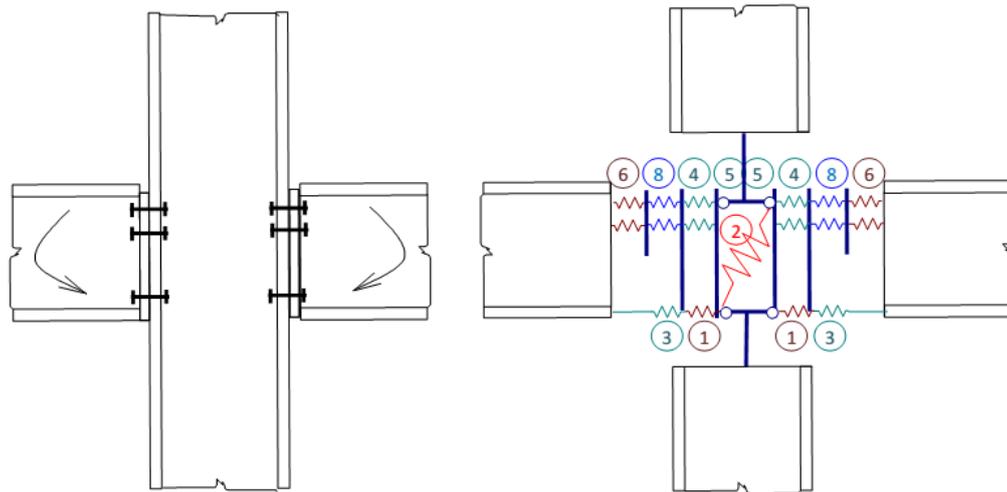


Fig.2.4 Composantes d'un assemblage poutre-poutre en acier représentées par des ressorts.

La courbe moment-rotation peut être déterminée de l'étude du système à ressorts, en tenant compte de l'équilibre des forces, la compatibilité des déplacements, etc. La précision des résultats dépend de la caractérisation des composantes. Ainsi, chaque composante est modélisée par un ressort soumis à la traction, la compression ou le cisaillement, avec une rigidité propre et, par conséquent, chaque composante possède sa propre loi de comportement.

Pour obtenir la rigidité globale de l'assemblage, ces ressorts sont groupés en série ou en parallèle selon la configuration géométrique de l'assemblage et, tout en respectant la compatibilité de déformation des différentes composantes. Cette association permet d'obtenir la courbe moment-rotation de l'assemblage.

Caractéristiques	Groupement	
	En parallèle	En série
Rigidité initiale k_{eq}	k_1+k_2	$\frac{1}{\frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2}}$

Tableau2.1 groupement en série et en parallèle des composantes

Rangées de boulons dans la zone tendue

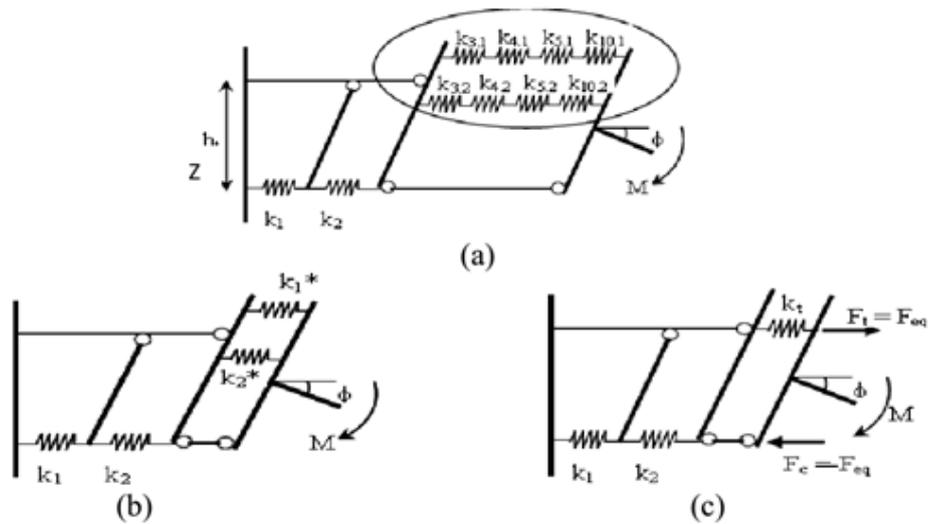


Fig.2.5 Approche EC3 pour le calcul de la rigidité initiale d'un assemblage poutre poteau par platine d'about boulonnée.

	composantes	Rigidité
Zone cisailée	Ame du poteau en cisaillement	$K_1 = \frac{0,38 \times A_{vc}}{\beta \times Z}$
Zone comprimée	Ame de poteau en compression	$K_2 = \frac{0,7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c}$
Zone tendue	Ame de poteau en traction	$K_3 = \frac{0,7 \times b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{d_c}$
	Semelle de poteau en flexion	$K_4 = \frac{0,9 \times L_{eff} \times t_{fc}^3}{m^3}$
	Platine d'extrémité en flexion	$K_5 = \frac{0,9 \times L_{eff} \times t_p^3}{m^3}$
	Boulons en traction	$K_{10} = \frac{16A_s}{L_b}$

Tableau2.2 Tableau récapitulatif de la méthode des composantes pour un assemblage avec platine d'extrémité débordante

Le comportement de chaque rangée de boulons (i) cumule les contributions des composantes qui dépendent du nombre de boulons en traction et de la position de chaque rangée. Ces composantes sont : l'âme du poteau en cisaillement, la semelle du poteau en flexion, la platine d'about en flexion et les boulons en traction avec leurs

coefficients de rigidité ($K_{eff,i}$) associés en série (**Figure a**). Pour chaque rangée de boulon en traction, les coefficients de rigidité de diverses composantes constituant cette rangée peuvent être regroupés pour n'avoir qu'un seul coefficient de rigidité K_i^* par rangée de boulon (**Figure b**) ; nous en déduisons pour chaque rangée de boulon :

$$K_{eff,i} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{3i}} + \frac{1}{K_{4i}} + \frac{1}{K_{5i}} + \frac{1}{K_{10}}} \quad (2.1)$$

En supposant que le centre de compression est situé au centre de la semelle comprimée de la poutre et en tenant compte de la position de chaque rangée de boulons (h_i), le bras de levier équivalent (z) est défini par :

$$z_{eq} = \frac{\sum K_{eff,r} h_r^2}{\sum K_{eff,r} h_r} \quad (2.2)$$

Finalement, la formule générale de la rigidité totale de l'assemblage :

$$S_{j,ini} = \frac{E_z^2}{\sum \frac{1}{K_i}} \quad (2.3)$$

2.3.4 Approche pour le calcul de la résistance

Le moment résistant correspond au moment maximum que peut supporter l'assemblage. Pour déterminer le moment résistant de l'assemblage poutre-poteau par platine d'extrémité boulonnée, on doit identifier les trois zones suivantes :

- la zone de traction de l'assemblage qui est directement affectée par la flexion de la plaque d'extrémité, la flexion de la semelle du poteau, la traction des boulons, la traction de l'âme du poteau et la traction de l'âme de la poutre.
- la zone de compression de l'assemblage qui comprend l'âme du poteau et l'âme et la semelle de la poutre.
- la zone de cisaillement de l'âme du poteau.

Selon la capacité de déformation des rangées de boulons, une distribution plastique des efforts internes peut être considérée, voir (**Figure 2.6**). Dans ce cas, le moment résistant en flexion de l'assemblage M_{Rd} est calculé par la formule suivante :

$$M_{j,Rd} = \sum h_r F_{tr,Rd} \quad (2.4)$$

Où $F_{tr,Rd}$ est la résistance de la rangée de boulons (i) soumise à la traction ; h_r est la distance de la rangée de boulons (i) du centre de compression situé au milieu de l'épaisseur de la semelle comprimée de la poutre.

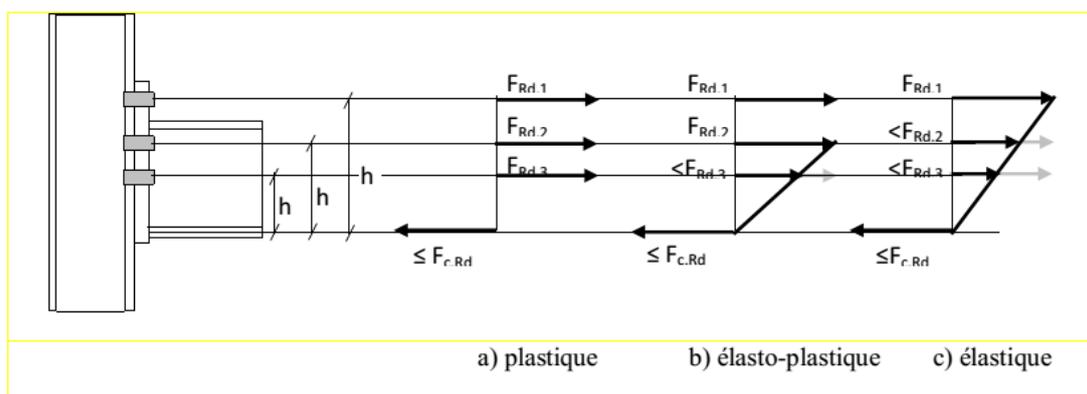


Fig.2.6: Répartition des efforts dans un assemblage poteau-poutre boulonné

Dans la procédure d'évaluation de la résistance de chaque rangée de boulons, la première rangée à considérer est la plus éloignée du centre de compression. Les autres rangées, qui sont progressivement de plus en plus proches du centre de compression, sont successivement prises en compte.

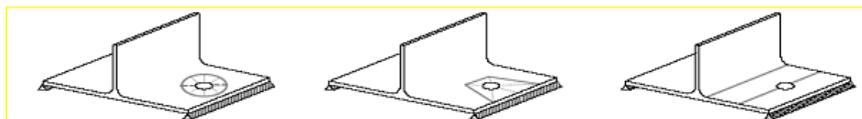
En résumé, suivant le schéma de fonctionnement de l'assemblage boulonné par platine d'extrémité, le calcul du moment résistant est effectué en considérant les cinq étapes suivantes :

- Déterminer les efforts de traction admissibles pour les différentes rangées de boulons en considérant les composantes associées à la rangée.
- adopter un type de diagramme de répartition des efforts entre les rangées de boulons, voir **figure 2.6**. Une distribution plastique est souvent considérée mais une distribution élastique ou élasto-plastique doit être utilisée si la capacité de déformation d'une rangée au moins est limitée. Avec une distribution élastique, la résistance de l'assemblage est limitée par la rangée la plus éloignée du centre de compression.

- Vérifier que la zone comprimée de la poutre présente une résistance suffisante pour équilibrer la somme des efforts de traction admissibles dans les boulons.
- Effectuer une vérification similaire en ce qui concerne la résistance de l'âme du poteau.
- Établir le moment résistant de l'assemblage comme étant la somme des résistances en traction admises dans chaque rangée de boulons par la distance de ces rangées au centre de compression situé au milieu de la semelle comprimée de la poutre. [9]

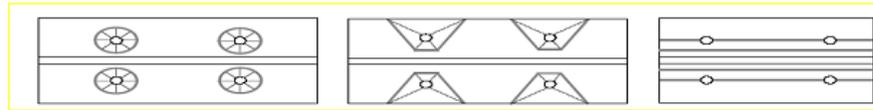
2.3.5 Concept du tronçon en té

L'équivalence entre le tronçon en Té et la zone tendue d'un assemblage métallique se traduit par la détermination d'une longueur équivalente dite longueur efficace et noté **Leff**. 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 ou en groupe lorsque les rangées de boulons sont proches. Il est à signaler que la longueur efficace d'un tronçon en Té 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.

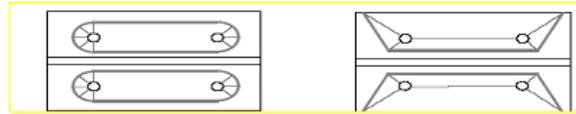


(a) mécanisme circulaire (b) mécanisme non circulaire (c) mécanisme poutre

Fig.2.7 Schémas des lignes de plastification des tronçons en té (mécanisme individuel)



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



(d) mécanisme circulaire (e) mécanisme non circulaire

Fig.2.8 Schémas des lignes de plastification des tronçons en té (mécanisme de groupe)

La longueur efficace du tronçon en Té pour différents mécanismes de ruine sont donnés dans le tableau suivant :

Position de la rangée de boulons	Rangée de boulons considérée individuellement		Rangée de boulons considérée comme une partie de groupes des rangées des boulons	
	Circulaire $L_{eff,cp}$	Non Circulaire $L_{eff,nc}$	Circulaire $L_{eff,cp}$	Non Circulaire $L_{eff,nc}$
Rangée intérieur	$2\pi m$	$4m + 1.25e$	$2p$	p
Rangée extérieur	La plus petite de : $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	La plus petite de : $4m + 1.25e$ $2m + 0.625e + e_1$	La plus petite de : $\pi m + p$ $2e_1 + p$	La plus petite de : $2m + 0.625e + 0.5p$ $e + 0.5p$
Mode 1	$L_{eff,1} = L_{eff,nc}$ mais $L_{eff,1} \leq L_{eff,cp}$		$\sum L_{eff,1} = \sum L_{eff,nc}$ mais $\sum L_{eff,1} \leq \sum L_{eff,cp}$	
Mode 2	$L_{eff,2} = L_{eff,nc}$		$\sum L_{eff,2} = \sum L_{eff,nc}$	

Tableau2.3: Valeurs de la longueur efficace de la semelle du poteau non raidi

m, e, e_1, p : sont tels qu'indiqués dans la (Figure 2.9).

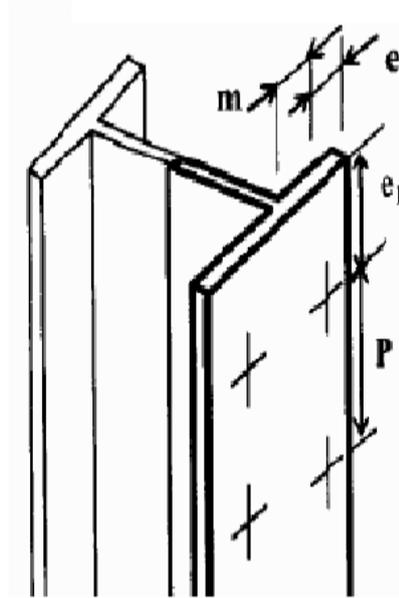


Fig.2.9: Définitions de m, e, e_1, p

- Dans le cas de boulons extérieurs à la semelle tendue de la poutre :
 $Leff.p.(a) = \min (0.5bp, 0.5w+2mx + 0.625ex, 4mx + 1.25ex, 2\pi mx)$
- Dans le cas de la première rangée de boulons en dessous de la semelle tendue de la poutre : $Leff.p.(a) = \min (2\pi m, \alpha m)$
- Dans le cas des boulons intérieurs : $Leff.p.(a) = \min (p, 2\pi m, 4m + 1.25 e)$

On détermine la valeur de $\lambda_1, \lambda_2, \alpha$ à l'aide de la courbe ($\lambda_1, \lambda_2, \alpha$)

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} \quad (2.5)$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} \quad (2.6)$$

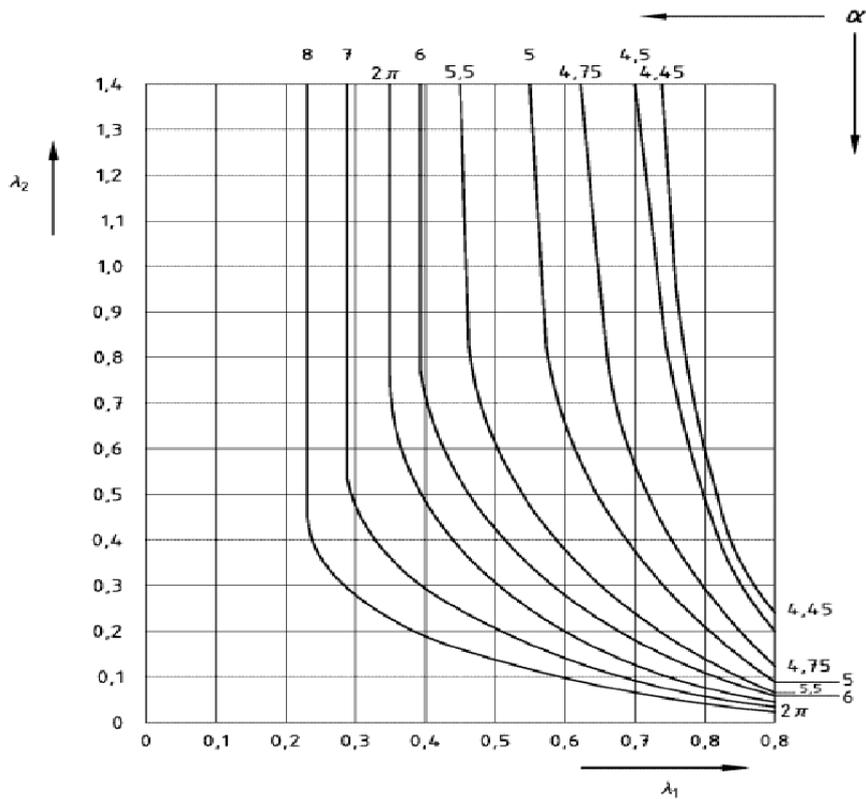


Fig.2.10 Valeurs de α pour les platines d'about

b_p , w , m_x et e_x sont tels qu'indiqués dans (Figure 2.11)

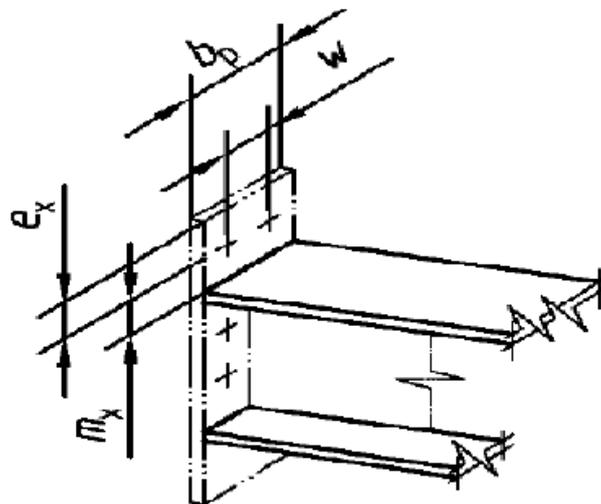


Fig.2.11 : Définitions de b_p , w , m_x et e_x

La longueur efficace d'âme de la poutre = la longueur efficace de la platine

$$b_{eff.t.wb} = L_{eff.p}$$

2.4 Comportement des assemblages métallique en zone sismique

En raison de la complexité topologique des assemblages et d'un grand nombre de mécanismes de comportement possible, le comportement cyclique peut varier de manière significative même dans le même type d'assemblage. Le développement de séquences des mécanismes de rendement peut aussi affecter la capacité de rotation d'assemblages en raison de l'interaction entre les composants. Les valeurs de rigidité initiale, de moments maximum, et de rotations ultimes ont été données pour chaque spécimen, y compris les boucles d'hystérésis complètes. Les cycles d'hystérésis affichent différents niveaux de dégradation, résultant de glissement des boulons et des déformations plastiques au niveau les trous de boulons, ainsi que la dégradation de la rigidité. Les modes de défaillance pour les assemblages ont été la rotation excessive causée par la plaque ou la rupture de boulons. Toutes les boucles d'hystérésis de dissipation d'énergie ont des caractéristiques correspondant à un comportement inélastique stable. Les modes de défaillance typique signalés pour l'assemblage ont été la rupture de boulons ou la rupture de la plaque d'extrémité. Dans le cas des assemblages avec plaque à l'extrémité, les déformations en flexion de la plaque d'extrémité et les déformations axiales des boulons peuvent contribuer à la dissipation d'énergie sous chargement cyclique. Les boucles d'hystérésis moment rotation des tests cycliques ont indiqué qu'elles pouvaient être des sources utiles de dissipation d'énergie dans une ossature en acier semi-rigide. Les boucles d'hystérésis ont montré un pincement, une réduction de la rigidité quand les cycles se poursuivent, et une réduction de la résistance sous charge cyclique. En particulier, il a été observé dans certaines expériences que la ductilité est très faible après la rupture des boulons. Si la plaque est rigidifiée, elle peut conduire à très bonne capacité de dissipation d'énergie. Par conséquent, l'épaisseur de la plaque d'extrémité et le diamètre des boulons sont les paramètres de conception très importants pour l'assemblage. [10]

2.5 Modes d'endommagement et de rupture

2.5.1 Modes de chargement

On distingue plusieurs modes de chargement des structures : chargement monotone, chargement cyclique, chargement constant. Chaque mode de chargement correspond à un mode de ruine particulier.

- a) **Chargement monotone** : Dans ce cas le chargement croît de façon continue. Le chargement peut consister en un déplacement imposé ou une charge imposée. Dans le cas linéaire (élasticité) les deux cas sont similaires. Dans le cas d'un comportement plastique, il existe une charge limite que la structure ne peut pas dépasser. Dans le cas d'un chargement en force, il y a rupture brutale par instabilité plastique (figure 1).

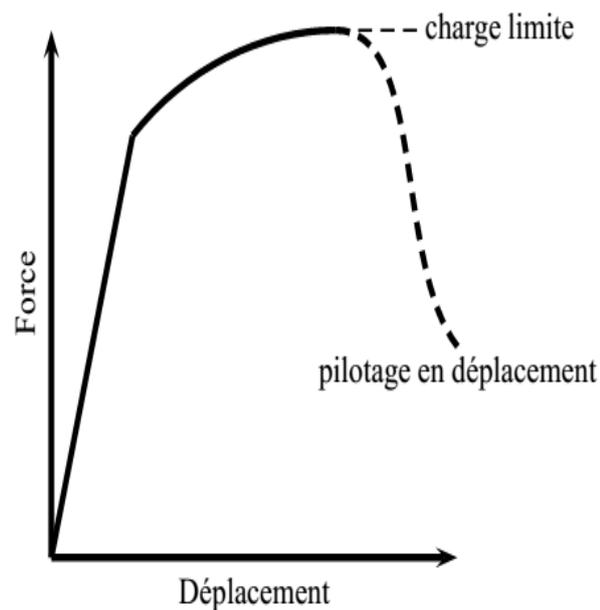


Fig.2.12 Charge limite et mode de pilotage du chargement.

- b) **Chargement cyclique** : La charge ou le déplacement varie de façon cyclique au cours du temps. La rupture est différée; elle n'interviendra qu'au bout d'un nombre de cycles dépendant de la sévérité du chargement (figure 2).

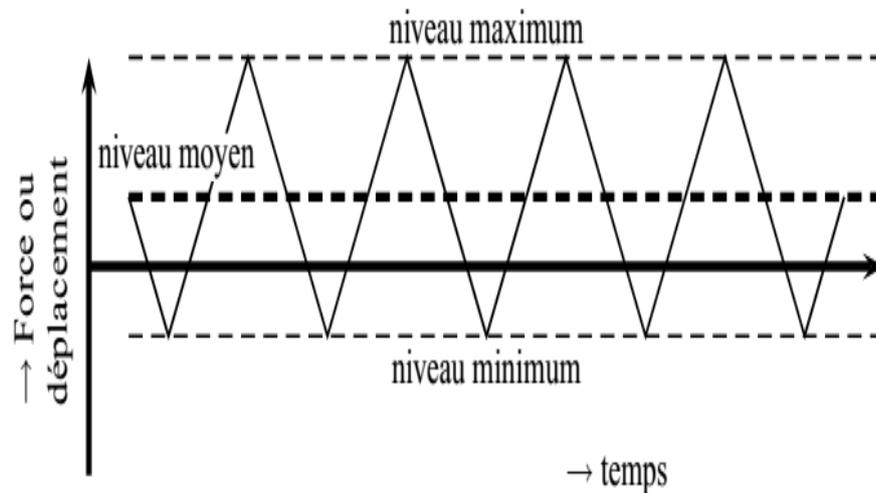


Fig.2.13: Chargement cyclique.

- c) **Chargement constant** : Dans ce cas une charge constante est appliquée sur une structure généralement à haute température (c'est à dire pour $T/T_f > 0.5$). Dans ce cas la structure flue. On se trouve également dans un cas de rupture différée.
- d) **Chargements complexes** : Dans certains cas, le chargement peut être plus complexe que dans les cas précédents. Une structure à haute température peut voir son niveau de charge varier au cours du temps. On parle alors d'interaction fatigue fluage. Une structure en fatigue dans laquelle se propage lentement une fissure peut subir une surcharge qui entraîne la rupture en charge limite

2.5.2 Modélisation phénoménologique

Les modèles phénoménologiques sont principalement basés sur les techniques des courbes d'ajustement par lesquelles une simple expression mathématique reproduit les données expérimentales avec certains coefficients des courbes d'ajustement. Les coefficients sont calibrés par les données expérimentales. L'avantage du modèle phénoménologique est qu'une fois les constantes déterminées, la relation moment-rotation peut être exprimée explicitement et utilisée dans l'analyse structurale

ordinaire pour la conception proposée. Il y a un large spectre de modèles phénoménologiques à des degrés divers de complexité.

Afin de tracer le comportement cyclique des raccords, la courbe statique et monotone (moment-rotation) peut être utilisée suivant la méthode de surface limite. Dans le cas de la méthode de surface limite, la règle de Masing est utilisée pour retracer les inversions résultant du déchargement et de rechargement en faisant directement suite à une courbe non-linéaire. Si une courbe statique et monotone est définie par l'équation suivante :

$$f(M, \theta) = 0 \quad (2.7)$$

Alors la courbe de déchargement et de rechargement peut être assumée par l'équation suivante (voir la figure 2.15) :

$$f\left(\frac{M-M_a}{2}, \frac{\theta-\theta_a}{2}\right) = 0 \quad (2.8)$$

Où : (M_a, θ_a) est le point où l'inversion de charge se produit.

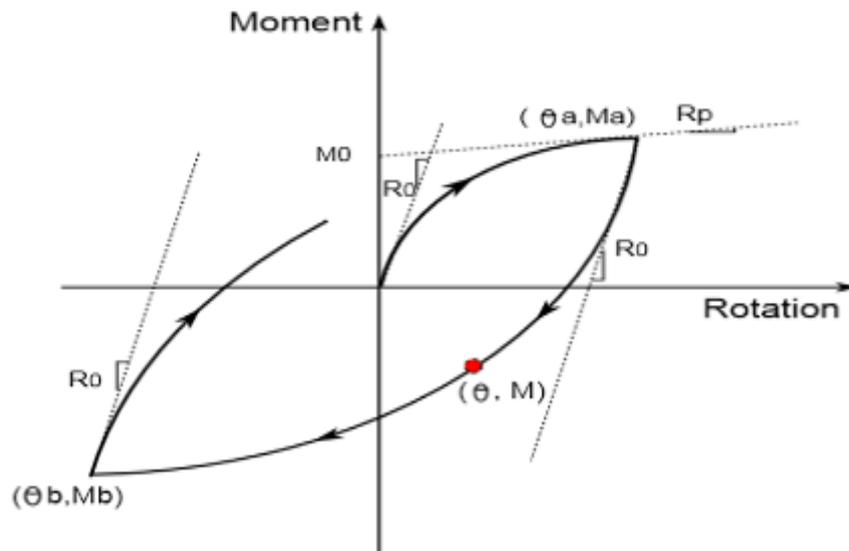


Fig.2.14 : Comportement hystérétique d'un assemblage

La rigidité tangente correspondant au chargement est exprimée par l'équation suivante:

$$R = \frac{dM}{d\theta} = g(M, \theta) \quad (2.9)$$

La rigidité tangente correspondant au déchargement et au rechargement est exprimée par l'équation suivante :

$$R = \frac{dM}{d\theta} = g\left(\frac{M-M_a}{2}, \frac{\theta-\theta_a}{2}\right) \quad (2.10)$$

2.6 Conclusion

Nous avons essayé de relever quelques aspects importants tels que la méthode des composantes présentées par l'EUROCODE-3 qui a pour but de décrire le comportement réel des assemblages métalliques. Les problèmes apparaissent le plus souvent au niveau des assemblages de type poutre-poteau. C'est la raison pour laquelle cet aspect est largement développé dans ce chapitre, en présentant aussi quelques modes d'endommagement et de rupture tel que les différents modes de chargement.

Chapitre 3

*Application numérique d'un
assemblage boulonné (charge
monotone)*

3.1 Introduction

Le but principal de ce chapitre est d'étudier deux exemples d'assemblage de type (poutre-poteau) avec platine d'about non débordante en utilisant la méthode dite « méthode des composants » présentée par L'EUROCODE-3.

3.2 Exemple de calcul

3.2.1 Assemblage par platine d'extrémité débordante (moment positif) :

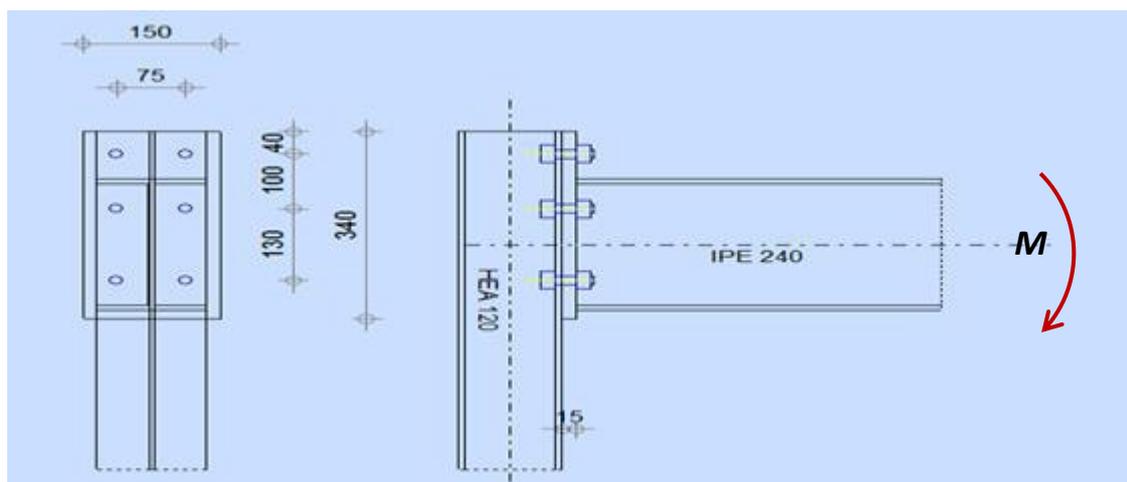


Fig.3.1 Caractéristiques géométrique d'assemblage poutre-poteau

3.2.1.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage

Poutre : IPE240, S235

$h_b=240$ mm; $b_b=120$ mm; $t_{fb}=9,8$ mm; $t_{wb}=6,2$ mm; $r = 15$ mm; $I_y= 3891,6$ cm⁴;
 $A= 39,12$ cm²; $A_{vz}=19,1$ cm² ; $w_{pl,y} = 366,6$ cm³ ; $d_b=190,4$ mm.

Poteau: HEA120, S235

$h_c=114$ mm; $b_c=120$ mm; $t_{fc}=8$ mm; $t_{wc}=5$ mm; $r = 12$ mm; $I_y= 606,2$ cm⁴;

$A= 25,3$ cm²

; $A_{vz}=8,5$ cm² ; $w_{pl,y} = 119,5$ cm³ ; $d_c=74$ mm. £

;

Platine d'about: S235

$h_p=340$ mm; $b_p=150$ mm; $t_p=15$ mm

Boulons : M16, classe 8.8 avec deux rondelles

(facultatif) $f_y=640$ MPa ; $f_u=800$ MPa ;

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

Coefficients partiels de sécurité : $\gamma_{M0} = 1,0$; $\gamma_{M1} = 1,0$ et $\gamma_{M2} = 1,25$

3.2.1.2 Zone cisailée

Résistance du panneau d'âme de poteau en cisaillement (EN 1993-1-8_6.2.6.1)

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc} \cdot A_{vc}}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 235 \cdot 846}{1 \cdot \sqrt{3}} = 103,8 \text{ kN} \quad (3.1)$$

3.2.1.3 Zone comprimé

a. Coté poutre

$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_{fb})$ (3.2) (Cf. Clause 6.2.6.7 (1) de la norme NF EN 1993-1-8)

$$\begin{aligned} M_{c,Rd} &= M_{pl,Rd} = f_{yb} W_{ply} / \gamma_{M0} \\ &= (235 \times 366,6 \times 10^3) / 10^6 = 86,151 \text{ kN.M} \end{aligned}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{86,151 \times 10^3}{(240 - 9,8)} = 374,24 \text{ kN}$$

b. Coté poteau

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega K_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega K_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (3.3)$$

ω : Interaction avec le cisaillement dans l'âme du poteau (coefficient réducteur)

$\beta = 1$ on a un assemblage unilatéral

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,23 \times \left(\frac{b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{A_{vc}} \right)}}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,23 \times \left(\frac{147 \times 5}{846} \right)}}$$

$$\omega = 0,71$$

K_{wc} : Interaction avec la contrainte de compression dans l'âme du poteau par simplification :

$$K_{wc} = 1$$

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2} a_p + 5(t_{fc} + s) + s_p = 9,8 + 2\sqrt{2} \times 5 + 5 \times (8 + 12) + 22,93 = 147 \text{ mm}$$

$$s = r_c = 12 \text{ mm}$$

$$s_p = t_p + (15 - a_p \sqrt{2}) = 15 + (15 - 5\sqrt{2}) = 22,93\text{mm}$$

Voilement de l'âme sous compression :

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{\text{eff},c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{Et^2_{wc}}} = 0,932 \sqrt{\frac{146,87 \times 74 \times 235}{210000 \times 5^2}} = 0,65 < 0,72$$

Donc $\rho=1$

L'interaction avec la contrainte de compression dans l'âme du poteau est à prendre en compte si cette contrainte dépasse 70% de la limite élastique (à vérifier ultérieurement)

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0,71 \times 1 \times 147 \times 5 \times 235}{1,0} = 122,63\text{kN}$$

3.2.1.4 Zone tendue

a. Résistance de la zone tendue coté poutre

Longueur de tronçon en T équivalent

Rangée extérieur non raidie (cf. Tableau 6.6 de la norme NF EN 1993-1-8)

$$m_x = 39,34\text{mm}$$

$$e_x = 40\text{mm}$$

$$e=37,5\text{mm}$$

$$w=75\text{mm}$$

Mécanisme circulaire

$$L_0 = \min(2\pi m_x ; \pi m_x + w ; \pi m_x + 2e)$$

$$L_0 = \min(247,18 ; 198,59 ; 198,59)$$

$$L_0 = 198,59 \text{ mm}$$

Mécanisme non circulaire

$$L_2 = \min(4m_x + 1,25e ; e + 2m_x + 0,625e_x ; 0,5b_p ; 0,5w + 2m_x + 0,625e_x)$$

$$L_2 = \min(204,235 ; 141,18 ; 75 ; 141,18)$$

$$L_2=75$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 75\text{mm}$$

$$L_1 = L_2 = 75\text{mm}$$

Rangé intérieur (cf. le tableau 6.6 de l'EN 1993-1-8)

$$e=22,5\text{mm}$$

$$m=28,74\text{mm}$$

$$m_2 = 39,54\text{mm}$$

$$L_0 = 2\pi m = 159,59\text{mm}$$

$$L_2 = \alpha m$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = 0,56 \qquad \lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = 0,77 \quad \Rightarrow \alpha = 5,1$$

$$L_2 = 5,1 \times 28,74 = 146,57\text{mm}$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 146,57\text{mm}$$

$$L_1 = L_2 = 146,57\text{mm}$$

Rangée 3 :

$$L_0 = 2\pi m = 159,59\text{mm}$$

$$L_2 = \alpha m$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = 0,56 \qquad \lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = 0,77 \quad \Rightarrow \alpha = 5,1$$

$$L_2 = 5,1 \times 28,74 = 146,57\text{mm}$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 146,57\text{mm}$$

$$L_1 = L_2 = 146,57\text{mm}$$

Groupe de rangées 2 à 3 :

$$L_0 = 2\pi m + 2p$$

$$m=28,74\text{mm}$$

$$p=130$$

$$L_0 = 2 \times \pi \times 28,74 + 2(130) = 440,57\text{mm}$$

$$L_2 = \alpha m = 5,1 \times 28,74 + 130 = 276,57\text{mm}$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 276,57\text{mm}$$

$$L_1 = L_2 = 276,57\text{mm}$$

- Résistance de T équivalent sous différents modes de ruine se référer au tableau 6.2 de la norme NF EN 1993-1-8

Mode 1 : mécanisme complet

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (3.4)$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4\gamma_{M0}}$$

Rangée r=1

$$L_1 = 75 \text{ mm}$$

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

$$f_y = f_{yp} = 235 \text{ MPa}$$

$$m = m_x = 39,34$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{75 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 0,991 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = 100,76 \text{ kN}$$

Rangée r=2 et r=3 :

$$L_1 = 146,57$$

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

$$f_y = f_{yp} = 235 \text{ Mpa}$$

$$m = 28,74 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd2} = \frac{146,57 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1,94 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd2} = 270,01 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 2 à 3 :

$$L_1 = 276,57 \text{ mm}$$

$$t_p = 15 \text{ mm}$$

$$f_y = f_{yp} = 235 \text{ Mpa}$$

$$m = 28,74 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd2a3} = \frac{276,57 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 3,65 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd\ 2a3} = 508,003 \text{ kN}$$

Mode2 : mécanisme partiel et rupture des boulons

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} \quad (3.5)$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_u A_s}{\gamma_{M2}}$$

Rangée r=1 :

$$M_{pl,2,Rd} = 0,991 \text{ kN.m}$$

$$m = 39,34 \text{ mm}$$

$$n = \min(e_{\min}; 1,25m) = 22,5 \text{ mm}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 800 \times 157}{1,25} = 90,432 \text{ kN}$$

$$\sum F_{t,Rd} = 180,86 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd1} = 97,85 \text{ kN}$$

Rangée r= 2et 3 :

$$M_{pl,2,Rd\ 2,3} = 0,25 \times 146,57 \times 15^2 \times 235/1$$

$$= 1,93 \text{ kN.m}$$

$$m = 28,74 \text{ mm}$$

$$n = 22,5 \text{ mm}$$

$$\sum F_{t,Rd} = 180,86 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd2} = 154,74 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 2a3 :

$$M_{pl,2,Rd\ 2a3} = 0,25 \times 276,57 \times 15^2 \times 235/1$$

$$= 3,65 \text{ kN.m}$$

$$m = 28,74 \text{ mm}$$

$$n = 22,5 \text{ mm} \quad \sum F_{t,Rd} = 4 F_{t,Rd} = 361,72 \text{ kN} \quad F_{T,2,Rd\ 2a3} = 301,3 \text{ kN}$$

Mode3 : rupture des boulons

$$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd} \quad (3.6)$$

$$F_{T,3,Rd} = 2 \times \text{Nbr}_{\text{rangée}} \times F_{t,Rd}$$

Rangée r=1et2et3 :

$$F_{T,3,Rd} = 180,86 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 2a3 :

$$F_{T,3,Rd2a3} = 361,72 \text{ kN}$$

Mode1-2

Rangée r=1 :

$$L_1 = 75 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}=1$$

$$m=39,34 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (39,34)^3 \times 1 \times 157}{75 \times 15^3} = 332,31 > L_b$$

Rangée r=2 et r=3 :

$$L_1 = 146,57 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}=1$$

$$m=28,74 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (28,74)^3 \times 1 \times 157}{146,57 \times 15^3} = 66,30 > L_b$$

Groupe de Rangées 2a3 :

$$L_1 = 276,57 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}=2$$

$$m=28,74 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (28,74)^3 \times 2 \times 157}{276,57 \times 15^3} = 70,23 > L_b$$

Mode 4 : plastification de l'âme tendue

$$F_{T,4,Rd} = \frac{L_{eff} t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (3.7)$$

$$t_w = 6,2\text{mm}$$

$$f_y = 235 \text{ Mpa}$$

Rangée r=1 :

$$F_{T,4,Rd1} = \frac{b_{fb} t_{fb} f_y}{2 \times \gamma_{M0}} = 138,180 \text{ kN}$$

$$b_{fb} = 120\text{mm} \quad t_{fb} = 9,8\text{mm}$$

Rangée r=2 et r=3 et groupe de rangée 2+3 :

$$F_{T,4,Rd2} = \frac{b_{fb} t_{fb} f_y}{2 \times \gamma_{M0}} + (e_0 - t_{fb} + \frac{p_1}{2}) \times \frac{t_{wb} f_y}{\gamma_{M0}} = 298,74 \text{ kN}$$

$$b_{fb} = 120\text{mm}$$

$$t_{fb} = 9,8\text{mm}$$

$$f_y = 235\text{Mpa}$$

$$p_1 = 130\text{mm}$$

$$e_0 = 55\text{mm} \quad t_{wb} = 6,2 \text{ mm}$$

$L_{eff}(mm)$	Rangée	Ame tendu					min $F_{T,Rd}$
		Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1-2	Mode 4	
75	Rangée1	100,76	97,85	180,86		138,18	97,87
146,57	Rangée2	270,01	154,74	180,86		298,74	154,74
146,57	Rangée3	270,01	154,74	180,86		298,74	154,74
276,57	Rangée2 a3	508,00	301,3	361,7		298,74	298,74

Tableau3.1: bilan des modes de ruine

b. Résistance de la zone tendue coté poteau

Longueur de tronçon en T équivalent

Rangée extérieur non raidie :

Mécanisme circulaire

$$L_0 = \min(2\pi m ; \pi m + 2e_1)$$

$$L_0 = \min(159,59 ; 359,79)$$

$$L_0 = 159,59 \text{ mm}$$

$$r_c = 12 \text{ mm}$$

$$t_{wc} = 5 \text{ mm}$$

$$e_1 = 140 \text{ mm}$$

$$p_2 = 75 \text{ mm}$$

$$m = \frac{p_2 - t_{wc}}{2} - 0,8r_c = 25,4 \text{ mm}$$

Mécanisme non circulaire

$$L_2 = \min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + e_1)$$

$$e = e_2 = 22,5 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_0, L_2)$$

Rangée r=1 :

$$L_0 = \min(2\pi m ; \pi m + 2e_1) = 159,59 \text{ mm}$$

$$L_2 = \min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + e_1) = 129,725 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_0, L_2) = 129,725 \text{ mm}$$

Rangée r=2 et r=3 :

$$L_0 = \min(2\pi m ; \pi m + 2e_1) = 159,59 \text{ mm}$$

$$L_2 = \min(4m + 1,25e ; 2m + 0,625e + e_1) = 129,725 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_0, L_2) = 129,725 \text{ mm}$$

Rangée 1+2 :

Mécanisme circulaire :

$$L_0 = \min(2\pi m + 2p ; \pi m + 2e_1 + 2p) = 359,59 \text{ mm}$$

$$p_0=p=100$$

Mécanisme non circulaire :

$$L_2 = \min(4m + 1.25e + p ; 2m + 0,625e + e_1 + p) = 229,725 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_0, L_2) = 229,725 \text{ mm}$$

Rangée 1+2+3 :

Mécanisme circulaire

$$L_0 = \min(2\pi m + 2\sum p_i ; \pi m + 2e_1 + 2\sum p_i)$$

$$p_0=100 \text{ mm}$$

$$p_1=130 \text{ mm}$$

$$L_0 = 2\pi m + 2 \times (p_0 + p_1) = 619,59 \text{ mm}$$

Mécanisme non circulaire

$$L_2 = 4m + 1.25e + p_0 + p_1 = 359,72 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_0, L_2) = 359,72 \text{ mm}$$

Rangée 2+3 :

$$L_0 = 2\pi m + 2p_1 = 419,59 \text{ mm}$$

$$L_2 = 4m + 1.25e + p_1 = 259,72 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_0, L_2) = 259,72 \text{ mm}$$

- **Résistance de Teq (différents modes de ruine)**

Mode 1 : mécanisme complet

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

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{L_1 t_{fc}^2 f_y}{4\gamma_{M0}}$$

$$t_{fc} = 8 \text{ mm}$$

$$f_y = f_{yc} = 235 \text{ MPa}$$

$$m = 25,4 \text{ mm}$$

Rangée r=1 (extérieure non raidie) :

$$L_1 = 129,79$$

$$M_{pl,1,Rd1} = \frac{129,79 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 0,48 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd1} = 75,59 \text{ kN}$$

Rangée r=2,3 (central) :

$$L_1 = 129,79$$

$$M_{pl,1,Rd2} = \frac{129,79 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 0,48 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd2} = 75,59 \text{ kN}$$

Groupe de rangée 1+2 :

$$L_1 = 229,79 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd1+2} = \frac{229,79 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 0,863 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd1+2} = 135,9 \text{ kN}$$

Groupe de rangée 2+3 :

$$L_1 = 259,72 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd2+3} = \frac{259,72 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 0,976 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd1a3} = 153,7 \text{ kN}$$

Groupe de rangée 1+2+3 :

$$L_1 = 359,72 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd1a3} = \frac{359,72 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1,35 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd1a3} = 212,59 \text{ kN}$$

Mode 2 : mécanisme partiel et rupture des boulons

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

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_u A_s}{\gamma_{M2}} = 90,432 \text{ kN}$$

$$m = 25,4 \text{ mm}$$

$$n = 22,5 \text{ mm}$$

Rangée 1 :

$$M_{pl,2,Rd1}=0,48 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd}=\frac{2 \times (0,48) + 2 \times 90,432 \times 10^{-3} \times 22,5}{(25,4 + 22,5) \times 10^{-3}}=104,99 \text{ kN}$$

Rangée r=2,3 :

$$M_{pl,2,Rd2}=0,48 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd2}=\frac{2 \times (0,48) + 2 \times 90,432 \times 10^{-3} \times 22,5}{(25,4 + 22,5) \times 10^{-3}}=104,99 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 1+2 :

$$M_{pl,2,Rd1+2} = 0,863 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd1+2}=\frac{2 \times (0,863) + 4 \times 90,432 \times 10^{-3} \times 22,5}{(25,4 + 22,5) \times 10^{-3}}=205,95 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 1+2+3 :

$$M_{pl,2,Rd1a3} = 1,35 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd1a3} = \frac{2 \times (1,35) + 6 \times 90,432 \times 10^{-3} \times 22,5}{(25,4 + 22,5) \times 10^{-3}} = 311,238 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 2+3 :

$$M_{pl,2,Rd2+3} = 0,976 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd2+3} = \frac{2 \times (0,976) + 4 \times 90,432 \times 10^{-3} \times 22,5}{(25,4 + 22,5) \times 10^{-3}}=210,66 \text{ kN}$$

Mode 3 : rupture des boulons

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

$$F_{T,3,Rd}=2 \times \text{Nbr}_{\text{rangée}} \times F_{t,Rd}$$

Rangée r=1,2,3

$$F_{T,3,Rd} = 2 \times 1 \times 90,432 = 180,864 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 1+2 :

$$F_{T,3,Rd1+2} = 2 \times 2 \times 90,432=361,728 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 2+3 :

$$F_{T,3,Rd1+2} = 2 \times 2 \times 90,432=361,728 \text{ kN}$$

Groupe de rangées 1+2+3 :

$$F_{T,3,Rd1+2} = 2 \times 3 \times 90,432 = 542,592 \text{ kN}$$

Mode 1-2 :**Rangée r=1,2,3 :**

$$L_1 = 129,725$$

$$\text{Nbr}=1$$

$$m=25,4 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{129,725 \times 8^3} = 340,87 \text{ mm} > L_b$$

Groupe de rangées 1+2 :

$$L_1 = 229,725 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}=2$$

$$m=25,4 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 2 \times 157}{229,725 \times 8^3} = 384,97 \text{ mm} > L_b$$

Groupe de Rangées 2+3 :

$$L_1 = 259,72 \text{ mm} \quad \text{Nbr}=2$$

$$m=25,4 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 2 \times 157}{259,72 \times 8^3} = 340,51 \text{ mm} > L_b$$

Groupe de Rangées 1+ 2+3 :

$$L_1 = 359,72 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}=3$$

$$m=25,4 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 3 \times 157}{359,72 \times 8^3} = 368,78 \text{ mm} > L_b$$

Mode 4 : plastification de l'âme tendue

$$F_{T,4,Rd} = F_{T,w,Rd} = W \frac{L_{\text{eff}} t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$t_{wc} = 5\text{mm}$$

$$f_y = 235\text{ Mpa}$$

$$A_{vc} = 8,46\text{ cm}^2$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \times \left(\frac{l_{eff} t_{wc}}{A_{vc}}\right)^2}}$$

Rangée r=1,2,3 :

$$L_1 = 129,725\text{mm}$$

$$W = 0,752$$

$$F_{T,4,Rd} = 114,625\text{ kN}$$

Groupe de rangées 1+2 :

$$L_1 = 229,725\text{mm}$$

$$W = 0,543$$

$$F_{T,4,Rd 1+2} = 146,57\text{ kN}$$

Groupe de rangées 2+3

$$L_1 = 259,72\text{mm}$$

$$W = 0,496$$

$$F_{T,4,Rd 2+3} = 151,364\text{ kN}$$

Groupe de rangées 1+2+3

$$L_1 = 359,72\text{mm}$$

$$W = 0,381$$

$$F_{T,4,Rd 2+3} = 161,037\text{ kN}$$

3.2.1.5 Résistance de l'assemblage

a. Bilan des différents modes de ruine

$L_{eff}(mm)$	Rangée	Flexion semelle poteau				Ame tendue	poteau	Poutre	Min $F_{T,Rd}$
		Mode 1	Mode 2	Mode3	Mode4	$F_{T,Rd}$	$F_{T,Rd}$		
129,725	Rangée1	75,59	104,99	180,864	114,625	75,59	97,87	75,59	
129,725	Rangée2	75,59	104,99	180,864	114,625	75,59	154,74	75,59	
129,725	Rangée3	75,59	104,99	180,864	114,625	75,59	154,74	75,59	
229,725	Rangée1+2	135,9	205,95	361,728	146,57	135,9		135,9	
259,72	Rangée2+3	153,7	210,66	361,728	151,364	151,36	298,74	151,36	
359,72	Rangée1+2+3	212,59	311,238	542,592	161,037	161,04		161,04	

Tableau3.2: bilan des modes de ruines

b. Moment résistant de l'assemblage

$$M_{j,Rd} = \sum h_r F_{tr,Rd} \quad (3.8)$$

$$F_{t1,Rd} = 75,59 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = 60,31 \text{ kN}$$

$$F_{t3,Rd} = 25,4 \text{ kN}$$

Rangée	$h_r (mm)$	$F_{tr,Rd} (KN)$	$M_{j,Rd} (KN.m)$
1	280,1	75,59	21,172
2	180,1	60,31	10,86
3	50,1	25,4	1,27

$$M_{j,Rd} = 33,30 \text{ kN.m}$$

c. Rigidité de l'assemblage

$$K_1 = \frac{0,38 \times A_{cv}}{\beta \times Z} = \frac{0,38 \times 846}{1 \times 212} = 1,516 \text{ mm}$$

$$K_2 = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 146,57 \times 5}{74} = 6.932 \text{ mm}$$

$$K_{3,1} = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 147 \times 5}{74} = 5.23 \text{ mm}$$

$$K_{3,2} = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 147 \times 5}{74} = 5.23 \text{ mm}$$

$$K_{3,3} = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 147 \times 5}{74} = 5.23 \text{ mm}$$

$$K_{4,1} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 129,725 \times 8^3}{25,4^3} = 3 \text{ mm}$$

$$K_{4,2} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 129,725 \times 8^3}{25,4^3} = 3 \text{ mm}$$

$$K_{4,3} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 129,725 \times 8^3}{25,4^3} = 3 \text{ mm}$$

$$K_{5,1} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 75 \times 15^3}{39,34^3} = 4 \text{ mm}$$

$$K_{5,2} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 146,57 \times 15^3}{28,74^3} = 18,75 \text{ mm}$$

$$K_{5,3} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 146,57 \times 15^3}{28,74^3} = 18,75 \text{ mm}$$

$$K_{10} = \frac{16A_s}{L_b} = \frac{1,6 \times 157}{42,5} = 6 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eff},1} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{31}} + \frac{1}{K_{41}} + \frac{1}{K_{51}} + \frac{1}{K_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{5.23} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} + \frac{1}{6}} = 1 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eff},2} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{32}} + \frac{1}{K_{42}} + \frac{1}{K_{52}} + \frac{1}{K_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{5.23} + \frac{1}{3} + \frac{1}{20} + \frac{1}{6}} = 1 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eff},3} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{33}} + \frac{1}{K_{43}} + \frac{1}{K_{53}} + \frac{1}{K_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{5.23} + \frac{1}{3} + \frac{1}{19} + \frac{1}{6}} = 1 \text{ mm}$$

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum K_{\text{eff},r} h_r^2}{\sum K_{\text{eff},r} h_r} = \frac{1 \times (280,1)^2 + 1 \times (180,1)^2 + 1 \times (50,1)^2}{1 \times 280,1 + 1 \times 180,1 + 1 \times 50,1} = 212 \text{ mm}$$

$$K_{eq} = \frac{\sum K_{eff,r} h_r}{Z_{eq}} = \frac{1 \times 280,1 + 1 \times 180,1 + 1 \times 50,1}{212} = 2 \text{ mm}$$

$$S_{j,ini} = \frac{E_z^2}{\sum \frac{1}{K_i}} = \frac{210000 \times (Z_{eq}^2)}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{eq}}} = \frac{210000 \times (212)^2}{\frac{1}{1.516} + \frac{1}{6.93} + \frac{1}{2}} = 7238,2985 \text{ kN.m/rad} \quad (3.9)$$

$$\mu = 1$$

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{1} = 7238,2985 \text{ kN.m/rad}$$

3.2.2 Assemblage par platine d'extrémité débordante (moment négatif):

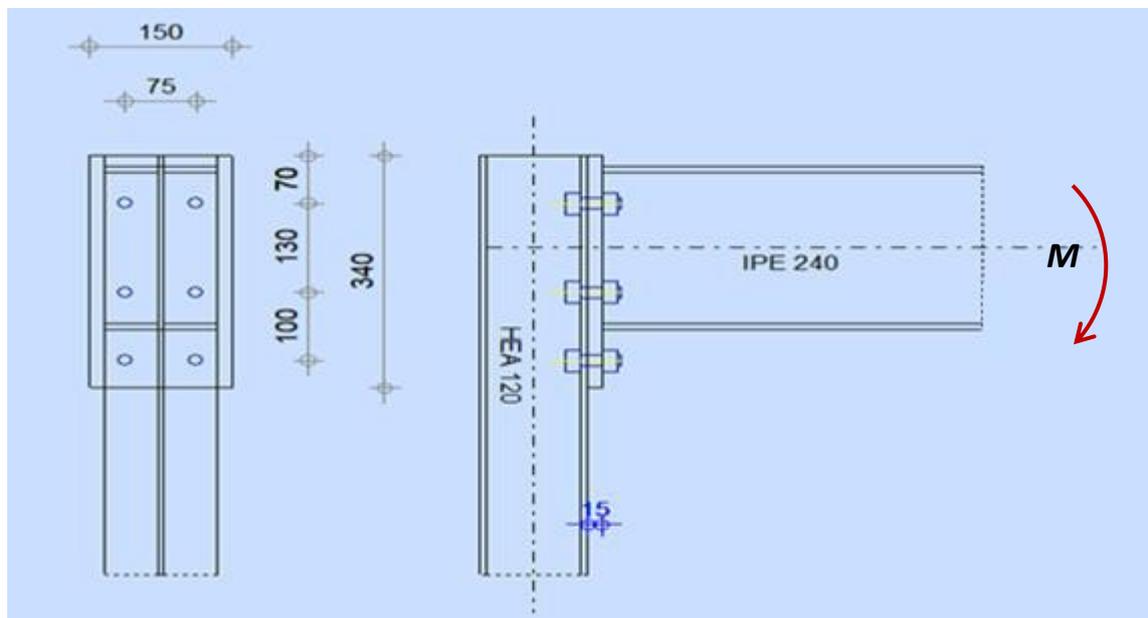


Fig.3.2 Caractéristiques géométriques d'assemblage poutre-poteau

3.2.2.1 Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage

Poutre : IPE240, S235

$$h_b = 240 \text{ mm} ; b_b = 120 \text{ mm} ; t_{fb} = 9,8 \text{ mm} ; t_{wb} = 6,2 \text{ mm} ; r = 15 \text{ mm} ;$$

$$I_y = 3891,6 \text{ cm}^4 ; ; w_{pl,y} = 366,6 \text{ cm}^3 ; d_b = 190,4 \text{ mm}.$$

Poteau : HEA120, S235

$$h_c = 114 \text{ mm} ; b_c = 120 \text{ mm} ; t_{fc} = 8 \text{ mm} ; t_{wc} = 5 \text{ mm} ; r = 12 \text{ mm} ;$$

$$I_y = 606,2 \text{ cm}^4; A = 25,3 \text{ cm}^2$$

$$A_{vz} = 8,5 \text{ cm}^2; w_{pl,y} = 119,5 \text{ cm}^3; d_c = 74 \text{ mm}.$$

Platine d'about : S235

$$h_p = 340 \text{ mm}; b_p = 150 \text{ mm}; t_p = 15 \text{ mm}$$

Boulons : M16, classe 8.8 avec deux rondelles

(facultatif) : $f_y = 640 \text{ MPa}$; $f_u = 800 \text{ MPa}$;

$$A_s = 157 \text{ mm}^2$$

Le diamètre de perçage des trous est $d_0 = 18 \text{ mm}$.

Coefficients partiels de sécurité : $\gamma_{M0} = 1,0$, $\gamma_{M1} = 1,0$ et $\gamma_{M2} = 1,25$

3.2.2.2 Zone cisailée :

Résistance du panneau d'âme de poteau en cisaillement

$$V_{wp,rd} = \frac{0,9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 235 \cdot 850 \times 10^{-3}}{1 \cdot \sqrt{3}} = 103,8 \text{ KN}$$

3.2.2.3 Zone comprimé

a. Coté poutre

$$F_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_{fb})$$

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = f_{yb} W_{ply} / \gamma_{M0} = \frac{(235 \times 366,6 \times 10^3)}{10^6} = 86,151 \text{ kN.M}$$

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{86,151 \times 10^3}{(240 - 9,8)} = 374,24 \text{ kN}$$

b. Coté poteau

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega K_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \leq \frac{\omega K_{wc} \rho b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}}$$

ω : Interaction avec le cisaillement dans l'âme du poteau (coefficient réducteur)

$\beta = 1$ On a un assemblage unilatéral

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,23 \times \left(\frac{b_{eff,c,wc} \times t_{wc}}{A_{vc}} \right)}}$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,23 \times \left(\frac{147 \times 5}{846} \right)}}$$

$$\omega=0.71$$

K_{wc} : Interaction avec la contrainte de compression dans l'âme du poteau par simplification :

$$K_{wc} = 1$$

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

$$= 9,8 + 2\sqrt{2} \times 5 + 5 \times (8+12) + 22,93 = 147 \text{ mm}$$

$$S = r_c = 12 \text{ mm}$$

$$s_p = t_p + (15 - a_p \sqrt{2}) = 15 + (15 - 5\sqrt{2}) = 22,93 \text{ mm}$$

Voilement de l'âme sous compression :

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{\text{eff},c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{Et^2_{wc}}} = 0,932 \sqrt{\frac{146,87 \times 74 \times 235}{210000 \times 5^2}} = 0,65 < 0,72$$

Donc $\rho=1$

L'interaction avec la contrainte de compression dans l'âme du poteau est à prendre en compte si cette contrainte dépasse 70% de la limite élastique (à vérifier ultérieurement)

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{0,71 \times 1 \times 147 \times 5 \times 235}{1,0} = 122,63 \text{ kN}$$

3.2.2.4 Zone tendue

a. Résistance de la zone tendue coté poutre

Range 1 intérieur :

$$m = 22,4 \text{ mm}$$

$$m_2 = 55 \text{ mm}$$

$$e = 37,5 \text{ mm}$$

Mécanisme circulaire

$$L_0 = 2\pi m = 2\pi \times 22,4 = 140,75 \text{ mm}$$

Mécanisme non circulaire

$$L_2 = \alpha m$$

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e} = 0,37$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} = 0,91 \quad \Rightarrow \alpha = 6,1$$

$$L_2 = 6,1 \times 22,4 = 136,64\text{mm}$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 136,64\text{mm}$$

Range 2 intérieur central :

Mécanisme circulaire

$$L_0 = 2\pi m = 2\pi \times 22,4 = 140,75\text{mm}$$

Mécanisme non circulaire

$$L_2 = 4m + 1.25e = 4 \times 22,4 + 1.25 \times 37,5 = 136,35\text{mm}$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 136,35\text{mm}$$

Range 1+2 intérieur

$$P=130$$

$$\alpha = 6,1$$

$$L_0 = 2\pi m + 2p = 2\pi \times 22,4 + 2 \times 130 = 400,74 \text{ mm}$$

$$L_2 = \alpha m = 6,1 \times 22,4 + 130 = 266,64 \text{ mm}$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 266,64 \text{ mm}$$

Mode 1 : mécanisme complet

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

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4\gamma_{M0}}$$

Rangée 1

$$L_1 = 136,64\text{mm}$$

$$t_p = 15\text{mm}$$

$$f_y = f_{yp} = 235 \text{ MPa}$$

$$m = m_x = 22,4\text{mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{136,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1,8029 \text{ kN.m} = 1802,9 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 1,8029}{m} = 0,321 \text{ kN} = 321,946 \text{ kN}$$

Rangée 2

$$L_1=136,64\text{mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{136,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1,8029 \text{ kN.m} = 1802,9 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 1,8029}{m} = 0,321 \text{ Kn} = 321,946 \text{ kN}$$

Rangée 1+ 2

$$L_1=266,64\text{mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{266,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 3,5246 \text{ kN.m} = 3524,6 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 3,5246}{m} = 0,6293 \text{ kN} = 629,392 \text{ kN}$$

Mode2 : mécanisme partiel et rupture des boulons

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

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 f_u A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$m = 22,4 \text{ mm}$$

$$e_{\min} = 37,5 \text{ mm}$$

$$n = \min(e_{\min}; 1,25m) = \min(37,5; 28) = 28 \text{ mm}$$

Rangée 1

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = \frac{136,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1802,9 \text{ kN.m}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \times 800 \times 157}{1,25} = 90,432 \text{ kN}$$

$$\sum F_{t,Rd} = 2 \times 90,432 \text{ kN} = 180,86 \text{ kN} \quad (2 \text{ boulons})$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m + n} = \frac{2 \times 1802,9 + 28 \times 180,86}{22,4 + 28} = 172,02 \text{ KN}$$

Rangée 2

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = 1802,9 \text{ kN.m}$$

$$\sum F_{t,Rd} = 180,86 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 172,02 \text{ kN}$$

Rangée 1+ 2

$$L_1 = 266,64 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{266,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 3,5246 \text{ kN.m} = 3524,6 \text{ kN.m}$$

$$\sum F_{t,Rd} = 180,86 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \sum F_{t,Rd}}{m+n} = 340,82 \text{ kN}$$

Mode3 : rupture des boulons

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

$$F_{T,3,Rd} = 2 \times \text{Nbr}_{\text{rangée}} \times F_{t,Rd}$$

Rangée 1

$$\sum F_{t,Rd} = 2 \times 90,432 \text{ kN} = 180,86 \text{ kN} \quad (2 \text{ boulons})$$

Rangée 2

$$\sum F_{t,Rd} = 2 \times 90,432 \text{ kN} = 180,86 \text{ kN}$$

Rangée 1+ 2

$$\text{Nbr}_{\text{rangée}} = 2$$

$$\sum F_{t,Rd} = 2 \times 2 \times 90,432 \text{ kN} = 361,728 \text{ kN}$$

Mode1-2

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$$

Rangée 1

$$L_1 = 136,64 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}_{\text{rangée}} = 1$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \text{ m}^3 \text{Nbr}_{\text{rangée}} A_s}{L_1 t_p^3} = \frac{8,8 \times (22,4)^3 \times 1 \times 157}{136,64 \times 15^3} = 37,15 > L_b = 39,15 \text{ mm} \quad \text{CV}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = \frac{136,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1802,9 \text{ kN}$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{2 \times 1802,9}{22,4} = 160,973 \text{ KN}$$

Rangée 2

$$L_1 = 136,64 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}_{\text{rangée}} = 1$$

$$L_b^* = \frac{8,8 m^3 \text{Nbr}_{\text{rangée}} A_s}{L_1 t_p^3} = \frac{8,8 \times (22,4)^3 \times 1 \times 157}{136,64 \times 15^3} = 37,15 < L_b = 39,15 \text{ mm} \quad \text{CV}$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = \frac{136,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1802,9 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{2 \times 1802,9}{22,4} = 160,973 \text{ KN}$$

Rangée 1+ 2

$$L_1 = 266,64 \text{ mm}$$

$$\text{Nbr}_{\text{rangée}} = 2$$

$$L_b^* = \frac{8,8 m^3 \text{Nbr}_{\text{rangée}} A_s}{L_1 t_p^3} = \frac{8,8 \times (22,4)^3 \times 2 \times 157}{266,64 \times 15^3} = 34,52 \text{ KN} < L_b = 39,15 \text{ mm} \quad \text{CV}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{266,64 \times 15^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 3,5246 \text{ kN.m} = 3524,6 \text{ KN}$$

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m} = \frac{2 \times 3524,6 \text{ KN}}{22,4} = 314,69 \text{ KN}$$

Mode 4 : plastification de l'âme tendue

$$F_{T,4,Rd} = \frac{L_{\text{eff}} t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$t_w = 6,2 \text{ mm}$$

$$f_y = 235 \text{ Mpa}$$

Rangée 1 : intérieure

$$L_1 = 136,64 \text{ mm}$$

$$b_{fb} = 120 \text{ mm}$$

$$t_{fb} = 9,8 \text{ mm}$$

$$F_{T,4,Rd} = \frac{b_{fb} t_{fb} f_y}{2 \times \gamma_{M0}} = 138,180 \text{ kN}$$

Rangée 2

$$L_1 = 136,64 \text{ mm}$$

$$F_{T,4,Rd} = \frac{b_{fb} t_{fb} f_y}{2 \times \gamma_{M0}} = 138,180 \text{ kN}$$

Rangée 1+ 2

$$L_1 = 266,64 \text{ mm}$$

$$F_{T,4,Rd2} = \frac{b_{fb} t_{fb} f_y}{2 \times \gamma_{M0}} + (e - t_{fb} + \frac{p_1}{2}) \times \frac{t_{wb} f_y}{\gamma_{M0}} = 301,8011 \text{ kN}$$

MODE DE RUINE POUR LA POUTRE							
$L_{eff} (mm)$	Rangée	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 1-2	Mode 4	$\min F_{T,Rd}$
136,64	Rangée 1	321,94	172,02	180,86	160,973	138,18	138,18
136,35	Rangée 2	321,94	172,02	180,86	160,973	138,18	138,18
266,64	Rangée 2+1	629,39	340,82	361,72	314,69	301,801	301,801

Tableau 3.3: bilan des modes de ruine poutre

b. Résistance de la zone tendue coté poteau :

Longueur de tronçon en T équivalent

Rangée intérieur non raidie

$$m_x = m = \frac{p_2 - t_{wc}}{2} - 0,8r_c = 25,4 \text{ mm}$$

$$e_1 = 70 \text{ mm}$$

$$e = e_2 = 37,5 \text{ mm}$$

$$p_0 = 100 \text{ mm}$$

$$p_1 = 130 \text{ mm}$$

Mécanisme circulaire

$$L_0 = \min(2\pi m_x; \pi m_x + 2e)$$

$$L_0 = \min(159,59; 219,79)$$

$$L_0 = 159,59 \text{ mm}$$

Mécanisme non circulaire

$$L_2 = \min(4m_x + 1,25e; 2m_x + 0,625e + e_1)$$

$$L_2 = \min(148,475 ; 144,23)$$

$$L_2 = 144,23$$

$$L_1 = \min(L_2; L_0) = 144,23$$

$$L_1 = L_2 = 144,23\text{mm}$$

Rangé intérieur 2

$$L_0 = 2\pi m = 159,59\text{mm}$$

$$L_2 = 4m_x + 1.25e = 148,475\text{mm}$$

$$L_1 = \min(159,59 ; 148,475)$$

$$L_1 = 148,475\text{mm}$$

Rangée intérieur 3

$$L_0 = 2\pi m = 159,59\text{mm}$$

$$L_2 = 4m_x + 1.25e = 148,475\text{mm}$$

$$L_1 = \min(159,59 ; 148,475)$$

$$L_1 = 148,475\text{mm}$$

Groupe de rangées 1 à 2 :

$$L_0 = \min(2\pi m + 2p; \pi m + 2e_1 + 2p)$$

$$L_0 = \min(419,592; 479,796)$$

$$L_0 = 419,592\text{mm}$$

$$L_2 = \min(4m + 1,25e + p; 2m + 0,625e + e_1 + p)$$

$$L_2 = \min(278,475; 274,237)$$

$$L_2 = 274,237\text{mm}$$

$$L_1 = \min(419,592, 274,237)$$

$$L_1 = 274,237\text{mm}$$

Groupe de rangées 2 à 3 :

$$L_0 = \min(2\pi m + 2p; \pi m + 2e_1 + 2p)$$

$$L_0 = \min(419,592; 479,796)$$

$$L_0 = 419,592\text{mm}$$

$$L_2 = \min(4m + 1,25e + p; 2m + 0,625e + e_1 + p)$$

$$L_2 = \min(278,475; 274,237)$$

$$L_2 = 274,237\text{mm}$$

$$L_1 = \min(419,592, 274,237)$$

$$L_1 = 274,237\text{mm}$$

Groupe de rangées 1+ 2 + 3 :

$$L_0 = \min(2\pi m + 2 \sum p_i ; \pi m + 2e_1 + 2\sum p_i)$$

$$L_0 = \min(619,59 ; 679)$$

$$L_0 = 619,59$$

$$L_2 = \min(4m + 1,25e + \sum p_i ; 2m + 0,625e + e_1 + \sum p_i)$$

$$L_2 = \min(378,475; 374,237)$$

$$L_2 = 374,237\text{mm}$$

$$L_1=L_2 = 374,237\text{mm}$$

- **Résistance de Teq sous les différents modes :**

Mode 1 :

Mécanisme complet :

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

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4\gamma_{M0}}$$

Rangée 1 :

$$L_1=144,23\text{mm}$$

$$t_p = 8\text{mm}$$

$$f_y = f_{yp} = 235 \text{ MPa}$$

$$m=m_x =25,4\text{mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{144,23 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 542,308 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 542,308}{25,4} = 85,40 \text{ KN}$$

Rangée 2:

$$L_1 = 148,475 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{148,47 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 558,266 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 558,266}{25,4} = 87,91 \text{ kN}$$

Rangée 3:

$$L_1 = 148,475 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{148,47 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 558,266 \text{ kN}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 558,266}{25,4} = 87,91 \text{ KN}$$

Rangée 1+2 :

$$L_1 = 274,237 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{274,237 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1031,133 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 1031,133}{25,4} = 162,38 \text{ KN}$$

Rangée 2+3 :

$$L_1 = 274,237 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{274,237 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1031,133 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 1031,133}{25,4} = 162,38 \text{ KN}$$

Rangée 1+2+3 :

$$L_1 = 374,237 \text{ mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{374,237 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1407,104 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4 \times 1407,104}{25,4} = 221,59 \text{ KN}$$

Mode 2 : mécanisme partiel et rupture des boulons

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

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{L_1 t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}}$$

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9f_u A_s}{\gamma_{M2}}$$

$$n = \min(e_{\min}; 1,25m) = (37,5; 31,75)$$

$$n = 31,75\text{mm}$$

$$m = 25,4\text{mm}$$

Rangée 1 :

$$L_1 = 144,23\text{mm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 542,23 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 542,23 + 31,75 \times 180,86}{25,4 + 31,75} = 119,44 \text{ kN}$$

Rangée 2 :

$$L_1 = 148,475\text{mm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 558,266 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 558,266 + 31,75 \times 180,86}{25,4 + 31,75} = 120,0144 \text{ kN}$$

Rangée 3:

$$L_1 = 148,475\text{mm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 558,266 \text{ kN}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 558,266 + 31,75 \times 180,86}{25,4 + 31,75} = 120,0144 \text{ kN}$$

Rangée 1+2:

$$L_1 = 274,2375\text{mm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 1031,133 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 1031,133 + 31,75 \times 2 \times 180,86}{25,4 + 31,75} = 237,99 \text{ kN}$$

Rangée 2+3:

$$L_1 = 274,2375\text{mm}$$

$$M_{pl,2,Rd} = 1031,133 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 1031,133 + 31,75 \times 2 \times 180,86}{25,4 + 31,75} = 237,99 \text{ kN}$$

Rangée 1+2+3:

$$L_1=374,237\text{mm}$$

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{374,237 \times 8^2 \times 235 \times 10^{-6}}{4 \times 1} = 1407,104 \text{ kN.m}$$

$$F_{T,2,Rd} = \frac{2 \times 1407,104 + 31,75 \times 6 \times 90,43}{25,4 + 31,75} = 350,67 \text{ kN}$$

Mode3 : rupture des boulons

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

$$F_{T,3,Rd} = 2 \times \text{Nbr}_{\text{rangée}} \times F_{t,Rd}$$

Rangée 1 et 2 et 3 :

$$F_{T,3,Rd} = 180,86 \text{ kN} \quad (2 \text{ boulons})$$

Rangée 1+2:

$$F_{T,3,Rd} = 180,86 \times 2 = 361,72 \text{ KN}$$

Rangée 2+3:

$$F_{T,3,Rd} = 180,86 \times 2 = 361,72 \text{ KN}$$

Rangée 1+2+3:

$$F_{T,3,Rd} = 180,86 \times 3 = 542,58 \text{ KN}$$

Mode1-2

$$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$$

$$L_b = t_p + t_{fc} + \frac{(h_e + h_t)}{2} = 39,15 \text{ mm}$$

Rangée 1 :

$$L_1=144,23\text{mm}$$

$$\text{Nbr}=1$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{144,23 \times 8^3} = 306,58 > L_b$$

Rangée 2 :

$$L_1=148,475\text{mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{148,475 \times 8^3} = 297,824 > L_b$$

Rangée 3 :

$$L_1 = 148,475 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{148,475 \times 8^3} = 297,824 > L_b$$

Rangée 1+2:

$$L_1 = 274,2375 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{274,2375 \times 8^3} = 322,49 > L_b$$

Rangée 2+3:

$$L_1 = 274,2375 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{274,2375 \times 8^3} = 322,49 > L_b$$

Rangée 1+2+3:

$$L_1 = 374,237 \text{ mm}$$

$$L_b^* = \frac{8,8 \times (25,4)^3 \times 1 \times 157}{374,237 \times 8^3} = 354,47 > L_b$$

Mode 4 : plastification de l'âme tendue

$$F_{T,4,Rd} = W \frac{L_{eff} t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$t_w = 5 \text{ mm}$$

$$f_y = 235 \text{ Mpa}$$

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

$$= (25,4 \times 10^2) - 240 \times 8 + (5 + 24) \times 8$$

$$A_{vc} = 852 \text{ mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \times \left(\frac{L_{eff} \times t_{wc}}{A_{vc}}\right)^2}}$$

Rangée 1 :

$$L_1=144,23\text{mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+1,3 \times \left(\frac{144,23 \times 5}{852}\right)^2}} = 0,71$$

$$F_{T,4,Rd} = 0,71 \times \frac{144,23 \times 5 \times 235 \times 10^{-3}}{1} = 120,32 \text{ kN}$$

Rangée 2 :

$$L_1=148,475\text{mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+1,3 \times \left(\frac{148,23 \times 5}{852}\right)^2}} = 0,71$$

$$F_{T,4,Rd} = 0,71 \times \frac{148,475 \times 5 \times 235 \times 10^{-3}}{1} = 123,86\text{KN}$$

Rangée 3 :

$$L_1=148,475\text{mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+1,3 \times \left(\frac{148,23 \times 5}{852}\right)^2}} = 0,71$$

$$F_{T,4,Rd} = 0,71 \times \frac{148,475 \times 5 \times 235 \times 10^{-3}}{1} = 123,86\text{KN}$$

Rangée 1+2:

$$L_1=274,2375\text{mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+1,3 \times \left(\frac{274,2375 \times 5}{852}\right)^2}} = 0,47$$

$$F_{T,4,Rd} = 0,47 \times \frac{274,2375 \times 5 \times 235 \times 10^{-3}}{1} = 151,44\text{KN}$$

Rangée 2+3:

$$L_1=274,2375\text{mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1+1,3 \times \left(\frac{274,2375 \times 5}{852}\right)^2}} = 0,47$$

$$F_{T,4,Rd} = 0,47 \times \frac{274,2375 \times 5 \times 235 \times 10^{-3}}{1} = 151,44\text{KN}$$

Rangée 1+2+3:

$$L_1=374,237\text{mm}$$

$$W = W_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \times \left(\frac{374,237 \times 5}{852}\right)^2}} = 0,37$$

$$F_{T,4,Rd} = 0,37 \times \frac{374,237 \times 5 \times 235 \times 10^{-3}}{1} = 161,699 \text{KN}$$

Bilan des modes de ruines poteau							
$L_{eff}(mm)$	Rangée	Mode 1	Mode2	Mode3	Mode1-2	Mode4	$\min F_{T,Rd}$
144,23	Rangée1	85,4	119,44	180,86		120,32	85,4
148,475	Rangée2	87,91	120,14	180,86		123,86	87,91
148,475	Rangée3	87,91	120,14	180,86		123,86	87,91
274,237	Rangée1+2	162,32	237,99	361,72		151,44	151,44
274,237	Rangée2+3	162,32	237,99	361,72		151,44	151,44
374,23	Rangée1+2+3	221,59	350,67	542,58		161,699	161,699

Tableau3.4: bilan des modes de ruine poteau

3.2.2.5 Résistance de l'assemblage

a. Moment résistant de l'assemblage

$$M_{j,Rd} = \sum h_r F_{tr,Rd}$$

$$F_{t1,Rd} = 85,4 \text{kN}$$

$$F_{t2,Rd} = 74,41 \text{kN}$$

$$F_{t3,Rd} = 48,28 \text{KN}$$

Rangée	$h_r (mm)$	$F_{tr,Rd} (KN)$	$M_{j,Rd} (KN.m)$
1	185	85,4	15,799
2	55	74,41	4,092
3		11,61	

$$M_{j,Rd} = 15,799 + 4,092 = 19,891 \text{ KN.m}$$

b. Rigidité de l'assemblage

$$K_1 = \frac{0,38 \times A_{vc}}{\beta \times Z} = \frac{0,38 \times 846}{1 \times 115} = 2,80 \text{ mm}$$

$$K_2 = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},c,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 147 \times 5}{74} = 6,98 \text{ mm}$$

$$K_{3,1} = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},t,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 144,23 \times 5}{74} = 5 \text{ mm}$$

$$K_{3,2} = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},t,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 148,47 \times 5}{74} = 4 \text{ mm}$$

$$K_{3,3} = \frac{0,7 \times b_{\text{eff},t,wc} \times t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \times 148,47 \times 5}{74} = 4 \text{ mm}$$

$$K_{4,1} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 144,23 \times 8^3}{25,4^3} = 4,05 \text{ mm}$$

$$K_{4,2} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 148,475 \times 8^3}{25,4^3} = 4,17 \text{ mm}$$

$$K_{4,3} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 148,475 \times 8^3}{25,4^3} = 4,17 \text{ mm}$$

$$K_{5,1} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 136,64 \times 15^3}{25,4^3} = 25,32 \text{ mm}$$

$$K_{5,2} = \frac{0,9 \times L_{\text{eff}} \times t_p^3}{m^3} = \frac{0,9 \times 136,35 \times 15^3}{25,4^3} = 25,27 \text{ mm}$$

$$K_{10} = \frac{1,6 A_s}{L_b} = \frac{1,6 \times 157}{39,15} = 6 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eff},1} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{31}} + \frac{1}{K_{41}} + \frac{1}{K_{51}} + \frac{1}{K_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{5} + \frac{1}{4,05} + \frac{1}{25,32} + \frac{1}{6}} = 1,5 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eff},2} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{32}} + \frac{1}{K_{42}} + \frac{1}{K_{52}} + \frac{1}{K_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4,17} + \frac{1}{25,26} + \frac{1}{6}} = 1,43 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eff},3} = \frac{1}{\sum \frac{1}{K_{ir}}} = \frac{1}{\frac{1}{K_{33}} + \frac{1}{K_{43}} + \frac{1}{K_{10}}} = \frac{1}{\frac{1}{4} + \frac{1}{4,17} + \frac{1}{6}} = 1,52 \text{ mm}$$

$$Z_{\text{eq}} = \frac{\sum K_{\text{eff},r} h_r^2}{\sum K_{\text{eff},r} h_r} = \frac{1,5 \times (180,1)^2 + 1,43 \times (50,1)^2}{1,5 \times 180,1 + 1,43 \times 50,1} = 153 \text{ mm}$$

$$K_{\text{eq}} = \frac{\sum K_{\text{eff},r} h_r}{Z_{\text{eq}}} = \frac{1,5 \times 180,1 + 1,43 \times 50,1}{153} = 2 \text{ mm}$$

$$S_{j,ini} = \frac{E_z \cdot z^2}{\sum \frac{1}{K_i}} = \frac{210000 \times (Z_{eq})^2}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{eq}}} = \frac{210000 \times (153)^2}{\frac{1}{2,8} + \frac{1}{6,98} + \frac{1}{2}} = 4913,878 \text{ kN.m/rad}$$

$$\mu = 1$$

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{1} = 4913,878 \text{ kN.m/rad}$$

3.3 Conclusion

On a utilisé dans ce chapitre la méthode des composants qui représente un processus long et difficile lorsqu'on veut faire une étude paramétrique dans le but de déterminer les caractéristiques clés d'un assemblage qui sont le moment de rotation $M_{j,Rd}$ et la rigidité initiale $S_{j,ini}$.

Et on a calculé un assemblage poteau-poutre dans les deux cas, cas avec une fois un moment positif et dans un autre cas la moment est négatif.

Qui nous a permis de compare le moment résistants et la rigidité de l'assemblage dans les deux cas.

Chapitre 4

*Application numérique d'un
assemblage boulonne (charge
cyclique)*

4.1 Introduction

Les connections poteau-poutre par plaque d'extrémité sont très utilisées dans les structures en acier. Ils sont souvent utilisés comme moment résistant aux connections. Ils ont l'avantage du simple contrôle de la qualité et la rapidité de montage comparant aux assemblages soudés.

Le comportement des connections poutre-poteau en acier peut être représenté par son comportement en flexion qui témoigne surtout de la relation du moment rotation. Ce comportement il n'est pas linéaire. En fait, les courbes moment-rotation représentent le résultat d'une interaction très complexe entre les aspects élémentaires constituant la liaison. Dans ce chapitre, on fait une expérience du comportement du moment – rotation d'un assemblage poteau-poutre par plaque d'extrémité, soumis à des charges cycliques ou monotones.

4.2 Assemblage sous charge cyclique

Afin d'analyser l'assemblage poutre-poteau sous charge cyclique on a développé un modèle d'assemblage en utilisant le logiciel **MATLAB** sous l'encadrement de Monsieur BOUMECHRA N. Le modèle est utilisé pour étudier les résultats du moment sollicitant appliqué sous forme de charge cyclique sur l'assemblage poteau poutre en acier.

4.3 Description d'assemblage

4.3.1 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (symétrique)

Exemple 1 :

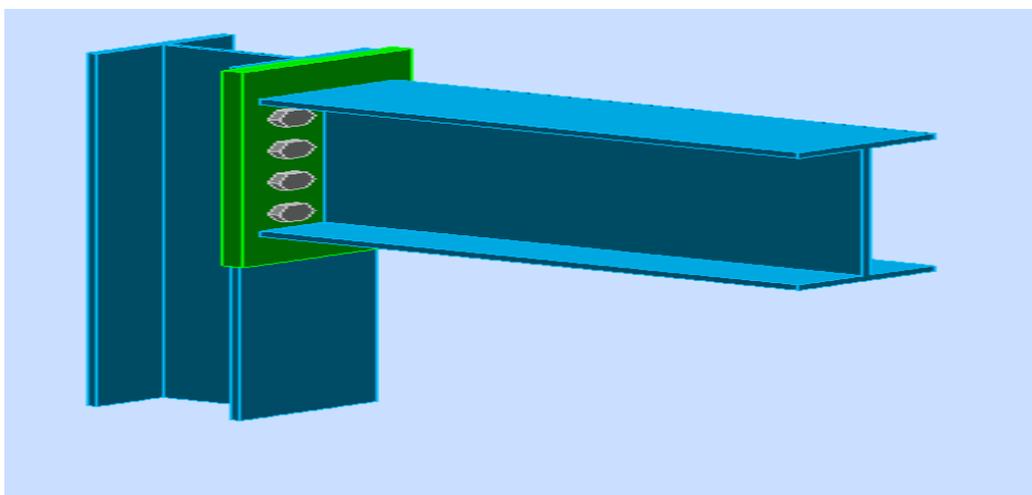


Fig.4.1 assemblage poutre-poteau symétrique vue 3D

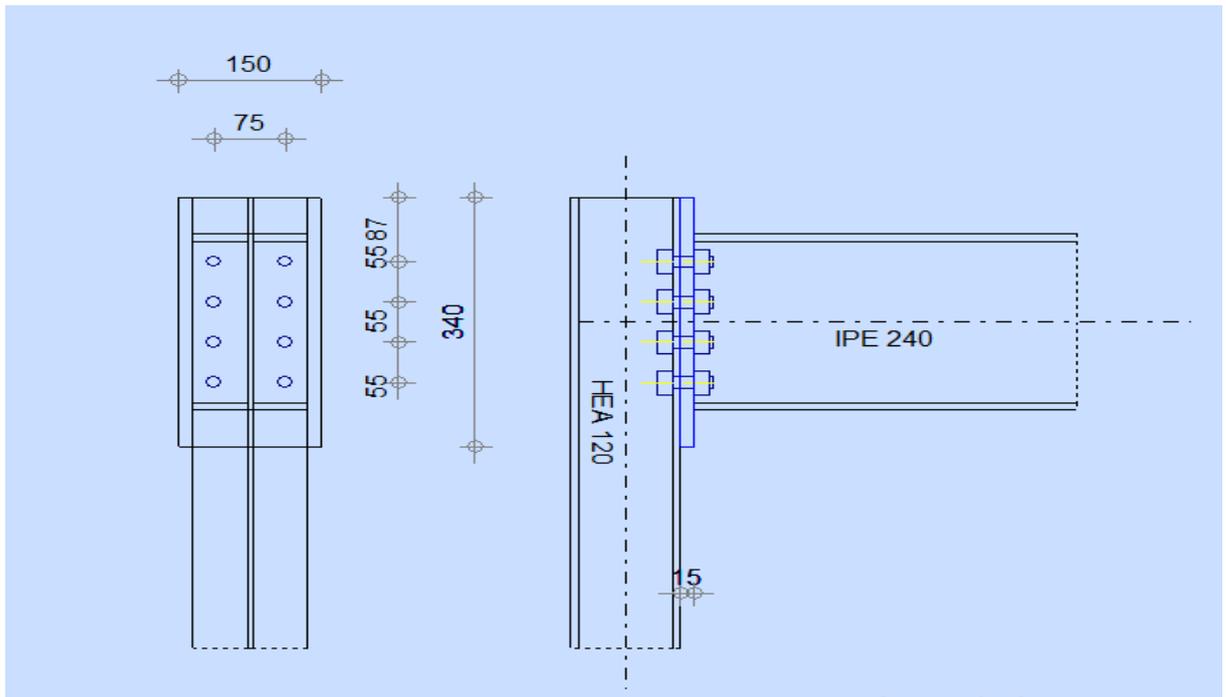


Fig.4.2 Caractéristiques géométrique assemblage poutre-poteau symétrique

4.3.2 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (non symétrique)

Exemple 2 :

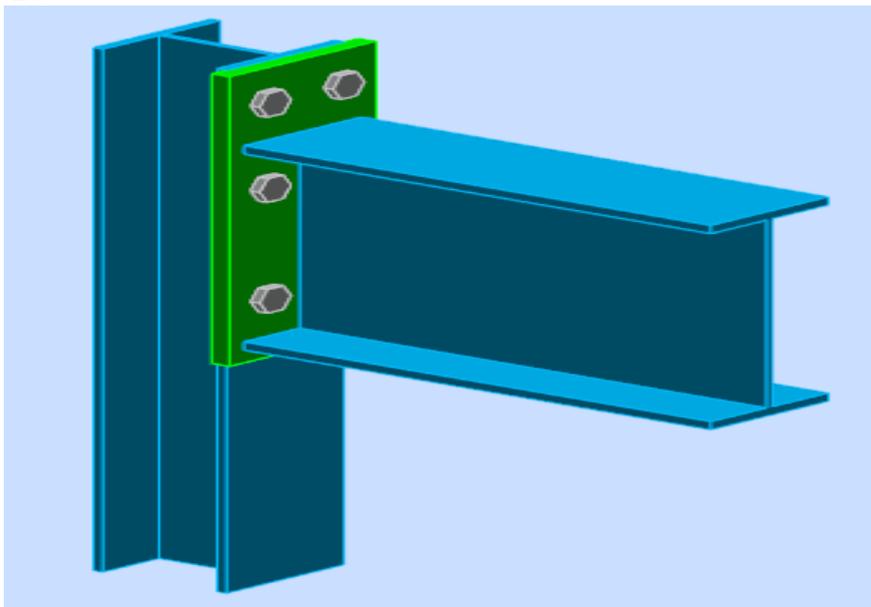


Fig.4.3 assemblage poutre-poteau non symétrique vue 3D

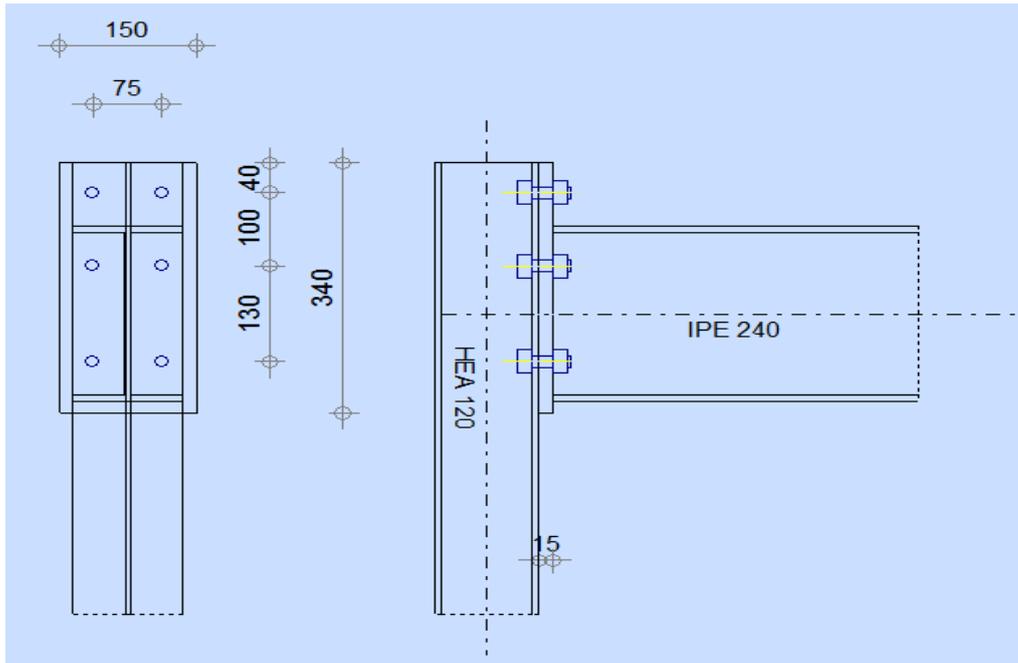


Fig.4.4 Caractéristiques géométrique assemblage poutre-poteau non symétrique

4.3.3 Caractéristiques géométriques et mécaniques de l'assemblage

Poutre: IPE240, S235

$h_b = 240 \text{ mm}$; $b_b = 120 \text{ mm}$; $t_{fb} = 9,8 \text{ mm}$; $t_{wb} = 6,2 \text{ mm}$; $r = 15 \text{ mm}$;

$I_y = 3891,6 \text{ cm}^4$;

$A = 39,12 \text{ cm}^2$; $A_{vz} = 19,1 \text{ cm}^2$; $w_{pl,y} = 366,6 \text{ cm}^3$; $d_b = 190,4 \text{ mm}$.

Poteau: HEA120, S235

$h_c = 114 \text{ mm}$; $b_c = 120 \text{ mm}$; $t_{fc} = 8 \text{ mm}$; $t_{wc} = 5 \text{ mm}$; $r = 12 \text{ mm}$; $I_y = 606,2 \text{ cm}^4$;

$A = 25,3 \text{ cm}^2$

$A_{vz} = 8,5 \text{ cm}^2$; $w_{pl,y} = 119,5 \text{ cm}^3$; $d_c = 74 \text{ mm}$.

Platine d'about: S235

$h_p = 340 \text{ mm}$; $b_p = 150 \text{ mm}$; $t_p = 15 \text{ mm}$

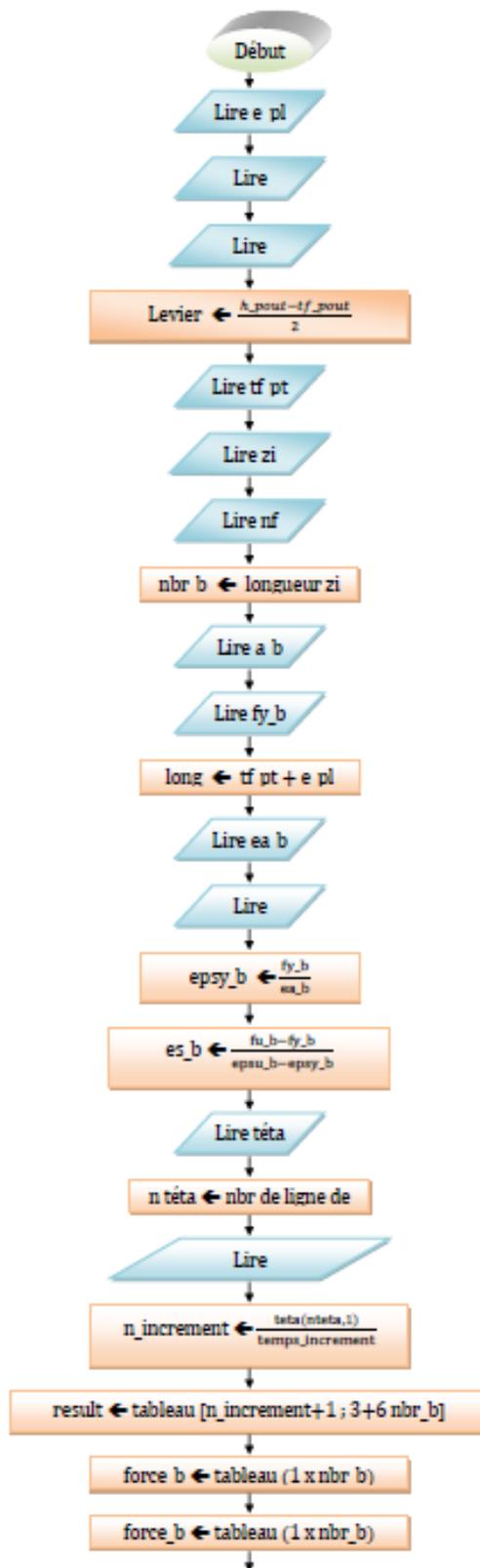
Boulons: M16, classe 8.8 avec deux rondelle

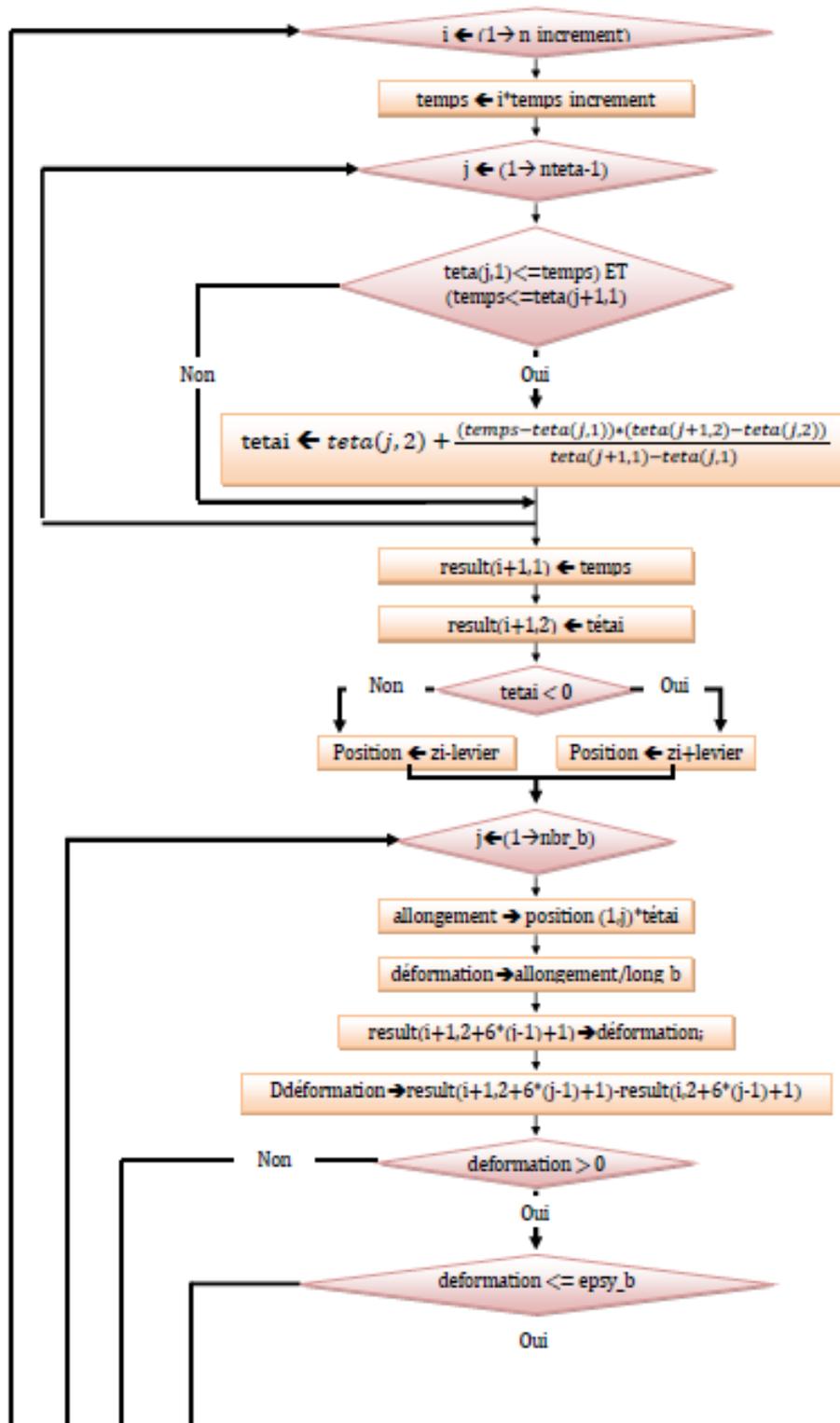
(facultatif)

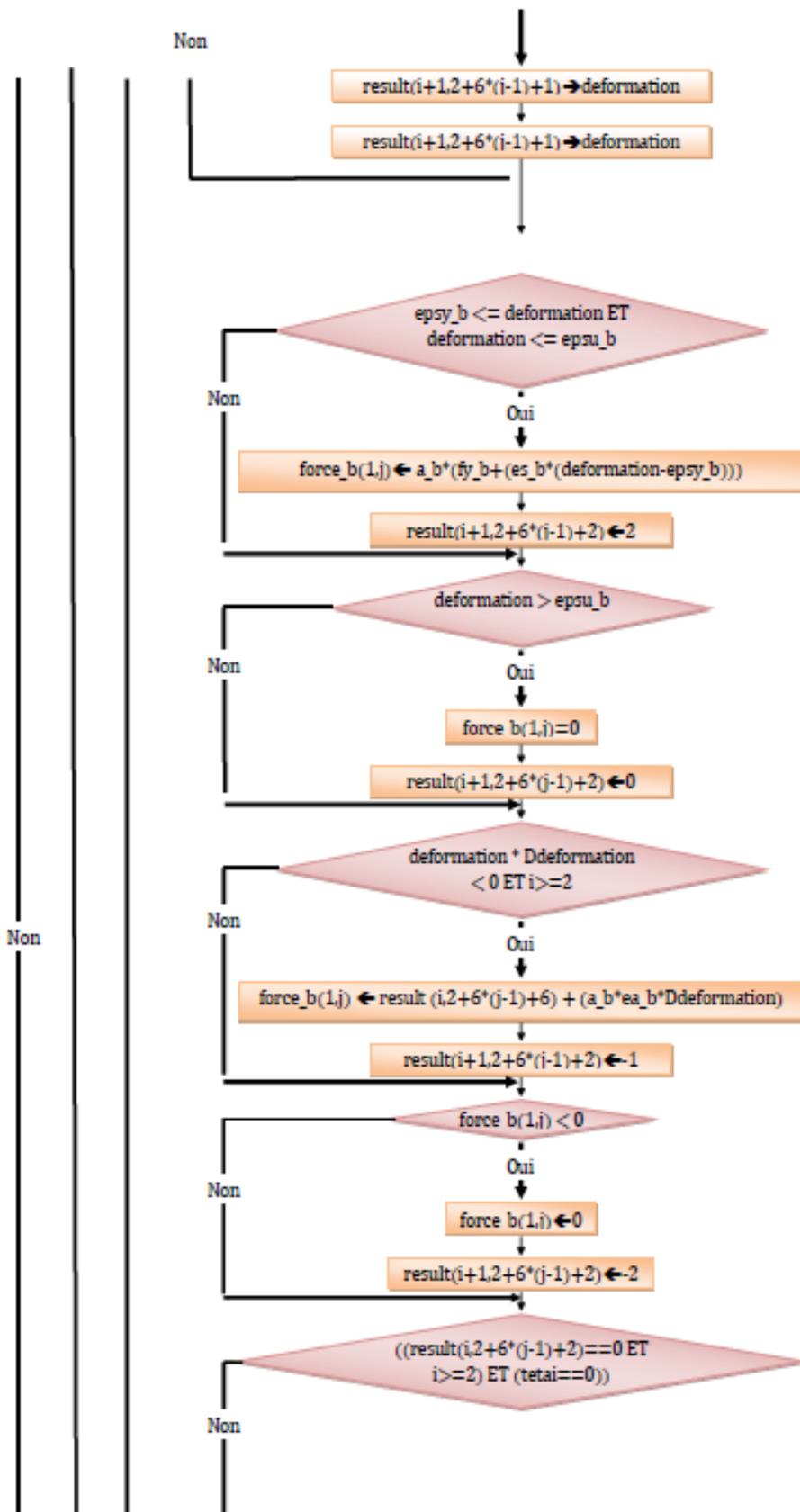
$f_y = 640 \text{ MPa}$; $f_u = 800 \text{ MPa}$; $A_s = 157 \text{ mm}^2$

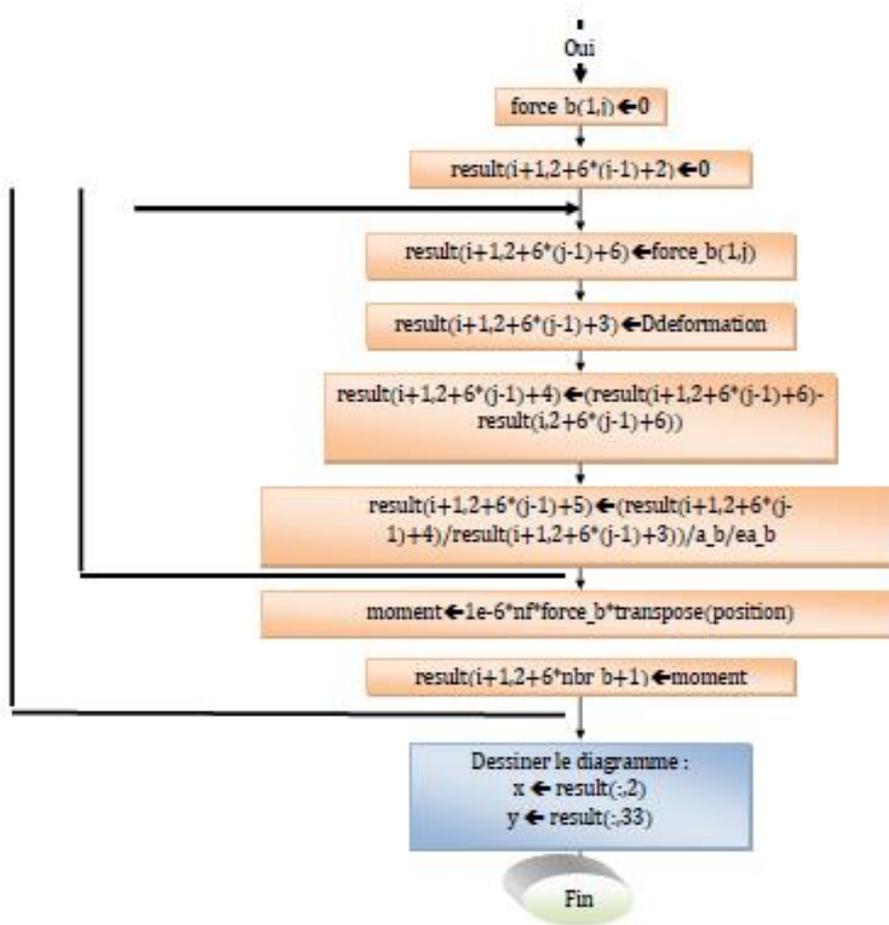
Coefficients partiels de sécurité : $\gamma_{M0}=1,0$; $\gamma_{M1}=1,0$ et $\gamma_{M2}=1,25$

4.4 Organigramme









4.5 Description du code

Dans cette étude numérique, on a suivi les démarches suivantes :

Tout d'abord on calcule l'allongement du boulon en multipliant le bras de levier du boulon par la rotation supposée, ce qui nous mène à calculer la déformation qui est la fraction de l'allongement par la longueur du boulon. A partir de la déformation on détermine le cas de calcul de la force sollicitée sur le boulon. Dans le cas où la déformation est inférieure ou égale à la déformation élastique la force sera :

- Egale à la section du boulon multiplié par le module de Young multiplié par la déformation obtenue déjà.

$$f = a_b \times E a_b * \varepsilon \quad (4.1)$$

Dans le cas ou la déformation sera inférieur a la rupture (plastique) la force sera calculé comme suite :

- Section du boulon fois l'addition de la limite élastique f_y et module de Young qui est multiplié par la soustraction de la déformation du boulon calculé déjà et la déformation plastique.

$$a_b * (f_y_b + (E s_b * (\epsilon - \epsilon_{ps_y_b}))) \quad (4.2)$$

Dans le cas ou la déformation atteint la déformation de rupture la force sera nulle
Il faut aussi prendre en considération le cas ou on sera dans la phase de déchargement la force sera égale à :

$$f = M a_b \times E a_b * \Delta \epsilon \quad (4.3)$$

Dans le cas ou la force sera négative on la prend égale à zéro.

Dans le cas ou le boulon sera sous la semelle inferieur de la poutre la force sera nulle.

Après le calcul des forces sollicitant sur tous les boulons, on calcule le moment sollicitant cela pour la 1ère itération, on effectue toute ces opérations jusqu'à atteindre la rupture de l'assemblage. Voir la **figure 4.5** et **figure 4.11**.

4.6 Interprétation du résultat

4.6.1 Assemblage poteau poutre courbe déplacement-temps (assemblage symétrique et non symétrique) :

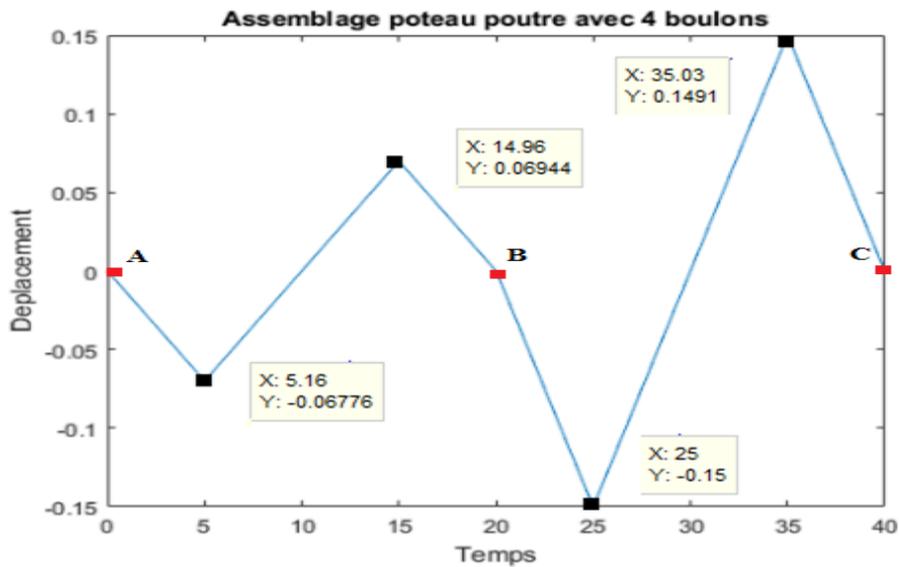


Fig.4.5 courbe déplacement- temps (assemblage symétrique).

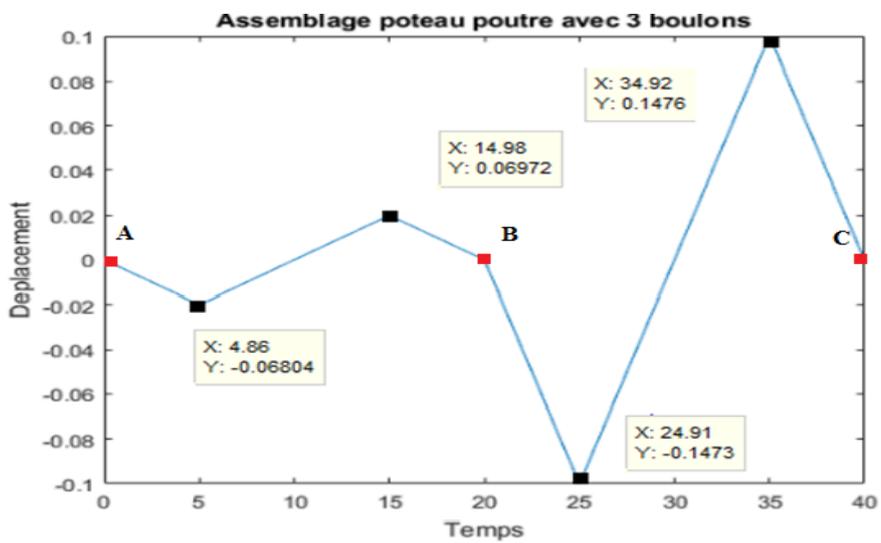


Fig.4.6 courbe déplacement- temps (assemblage non symétrique)

- **Commentaire**

L'application du chargement cyclique est représentée par une courbe de déplacement en fonction du temps, la **figure 4.6** de l'assemblage non symétrique elle contient deux cycles, elle est similaire à l'assemblage symétrique de la **figure 4.5**.

La rotation qui résulte de l'allongement des boulons induit à un déplacement de l'assemblage jusqu'à rupture des boulons de l'assemblage.

- on remarque que le déplacement de l'assemblage est minimal à (l'état initial) dans le 1^{er} cycle voir **fig.4.6 et 4.5**

- dans le 2^{eme} cycle **fig. 4.6 ,4.5** on remarque que le déplacement des deux assemblages a augmenté par le temps jusqu'à la rupture total de l'assemblage

4.6.2 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (symétrique)

L'application de chargement cyclique nous donne le résultat en courbe hystérésis présentée dans la figure suivante, la courbe est non linéaire. Le moment maximal est de **-118.5kN.m** correspondant à une rotation de **-0.00252 rad**.

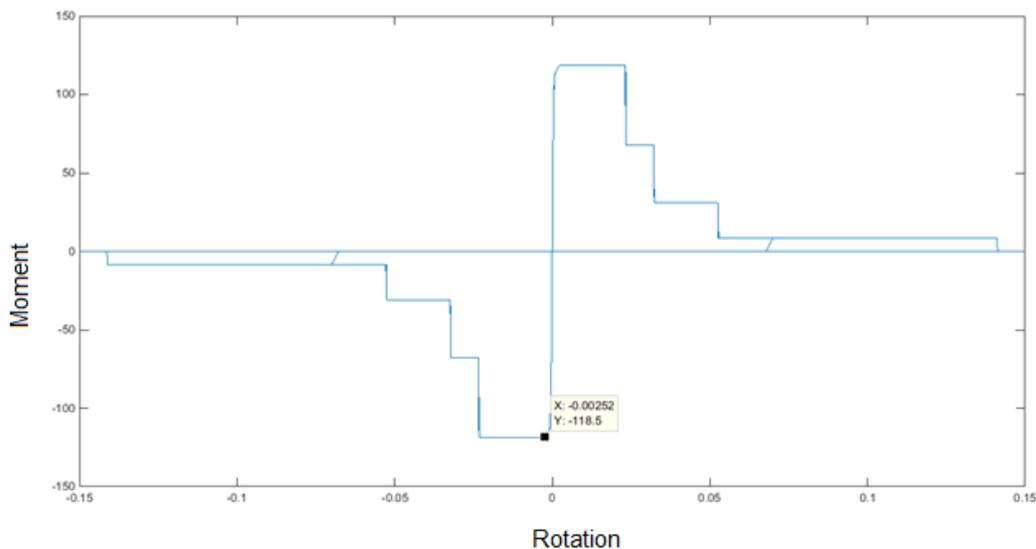


Fig.4.7 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique)

La courbe à la **Figure.4.7** présente une non linéarité due au développement de la plasticité dans les boulons.

1^{ère} phase :

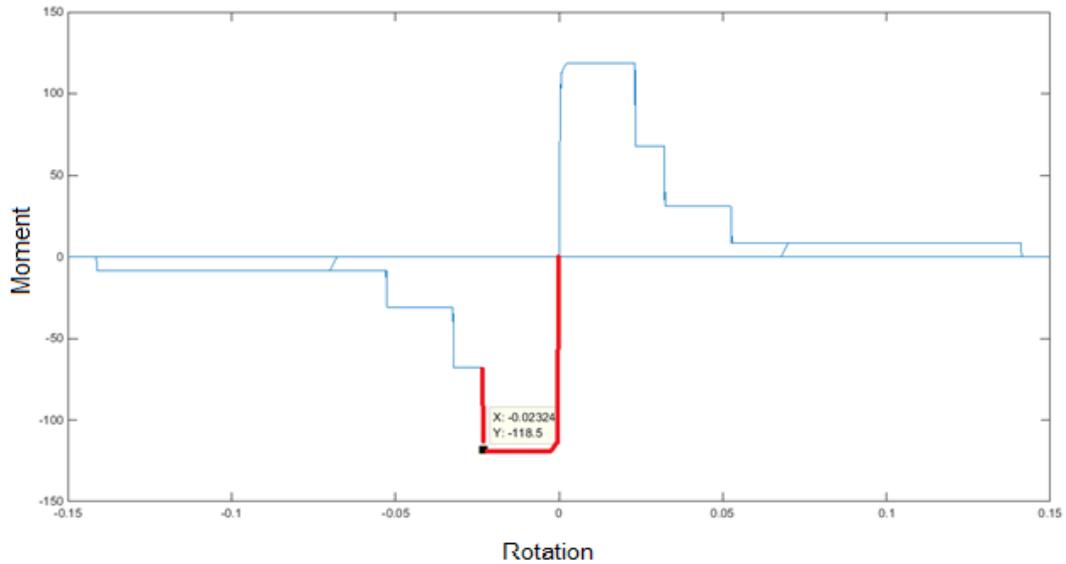


Fig.4.8 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-1)

La première partie de la courbe correspond à la phase chargement de l'assemblage où le moment sollicitant est négatif voir la **figure 4.8** qui nous mène a une plastification de l'assemblage jusqu'à rupture du 1^{ère} boulon (Moment **X= -118.5** ; Rotation **Y= -0.02324**).

2^{ème} phase

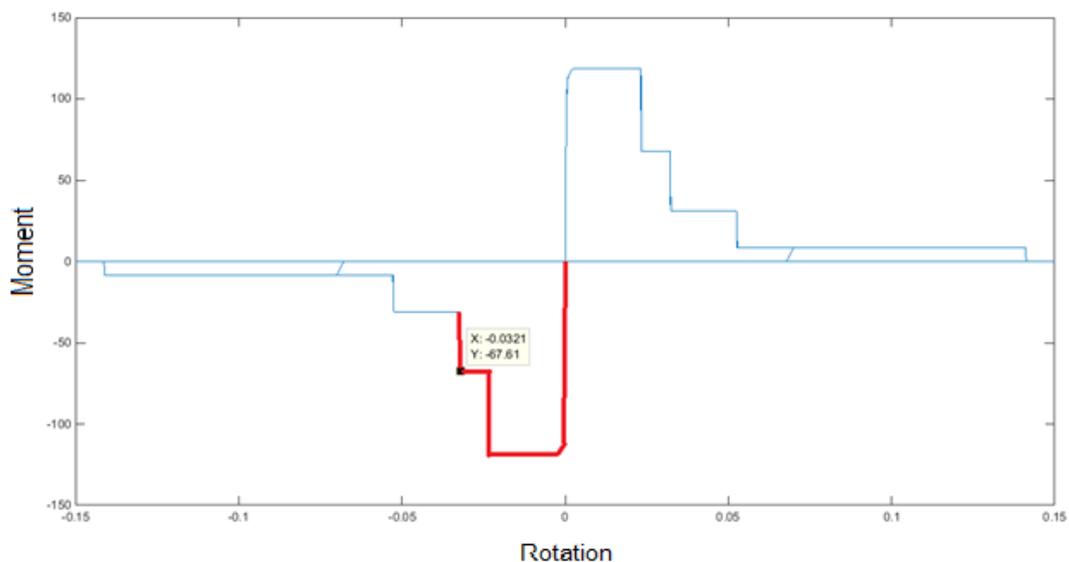


Fig.4.9 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-2)

La deuxième partie de la courbe correspond à la phase **chargement** où le moment sollicitant est négatif voir la **figure 4.9** qui résulte à une rupture du 2^{ème} boulon (Moment **X= -67.61** ; Rotation **Y= -0.0321**)

3^{ème} phase

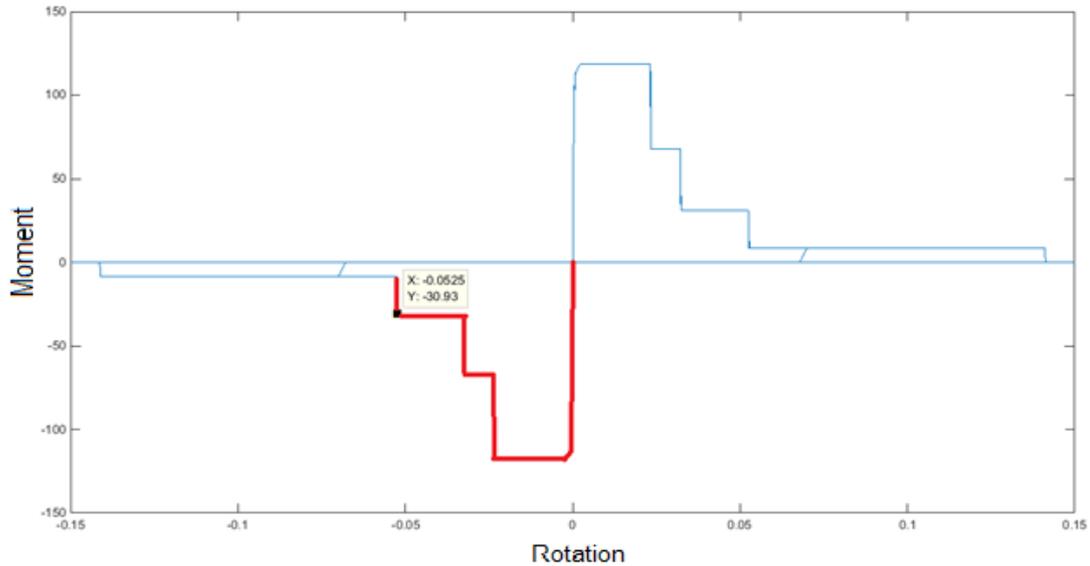


Fig.4.10 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-3).

La troisième partie de la courbe correspond à la rupture du 3^{ème} boulon où le moment sollicitant est négatif voir la **figure 4.10** (Moment **X= -30.93** ; Rotation **Y= -0.0625**).

4^{ème} phase

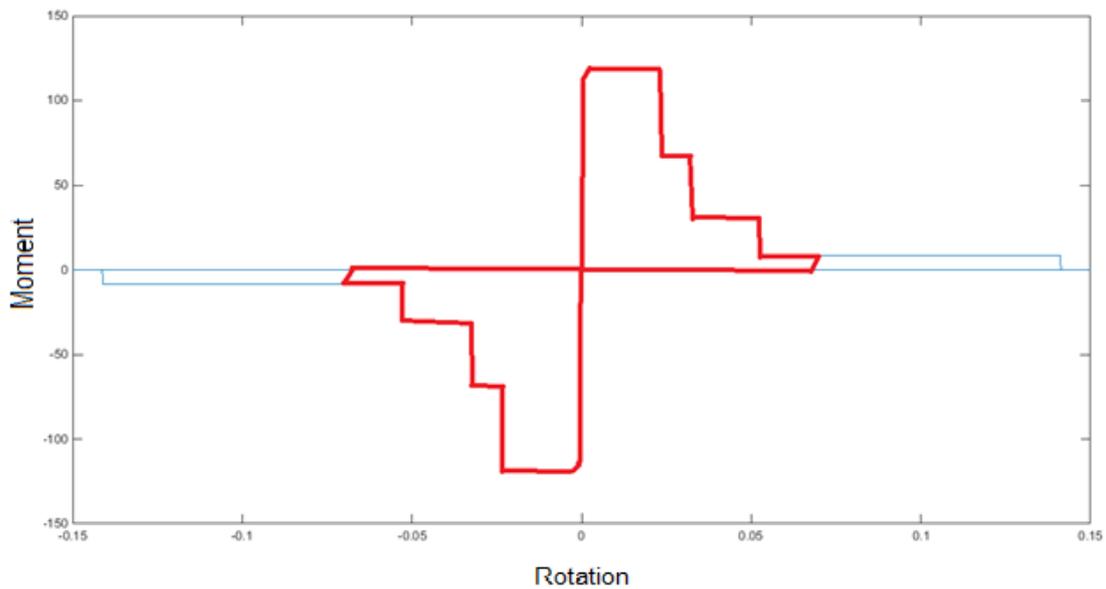


Fig.4.11 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-4)
 La quatrième partie de la courbe correspond au 1^{er} cycle ou le moment sollicitant est positif et négatif voir la **figure 4.11**.

5^{ème} phase

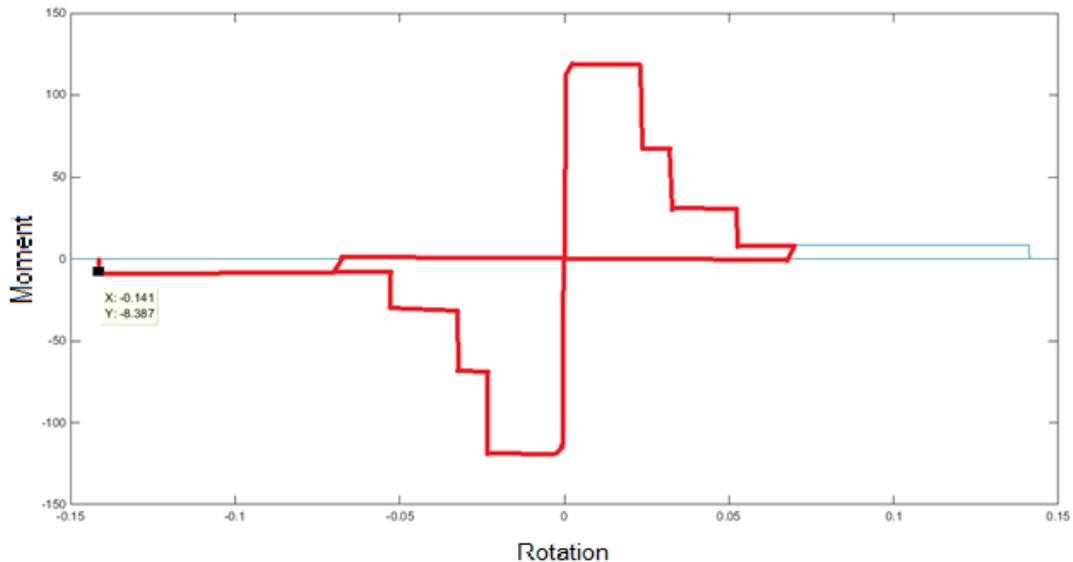


Fig.4.12 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage symétrique phase-5)

La cinquième partie de la courbe correspond à la rupture du 4^{ème} boulon ou le moment sollicitant est négatif voir la **figure 4.12** (Moment **X= -8.387** ; Rotation **Y= -0.141**)

4.6.3 Assemblage poteau poutre sous charge cyclique (non symétrique)

L'application du chargement cyclique nous donne le résultat en courbe hystérésis présentée dans la figure suivante, là courbe est non linéaire. Le moment maximal est de **-131.3kN.m** correspondant à une rotation de **-0.00188 rad**.

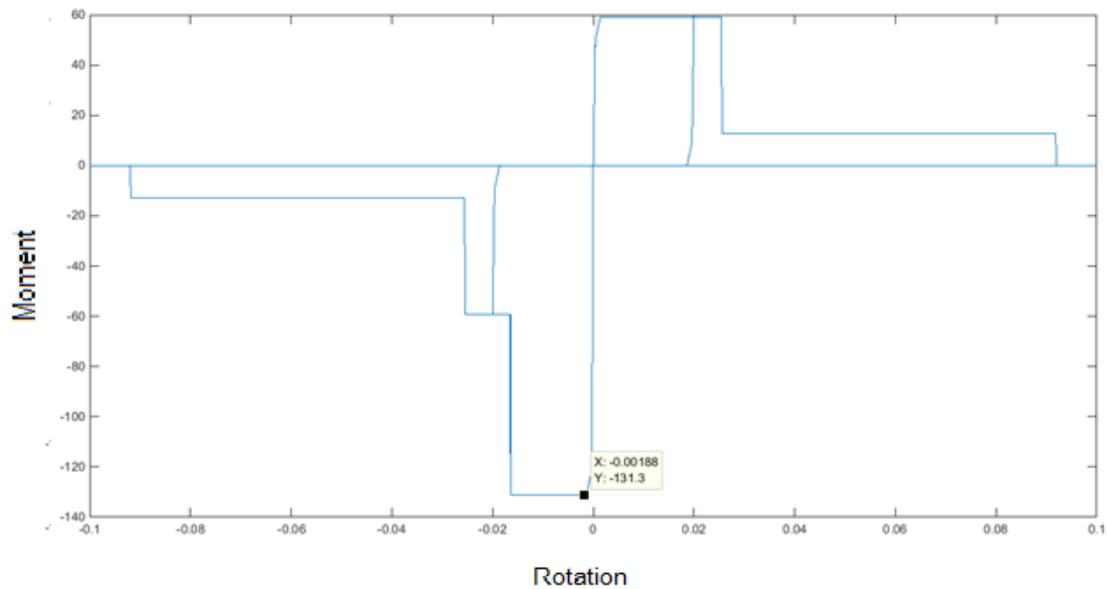


Fig.4.13 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique)

La courbe (**figure 4.13**) présente une non linéarité due au développement de la plasticité des boulons.

1^{ère} phase

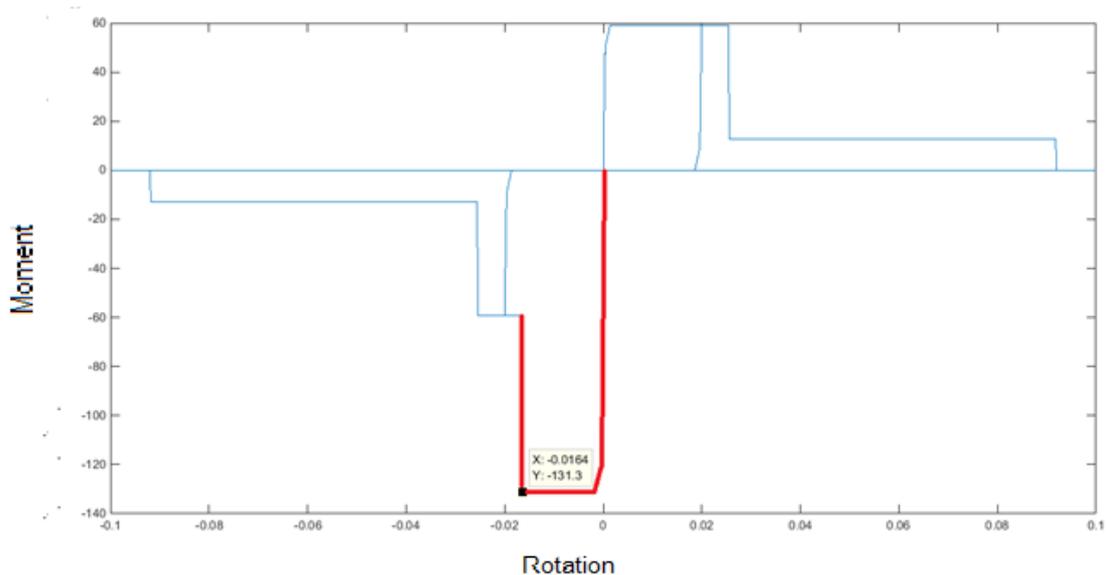


Fig.4.14 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-1)

La première partie de la courbe correspond à la phase chargement de l'assemblage le moment sollicitant est négatif voir (la **figure 4.14**) qui nous mène a une plastification de l'assemblage jusqu'a rupture du 1^{ère} boulon (Moment **X= -131.3**; Rotation **Y= -0.0164**).

2^{ème} phase

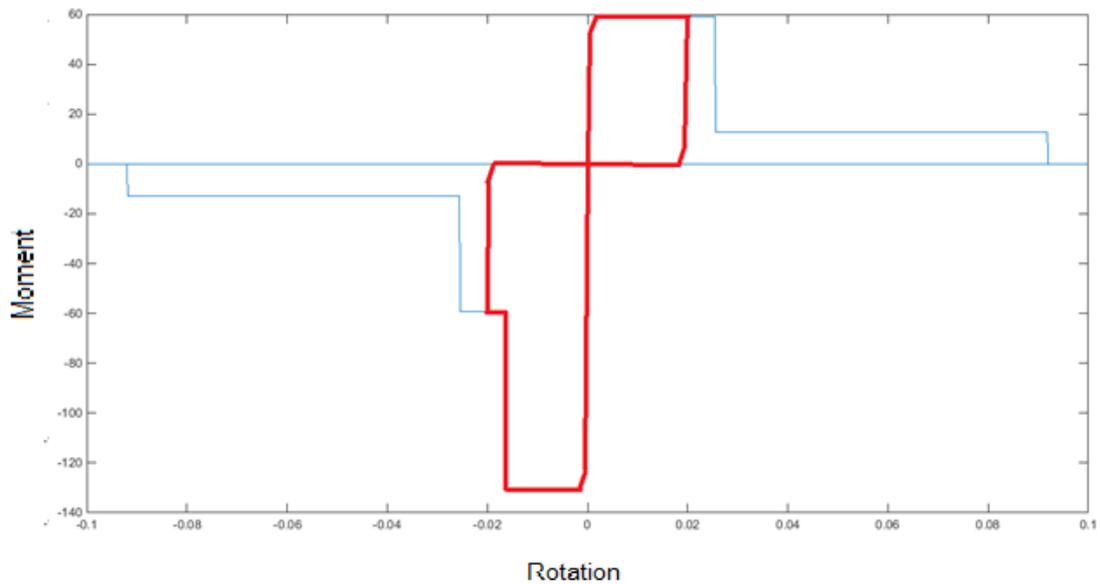


Fig.4.15 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-2)

La deuxième partie de la courbe correspond au 1^{er} cycle ou le moment sollicitant est positif et négatif voir la **figure 4.15**.

3^{ème} phase

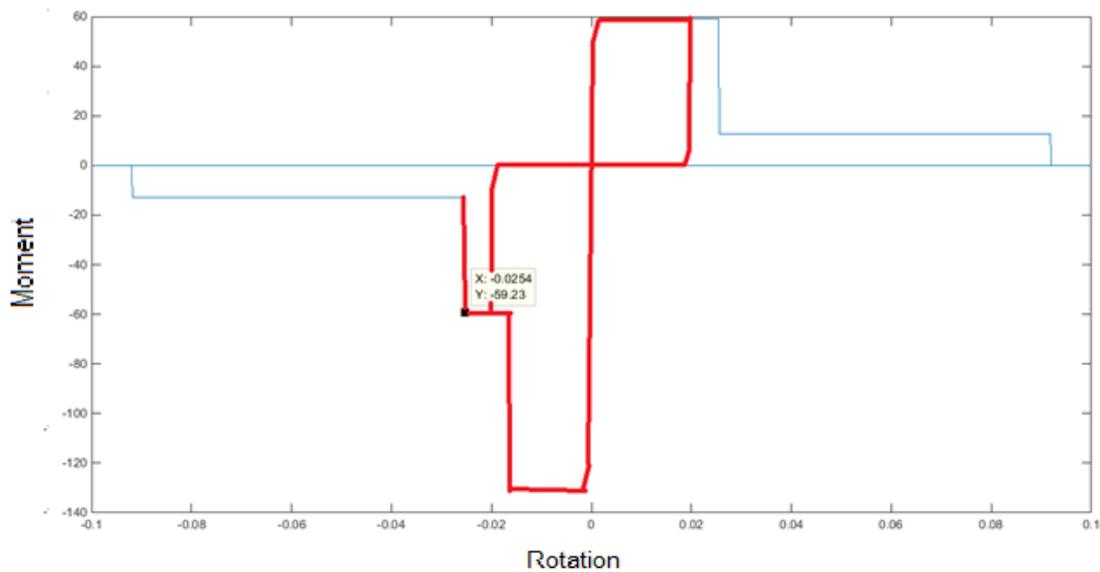


Fig.4.16 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-3)

La troisième partie de la courbe correspond à la phase où le moment sollicitant est négatif voir la **figure 4.16** qui résulte a une rupture du 2^{ème} boulon (Moment **X= -59.23** ; Rotation **Y= -0.0254**)

4^{ème} phase

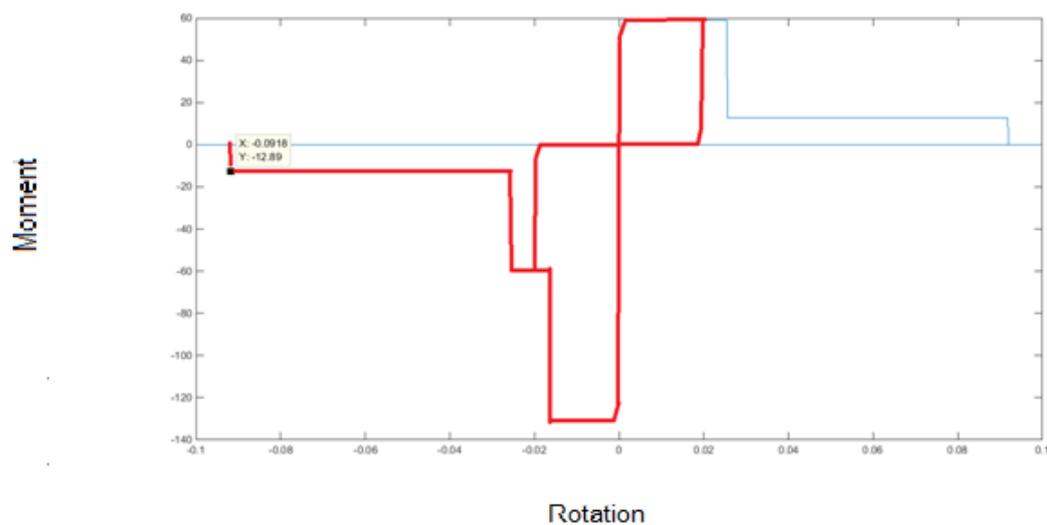


Fig.4.17 Courbe hystérésis moment rotation (assemblage non symétrique phase-4)

La quatrième partie de la courbe correspond à la rupture du 3^{ème} boulon ou le moment sollicitant est négatif voir la **figure 4.17** (Moment **X= -12.89** ; Rotation **Y= -0.0918**).

- **Commentaire**

La charge où le déplacement varie de façon cyclique croît au cours du temps, la rupture elle n'interviendra qu'au bout d'un nombre de cycles dépendant de la sévérité du chargement. Le chargement peut consister à un déplacement imposé soit élastique où plastique que ça soit d'un chargement positif où négatif, les deux cas sont similaires comme indique dans l'exemple 1 voir **figure 4.7**.

Il existe une charge limite que les boulons ne peuvent pas dépasser. Dans le cas d'un chargement en force qui nous donne un moment maximal sollicitant comme indiqué dans le 2^{ème} exemple rupture du 1^{er} boulon voir **figure 4.14** ou après un chargement cyclique répétitif qui nous donne une fatigue des boulons, il y'aura une rupture du 1^{er} boulon **Fig.4.8** exemple 1, qui nous mène ensuite à la rupture des autres boulons qui signifie rupture de l'assemblage, **Fig.4.12** exemple 1.

4.7 Conclusion :

L'application de chargement cyclique nous a donné les résultats en courbe hystérésis (Moment-Rotation) des assemblages présentés dans les figures (**Fig.4.1, Fig.4.3**) les courbe sont non linéaire

Exemple 1 c'est un assemblage symétrique par rapport à l'axe horizontal de la platine.

On remarque dans la courbe (Moment-Rotation) que la rupture des 4 boulons dans le cas où on a le moment positif est la même dans le cas où on a le moment négatif, Le moment maximal sollicitant est similaire dans les deux directions.

Exemple 2 c'est un assemblage non symétrique par rapport à l'axe horizontal de la platine. Dans la courbe (Moment-Rotation) la rupture du 2^{ème} et 3^{ème} boulon dans le cas où on a le moment positif est la même dans le cas où on a le moment négatif par contre elle n'est pas symétrique pour le 1^{er} boulon. Voir la **figure 4.14**.

Les deux exemples pris ont été utilisés pour expliquer le principe du code présenté par son organigramme en examinant les différents cas possibles selon le comportement des boulons (élastique, plastique, rupture, ...) suivant la variation de signe du chargement, ainsi nous exprimons le comportement du (moment – rotation) d'un assemblage poteau-poutre par plaque d'extrémité, soumis à des charges cycliques ou monotones par une courbe hystérésis.

CONCLUSION GENERAL

Le travail présenté dans ce mémoire de master a été consacré à l'étude d'un assemblage métallique boulonnée de type poteau-poutre avec platine d'about débordante et non débordante sous charges monotones ou cycliques.

Les assemblages dans les structures métalliques permettent d'assurer la continuité entre les éléments, tels que les poteaux et les poutres. La caractérisation du comportement des assemblages n'est pas simple à cause de leur complexité géométrique et mécanique. Cette complexité résulte du nombre d'éléments intermédiaires utilisés (boulons, platine, cornière...).

Le but du travail présenté de ce projet de fin d'études était d'analyser le comportement de l'assemblage sous charge cyclique, L'étude a permis de présenter les modes de ruine observés numériquement à l'aide d'un programme que nous avons développé sous Matlab et qui nous permet de tracer les courbes moment-rotation de l'assemblage.

La méthode des composantes présentée par l'EUROCODE-3 est largement développée et utilisée pour l'étude du comportement réel des assemblages métalliques. Les caractéristiques principales des assemblages sont le moment de rotation $M_{j,Rd}$ et la rigidité initiale $S_{j,ini}$ des deux assemblages traités qui nous a menés aux conclusions suivantes :

- La rigidité et le moment résistant du 1^{er} assemblage où le moment appliqué est positif sont supérieurs au 2^{ème} assemblage avec moment négative vu le positionnement des boulons.
- La rupture des 4 boulons dans le cas où on a le moment positif est le même dans le cas où on a le moment négatif ce qui nous mène à remarquer que le moment maximal sollicitant est similaire dans les deux directions ; alors que dans l'exemple non symétrique, on aura le moment maximal sollicitant en une seule direction par conséquent on obtient la rupture du 1^{er} boulon.

Références Bibliographiques

- [1] **Abidelah A**, *Analyse numérique du comportement d'assemblages métalliques - Approche numérique et validation expérimentale-*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal- ClermontII, 2009, 195p.
- [2] **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
- [3] **MUZEAU J.P.** – Constructions métalliques-Moyens d'assemblages. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II. Novembre 2010
- [4] **JASPART J.P.** –Elément de stabilité des structures de bâtiments métalliques. Notes destinées aux étudiants de CUST de Clermont-Ferrand. 1998
- [5] **Manfred A, Hirt R.B**, Construction fondamentale V10 : notions fondamentales et méthodes de dimensionnement. Presses polytechniques et universitaires romandes (école polytechnique fédérale de Lausanne).
- [6] **Mohamed Elamine Khoualdi**, Contribution a la justification des structures a étages multiples a assemblages semi-rigide et résistance partielle, mémoire, universite chekh laarbi tebessi – tebessa, 2014, 33p.
- [7] [8] [9] **Abidelah A**, *Analyse numérique du comportement d'assemblages métalliques - Approche numérique et validation expérimentale-*, Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal- ClermontII, 2009, 22p ,23p,32p ,
- [10] **Koraib Ali**, modélisation des assemblages métalliques en zone sismique, mémoire, Université de Tlemcen Faculté de Technologie, 2015, 46p.

Annexes

Annexe A : Tableau des sections des profilés

EUROPEAN I BEAMS: Dimensions and Properties (IPE)

Designation	G	h	b	t _w	t _f	r	A	i _y	d	I _y	I _z	i _y	i _z	W _y	W _z	W _{ply}	W _{plz}	I _w	I _T
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	cm ⁴	cm ⁴	cm	cm	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	dm ⁶	cm ⁴
IPE 100 A	6.89	98	55	3.6	4.7	7	8.78	88.6	74.6	141	13.1	4.01	1.22	28.8	4.77	33.0	7.54	0.000	0.727
IPE 100	8.10	100	55	4.1	5.7	7	10.3	88.6	74.6	171	15.9	4.07	1.24	34.2	5.79	39.4	9.15	0.000	1.16
IPE 120 A	8.66	118	64	3.8	5.1	7	11.0	107.4	93.4	257	22.4	4.83	1.42	43.8	7.00	49.9	11.0	0.001	0.996
IPE 120	10.4	120	64	4.4	6.3	7	13.2	107.4	93.4	318	27.7	4.90	1.45	53.0	8.65	60.7	13.6	0.001	1.69
IPE 140 A	10.5	138	73	3.8	5.6	7	13.4	126.2	112.2	435	36.4	5.70	1.65	63.3	9.98	71.6	15.5	0.002	1.34
IPE 140	12.9	140	73	4.7	6.9	7	16.4	126.2	112.2	541	44.9	5.74	1.65	77.3	12.3	88.3	19.2	0.002	2.40
IPE 140 R	14.4	142	72	5.3	7.8	7	18.4	126.4	112.4	611	48.8	5.77	1.63	86.1	13.5	99.1	21.3	0.002	3.36
IPE 160 A	12.7	157	82	4.0	5.9	9	16.2	145.2	127.2	689	54.4	6.53	1.83	87.8	13.3	99.1	20.7	0.003	1.93
IPE 160	15.8	160	82	5.0	7.4	9	20.1	145.2	127.2	869	68.3	6.58	1.84	109	16.7	124	26.1	0.004	3.54
IPE 160 R	17.7	162	81	5.6	8.5	9	22.6	145.0	127.0	989	75.7	6.62	1.83	122	18.7	140	29.4	0.004	5.05
IPE 180 A	15.4	177	91	4.3	6.5	9	19.6	164.0	146.0	1063	81.9	7.37	2.05	120	18.0	135	28.0	0.006	2.67
IPE 180	18.8	180	91	5.3	8.0	9	23.9	164.0	146.0	1317	101	7.42	2.05	146	22.2	166	34.6	0.007	4.73
IPE 180 O	21.3	182	92	6.0	9.0	9	27.1	164.0	146.0	1505	117	7.45	2.08	165	25.5	189	39.9	0.009	6.65
IPE 180 R	22.1	183	89	6.4	9.5	9	28.1	164.0	146.0	1554	112	7.44	2.00	170	25.2	195	39.7	0.008	7.63
IPE 200 A	18.4	197	100	4.5	7.0	12	23.5	183.0	159.0	1591	117	8.23	2.23	162	23.4	182	36.5	0.011	4.14
IPE 200	22.4	200	100	5.6	8.5	12	28.5	183.0	159.0	1943	142	8.26	2.24	194	28.5	221	44.6	0.013	6.92
IPE 200 O	25.1	202	102	6.2	9.5	12	32.0	183.0	159.0	2211	169	8.32	2.30	219	33.1	249	51.9	0.016	9.36
IPE 200 R	26.6	204	98	6.6	10.5	12	33.9	183.0	159.0	2363	166	8.35	2.21	232	33.8	265	53.2	0.016	11.7
IPE 220 A	22.2	217	110	5.0	7.7	12	28.3	201.6	177.6	2317	171	9.05	2.46	214	31.2	240	48.5	0.019	5.68
IPE 220	26.2	220	110	5.9	9.2	12	33.4	201.6	177.6	2772	205	9.11	2.48	252	37.3	285	58.1	0.023	9.03
IPE 220 O	29.4	222	112	6.6	10.2	12	37.4	201.6	177.6	3134	240	9.16	2.53	282	42.8	321	66.9	0.027	12.2
IPE 220 R	31.6	225	108	6.7	11.8	12	40.2	201.4	177.4	3474	249	9.29	2.49	309	46.1	352	71.8	0.028	16.4
IPE 240 A	26.2	237	120	5.2	8.3	15	33.3	220.4	190.4	3290	240	9.94	2.68	278	40.0	312	62.4	0.031	8.50
IPE 240	30.7	240	120	6.2	9.8	15	39.1	220.4	190.4	3892	284	9.97	2.69	324	47.3	367	73.9	0.038	13.0
IPE 240 O	34.3	242	122	7.0	10.8	15	43.7	220.4	190.4	4369	329	10.0	2.74	361	53.9	410	84.4	0.044	17.1
IPE 240 R	37.3	245	118	7.5	12.3	15	47.5	220.4	190.4	4823	339	10.1	2.67	394	57.4	450	90.1	0.046	22.8

EUROPEAN WIDE FLANGE BEAMS: Dimensions and Properties

Designation	Weight per Metre G	Depth of Section h	Weight of Section b	Thickness of Web t _w	Thickness of Flange t _f	Radius of the Root Fillet r	Area of Section A	Inner Depth between Flanges t _l	Depth of Straight Portion of Web d	Moment of Inertia		Radius of Gyration		Elastic Sectional Modulus		Plastic Section Modulus		Warping Constant I _w	Torsional Constant I _t
										I _y	I _z	i _y	i _z	W _y	W _z	W _{pl,y}	W _{pl,z}		
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm	cm ⁴	cm ⁴	cm	cm	cm ³	cm ³	cm ³	cm ³	dm ⁶	cm ⁴
HE 100 AA	12.2	91	100	4.2	5.5	12	15.6	80	56	237	92.1	3.89	2.43	52.0	18.4	58.4	28.4	0.002	2.33
HE 100 A	16.7	96	100	5.0	8.0	12	21.2	80	56	349	134	4.06	2.51	72.8	26.8	83.0	41.1	0.003	5.28
HE 100 B	20.4	100	100	6.0	10.0	12	26.0	80	56	450	167	4.16	2.53	89.9	33.5	104	51.4	0.003	9.33
HE 120 AA	14.6	109	120	4.2	5.5	12	18.6	98	74	413	159	4.72	2.93	75.8	26.5	84.1	40.6	0.004	2.59
HE 120 A	19.9	114	120	5.0	8.0	12	25.3	98	74	606	231	4.89	3.02	106	38.5	119	58.9	0.006	6.04
HE 120 B	26.7	120	120	6.5	11.0	12	34.0	98	74	864	318	5.04	3.06	144	52.9	165	81.0	0.009	13.9
HE 140 AA	18.1	128	140	4.3	6.0	12	23.0	116	92	719	275	5.59	3.45	112	39.3	124	59.9	0.010	3.43
HE 140 A	24.7	133	140	5.5	8.5	12	31.4	116	92	1033	389	5.73	3.52	155	55.6	173	84.8	0.015	8.10
HE 140 B	33.7	140	140	7.0	12.0	12	43.0	116	92	1509	550	5.93	3.58	216	78.5	245	120	0.023	20.2
HE 160 AA	23.8	148	160	4.5	7.0	15	30.4	134	104	1283	479	6.50	3.97	173	59.8	190	91.4	0.024	6.43
HE 160 A	30.4	152	160	6.0	9.0	15	38.8	134	104	1673	616	6.57	3.98	220	76.9	245	118	0.031	12.1
HE 160 B	42.6	160	160	8.0	13.0	15	54.3	134	104	2492	889	6.78	4.05	312	111	345	170	0.048	31.3
HE 160 M	76.2	180	166	14.0	23.0	15	97.1	134	104	5098	1759	7.25	4.26	566	212	675	325	0.108	161
HE 180 AA	28.7	167	180	5.0	7.5	15	36.5	152	122	1967	730	7.34	4.47	236	81.1	258	124	0.046	8.31
HE 180 A	35.5	171	180	6.0	9.5	15	45.3	152	122	2510	925	7.45	4.52	294	103	325	156	0.060	14.9
HE 180 B	51.2	180	180	8.5	14.0	15	65.3	152	122	3631	1363	7.66	4.57	426	151	481	231	0.094	42.2
HE 180 M	88.9	200	186	14.5	24.0	15	113	152	122	7483	2580	8.13	4.77	748	277	883	425	0.200	201
HE 200 AA	34.6	186	200	5.5	8.0	18	44.1	170	134	2944	1058	8.17	4.92	317	107	347	163	0.085	12.5
HE 200 A	42.3	190	200	6.5	10.0	18	53.8	170	134	3952	1336	8.28	4.98	389	134	429	204	0.108	21.0
HE 200 B	61.3	200	200	9.0	15.0	18	78.1	170	134	5696	2003	8.54	5.07	570	200	643	306	0.171	59.7
HE 200 M	103	220	206	15.0	25.0	18	131	170	134	10640	3651	9.00	5.27	967	354	1135	543	0.347	258
HE 220 AA	40.4	205	220	6.0	8.5	18	51.5	188	152	4170	1510	9.00	5.42	407	137	445	209	0.146	15.5
HE 220 A	50.5	210	220	7.0	11.0	18	64.3	188	152	5410	1955	9.17	5.51	515	178	568	271	0.194	28.6
HE 220 B	71.5	220	220	9.5	16.0	18	91.0	188	152	8091	2943	9.43	5.59	736	258	827	394	0.296	77.0
HE 220 M	117	240	226	15.5	26.0	18	149	188	152	14600	5012	9.89	5.79	1217	444	1419	679	0.574	313
HE 240 AA	47.4	224	240	6.5	9.0	21	60.4	206	164	5835	2077	9.83	5.87	521	173	571	264	0.240	22.1
HE 240 A	60.3	230	240	7.5	12.0	21	76.8	206	164	7763	2769	10.1	6.00	675	231	745	352	0.329	42.1
HE 240 B	83.2	240	240	10.0	17.0	21	106	206	164	11260	3923	10.3	6.08	938	327	1053	498	0.488	104
HE 240 M	157	270	248	18.0	32.0	21	200	206	164	24290	8158	11.0	6.39	1799	657	2117	1006	1.15	626
HE 260 AA	54.1	244	260	6.5	9.5	24	69.0	225	177	7981	2788	10.8	6.36	654	214	714	328	0.383	30.1
HE 260 A	68.2	250	260	7.5	12.5	24	86.8	225	177	10450	3668	11.0	6.50	836	282	920	430	0.517	54.2
HE 260 B	93.0	260	260	10.0	17.5	24	118	225	177	14920	5135	11.2	6.58	1148	395	1283	602	0.755	127
HE 260 M	172	290	268	18.0	32.5	24	220	225	177	31310	10450	11.9	6.90	2159	780	2524	1192	1.73	720

Annexe B : Caractéristique géométrique des boulons

Désignation	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24	M27	M30
d (mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24	27	30
d ₀ (mm)	9	11	13	15	18	20	22	24	26	30	33
A (mm ²)	50.3	78.5	113	154	201	254	314	380	452	573	707
A _s (mm ²)	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
Tôle usuelle (mm)	2	3	4	5	6	7	8	10-14	>14	-	-
Cornière usuelle(mm)	30	35	40	50	60	70	80	120	>120	-	-
d _m (mm)	14	18.3	20.5	23.7	24.58	29.1	32.4	34.5	38.8	44.2	49.60