

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

MINISTRE DE L'INSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



جامعة محمد بوضياف - المسيلة -

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF-M'SILA-



كلية العلوم و الهندسة

FACULTE DES SCIENCES ET SCIENCES DE L'INGENIER

قسم الهندسة المدنية

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE

MASTER

OPTION : STRUCTURE

THEME :

*Modélisation par élément finis des assemblages  
mixtes de type (poutre-poteau) par platine  
d'extrémité boulonnée*

Dirige par:

Professeur TITOU MESSAoud

Doctorant BOULKSIBAT Nourddine

présente par:

Mr. HAMMOU Yassine

Mr. MAAROUF Houssam eddine

Promotion 2019

## **REMERCIEMENTS**

- ❖ Nous tenons tout d'abord à remercier Dieu le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce Modeste travail.
- ❖ En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur Mr : Professeur TITOUM Messaoud et notre co-encadreur Mr : BOULKSIBAT Noureddine ses précieux conseils et ses aides durant toute la période du travail.
- ❖ Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail Et de l'enrichir par leurs propositions.
- ❖ Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

## *Dédicaces*

### **De la part de HAMMOU YASSINE**

Je dédie ce modeste travail à :

- Mes parents pour sa tendresse, sa patience et ses encouragements. Je les remercie pour leur confiance et que « Dieu leur accordent une très longue vie »
- Mes très chers frères, et mes chères sœurs en connaissance de tous les sacrifices,
- les efforts, l'amour et la gentillesse qu'il m'a toujours apportée.
- Mes chères amies ainsi que toutes promos mastères et a personne qui me connaisse.

### **De la part de MAAROUF HOUSSAM EDINNE**

Je dédie ce modeste travail à :

- A mon grand-père
- À mes très chers parents qui ont toujours été là pour moi, qui m'ont guidé durant les moments les plus pénibles de ce long chemin et qui m'ont donné un magnifique modèle de labeur et de persévérance.
- À Mes amis et collègues.

## **Résumé :**

Le présent travail est consacré à l'étude d'un assemblage mixte de type poutre-poteau par platine d'extrémité boulonnée.

Nous avons commencé par la présentation de la conception des assemblages poutre-poteau. Ensuite, nous avons montré comment déterminer les caractéristiques (Moment-Rotation) d'un assemblage poutre-poteau par la méthode des composantes recommandée par l'EUROCODE4. Enfin, nous avons fait une tentative de modélisation par éléments finis d'un assemblage mixte poutre-poteau par platine d'extrémité boulonnée en utilisant le logiciel ANSYS.

**Mots clés :** Assemblage poteau-poutre, Semi rigidité, Eurocode4, Modélisation par Eléments Finis, ANSYS.

## ملخص

يكرس العمل الحالي لدراسة مجموعة مختلطة من شعاع إلى عمود بواسطة لوحة نهاية مسدودة بدأنا من خلال تقديم تصميم التجميعات شعاع إلى العمود. بعد ذلك ، أظهرنا كيفية تحديد خصائص لحظات الدوران الخاصة بتجميع الحزمة إلى العمود بواسطة طريقة المكون الموصى بها من قبل أخيرًا ، قمنا بمحاولة نمذجة العناصر المحددة لمزيج الشعاع إلى العمود بواسطة EUROCODE4. ANSYS. لوحة نهاية مثبتة باستخدام برنامج ، نمذجة العناصر المحدودة ، Eurocode4 الكلمات المفتاحية: تجميع ما بعد الشعاع ، نصف الصلابة ، ANSYS.

## **Abstract**

The present work is devoted to the study of a mixed beam-to-column type assembly by bolted end plate.

We began by presenting the design of beam-to-column assemblies. Then, we showed how to determine the Moment-Rotation characteristics of a beam-to-column assembly by the component method recommended by EUROCODE4. Finally, we made an attempt at finite element modeling of a beam-to-column combination by bolted end plate using the ANSYS software.

Key words: Post-beam assembly, Semi-stiffness, Eurocode4, Finite Element Modeling, ANSYS.

# ***SOMMAIRE***

Remerciement .....	I
Dédicaces .....	II
Résumé.....	III
ملخص .....	IV
Abstract .....	V

LISTE DES FIGURES

LISTE DES TABLEAU

NOTATIONONS ET SYMBOLES

INTRODUCTION GENERALE .....	01
-----------------------------	----

## ***CHAPITRE I : Généralités sur les assemblages poteau-poutre***

I-1. INTRODUCTION.....	06
I-2. DEFINITION ET ROLE DE L'ASSEMBLAGE.....	06
I-3. TYPES D'ASSEMBLAGES .....	08
I-3-1 ASSEMBLAGE POUTRE- POTEAU .....	08
I-3-1-1.TYPE D'ASSEMBLAGE POUTRE-POTEAU .....	09
I-3-2 ASSEMBLAGE DE CONTINUITÉ.....	10
I-3-3. ASSEMBLAGE DE PIED DE POTEAU.....	11
I-4. MOYENS D'ASSEMBLAGE.....	11
I-4-1. LES ASSEMBLAGES BOULONNES. ....	11
I-4-1-1.LE RIVETAGE.....	11
I-4-1-1-1. LE RIVETAGE A ANNEAU.....	12
I-4-1-1-2. BOULONAGE.....	12
I-4-2. LES ASSEMBLAGE SOUDES.....	15
I-4-3. LES ASSEMBLAGES CHIMIQUE (COLLES) .....	16
I-5. FONCTIONNEMENT DES ASSEMBLAGES.....	16
I-5-1. FONCTIONNEMENT PAR OBSTACLE .....	16
I-5-2. FONCTIONNEMENT PAR ADHERENCE .....	16
I-5-3. FONCTIONNEMENT PAR MIXTE.....	16
I-6. CLASSIFICATION DES ASSEMBLAGES POUTRE-POTEAU SELON L'EC3 ,4.....	16

## **CHAPITRE II: Caractérisation d'un assemblage poutre - poteau par la méthode des composantes selon l'EUROCODE 4**

II -1. INTRODUCTION .....	19
II -2. METHODE DES COMPOSANTES .....	19
II -3. APPLICATION DE LA METHODE DES COMPOSANTES AUX D'ASSEMBLAGE MIXTE AVEC PLATINE D'EXTREMITE .....	20
II -3-1. ASSEMBLAGE AVEC PLATINE D'EXTREMITE NON DEBORDANTE .....	21
A. Calcul du moment résistant.....	21
B. rigidité initiale $S_{j, ini}$ .....	23
C. Calcul des propriétés mécaniques de l'assemblage.....	25

## **CHAPITRE III : Exemples d'application sur la méthode des composantes**

III-1. EXEMPLE D'APPLICATION.....	32
EXEMPLE 01 : POTEAU EN HEB140 ET POUTRE EN IPE220.....	32
III-2. CARACTERISTIQUES DE LA POUTRE MIXTE.....	33
III-2-1. LARGEUR PARTICIPANTE DE LA DALLE EN BETON.....	33
III-2-2. DEGRE DE CONNEXION.....	33
III-2-3. MOMENT RESISTANTS PLASTIQUES DE LA POUTRE MIXTE.....	34
III-2-4. MOMENT D'INERTIE DE LA POUTRE MIXTE.....	35
III-3. CARACTERISTIQUES DE L'ASSEMBLAGE MIXTE POUTRE-POTEAU.....	36
III-3-1. RIGIDITE INITIALE DE L'ASSEMBLAGE $S_{j, ini}$ .....	37
III-3-2. MOMENT RESISTANT DE L'ASSEMBLAGE $M_{j, rd}$ .....	38
III-3-3. CAPACITE DE ROTATION DE L'ASSEMBLAGE $\varphi_{cd}$ .....	39
III-4. CLASSIFICATION DES ASSEMBLAGES POUTRE - POTEAU.....	39
EXEMPLE 02 : POTEAU EN HEB200 POUTRE EN IPE300.....	41
EXEMPLE 02 : POTEAU EN HEB300POUTRE EN IPE450.....	43

**Chapitre IV: Tentative de modélisation par éléments finis  
d'un assemblage mixte (poutre-poteau)**

IV.1. INTRODUCTION.....	46
IV.2.SYSTEME D'UN ASSEMBLAGE MIXTE (POUTRE-POTEAU) PAR PLATINE D'EXTREMITE BOULONNEE.....	46
IV.3. MODELE D'ELEMENT FINIS.....	47
IV.3.1. TYPE D'ELEMENT FINIS UTILISES.....	48
IV.3.2. MAILLAGE ET CONDITION AUX LIMITES.....	50
IV.3.3. MODELISATION DES MATERIAUX.....	51
IV.4. VALIDATION DU MODELE PROPOSE.....	53
CONCLUSION GENERALE .....	56
REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE.....	57

# ***LISTES DES FIGURES***

## **CHAPITRE I**

<b>Figure 1-1:</b> Différence entre attache et assemblage .....	07
<b>Figure1-2:</b> Exemple d'un assemblage mixte (poutre mixte – poteau métallique).....	07
<b>Figure 1-3:</b> Différents types d'assemblages dans une structure métallique.....	08
<b>Figure1-4:</b> Assemblage poteau poutre .....	09
<b>Figure1-5:</b> assemblage poutre poteau par platine d'extrémité débordante ou limite .....	09
<b>Figure1-6:</b> Assemblage par tasseau et plaque de contact.....	10
<b>Figure1-7:</b> Assemblages par cornières .....	10
<b>Figure1-8:</b> Assemblage continuité .....	10
<b>Figure1-9:</b> Assemblage de pied de poteau .....	11
<b>Figure1-10:</b> Rivet .....	12
<b>Figure1-11:</b> Boulon de charpente et boulon à haute résistance.....	14
<b>Figure1-12:</b> Assemblages soudés .....	15

## **CHAPITRE II**

<b>Figure 2-1 :</b> Modélisation simplifiée selon l'EN 1994-1-1 EC-4 .....	20
<b>Figure 2-2 :</b> assemblage mixtes avec platine non débordante .....	21
<b>Figure2-3 :</b> Distribution des efforts intérieurs.....	22
<b>Figure 2-4:</b> Modèle de ressort pour un assemblage poutre-poteau avec platine d'extrémité non débordante .....	24

## **CHAPITRE III**

<b>Figure 3.1 :</b> Schéma statique de l'ossature étudié.....	32
<b>Figure 3.2 :</b> Assemblage mixte poutre-poteau par platine d'extrémité.....	36
<b>Figure 3.3 :</b> Courbe de comportement moment-rotation.....	39
<b>Figure 3.4 :</b> Classification des assemblages mixtes.....	39
<b>Figure 3.5 :</b> Vue en 3D de l'assemblage (Exemple2).....	41
<b>Figure 3.6 :</b> Détails de la poutre mixte.....	42
<b>Figure 3.7 :</b> La Platine d'extrémité.....	42
<b>Figure 3.8 :</b> Vue en 3D de l'assemblage (Exemple3).....	43

<b>Figure 3.9</b> : Détails de la poutre mixte.....	43
<b>Figure 3.10</b> : La Platine d'extrémité.....	44

## **CHAPITRE IV**

<b>Figure 4.1</b> : Assemblage mixte (poutre-poteau) par platine d'extrémité boulonnée.....	47
<b>Figure 4.2</b> : Géométrie de l'élément SOLID65.....	48
<b>Figure 4.3</b> : Géométrie de l'élément LINK8.....	48
<b>Figure 4.4</b> : Géométrie de l'élément SOLID45.....	49
<b>Figure 4.5</b> : Géométrie de l'élément BEAM189.....	49
<b>Figure 4.6</b> : Eléments de contact - CONTA173 et TARGE170.....	50
<b>Figure 4.7</b> : Maillage et conditions aux limites.....	51
<b>Figure 4.8</b> : Diagramme (contrainte – déformation) pour le béton.....	52
<b>Figure 4.9</b> : Diagramme contrainte-déformation pour l'acier.....	53
<b>Figure 4.10</b> : Assemblage mixte (poutre-poteau) par plaque d'extrémité boulonnée testé par Richard Liew.....	54

# ***LISTE DES TABLEAUX***

## **CHAPITRE I**

<b>Tableau 1.1.</b> Caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons.....	12
<b>Tableau 1.2 :</b> Caractéristiques Mécaniques des boulons selon EC3.....	13
<b>Tableau 1.3 :</b> Caractéristiques géométriques des boulons.....	13

## **CHAPITRE II**

<b>Tableau 2.1 :</b> Résume la méthode des composantes pour ce type d'assemblage.....	30
---	----

## NOTATIONS ET SYMBOLES

### A :

$A_c$  : Aire de la section du poteau métallique.

$A_b$  : Aire de la section de la poutre métallique.

$a_{cs}$  : La distance entre le bord supérieur de la dalle et le centre de Gravité des armatures longitudinales de la dalle (enrobage).

$a_w$  : Épaisseur utile (ou gorge) d'un cordon de soudure sur l'âme.

$a_f$  : Épaisseur utile (ou gorge) d'un cordon de soudure sur Semelle.

$A_{sb}$  : Section résistance de la tige d'un boulon au fond de filet.

$A_{vc}$  : Aire de cisaillement du poteau.

$A_s$  : L'aire de la section des armatures longitudinales.

$A$  : Aire de la section de la tige du boulon.

### B :

$b$  : Paramètre de transformation.

$b_c$  : La largeur de la section du poteau métallique.

$b_b$  : La largeur de la section de la poutre métallique.

$b_{eff.b}$  : La largeur efficace de la dalle en béton =  $3 b h$ .

$b_{eff.c.wc} \square b_{eff.c}$  : La hauteur efficace d'âmes du poteau en compression .

$b_{eff.t.fc} \dots$  : La longueur efficace de la semelle du poteau en flexion (traction).

$b_{eff.wb}$  : La longueur efficace de l'âme de la poutre en traction.

### C :

$C$  = Un rapport =  $\frac{Z_1}{Z_2}$

### D :

$d_{wc}$  : La hauteur de l'âme de la section du poteau.

$d_{wb}$  : La hauteur de l'âme de la poutre.

$d_s$  : La distance entre le centre de gravité de la section métallique de la poutre et le centre de gravité de la section des armatures longitudinale de la dalle.

$d_w = d_m$  : Diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit de la tête du boulon.

$d_{eff}$  : L'épaisseur efficace de la dalle en béton.

$d$  : Diamètre de la partie non filetée de boulon.

$d_0$  : Diamètre nominal du trou de boulon.

### E :

$E_a$  : Module d'élasticité de l'acier structural

$e_{pl}$  : La distance verticale entre le centre de gravité de la rangée du boulon et le bord de la semelle inférieure de la poutre.

$E_{cm.c}$  : Module d'élasticité du béton.

$E_s$  : Module d'élasticité des armateurs de la dalle

$e_s$  : Espacement entre les connecteurs de cisaillement.

$e$  : La distance entre le centre de gravité de la rangée du boulon et le bord de la semelle

du poteau (Distance horizontale).  $e_w = \frac{d_w}{4}$

## **F :**

$f_{y.c}$  : La limite d'élasticité de l'acier de la section du poteau

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

$f_{y.fb}$  : La limite d'élasticité de l'acier de la semelle du poteau

$f_{y.b}$  : La limite d'élasticité de l'acier de la section de la poutre.

$f_{y.wb}$  : La limite d'élasticité de l'acier de l'âme de la poutre

$f_{y.fb}$  : La limite d'élasticité de l'acier de la semelle de la poutre

$f_{y.p}$  : La limite d'élasticité de la platine d'extrémité

$f_{u.b}$  : La résistance à la traction d'un boulon

$f_{y.b}$  : La limite d'élasticité d'un boulon

$f_{ck}$  : Résistance ultime du béton à 28 jours.

$f_{sk}$  : La limite d'élasticité de l'acier des armatures de la dalle.

$f_{t.Rd} = B_{t.Rd}$  : La résistance à la traction des boulons.

$F_{v.Rd}$  : La résistance de calcul au cisaillement des boulons.

$F_{Rd i}$  : La résistance de calcul de la composante i.

$F_{Rd j}$  : La résistance de calcul de l'assemblage.

$f_{y.cp}$  : La limite d'élasticité de l'acier de la plaque de contact.

$F_{c.Rd}$  : La résistance de l'attache en compression

$F_{t.Rd}$  : La résistance de l'attache en traction.

$F_{c.wc.Rd}$  : La résistance de calcul d'âme de poteau en compression

$F_{f.c.Rd i}$  : La résistance de calcul de la semelle du poteau en flexion selon le mode de ruine " i "

$F_{c.cp.Rd}$  : La résistance de calcul de la plaque de contact en compression.

## **H:**

$h_c$  : La hauteur de la section du poteau

$h_b$  : La hauteur de la section de la poutre

$h_{ps}$  : La hauteur des nervures de la tôle profilée de la dalle.

$h_{cs}$  : La hauteur de la dalle en béton (où de la partie de béton située au – dessus des nervures de la tôle).

$h_n$  : La hauteur de l'écrou.

$h_h$  : La hauteur de la tête du boulon.

$h_{cp}$  : La hauteur de la plaque de contact.

## **I:**

$I_{y.b} = I_a$  : Le moment d'inertie par rapport à y de la section de la poutre (par rapport à l'axe fort de l'inertie).

## **K:**

$k_{sc}$  : La rigidité d'un connecteur de cisaillement.

$K_i$  : La rigidité de la composante " i ".

$K_{eq}$  : Le coefficient de rigidité de ressort effectif.

$K_{w.c.a}$  : Le coefficient qui prend en compte l'effet défavorable des contraintes longitudinales agissant sur l'âme de poteau en compression.

$K_t$  : La rigidité de la partie en traction de l'assemblage.

$K_{a.wp.s}$  : La rigidité des panneau d'âme en cisaillement du poteau non enrobé.

$K_{c.wp.s}$  : La contribution du béton dans la rigidité de panneau d'âme en cisaillement du poteau enrobé.

$K_{fc}$  : Coefficient qui prend en compte l'effet défavorable des contraintes longitudinales agissant dans la semelle (effort normal et moment fléchissant) sur la résistance locale de la semelle du poteau fléchi.

$K_{st}$  : La rigidité de translation de la dalle en béton en traction lorsque en néglige le glissement des connecteurs de cisaillement.

## **L:**

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

$l_{eff.b}$  : La longueur efficace de la poutre.

$l_{eff}$  : La longueur équivalente du tronçon en té.

$l_{eff.t.wc}$  : La longueur efficace de l'âme du poteau en traction.

$l_{eff.p}$  : La longueur efficace de la platine d'extrémité en flexion.

## **M:**

$m$  : La distance entre le centre du boulon et le point de la naissance de la courbure au niveau de la jonction âme- semelle

$m_{plfc}$  : Le moment résistant plastique de la semelle du poteau par une unité de la longueur.

$m_{pl.p}$  : Le moment résistant plastique de la platine d'extrémité.

$m_{p1}$  : La distance horizontale entre le centre du boulon et le point de la naissance de la cordon de soudure de la platanes avec l'âme de la poutre.

$m_{p2}$  : La distance verticale entre le centre du boulon et le point de naissance de la cordon de soudure de la platine avec la semelle de la poutre.

$M_{j.Rd} = M_{Rd}$  : Le moment résistant plastique de calcul de l'assemblage.

$M_{e.Rd}$  : Le moment le résistant élastique de l'assemblage.

$M_{c.Rd} = M_{pl.c.Rd}$  : Le moment résistant plastique de calcul de la section transversale de la poutre

$M_{sd}$  : Le moment sollicitant.

## **N:**

$N$  : le nombre de connecteurs de cisaillement qui se trouve sur la longueur efficace

$n$  Ou  $p_n$  : la distance entre le centre de gravité de la rangée de boulons et le point d'applications de l'effort de levier  $Q$ .

## **P :**

$P_P$  : La distance verticale entre le centre de gravité de la rangée supérieure de boulons et le centre de gravité de la rangée inférieure de boulons.

$P$ : la distance verticale entre le centre de gravité de la rangée supérieurs de boulons et le bord de la semelle supérieurs de la poutre.

## **Q:**

$Q$  : La force ou l'effort de levier.

## **R:**

$r_c$  : Le rayon de la courbure qui se trouve au niveau de la jonction âme - semelle d'un profilé laminé de poteau.

$r_b$  : Le rayon de la courbure qui se trouve ou niveau de la jonction âme- semelle d'un profilé laminé de la poutre.

## **S:**

$S_{j. ini}$  : La rigidité initiale de l'assemblage (poutre - poteau)

$S_J$  : La rigidité nominale de l'assemblage (poutre - poteau)

## **T:**

$t_{.wc}$  : L'épaisseur de l'âme de la section métallique du poteau.

$t_{.fc}$  : L'épaisseur de la semelle de la section métallique du poteau.

$t$  : L'épaisseur de l'âme de la section métallique de la poutre.

$t_{.fb}$  : L'épaisseur de la semelle de la section métallique de la poutre.

$t_{.p}$  : L'épaisseur de la platine d'extrémité.

## **W:**

$W_{pl. y. c}$  : Module plastique de flexion de la poteau autour de l'axe fort(y).

$W_{pl. y. b}$  : Module plastique de flexion de la poutre autour de l'axe (y)

$W_{el. y}$  : module élastique de flexion autour de l'axe fort (y).

$W$ : la distance horizontale entre la rangée gauche de boulons et la rangée droite de boulons.

$W_i$  : La déformation du ressort (composante)"i".

$W_c$  : Coefficient de réduction qui prend en charge l'influence de la contrainte de cisaillement dans le panneau d'âme du poteau en compression.

$W_t$  : Coefficient de réduction qui prend en charge l'influence de la contrainte de cisaillement dans le panneau d'âme de poteau en traction.

## ***D'AUTRES CARACTERES***

$\beta$  : Paramètre de transformation.

$\emptyset_{cd}$  : Capacité de rotation de l'assemblage.

$\mu$ : Le rapport entre  $S_{j,ini}$  et  $S_j$ .

$\mu$ : le pourcentage des armatures longitudinales dans la dalle de béton.

$\rho$  : Facteur qui tient compte le flambement de l'âme de poteau en compression.

$\overline{\lambda}_p$  : Élancement réduit.

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

$\alpha$  : Coefficient qui dépend de la position des trous de boulons sur la platine.

$\sigma_{com.Ed}$  : La contrainte maximale du compression longitudinale (force axiale et moment fléchissant) exercée au centre de gravité de la semelle de poteau.

# ***LES INDICES***

a : acier structural

b: beam = poutre.

c: colomn = poteau

w: Web = âme

wc: âme du poteau .

wb: âme de la poutre .

f : flang = semelle .

fc : semelle du poteau

fb : semelle de la poutre

Rd: résistant de calcul.

Sd: sollicitant.

S: Armature de la dalle = slab.

t: Traction.

c: compression

f : flexion

eff: efficace où effectif .

j : Joint = assemblage .

ini: initiale .

cd: capacité

s : schear = cisaillement .

v: force de cisaillement (effort ).

p: Panneau.

pl: plastique .

c: concert = béton .

Ed: de calcul.

### INTRODUCTION GENERALE

En Construction Métallique comme en construction mixte acier-béton, la prise en compte du comportement semi-rigide des assemblages est aujourd'hui bien admise dans les réglementations modernes, bien que la pratique du calcul fasse encore souvent référence aux hypothèses traditionnelles d'encastrement parfait ou d'articulation. Il a été démontré [1,2] que l'introduction du concept d'assemblage semi-rigide dans une ossature permettait non seulement, par un calcul plus précis et plus réaliste, d'effectuer une vérification plus sûre des critères de dimensionnement de l'ossature, mais aussi d'aboutir à une configuration structurale moins coûteuse.

Les ossatures métalliques et mixtes sont largement utilisées dans les pays industrialisés et surtout ceux présentant un risque sismique important. Les structures métalliques en ossature sont des systèmes structuraux qui offrent de nombreux avantages sur le plan architectural, laissant une large liberté de compartimentation et de définition des espaces.

Ces structures ont généralement une grande capacité à dissiper l'énergie sismique par le mécanisme d'apparition progressive des rotules. Dans les régions affectées par de forts séismes, les ossatures métalliques offrent en général une bonne capacité de dissipation de l'énergie en raison du comportement ductile des éléments constitués par les poutres composant ces ossatures. Il n'est pas exclu également que des déformations inélastiques cycliques puissent se produire dans d'autres éléments, par exemple les assemblages.

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

La connexion poteau-poutre doit transférer les charges et les moments par des bielles dans les poteaux. La connexion (le nœud) poteau-poutre devrait être aussi résistante que les autres membres adjacents. Par conséquent, il a été reconnu en Nouvelle-Zélande et Japon que les connexions poteaux-poutres peuvent présenter des vulnérabilités dans les zones sismiques. Pourtant, dans d'autres pays il a été réclaté que l'importance de la conception sismique des connexions poteaux-poutres dans les zones sismiques peut être exagérée parce qu'il y avait peu d'évidence de dommages importants ou d'effondrements qui pourraient être attribués à la rupture du nœud.

La construction métallique utilise principalement deux types d'assemblages : les assemblages soudés et 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 de 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.

Le présent travail porte à la modélisation d'un assemblage mixte de type poteau poutre par platine d'extrémité non débordante.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les assemblages rencontrés dans les ossatures de bâtiments métallique et mixtes, on met l'accent sur les assemblages mixtes de type poteau-poutre boulonné par platine d'about limité.

Le deuxième chapitre est consacré à la caractérisation des assemblages mixtes de type poutre-poteau par la méthode des composantes selon l'EUROCODE 4.

Dans le troisième chapitre, nous allons faire un exemple d'application manuel et par un logiciel simplifié sur la méthode des composantes

Le quatrième chapitre est consacré au développement des modèles numériques tridimensionnels non linéaire avec des éléments finis à l'aide du logiciel d'éléments finis ANSYS. Les modèles permettent de suivre le comportement réel des assemblages avec

platine d'about boulonnée raidies ou non jusqu'à la ruine en traçons les courbe moments rotation. Il tient compte des non linéarités matérielles et géométriques (contact, plasticité, grands déplacements). On finit par une conclusion générale.

# ***CHAPITRE I***

## ***Généralités sur les assemblages***

## I.1 Introduction

Pour réaliser une ossature métallique, les composants élémentaires poutres, poteaux, barres doivent être reliés entre eux par des dispositifs particuliers appelés assemblages. Ces assemblages possèdent des formes multiples liées à la nature des efforts à transmettre mais aussi aux moyens d'attaches utilisés. Ils ont considéré comme « éléments sensibles ». De ce fait, il y a des règles et des exigences à respecter en la matière, dont l'essentiel consiste à anticiper les problèmes préalables et les risques à venir.

La fonction principale d'un assemblage est de transmettre correctement des efforts qui peuvent être très importants et qui sont le plus généralement statiques ou quasi-statiques (actions gravitaires, actions climatiques, charges d'utilisation à variations lentes) mais qui peuvent également être dynamiques (effets de chocs ou de séismes, vibrations, etc.).

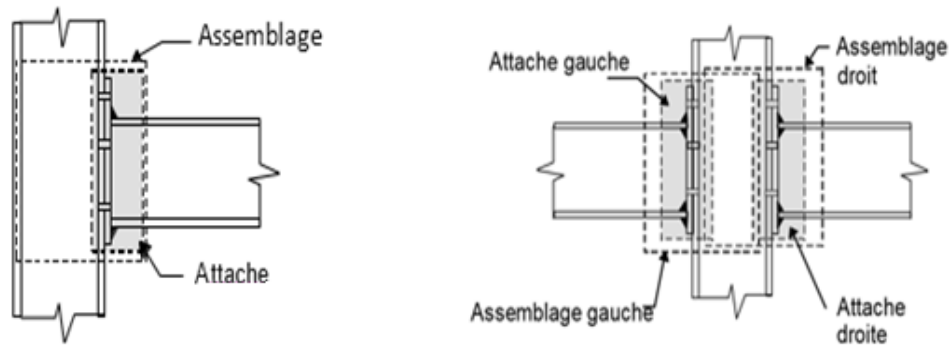
Cette partie est consacrée aux généralités sur les assemblages rencontrés dans les bâtiments métalliques et mixtes. Dans un premier temps on définit le rôle et l'importance d'un assemblage dans ces types de construction, ensuite nous présentons les différentes formes d'assemblages rencontrés et les différents moyens d'assemblage utilisés pour les réaliser. Une description des différentes configurations d'assemblages poutre- poteau que l'on peut avoir est présentée ; suivit d'une classification de ces assemblages suivant l'ancienne et la nouvelle approche. A savoir les assemblages poutre- poteau boulonné par platine d'extrémité.

## I.2 Définition et rôle de l'assemblage

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

La caractéristique essentielle des constructions métalliques est d'être composées d'un ensemble d'éléments (poteaux- poutres) constitués de profilés laminés ou soudés souvent en forme de (I ou de H) qu'il faut assemblés entre eux pour constituer l'ossature.

Les liaisons entre ces différents éléments représentent ce qu'on appelle communément les assemblages. Ces derniers constituent des composants spécifiques à la construction métallique, ils jouent un rôle très important, on peut les définir comme organes de liaison qui permettent de réunir et de solidariser plusieurs éléments entre eux, on assurant la transmission



(a) Configuration d'assemblage unilatérale

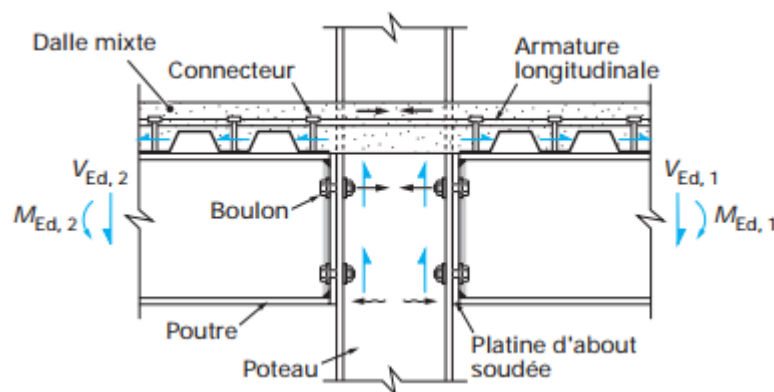
(b) Configuration d'assemblage bilatérale

**Figure 1.1 : Différence entre attache et assemblage**

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

**Assemblage Mixte :**

Un assemblage est dite mixte lorsqu'il relire des éléments mixtes, dans lequel le renforcement de ces éléments est destiné à contribuer à la résistance et la rigidité de l'assemblage.



**Figure 1.2 : Exemple d'un assemblage mixte (poutre mixte – poteau métallique)**

### I.3 Types d'assemblages

Les poutres et les poteaux dans une structure en acier peuvent être assemblés par différents types d'assemblages. On distingue, d'une manière commode, les types d'assemblages suivants :

- assemblages poutre-poteau (A) ;
- assemblages de continuité (B, C) ;
- assemblages de pied de poteau (D).

La figure 1.2 donne une illustration de ces types d'assemblages dans une structure en acier.

Les poutres et les poteaux dans une structure en acier sont des sections en I ou H, obtenus par laminage ou reconstitués par soudage. Ces poutres et poteaux sont sollicités soit en flexion simple, soit en traction ou compression, soit en flexion composée. Ainsi, chaque type de ces assemblages doit être dimensionné pour transmettre les moments et/ou les efforts tranchants et/ou les efforts normaux.

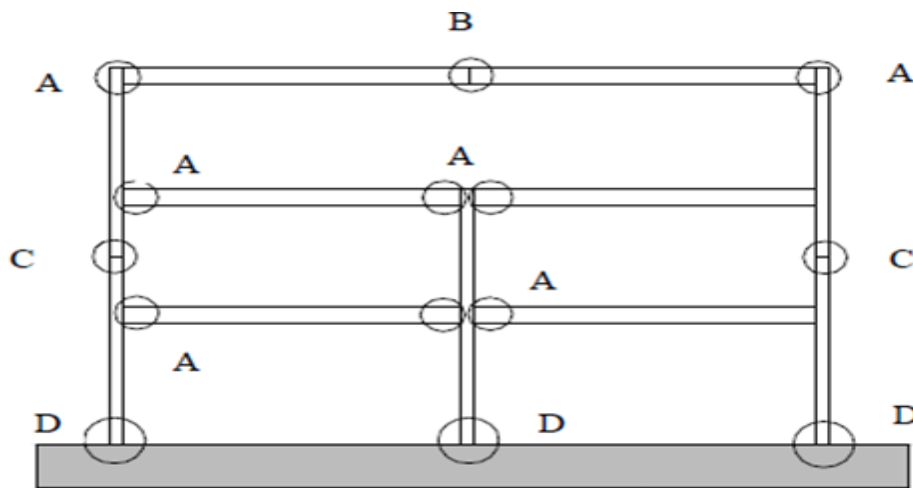


Figure 1.3 : Différents types d'assemblages dans une structure métallique

#### I.3.1 Assemblage poutre-poteau :

La caractéristique essentielle des structures en acier formées de poutres et de poteaux est d'être composées de profilés laminés ou reconstitués par soudage élaborés en usine et ensuite assemblés sur le site de construction. Les assemblages ont donc un double rôle qui est de permettre la constitution de la structure en acier apte à supporter les charges et les surcharges appliquées et surtout de contribuer à sa pérennité et à sa stabilité globale.

Les assemblages dans les structures en acier sont, en règle générale, réalisés par

soudure et/ou par boulonnage. L'assemblage par platine d'extrémité est largement utilisé dans les structures en acier et sa popularité est attribuée à la simplicité et l'économie des fabrication. Toutefois, le comportement structural de ce type d'assemblages est extrêmement complexe à analyser. Cette complexité est due à la variation de leurs propriétés géométrique set matérielles qui aboutit à un comportement difficile à prédire.

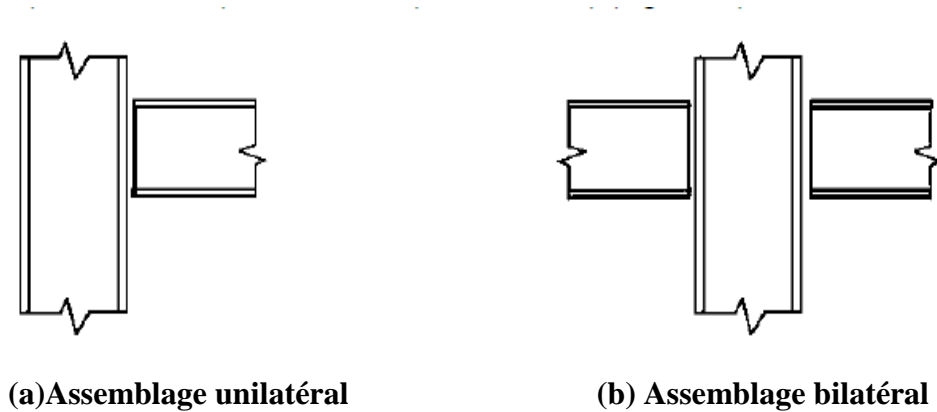
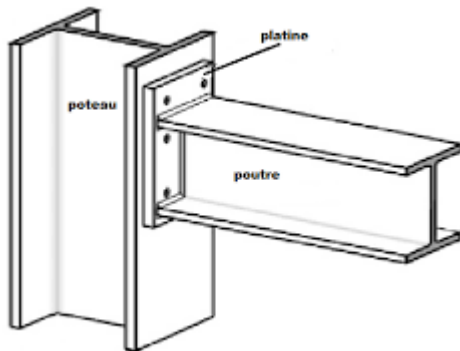


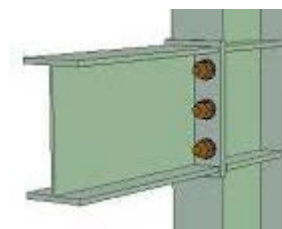
Figure 1.4 : Assemblage poteau poutre

I.3.1.1 Types d'assemblage poutre poteau :

- Assemblage poutre poteau par Platine d'extrémité débordante ou limité



Platine d'extrémité débordante



Platine d'extrémité Limité

Figure 1.5 : Assemblage poutre poteau par platine d'extrémité débordante ou limite

- Assemblage par tasseau et plaque de contact

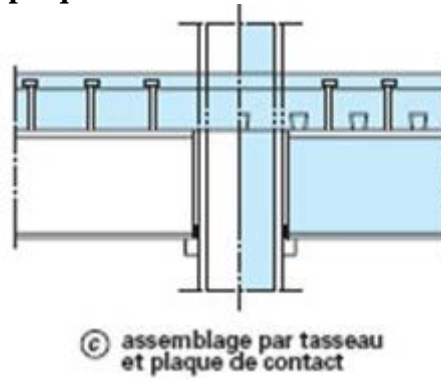


Figure 1.6 : Assemblage par tasseau et plaque de contact

- Assemblage par cornières :

Les cornières dans cet assemblage peuvent être soudés d'un côté et boulonnés de l'autre côté pour faciliter le montage.

Souvent, tous travaux de soudure se fait au niveau de l'usine

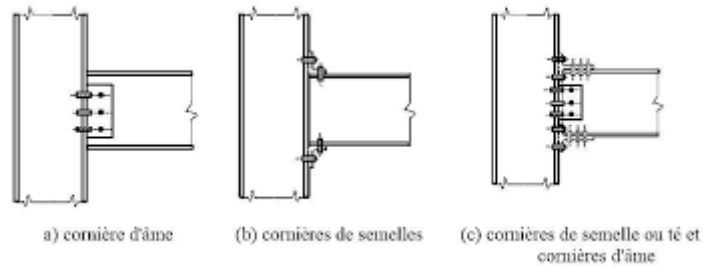


Figure 1.7 : Assemblages par cornières

I.3.2 Assemblage de continuité :

La figure 1.4 illustre quelques cas usuels de ce type d'assemblage. Ce sont des assemblages rigides qui transmettent tous les efforts d'un composant à l'autre. Ce type d'assemblages est souvent utilisé pour des raisons de transport ou de montage et lorsque la longueur des poutres ou des poteaux est limitée.

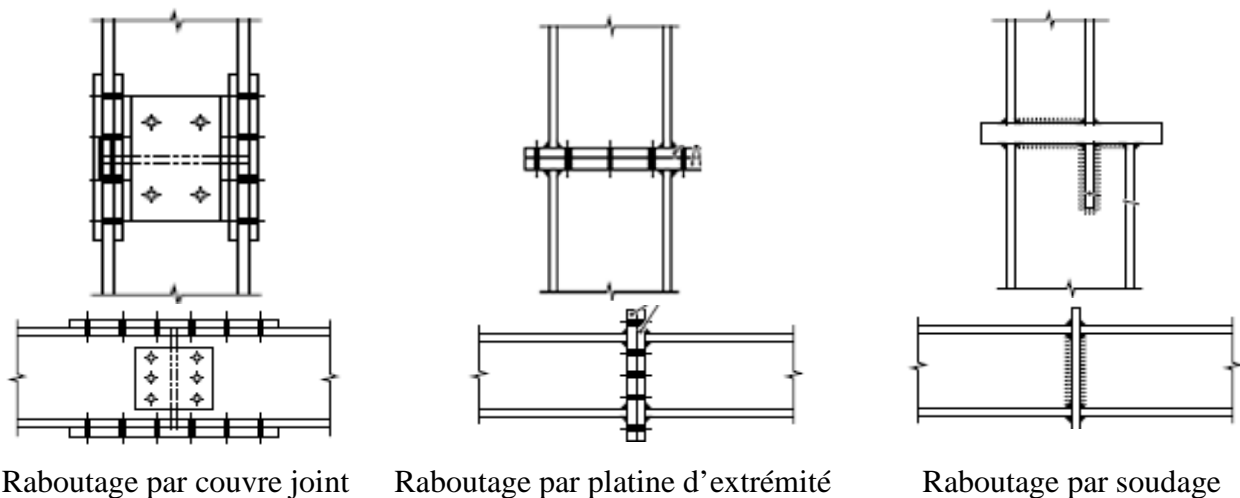
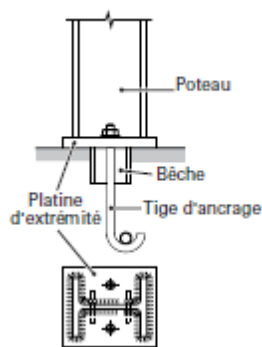


Figure 1.8 : Assemblage continuité

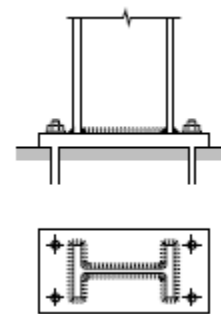
### I.3.3 Assemblage de pied de poteau :

Ces assemblages, généralement désignés par les termes de « **pieds de poteaux** » ont pour fonction essentielle de transmettre aux fondations toutes les charges verticales et horizontales exercées sur le bâtiment. Par ailleurs, selon la rigidité que le concepteur leur donne, ces assemblages participent à la stabilité et à la souplesse de l'ensemble de l'ouvrage. Les pieds de poteaux se répartissent ainsi en deux grandes familles :

- les pieds de poteaux articulés ou semi-articulés ;
- les pieds de poteaux encastrés.



les pieds de poteaux articulés



les pieds de poteaux encastrés.

**Figure 1.9** Assemblage de pied de poteau

## I.4 Moyens d'assemblage :

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

- Les assemblages boulonnés.
- Les assemblages soudés.
- Les assemblages chimiques (colles) [1].

### I.4.1 Les assemblages boulonnés :

#### I.4.1.1.2 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 20<sup>ème</sup> siècle [2].

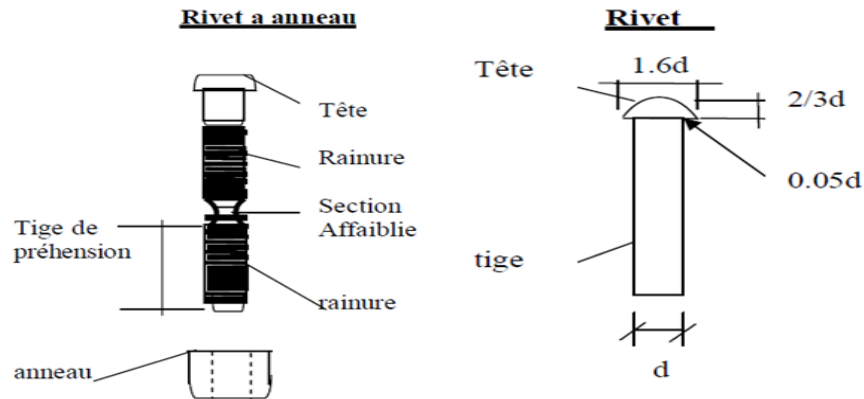


Figure1.10 : Rivet

**I.4.1.1.1 Rivets à anneau :**

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 anneau est un acier à haute résistance [2].

**I.4.1.1.2 Le boulonnage :**

Les boulons peuvent être utilisés en atelier ou sur le chantier. Ils sont assez couramment mis en œuvre. Un boulon comporte une tête hexagonale, un corps cylindrique fileté qui constitue la vis et un écrou également hexagonal. Les rondelles, freins d'écrou, contre-écrou font partie des accessoires des assemblages. Les jeux dans les trous sont de 1 à 2 mm. Ils travaillent soit en traction, soit au cisaillement.

Les caractéristiques mécaniques des boulons sont données au tableau 1.1 où :

$F_{yb}$ : Limite d'élasticité

$f_{ub}$ : Résistance à la traction

Boulons	Classe de qualité	$f_{yb}$	$f_{ub}$
De charpente (ordinaire)	4.6	240	400
	5.6	300	500
A haute résistance	8.8	640	800
	10.9	900	1000

Tableau 1.1. Caractéristiques mécaniques des aciers pour boulons [3]

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 de charpente métallique** (aciers 4.6 et 5.6) : ils sont employés couramment pour réaliser les assemblages faiblement sollicités des halles et des bâtiments.

✓ **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. Seuls les boulons à haute résistance peuvent être précontraints.

L'Eurocode3 ajoute les classes de qualité 4.8, 5.8 et 6.8 à celles données dans le tableau 1.1 et utilise la notion de boulon ordinaire à la place de boulon de charpente.

Class de boulon	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$f_{yb}$	240	320	300	400	480	640	900
$f_{ub}$	400	400	500	500	600	800	1000

**Tableau 1.2 : Caractéristiques Mécaniques des boulons selon EC3**

$f_{yb}$  : la résistance à la limite élastique

$f_{ub}$  : la résistance ultime à la traction

Pour une Classe X.Y donnée,  $f_{yb}$  est égale à 10 XY et  $f_{ub}$  à 100 X, toutes deux exprimées en MPa.

Selon L'EC3 seuls les boulons 8.8 et 10.9 peuvent être utilisés comme boulons précontraints à haute résistance pour la construction.

Désignation	M8	M10	M12	M14	M16	M18	M20	M22	M24
d (mm)	8	10	12	14	16	18	20	22	24
$d_0$ (mm)	9	11	13	15	18	20	22	24	26
A (mm <sup>2</sup> )	50.3	78.5	113	154	201	254	314	380	452
$A_s$ (mm <sup>2</sup> )	36.6	58	84.3	115	157	192	245	303	353
Rondelle (mm)	16	20	24	27	30	34	36	40	44
clé (mm)	21	27	31	51	51	51	58	58	58
$d_m$ (mm)	14	18.3	20.5	23.7	24.58	29.1	32.4	34.5	38.8

**Tableau 1.3 : Caractéristiques géométriques des boulons**

$d$  : diamètre de la partie non filetée de la tige

$d_0$  : diamètre nominal du trou

$A$  : section nominale du boulon

$A_s$  : section résistante de la partie filetée

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

**Remarque :**

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

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

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

L'Eurocode3 propose les mêmes diamètres de trous, sauf pour les diamètres de boulons :

$d_0 = 14\text{mm}$ , pour lesquels  $d_0 = d + 1\text{mm}$ .

Dans certains cas, un jeu plus petit peut être exigé, on parle alors de boulons ajustés lorsque le jeu est de 0.3 mm seulement. L'emploi de boulons ajustés offre l'avantage de créer des assemblages avec un mouvement relatif possible très petit, donc des structures très peu déformables. Ce pendant, la réalisation des trous doit être précise, ce qui augmente sensiblement le coût de ce type d'assemblage. On n'utilisera de ce fait les boulons ajustés qu'en cas de nécessité absolue. [3]

La figure 1.11 montre les différentes parties composant un boulon de charpente et d'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.

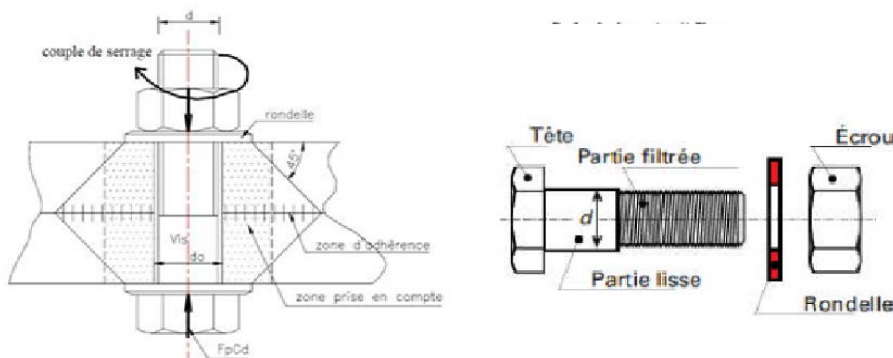


Figure.1.11 : Boulon de charpente et boulon à haute résistance

#### I.4.2 Les assemblages soudés :

Le soudage est un procédé qui permet d'assembler par fusion ou plastification. Le soudage implique donc :

- a) l'existence d'une source de chaleur suffisante pour obtenir la fusion du matériau, elle peut être d'origine électrique (résistance, arc, friction).
- b) 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. [4]

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

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

En revanche, il présente divers inconvénients:

- ❖ Le métal de base doit être soudable.
- ❖ Le contrôle des soudures est nécessaire et onéreux.
- ❖ Le contrôle des soudures est aléatoire.
- ❖ Le soudage exige une main-d'œuvre qualifiée et un matériel spécifique [5].

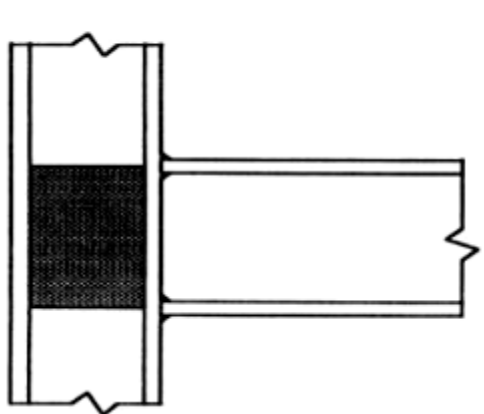


Figure1.12 : Assemblages soudés

**I.4.3 Les assemblages chimiques (colles) :**

Encore expérimentale, le collage des pièces métalliques ne s’emploie en pratique que pour des Pièces secondaires où les contraintes mécaniques à prendre en compte sont faibles (par exemple raccord d’angle pour un bardage). Néanmoins les progrès très importants réalisés ces Dernières années dans les colles laissent prévoir un grand développement de ce type d’application.

**I.5 Fonctionnement des assemblages :**

**I.5.1 Fonctionnement par obstacle :** C’est le cas des boulons ordinaires, non précontraints dont les tiges reprennent les efforts et fonctionnement en cisaillement.

**I.5.2 Fonctionnement par adhérence :** Dans ce cas, la transmission des efforts s'opère par adhérence des surfaces des pièces en contact. Cela concerne le soudage, et le boulonnage par boulons HR.

**I.5.3 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]

**I.6 Classification des assemblages poutre-poteau selon l’EC3, 4 :**

**Classification par Résistance :**

**-Assemblage articulé :**

Un assemblage sera classé comme étant Articulé si les critères suivants sont satisfaits :

$$M_{j,Rd} < 0.25 M_{b,pl,Rd}$$

$$M_{j,Rd} < 0.25 M_{c,pl,Rd}$$

$M_{b,pl,Rd}$  : Moment de résistance plastique du poteau

$M_{c,pl,Rd}$  :Moment de résistance plastique de la poutre

**-Assemblage à résistance complète :**

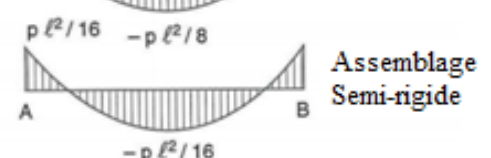
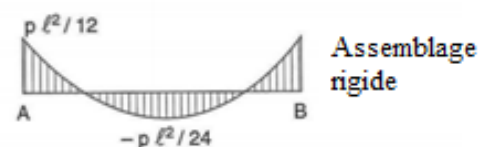
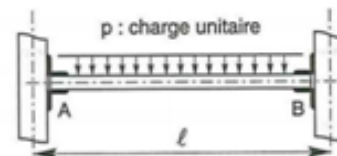
Un assemblage sera classé comme étant à pleine résistance si les critères suivants sont satisfaits :

$$M_{j,Rd} = M_{b,pl,Rd}$$

$$M_{j,Rd} = M_{c,pl,Rd}$$

**-assemblage à résistance partielle :**

Un assemblage sera classé comme étant à résistance partielle si les critères suivants sont satisfaits :



Diagrammes de moment fléchissant avec divers modes de liaison

$$0.25 M_{b,pl,Rd} < M_{j,Rd} < M_{b,pl,Rd}$$

$$0.25 M_{c,pl,Rd} < M_{j,Rd} < M_{c,pl,Rd}$$

La résistance d'un assemblage à résistance partielle est par définition inférieure à celle de l'élément structural assemblé.

**Classification par Rigidité :**

Rigide : si  $S_{j,ini} = 8 \frac{EI_b}{L_b}$

Articulé : si  $S_{j,ini} = 0,5 \frac{EI_b}{L_b}$

Semi-rigide : Les assemblages qui ne satisfont pas aux critères concernant les assemblages rigides ou articulés seront classés comme des assemblages semi-rigides

*Chapitre II :*

*Caractérisation d'un*

*assemblage poutre - poteau*

*par la méthode des*

*composantes selon*

***l'EUROCODE 4***

## II.1 INTRODUCTION :

Cette étape consiste à la détermination des courbes de comportement des assemblages sous forme moment-rotation ( $M-\theta$ ) qui constituent les données nécessaires à la modélisation des assemblages par la méthode de composante, et la classification d'un assemblage poutre - poteau selon Eurocode 4.

La méthode des « composantes » constitue actuellement la méthode la plus utilisée et la plus exacte pour le calcul et la caractérisation des assemblages mixtes.

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 ( $\phi_{cd}$ ).

## II.2 METHODE DES COMPOSANTES :

Le comportement mécanique d'un assemblage mixte en terme, de résistance, rigidité et capacité de rotation est un phénomène complexe. Pour déterminer, ce comportement complexe, l'assemblage peut être décomposé en différents éléments appelés « composantes ». Chaque composante forme une **identité** dans l'assemblage. 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 contributions 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.

• **Identification des composantes** : Détermination des composantes actives au sein de l'assemblage et intervenant en compression, traction et cisaillement.

• **Caractérisation des composantes** : Détermination des propriétés mécaniques de ces composantes.

• **Assemblage des composantes** : Pour l'évaluation des caractéristiques de l'assemblage.

### II.3 APPLICATION DE LA METHODE DES COMPOSANTES AUX D'ASSEMBLAGE MIXTE AVEC PLATINE D'EXTREMITE :

L'EC3 [La pr EN 1993 .1-8] [2] propose des expressions pour le calcul de la résistance et de la rigidité de la composante suivante :

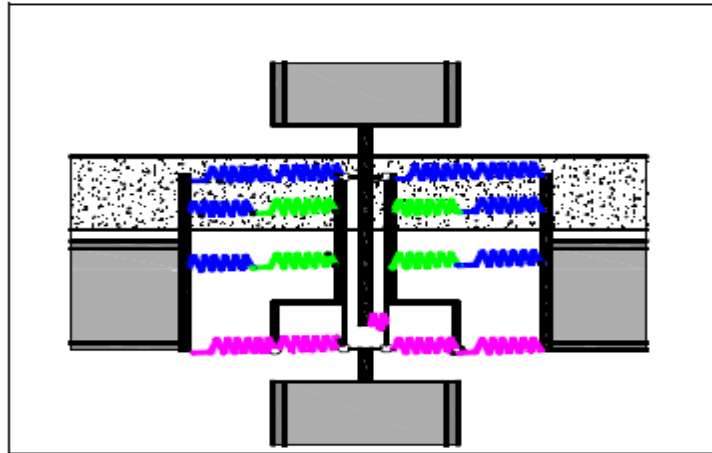


Figure 2.1: Modélisation simplifiée selon l'EN 1994-1-1 EC-4 [1].

- **Zone de compression.**
  - Âme du poteau en compression.
  - Semelle et âme de poutre en compression
- **Zone de traction :**
  - Semelle de poutre en flexion
  - Âme du poteau en traction.
  - Platine d'extrémité en flexion.
  - Âme de poutre en traction.
  - Boulons en traction.
- **Zone de cisaillement :**
  - Panneau d'âme du poteau en cisaillement.

Pour les assemblages mixtes en plus des composantes ci-dessus, on doit considérer également les composantes de base suivantes :

- Plaque de contact en compression.
- Armatures longitudinales de la dalle en traction.
- tenir compte de l'enrobage du poteau, comme une forme de raidissage, et les coefficients de rigidité  $K_i$  des composantes influencée par l'enrobage de béton sont transformés en valeurs équivalentes de composantes tout - acier à l'aide du rapport des modules d'élasticité de l'acier et du béton.

- On ne tient pas compte :
  - Du béton de la dalle venant en compression au contact du poteau.
  - De l'armature transversale de la dalle.
  - Du glissement de la connexion de la poutre mixte.

Les composantes d'Assemblage avec platine d'extrémité non débordante :

1. Âme de poteau en cisaillement
2. Âme de poteau en compression.
3. Âme de poteau en traction.
4. Semelle de poteau en flexion.
5. Platine d'extrémité en flexion.
7. Semelle de la poutre en compression.
8. Âme de la poutre en traction.
10. Boulons en traction.
13. Armature longitudinale de la dalle en traction.

### II.3.1 Assemblage avec platine d'extrémité non débordante :

#### A. Calcul du moment résistant

- Dans ce type d'assemblage La traction induite par la flexion est prise à la fois par l'armature et la partie supérieure de l'attache métallique.
- L'effort de compression est concentré au niveau du centre de la semelle inférieure de la poutre.

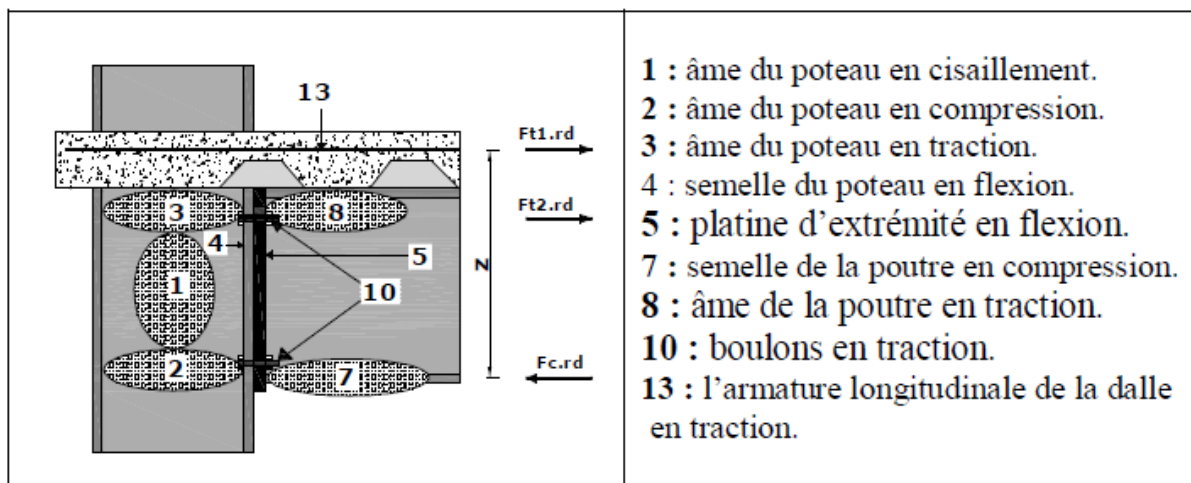
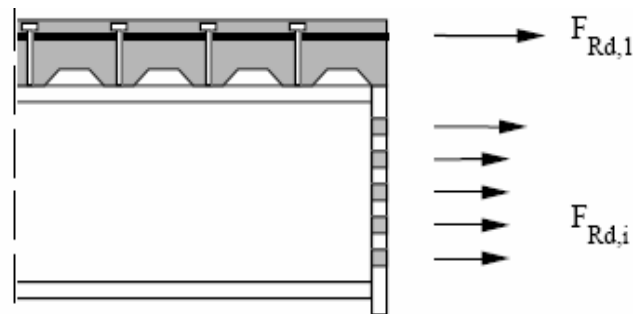


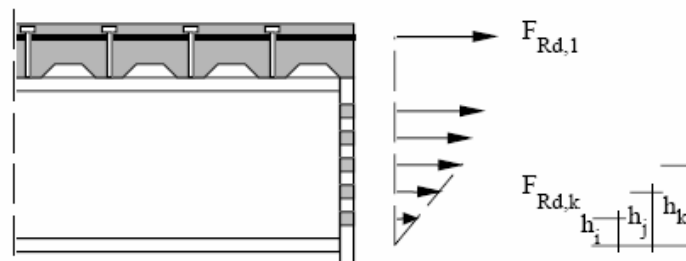
Figure 2.2: assemblage mixtes avec platine non débordante [5].

Dans le cas de plusieurs rangées de composantes en traction, la distribution des efforts est complexe, trois types de distribution des efforts intérieurs peuvent être envisagés :

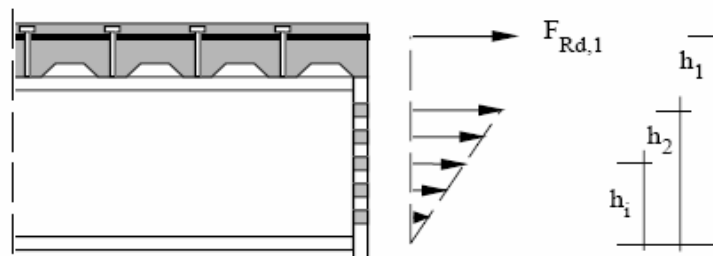
- une distribution élastique.
- Une distribution plastique.
- une distribution élasto-plastique.



(a)- distribution plastique des efforts



(b)-distribution élasto-plastique des efforts



(c)-distribution élastique des efforts

**Figure 2.3 : Distribution des efforts intérieurs [14].**

Dans L'EC3- Annexe J (Révisée) [5], on suppose que la rangée supérieure sera la première à atteindre sa résistance de calcul.

L'EC 3 considère qu'une rangée de boulons possède une capacité de déformation suffisante pour permettre une redistribution plastique des sollicitations lorsque :

- $F_{Rd,i}$  est associée à la ruine de l'âme de poutre en traction.
- $F_{Rd,i}$  est associée à la ruine de l'ensemble boulons- platine.

$$F_{Rd,i} \leq 1,9 B_{tRd}$$

$B_{tRd}$  : la résistance de calcul d'un boulon. On donne alors la résistance.

$$M_{j,Rd} = S F_{Rd,i} . h_i$$

Le moment résistant de calcul est alors donné par la sommation inclut l'armature en traction.

A cause d'une insuffisance de capacité de déformation dans la dernière rangée ayant atteint sa résistance de calcul ( $F_{Rd,k} > 1,9 B_{tRd}$ ) et liée à la ruine des boulons ou de l'ensemble boulons – platine

Dans les rangées de boulons situées plus bas que la rangée de boulons k, les efforts sont alors répartis linéairement en fonction de leur distance au point de compression (centre de semelle inférieure de la poutre). Le moment de résistance de calcul est égale à :

$$M_{j,Rd} = \sum_{i=1,k} F_{Rd,d} \times h_{ii} + \frac{F_{Rd,k}}{h_k} \sum_{j=k+1} h_j^2$$

**n** : nombre totale de rangées de boulons.

**K**: numéro de la rangée de boulons dont la capacité de déformation n'est pas suffisante.

Dans la répartition **Fig3-17(b)** dite élasto-plastique la répartition des sollicitations est interrompue parce que l'effort de compression  $F_c$  atteint la résistance de calcul de semelle et de l'âme de poutre en compression .Le moment  $M_{j,Rd}$  est évalué au moyen de formules similaires (deux formules précédentes) dans les quelles, évidemment, seul un nombre limité (n) de rangées de boulons est pris en considération ces rangée sont déterminés à l'aide de la formule suivante :

$$\sum_{i=1,n} F_l = F_{c,Rd}$$

Où:

$n$  : est le numéro de la dernière rangée de boulons transmettant un effort de traction ;

$F_l$  : est l'effort de traction exercée dans la rangée de boulons numéro "l".

$F_{c,Rd}$  : Min (la résistance de calcul des semelles et âme de poutre comprimée, résistance de calcul de l'âme de poteau en compression).

### B. rigidité initiale $S_{J,ini}$ :

On suppose que les déformations de rangée de boulons pour toute la rangée sont proportionnelles à la distance au point de compression.

La force élastique appliquée dans chaque rangée dépendant de la rigidité des composantes.

La figure [2-4]-(b) montre comment les déformations des composantes 3.4.5 et 10 sont ajoutées à un ressort effectif par rangée de boulons, avec un coefficient de rigidité  $K_{eff, r}$  (r représente l'indice de numéro de rangée). La figure [2-4]-(c) montre comment ces ressorts effectifs par rangée de boulons sont remplacés par un ressort équivalent agissant au niveau d'un bras de levier « Z ». Le coefficient de rigidité de ce ressort effective  $K_{eq}$  peut être directement appliqué dans la formule de  $S_{j, ini}$ .

$$K_{eff, r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{K_{ir}}}$$

$$Z = \frac{\sum_r K_{eff, r} \times h_r^2}{\sum_r K_{eff, r} \times h_r}$$

$$K_{eq} = \frac{\sum_r h_{eff, r} \times h_r}{Z}$$

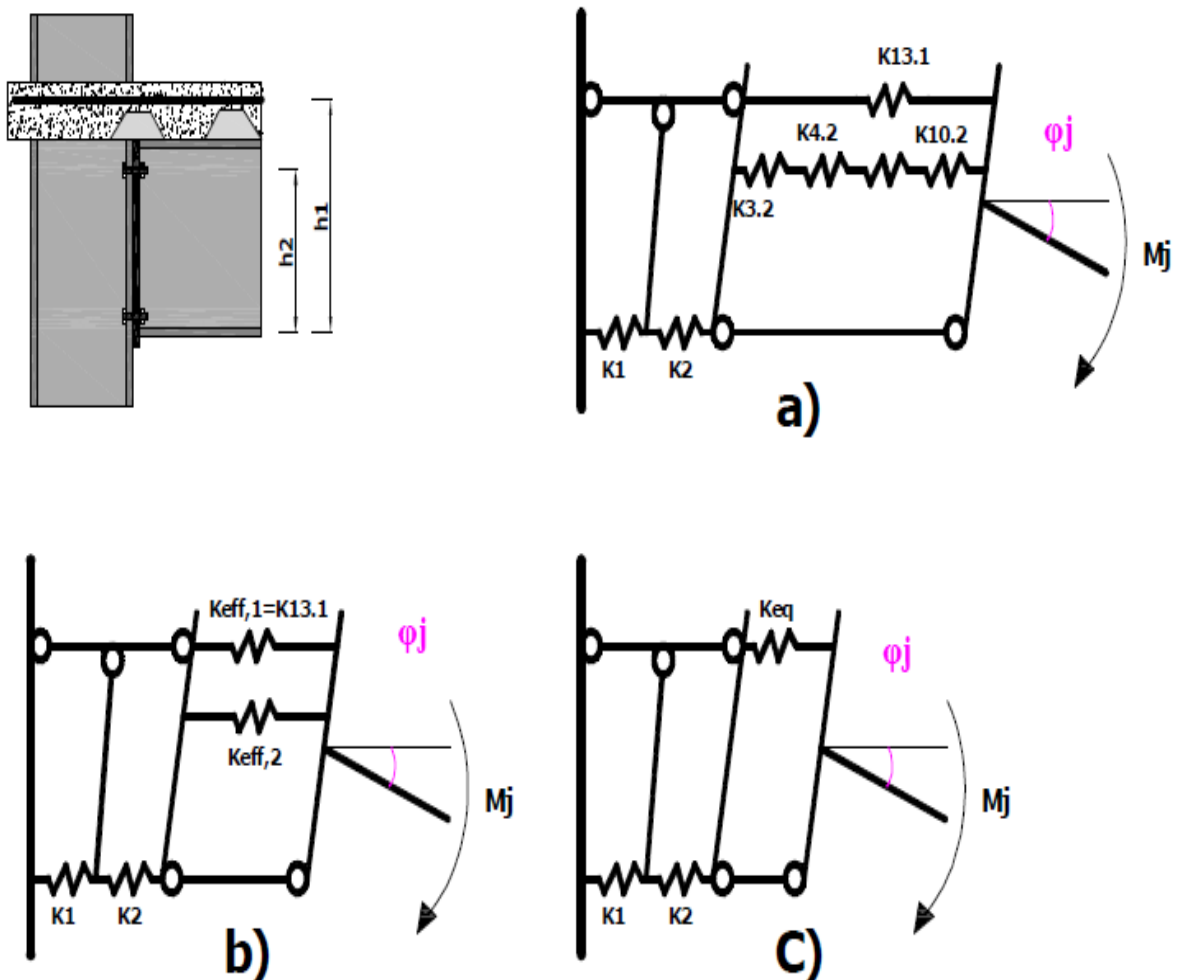


Figure 2-4 : Modèle de ressort pour un assemblage poutre-poteau avec platine d'extrémité non débordante.

**C. Calcul des propriétés mécaniques de l'assemblage :**

- **La résistance :**

$$F_{Rd} = \min [ F_{Rd,1}; F_{c,Rd}; F_{t,Rd} ]$$

- **Moment résistant élastique :**

$$M_{e,Rd} = \frac{2}{3} F_{Rd} z.$$

- **Moment résistant plastique de calcul :**

$$M_{Rd} = F_{Rd} Z$$

- **La rigidité initiale :**

$$S_{j,ini} = \frac{E_a Z_{eq}^2}{\left( \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{eq}} \right)}$$

- **Rigidité nominale :**

$$S_j = S_{j,ini} / 2$$

En fin, en résumé la méthode des composantes pour ce type d'assemblage dans le tableau suivant :

COMPOSANTE	RESISTANCE	RIGIDITE
COMPOSANTE N°2: AME DU POTEAU EN COMPRESSION	$F_{Rd,2} = F_{a.wc.c.Rd} + F_{c.wc.c.Rd}$ <p>AVEC <math>F_{a.wc.c.Rd} = K_{wc,a} \omega_c b_{eff,c,wc} t_{wc} \frac{f_{ywc}}{\gamma_{M0}}</math></p> <p>Si <math>\bar{\lambda}_p \leq 0.67</math></p> $F_{a.wc.c.Rd} = K_{wc,a} \omega_c b_{eff,c,wc} t_{wc} \left[ \frac{1}{\bar{\lambda}_p} \left( 1 - \frac{0.22}{\bar{\lambda}_p} \right) \right] \frac{f_{ywc}}{\gamma_{M0}}$ <p>Si <math>\bar{\lambda}_p &gt; 0.67</math></p> $K_{wc,a} = MIN \left[ 1 \times 0.1 \times 25 - 0.5 \frac{\sigma_{com a Ed}}{f_{ywc}} \right]$ <ul style="list-style-type: none"> <li>si le poteau est non enrobé :</li> </ul> $\bar{\lambda}_p = 0.932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} \times d_{wc} \times f_{ywc}}{Et_{wc}^2}}$ <p>si <math>\beta = 1</math> ; <math>\omega_c = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3(b_{eff,c,wc} \times t_{wc} \times A_{vc})^2}}</math></p> <p>si <math>\beta = 0</math> ; <math>\omega_c = 1</math> avec <math>F_{c.wc.c.Rd} = 0</math></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>si le poteau est enrobé :</li> </ul> <p><math>\omega_c = 1</math> et <math>\bar{\lambda}_p = 0</math></p> <p>Et</p> $F_{c.wc.c.Rd} = 0.85 K_{wc,c} t_{eff,c} (b_c - t_{wc}) \frac{f_{ck,c}}{\gamma_c}$ <p>avec</p> $K_{wc,c} = MIN \left[ 1.3 + 3.3 \frac{\sigma_{com a Ed}}{\left( \frac{f_{ck,c}}{\gamma_c} \right)} ; 2.0 \right]$ $l_0 = t_{fb} / 2 + a_f \sqrt{2} + t_p$ $t_{eff,c} = l_0 + 5t_{fc}$ $b_{eff,c,wc} = l_0 + 5(s + t_{fc})$ $b_{el} = l_0 + 2(s + t_{fc})$	$K_{Rd,2} = K_{a,wc,Rd} + K_{c,wc,Rd}$ $K_{a,wc,Rd} = \frac{0.7 b_{eff,c,wc} t_{wc}}{d_{wc}}$ <p>si le poteau est non enrobé :</p> $K_{c,wc,Rd} = 0$ <p>si le poteau est enrobé :</p> $K_{c,wc,Rd} = \frac{0.5 b_{el} b_c E_{cm,c}}{h_c E_a}$

<p>COMPOSANTE N°3: AME DU POTEAU EN TRACTION</p>	$F_{Rd,3} = \frac{\omega_1 \times b_{eff,t,wc} \times t_{wc} \times f_{ywc}}{\gamma_{M0}}$ $\omega_c = \frac{1}{\sqrt{1 + 1.3(b_{eff,t,wc} \times t_{wc} \times A_{vc})^2}}$ $b_{eff,t,wc} = \min[2\pi m, 4m + 1.25e]$	$K_3 = \frac{0.7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_{wc}}$
<p>COMPOSANTE N°4: SEMELLE DU POTEAU EN FLEXION</p>	$F_{Rd,4} = \min[F_{fc,Rd,t1}; F_{fc,Rd,2}]$ $F_{fc,Rd,t1} = \frac{(8n - 2e_w)l_{eff,t,wc}m_{pl,fc}k_{fc}}{2mn - e_w(m+n)}$ $F_{fc,Rd,2} = \frac{2l_{eff,t,wc}m_{pl,fc}k_{fc} + 2B_{1,Rd}n}{m+n}$ <p>Si <math>\sigma_{n,fc} \leq 180(N/mm^2)</math> <math>k_{fc} = 1</math></p> <p>Si <math>\sigma_{n,fc} &gt; 180(N/mm^2)</math> :</p> $k_{fc} = \min\left[1; \frac{(2f_{yfc} - 180 - \sigma_{com a Ed})}{(2f_{yfc} - 360)}\right]$ $n = \min[e; 1.25m; e_p]$ $m_{pl,fc} = \frac{0.25t_{fc}^2 f_{yfc}}{\gamma_{M0}}$ $e_w = \frac{d_w}{4}$ <p><math>d_w</math> : diamètre moyen entre le cercle circonscrit et le cercle inscrit à la tête du boulon</p> <p><math>\sigma_{com a Ed}</math> : la contrainte maximale de compression longitudinale exercée dans la semelle de poteau à l'extérieur du rayon en un point situé juste à l'extérieur de l'assemblage</p> $l_{eff,t,wc} = b_{eff,t,wc}$	$K_4 = \frac{0.85l_{eff,t,fc}t_{fc}^2}{m^3}$

<p>COMPOSANTE N°5: PLANE D'EXTREMITÉ EN FLEXION</p>	$F_{Rd,5} = \min [F_{eq,Rd,1}; F_{eq,Rd,2}]$ $F_{eq,Rd,1} = \frac{(8n - 2e_w) l_{eff,p} m_{pl,p}}{2m_{pl} n_p - e_w (m_{pl} + n_p)}$ $F_{eq,Rd,2} = \frac{2l_{eff,p} m_{pl,p} + 2B_{1,Rd} n_p}{m_{pl} + n_p}$ $n_p = \min [e_p; 1.25m_{pl} + n_p]$ $m_{pl,p} = \frac{0.25t_p^2 f_{yp}}{\gamma_{M0}}$ $l_{eff,p} = \min [2\pi m_{pl}; \alpha m_{pl}] \text{ Avec } \alpha \text{ donné par une courbe}$	$K_5 = \frac{0.85 l_{eff,p} t_p^3}{m_{pl}^3}$
<p>COMPOSANTE N°7: DU SEMELLE POTEAU EN COMPRESSION</p>	$F_{Rd,7} = \frac{M_{c,Rd}}{(h_b - t_{fb})}$	$K_7 = \infty$
<p>COMPOSANTE N°8: AME DU POUTRE EN TRACTION</p>	$F_{Rd,8} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{ywb}}{\gamma_{M0}}$ $b_{eff,t,wb} = b_{eff,p}$	$K_8 = \infty$
<p>COMPOSANTE N°10 : BOULONS EN TRACTION</p>	$F_{Rd,10} = 2B_{t,Rd}$ $B_{t,Rd} = \frac{0.9 f_{ub} A_{sb}}{\gamma_{M0}}$ <p><math>A_{sb}</math> : section résistante de la partie filetée</p>	$K_{10} = 1.6 \frac{A_{s,b}}{L_b}$ $L_b = t_b + t_{fb} + 0.5(h_n + h_h)$ <p><math>h_n</math> : la hauteur de l'écrou <math>h_h</math> : la hauteur de la tête de boulon</p>

<p>COMPOSANTE N°13 : ARMATURES LONGITUDINALES DE LA DALLE EN TRACTION</p>	$F_{Rd,13} = \frac{A_s f_{sk}}{\gamma_{M0}}$ $A_s^{\min} = 0.004 d_{eff} (b_{eff,b} - b_c)$ $A_s^{\max} = \frac{1.1 \left( \frac{0.85 f_{ck,s}}{\gamma_c} \right) b_c d_{eff}}{\beta \left( \frac{f_{ck}}{\gamma_s} \right)}$	$K_{13} = K_{s,t} K_r$ $K_{s,t} = \frac{A_s E_s}{h_c \left( \frac{1+\beta}{2} + K_\beta \right) E_a}$ $K_\beta = \beta (4.3\beta^2 - 8.9\beta + 7.2)$ $K_r = \frac{1}{1 + \frac{E_s K_{s,t}}{K_{s,c}}}$ $K_{s,c} = \frac{1}{v + \frac{v-1Z_1}{1+\xi d_s}}$ $\xi = \frac{E_a I_a}{d_s^2 E_s A_s}$ $v = \sqrt{\frac{(1+\xi) N k_{sc} l_{eff,b} d_s^2}{E_a I_a}}$
<p>COMPOSANTE N°1: PANNEAU D'AME DU POTEAU EN CISAILLEMENT</p>	$F_{Rd,1} = \frac{V_{wp,Rd}}{\beta}$ $V_{wp,Rd} = V_{a,wp,Rd} + V_{c,wp,Rd}$ <p>Ou : <math display="block">V_{a,wp,Rd} = \frac{0.9 A_{vc} f_{ywc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}}</math></p> <p>si le poteau est non enrobé :</p> $V_{c,wp,Rd} = 0$ <p>si le poteau est enrobé :</p> $V_{c,wp,Rd} = v A_c \sin \theta \frac{0.85 f_{ywc}}{\gamma_c}$ $A_c = 0.8 (h_c - 2t_{fc}) (b_c - t_{wc}) \cos \theta$ $\theta = \arctan \left[ \frac{h_c - 2t_{fc}}{Z} \right]$ $v = 0.55 \left[ 1 + 2 \frac{N_{sd}}{N_{pl,Rd}} \right] \leq 1.1$ $F_{t,Rd} = \min [ F_{Rd,i} ]_{i=3,4,5,8,10}$ $F_{c,Rd} = \min [ F_{Rd,2}; F_{Rd,7} ]$	$K_t = \frac{1}{\sum \frac{1}{k_i}}$ <p>Avec : <math>i = 3, 4, 5, 8, 10</math></p> $K_{eq} = \frac{K_{13} Z_1 + K_1 Z_2}{Z_{eq}}$ $Z_{eq} = \frac{K_{13} Z_1^2 + K_1 Z_2^2}{Z_{eq}}$ <p>.....</p> $K_1 = K_{a,wp,s} + K_{c,wp,s}$ <p>Telle que :</p> $K_{a,wp,s} = \frac{0.38 A_{vc}}{\beta Z_{eq}}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• si le poteau est non enrobé :</li> </ul> $K_{c,wp,s} = 0$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• si le poteau est enrobé :</li> </ul> $K_{c,wp,s} = \frac{0.06 b_c h_c E_{cmc}}{\beta Z_{eq} E_a}$

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si <math>F_{c,Rd} &gt; F_{Rd,13}</math></li> </ul> $F_{Rd,0} = \min [F_{c,Rd}; F_{Rd,13}; F_{t,Rd}]$ $Z = \frac{1 + F_0 C_0^2}{1 + F_0 C_0} - 1$ $F_0 = \frac{F_{Rd,0}}{F_{Rd,13}} - 1$ $C_0 = \frac{Z_2}{Z_1}$ <ul style="list-style-type: none"> <li>• Si <math>F_{c,Rd} \leq F_{Rd,13} : Z = Z_1</math></li> </ul>	
<p>L'ASSEMBLAGE</p>	<p>Rigidité initiale :</p> $S_{j,ini} = \frac{E_a Z_{eq}^2}{\left( \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_{eq}} \right)}$ <p>Rigidité nominale :</p> $S_j = S_{j,ini} / 2$	$F_{Rd} = \min [F_{Rd,1}; F_{c,Rd}; F_{t,Rd}]$ <p>Moment résistant élastique :</p> $M_{e,Rd} = \frac{2}{3} F_{Rd} z$ <p>Moment résistant plastique de calcul :</p> $M_{Rd} = F_{Rd} Z$

Tableau 2.1 : résume la méthode des composantes pour ce type d'assemblage

***Chapitre III :***  
***Exemples d'application sur la***  
***méthode des composantes***

### III.1 EXEMPLE D'APPLICATION :

Le but de cet exemple est de montrer les principales étapes à suivre pour le calcul des poutres mixtes semi-continues avec des assemblages semi-rigides en utilisant la méthode des composantes. Il s'agit de poutres mixtes d'un bâtiment administratif contreventé, de trois niveaux. Le schéma statique de l'ossature est représenté à la figure 2.2.

• Les charges prises en compte pour le dimensionnement sont des charges uniformément réparties sur les poutres mixtes :

- Charge permanente,  $g_k = 16 \text{KN/m}$  ;
- Surcharge d'exploitation (bureaux)  $p_k = 12 \text{KN/m}$  ;

#### Exemple1 : Poteau en HEB140 et poutre en IPE220

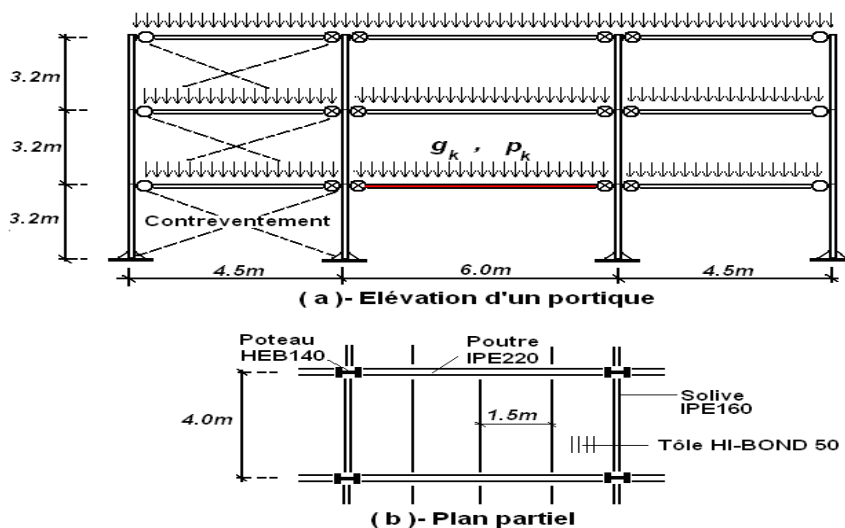


Figure 3.1 : Schéma statique de l'ossature étudié

Les éléments structuraux sont les suivants :

- ❖ Solives : IPE160, acier de nuance S 235
- ❖ Poutres : **IPE220**, acier de nuance S 235, (étayées lors du bétonnage)
- ❖ Dalle mixte :
  - Tôle profilée : HI-BOND 50 :
  - Béton : C20/25 ( $f_{cK} = 20 \text{N/mm}^2$ ,  $E_{cm} = 29000 \text{N/mm}^2$ )
  - Epaisseur totale de la dalle = 130mm
  - Epaisseur de béton sur les nervures :  $h_c = 80 \text{mm}$
- ❖ Poteaux : **HEB140**, acier de nuance S 235
- ❖ Armature en appui : 4 barres  $\phi 10$  (situées dans la largeur participante)

$$A_s = 314 \text{ mm}^2, f_{sK} = 460 \text{ N/mm}^2, h_s = 90 \text{ mm}$$

❖ Connecteurs :

- Goujons à tête,  $d = 19 \text{ mm}$ ,  $h = 100 \text{ mm}$
- Le nombre de goujons est 20, placés sur la longueur totale de la poutre et espacés de  $300 \text{ mm}$ , ( $L_b = 6000 \text{ mm}$ )
- Le premier connecteur est placé à une distance de  $150 \text{ mm}$  du bord de la semelle du poteau.
- Le nombre de connecteurs placés dans la région de moment négatif ( $0.15 L_b$ ) est 3.

### III.2 CARACTERISTIQUES DE LA POUTRE MIXTE :

#### III.2.1 Largeur participante de la dalle en béton :

$$b_{eff} = \min\left(\frac{l_0}{4}; b_p\right)$$

- En travée :  $l_0^+ = 0.7 L_b = 4200 \text{ mm} \Rightarrow b_{eff}^+ = 1050 \text{ mm}$
- Sur appui :  $l_0^- = 0.25(L_{b1} + L_{b2}) = 0.25(4500 + 6000) = 2625 \text{ mm}$   
 $b_{eff}^- = 656.25 \text{ mm}$ .

#### III.2.2 Degré de connexion :

Résistance du connecteur au cisaillement

$$P_{Rd} = \min\left(0.8\pi \frac{d^2}{4} \times \frac{f_u}{\gamma_u}, 0.29d^2 \sqrt{f_{cK} \cdot E_{cm}} / \gamma_v\right)$$

$$P_{Rd} = \min\left(0.8\pi \frac{19^2}{4} \times \frac{450}{1.25}, 0.29 \times 19^2 \sqrt{20 \times 2900} / 1.25\right)$$

$$P_{Rd} = \text{Min}(81656; 63784) = 63784 \text{ N} = 63.784 \text{ KN}$$

Nombre total de connecteurs pour avoir une connexion complète

$$N_f = 2(N_f^+ + N_f^-)$$

$$N_f^+ \geq \frac{\min(A_a \cdot f_y / \gamma_a, 0.85b_{eff}^+ \cdot h_c \cdot f_{cK} / \gamma_c)}{P_{Rd}}$$

$$N_f^+ \geq \frac{\min(712.905; 952)}{63.784} = 11.18$$

$$N_f^- \geq \frac{(A_s \cdot f_{sK} / \gamma_s)}{P_{Rd}} = \frac{125.600}{63.784} = 1.97$$

$$\Rightarrow N_f \geq 2(11.18 + 1.97) = 26.3, \text{ soit } N_f = 27 \text{ connecteurs}$$

➤ Degré de connexion  $\frac{N}{N_f} = \frac{20}{26.3} \approx 0.75 = 75\%$ .

### III.2.3 Moment résistants plastiques de la poutre mixte :

Entravée : (sous une flexion positive)

$$F_a = A_a \cdot f_y / \gamma_a = 3337 \times 235 / 1.10 = 712905 N = 712.905 KN$$

$$F_c = h_c \cdot b_{eff}^+ (0.85 f_{cK} / \gamma_c) = 80 \times 1050 (0.85 \times 20 / 1.5) = 952000 N = 952 KN$$

$$F_c > F_a \rightarrow (\text{Axe neutre dans la dalle})$$

-La cote ( $Z$ ) de l'axe neutre plastique par rapport à la face supérieure de la dalle est donnée par :

$$Z = F_a / (b_{eff}^+ \times 0.85 f_{cK} / \gamma_c) = 712905 / (1050 \times 0.85 \times 20 / 1.5)$$

$$Z = 59.9 mm \approx 60 mm$$

Le moment résistant plastique se calcule alors au niveau de la résultante du béton comprimé :

$$M_{pl.Rd}^+ = F_a (h_a / 2 + h_c + h_p - \frac{Z}{2})$$

$$M_{pl.Rd}^+ = 712905 (110 + 80 + 50 - \frac{60}{2}) = 149710050 N.mm$$

$$M_{pl.Rd}^+ = 149.71 KN.m$$

Prise en compte de la connexion partielle,  $\frac{N}{N_f} = 0.75$

$$M_{pl.Rd}^{red} = M_{a.pl.Rd} + \frac{N}{N_f} (M_{pl.Rd}^+ - M_{a.pl.Rd})$$

$$M_{pl.Rd}^{red} = 60.97 + 0.75(149.71 - 60.97) = 127.525 KN.m$$

Sur appui : (sous une flexion négative)

$$F_s = A_s \cdot f_{sK} / \gamma_s = 314 \times 460 / 1.15 = 125600 N < N^- P_{Rd}$$

$$F_a - F_s = 712905 - 125600 = 587305N$$

$$2b_f \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_s = 2 \times 110 \times 9.2 \times 235 / 1.10 = 432400N$$

$$(F_a - F_s) > 2 \cdot b_f \cdot t_f \cdot f_y / \gamma_a \rightarrow (\text{Axe neutre dans l'âme du profilé}).$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow M_{pl.Rd}^- &= M_{apl.Rd} + F_s \left( \frac{h_a}{2} + h_s \right) - F_s^2 / (4t_w \cdot f_y / \gamma_a) \\ &= (285.4 \times 10^3 \times 235 / 1.10) + 125600 \left( \frac{220}{2} + 90 \right) - 125600^2 / (4 \times 5.9 \times 235 / 1.10) \end{aligned}$$

$$M_{pl.Rd}^- = 82962915N.mm = 82962915KN.m$$

### III.2.4 Moment d'inertie de la poutre mixte :

Coefficient d'équivalence :

$$n = \frac{E_a}{E_{cm}} = \frac{210000}{2900} = 7.24$$

- - En travée « béton non-fissuré »

La position de l'axe neutre élastique par rapport à la face inférieure de la poutre est déterminée à l'aide de l'expression suivante :

$$\begin{aligned} Z_m &= h - \frac{n \cdot A_a}{b_{eff}^+} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{2b_{eff}^+}{n \cdot A_a} (h - Z_a)} \right] \\ Z_m &= 350 - \frac{7.24 \times 3337}{1050} \left[ -1 + \sqrt{1 + \frac{2 \times 1050}{7.24 \times 3337} (350 - 110)} \right] \end{aligned}$$

$$Z_m = 265.43mm \rightarrow (\text{Axe neutre élastique dans la dalle}).$$

Le moment d'inertie de la poutre mixte en travée est donné par l'expression suivante :

$$\begin{aligned} I_b^+ &= I_a + A_a (Z_m - Z_a)^2 + \frac{b_{eff}^+}{3n} (h - Z_m)^3 \\ I_b^+ &= 2772 \times 10^4 + 3337 (265.43 - 110)^2 + \frac{1050}{3 \times 7.24} (350 - 265.43)^3 \\ I_b^+ &= 137.577 \times 10^6 mm^4 = 137.577 \times 10^{-6} m^4 \end{aligned}$$

- Sur appui « béton fissuré »

Position de l'axe neutre élastique

$$Z_m = \frac{A_a Z_a + A_s Z_s}{A_a + A_s} = \frac{3337 \times 110 + 314 \times 310}{337 + 314} = 127.2 \text{ mm}$$

$$Z_m = 127.2 \text{ mm} \rightarrow (\text{Axe neutre élastique dans le profilé})$$

Le moment d'inertie de la poutre mixte sur appui intermédiaire est donné par l'expression suivante :

$$I_b^- = I_a + A_a (Z_a - Z_m)^2 + A_s (Z_s - Z_m)^2$$

$$= 2772 \times 10^{+4} + 3337(110 - 127.2)^2 + 314(310 - 127.3)^2$$

$$I_b^- = 39.2 \times 10^{+6} \text{ mm}^4 = 39.2 \times 10^{-6} \text{ m}^4$$

### III.3 CARACTERISTIQUES DE L'ASSEMBLAGE MIXTE POUTRE-POTEAU :

L'assemblage choisi est représenté à la figure 2.3 (Assemblage mixte poutre-poteau par platine d'extrémité).

Les caractéristiques de cet assemblage peuvent être calculées à l'aide de la méthode des composantes.

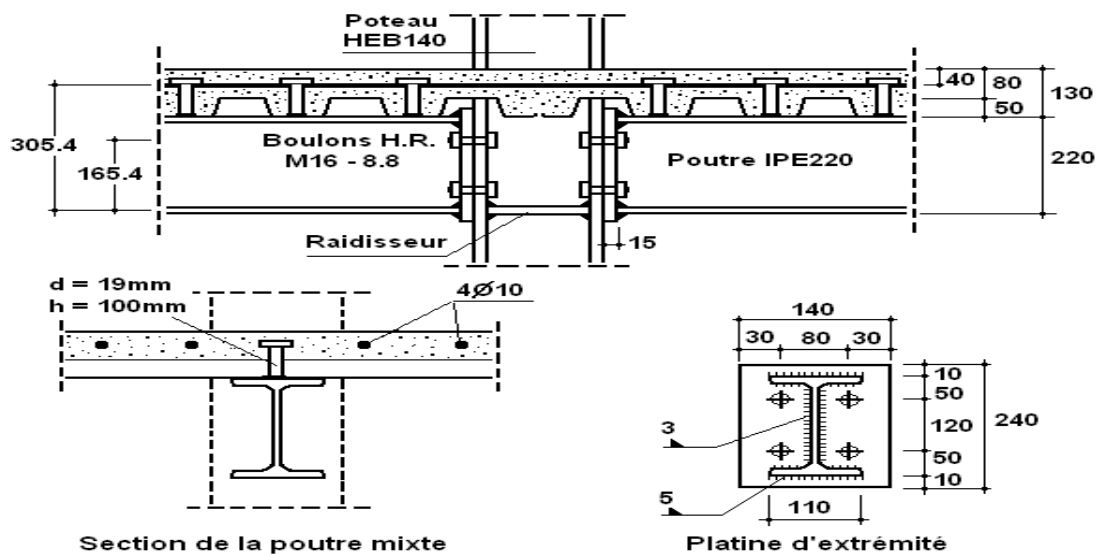


Figure 3.2 : Assemblage mixte poutre-poteau par platine d'extrémité.

**III.3.1 Rigidité initiale de l'assemblage  $S_{j,ini}$  :**

$$S_{j,ini} = \frac{H_b \cdot D_r}{\left( \frac{1}{K_r} + \frac{1}{K_s} \right)} + K_b \cdot D_b^2$$

$H_b$  : La hauteur de la poutre métallique ;

$D_r$  : La distance entre le centre de gravité de l'armature est l'axe de rotation passant par la face inférieure de la semelle comprimée de la poutre métallique ;

$D_b$  : La distance entre la rangée supérieure de boulons et la face extérieure de la semelle inférieure comprimée de la poutre.

$H_b = 220\text{mm}$ ,  $D_r = 220 + 130 - 40 = 310\text{mm}$ ,  $D_b = 220 - 50 = 170\text{mm}$

$$K_r = \frac{\square \square \times \square \square}{\square \square} = \frac{200000 \times 314}{(0.5 \times 140 \times 150)} = 285.455 \text{ KN/mm}$$

$$K_s = N^- k_{sl} = 3 \times 100 = 300 \text{ KN/mm}$$

$$K_b = \frac{E_a}{\left[ \frac{1}{K_3} + \frac{1}{K_4} + \frac{1}{K_5} + \frac{1}{K_{10}} \right]} = \frac{210000}{\left[ \frac{1}{7.728} + \frac{1}{10.949} + \frac{1}{13.875} + \frac{1}{6.525} \right]} \quad K_b = 470.82$$

KN/mm

$$S_{j,ini} = \frac{220 \times 310}{\left[ \frac{1}{285.455} + \frac{1}{300} \right]} + 470.82 \times 170^2$$

$$S_{j,ini} = 23583 \text{ KN.m/rad.}$$

Rigidité nominale de l'assemblage,  $S_j = S_{j,ini} / n$

Pour un assemblage par platine d'extrémité,  $n = 2$



$$S_j = S_{j,ini} / 2 = \frac{23583}{2} = 11791.5 \text{ KN.m / rad}$$

**III.3.2 Moment résistant de l'assemblage  $M_{j,Rd}$  :**

$$R_r = \frac{A_r f_{sk}}{\gamma_s} = \frac{314 \times 460}{1.15} = 125600N = 125.6KN$$

$$R_b = \min(F_{t.wc.Rd}, F_{t.fc.Rd}, F_{t.p.Rd}, F_{t.wb.Rd}, F_{t.b.Rd})$$

$$R_b = \min(162.439KN, 134.550KN, 165.049KN, 232.45KN, 180.4KN)$$

$R_b = 134.550KN \rightarrow$ (La semelle du poteau est la composante la plus faible en zone tendue).

$$R_{fb} = \frac{A_{fb} \cdot f_{yb}}{\gamma_a} = \frac{(110 \times 9.2) \times 235}{1.10} = 216200N = 216.2KN$$

$$R_r + R_b = 125.6 + 134.550 = 260.15 > R_{fb}$$

$$\Rightarrow M_{j,Rd} = R_r \left( D_r - \frac{t_{fb}}{2} \right) + R_b \left( D_b - \frac{t_{fb}}{2} \right) - (R_r + R_b - R_{fb}) \left( \frac{X_{wb} + t_{fb}}{2} \right)$$

$R_r$  : Résistance des armatures à la traction

$R_b$  : Résistance de la rangée supérieure de boulons à la traction

$R_{fb}$  : Résistance de la semelle inférieure de la poutre à la compression

$$X_{wb} = \frac{(R_r + R_b - R_{fb})}{t_{wb} \cdot f_{yb}} = \frac{(260.15 - 216.2)}{5.9 \times 235 \times 10^{-3}} = 31.70mm$$

Avec :

$t_{wb}$  : Épaisseur de l'âme de la poutre et  $f_{yb}$  : limite élastique de l'acier de la poutre.

$$D'où : M_{j,Rd} = 125.6 \left( 310 - \frac{9.2}{2} \right) + 134.55 \left( 170 - \frac{9.2}{2} \right) - (260.15 - 216.2) \left( \frac{31.70 + 9.2}{2} \right)$$

$$\Rightarrow M_{j,Rd} = 59714KN.mm = 59.714KN.m$$

**III.3.3 Capacité de rotation de l'assemblage  $\phi_{cd}$  :**

$$\phi_{cd} = \frac{\Delta_{r,u}}{D_r} + \frac{S}{H_b}$$

$$H_b = 220mm \quad , \quad D_r = 310mm .$$

$$\Delta_{r,u} = L_r \cdot \varepsilon_{r,u} = (0.5 \times 140 + 150)(0.03) = 6.6mm$$

$$S = 5 \left( 1.5 - \frac{N}{N_f} \right) \frac{L_b}{5} = 5(1.5 - 0.75) \frac{6}{5} = 4.5mm$$

$$\Rightarrow \phi_{cd} = \frac{6.6}{310} + \frac{4.5}{220} = 41.7 \times 10^{-3} rad = 41.7mrad$$

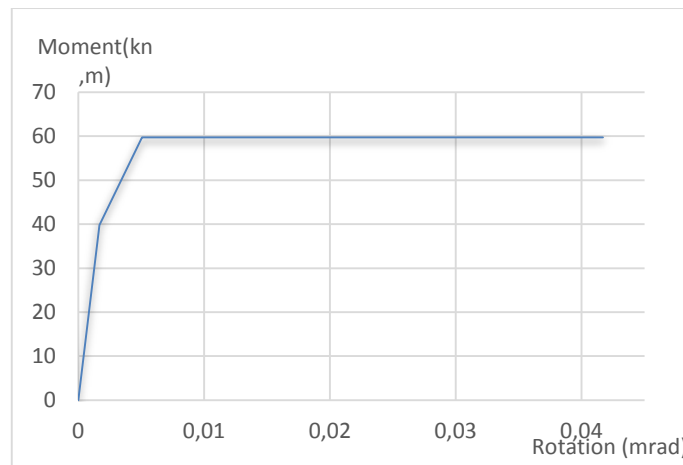


Figure 3.3 : Courbe de comportement moment-rotation

**III.4 Classification des assemblages poutre - poteau :**

Les courbes de comportement ( $M - \phi$ ) des assemblages peuvent être ramenées à trois grandes catégories représentées sur la figure (2.4). Pour chaque catégorie de comportement ( $M - \phi$ ) est associée la conception de l'assemblage correspondante.

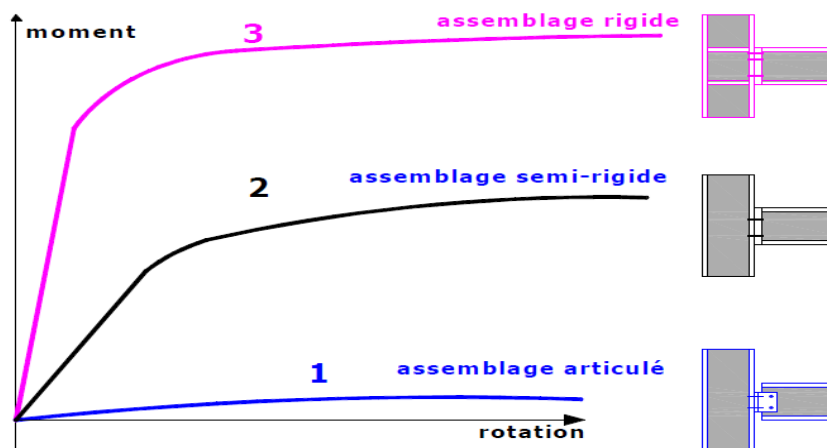


Figure 3.4 : Classification des assemblages mixtes

La courbe (1) représente le cas d'un assemblage articulé qui ne possède pas de rigidité à la flexion. La courbe (2) correspond à un assemblage semi-rigide ou la transmission d'un certain moment de flexion est possible avec une rigidité moyenne. La courbe (3) correspond à un assemblage rigide capable de transmettre un moment de flexion important pour une faible rotation.

➤ **Classification par rigidité :**

**Zone 1 :** si  $S_{j,ini} \geq 8 \frac{E_b I_b^+}{L_b}$  assemblage rigide.

**Zone 2 :** si  $0.5 \frac{E_b I_b^+}{L_b} \leq S_{j,ini} \leq 8 \frac{E_b I_b^+}{L_b}$  assemblage semi - rigide.

**Zone 3 :** si  $S_{j,ini} \leq 0.5 \frac{E_b I_b^+}{L_b}$  assemblage articulé.

$$S_{j,ini} = 23583 \text{KN.m/rad}$$

$$0.5 \frac{E_b I_b^+}{L_b} = 0.5 \frac{210000 \times 137.577 \times 10^{+6}}{6000} = 2408 \times 10^{+6} \text{N.mm/rad} = 2408 \text{KN.m/rad}$$

$$8 \frac{E_b I_b^+}{L_b} = 8 \cdot \frac{210000 \times 137.577 \times 10^{+6}}{6000} = 38522 \times 10^{+6} \text{N.mm/rad} = 38522 \text{KN.m/rad}$$

$$\Rightarrow 2408 \text{KN.m/rad} < S_{j,ini} = 23583 \text{KN.m/rad} < 38522 \text{KN.m/rad}$$

L'assemblage est bien classé «semi- rigide».

➤ **Classification par résistance :**

Les assemblages mixtes sont classés comme suite :

- Assemblage pleinement résistant au sommet d'un poteau si :

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$$

Et

$$M_{j,Rd} \geq M_{c,pl,Rd}$$

$M_{j,Rd}$  : le 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

- Assemblage est pleinement résistant le long d'un poteau si :

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,pl,Rd}$$

Et

$$M_{j,Rd} \geq 2M_{c,pl,Rd}$$

Assemblage est articule si :

$M_{j,Rd}$  est plus faible que 25% de moment résistant requis pour avoir un assemblage pleinement résistant.

$$M_{j,Rd} = 59.714KN.m$$

$$M_{pl,Rd}^- = 82.963KN.m$$

$$\Rightarrow 0.25M_{pl,Rd}^- < M_{j,Rd} = 59.714KN.m < M_{pl,Rd}^-$$

L'assemblage est bien classé « semi- rigide » et « de résistance partielle ».

### Exemple2 : Poteau en HEB200 poutre en IPE300

Dans cet exemple on a utilisé un logiciel de calcul par la méthode des composantes (COP2 AM 2.1.2), ce logiciel a été développé par ArcelorMittal pour le dimensionnement des assemblages mixtes selon l'EuroCode04.

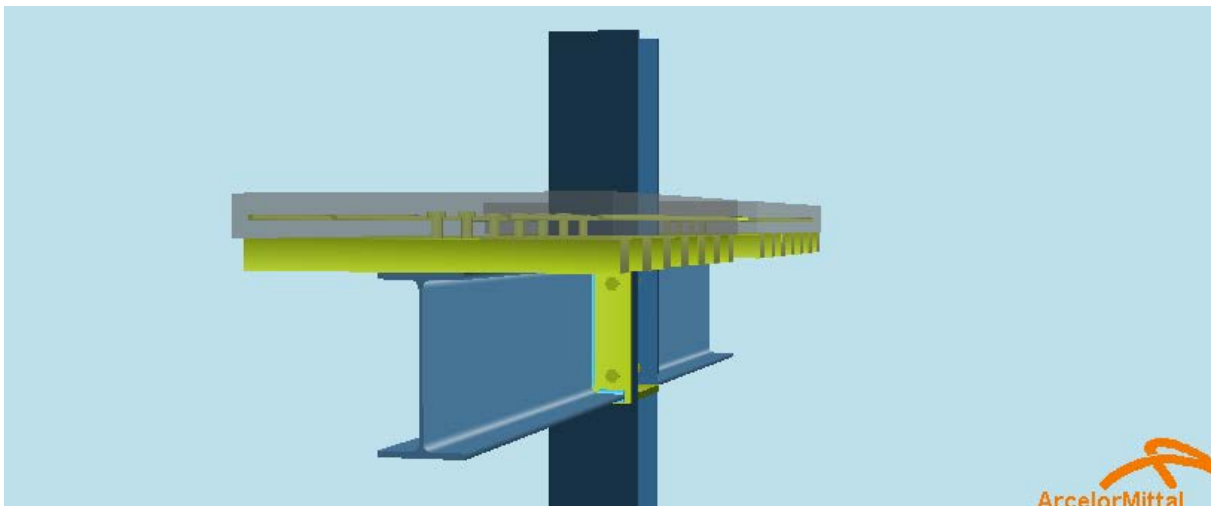


Figure 3.5 : Vue en 3D de l'assemblage (Exemple2)

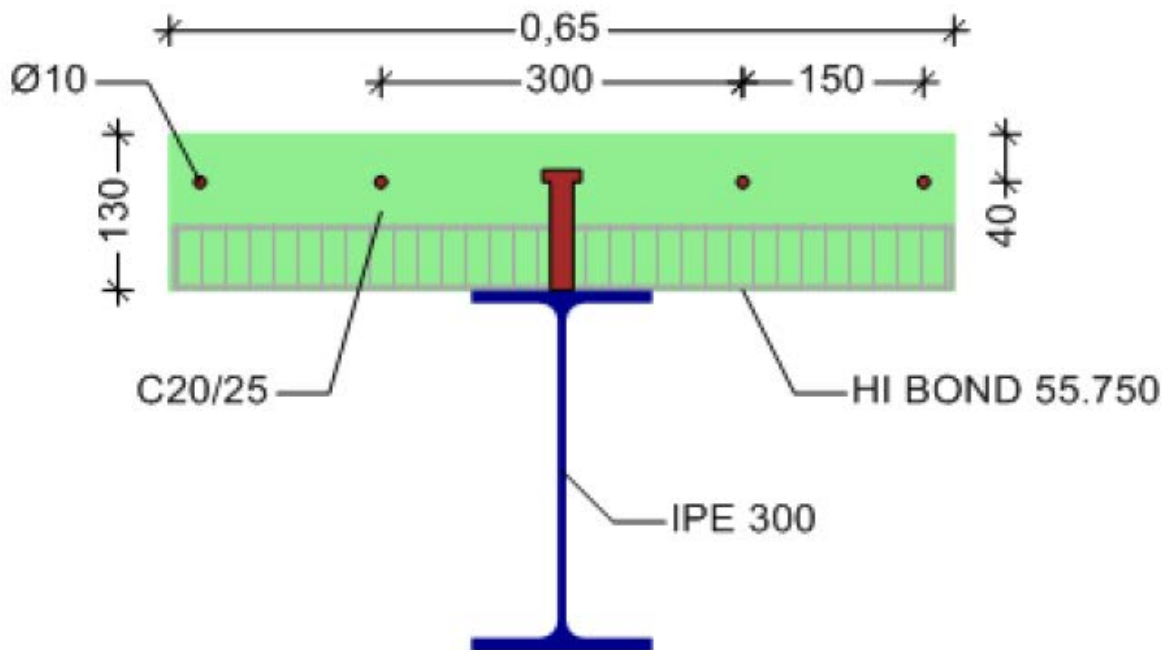


Figure 3.6 : Détails de la poutre mixte

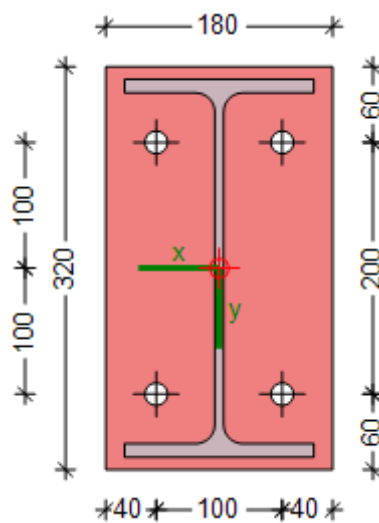


Figure 3.7 : La Platine d'extrémité

Le Calcul nous a donné les caractéristiques suivantes :

$$M_{j,Rd} = 89144KN.mm = 89.144KN.m$$

$$S_{j,ini} = 58400KN.m/rad$$

$$S_j = S_{j,ini}/2 = 29200KN.m/rad$$

Classification de l'assemblage : Semi-rigide

Exemple3 : poteau en HEB300 et poutre en IPE450

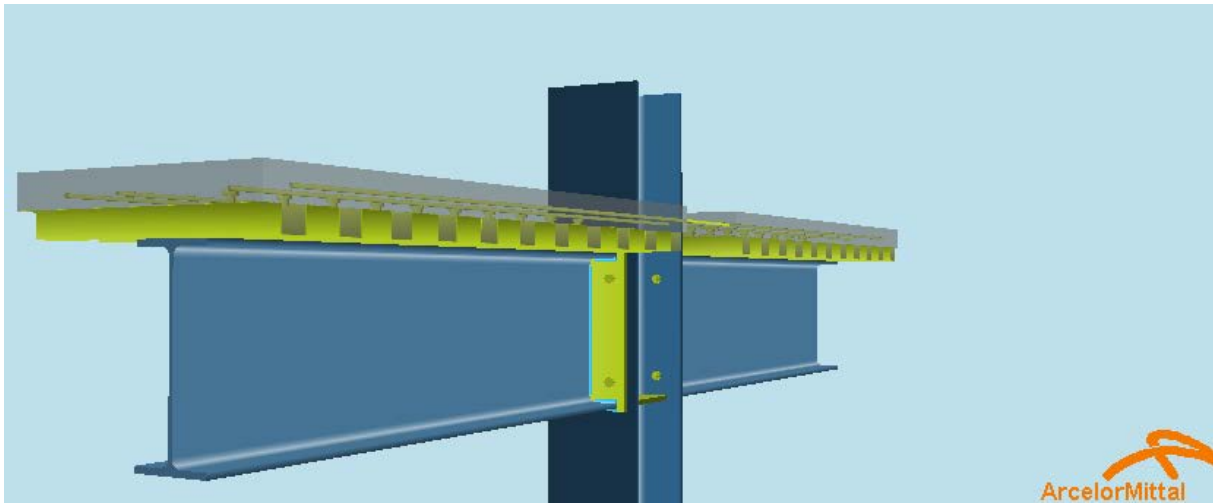


Figure 3.8 : Vue en 3D de l'assemblage (Exemple3)

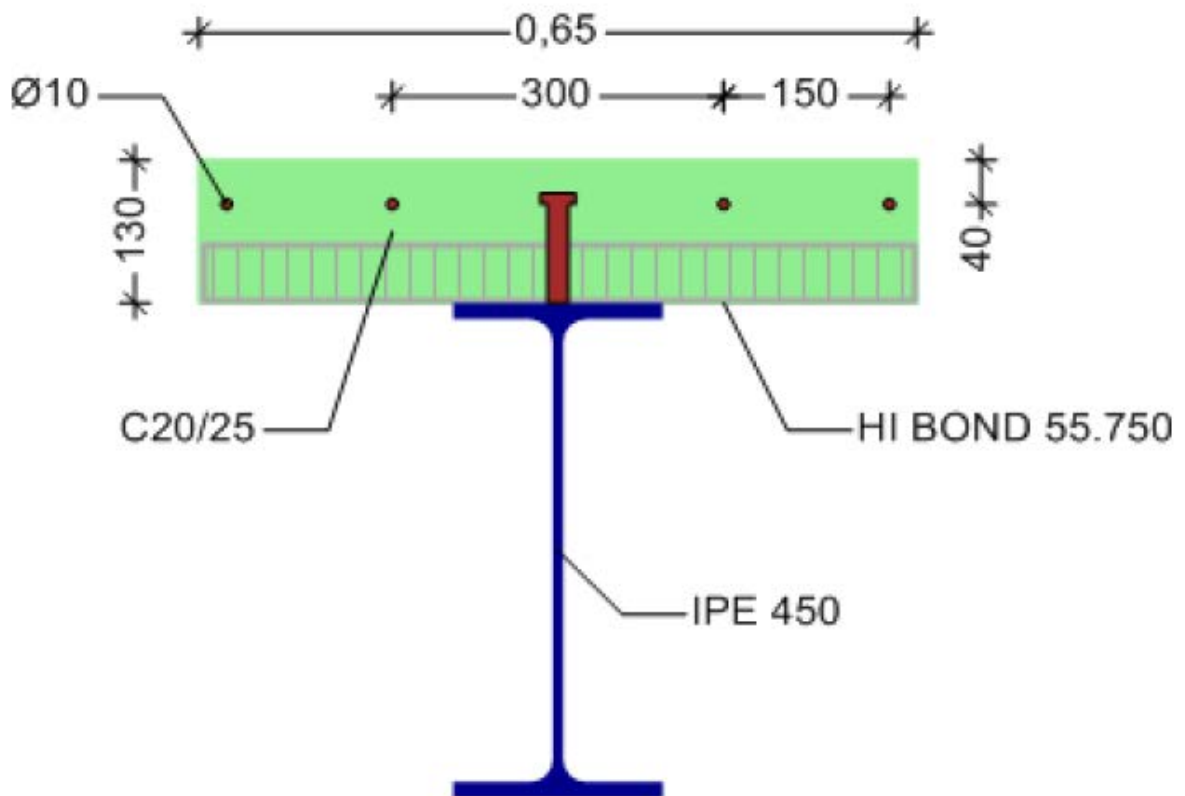
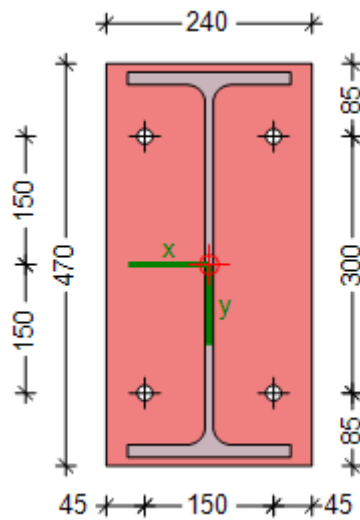


Figure 3.9 : Détails de la poutre mixte



**Figure 3.10 : La Platine d'extrémité**

Le calcul nous a donné les caractéristiques suivantes :

$$M_{j,Rd} = 132151 \text{KN} \cdot \text{mm} = 132.151 \text{KN} \cdot \text{m}$$

$$S_{j,ini} = 99510 \text{KN} \cdot \text{m/rad}$$

$$S_j = S_{j,ini}/2 = 49750 \text{KN} \cdot \text{m/rad}$$

Classification de l'assemblage : Semi-rigide

*Chapitre IV:*  
*Tentative de modélisation par*  
*éléments finis*  
*d'un assemblage mixte*  
*(poutre-poteau)*

## IV.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente un modèle d'éléments finis tridimensionnel 3D en utilisant le code ANSYS [56] pour la simulation d'un assemblage mixte de deux poutres mixtes avec un poteau métallique par plaques d'extrémité boulonnées. La validation du modèle proposé se fait par comparaison des résultats numériques avec des résultats expérimentaux tirés de la littérature.

D'une manière générale, la modélisation par éléments finis comporte les étapes qui seront citées ci-dessous. Il est à noter que chaque étape dépend de celui qui le précède.

- 1) Définition des caractéristiques géométriques du modèle,
- 2) Choix des types d'éléments finis à utiliser pour la modélisation,
- 3) Définition des propriétés mécaniques des matériaux,
- 4) Définition du maillage des éléments finis,
- 5) Discrétisation de la géométrie du modèle,
- 6) Introduction des conditions aux limites et chargement du modèle,
- 7) Choix des paramètres pour l'analyse non linéaire (nombre d'incrémentations, nombre maximal d'itération, critères de Convergences, etc.)
- 8) Exécution du calcul
- 9) Exploitation des résultats (déformée, contraintes, déformations, etc...).

## IV.2 Système d'un assemblage mixte (poutre-poteau) par platine d'extrémité boulonnée

Le système étudié est composé d'un poteau métallique et de deux poutres consoles mixtes adjacentes fixées au poteau par une platine d'extrémité boulonnée. La dalle de béton est armée par des barres longitudinales traversant le poteau. La connexion entre la poutre métallique et la dalle de béton est assurée par des connecteurs (goujons soudés). Les charges sont appliquées à l'aide de deux vérins hydrauliques aux extrémités des poutres consoles afin de créer des moments fléchissants au niveau de l'assemblage. A titre d'illustration, la Figure 4.1 présente l'exemple d'un assemblage mixte poutre-poteau par platine d'extrémité boulonnée.

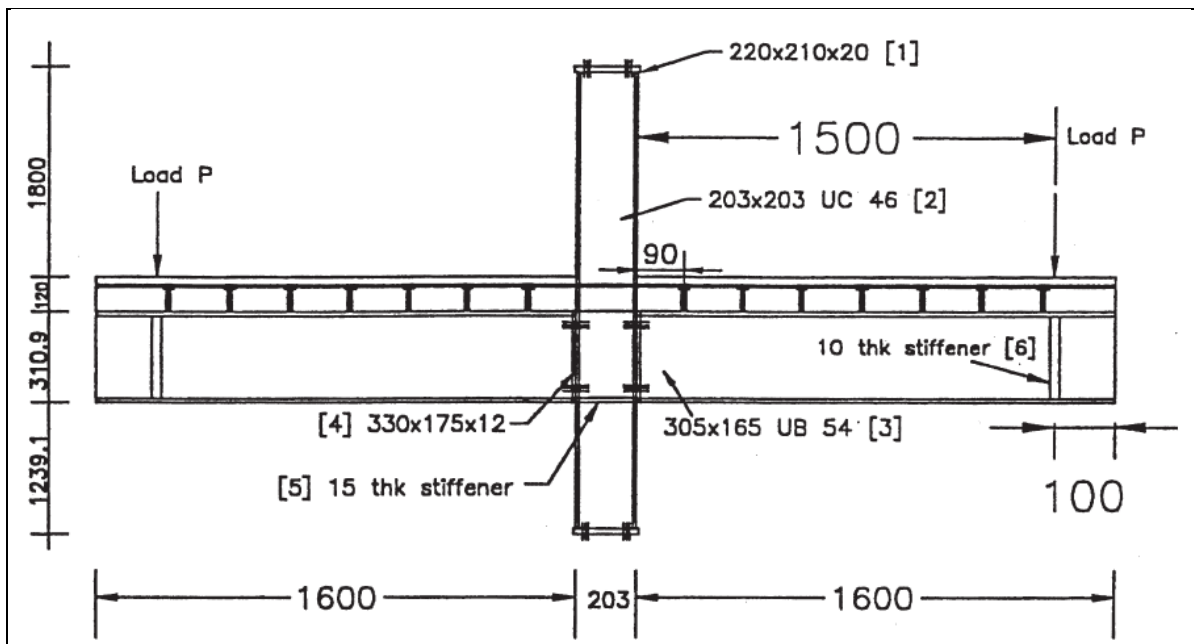


Figure 4.1- Assemblage mixte (poutre-poteau) par platine d'extrémité boulonnée

### IV.3 Modèle d'éléments finis

Le système d'un assemblage mixte (poutre-poteau) présenté à la Figure 4.1 est simulé par une modélisation tridimensionnelle 3D en utilisant le code d'éléments finis ANSYS [56]. Les parties constituant ce système sont le poteau métallique, les deux poutres métalliques, la plaque d'extrémité, les boulons, les raidisseurs, les connecteurs, la dalle en béton et les barres d'armature. Afin d'obtenir

d'un assemblage mixte (poteau-poutre)

une simulation correcte, toutes ces parties doivent être modélisées en tenant compte leur non-linéarité matérielle.

IV.3.1 Types d'éléments finis utilisés

- La dalle en béton est modélisée par des éléments solides à huit nœuds (SOLID65).

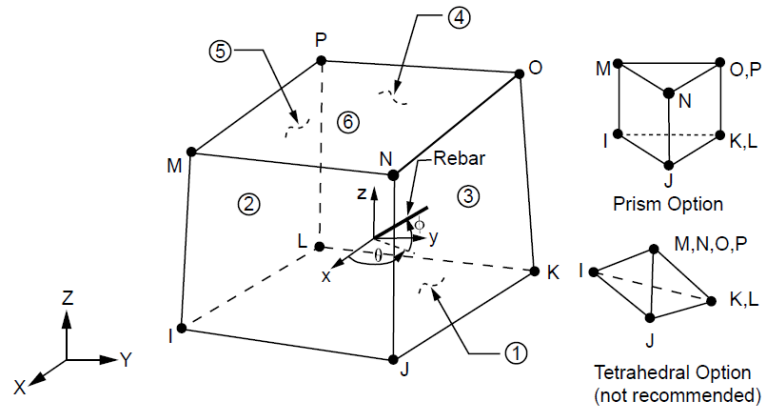


Figure 4.2. Géométrie de l'élément SOLID65

- Les barres d'armatures sont modélisées de manière discrète par des éléments barres à deux nœuds (LINK8) en supposant une adhérence parfaite avec le béton car la prise en compte du glissement entre armatures et béton n'apporte pas de modification significative au comportement global à cause de nombreuses barres transversales placées pour éviter la fissuration longitudinale.

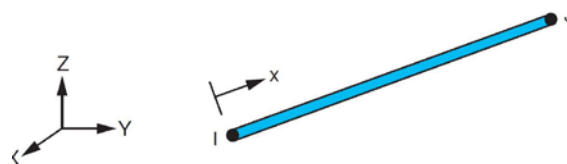


Figure 4.3. Géométrie de l'élément LINK8

- Le poteau métallique, les poutres métalliques, la plaque de contact et les raidisseurs sont modélisés par des éléments solides (SOLID45). Cet élément est défini par huit nœuds ayant trois degrés de liberté à chacun des directions x, y, et z, comme illustré à la Fig. 4.4.

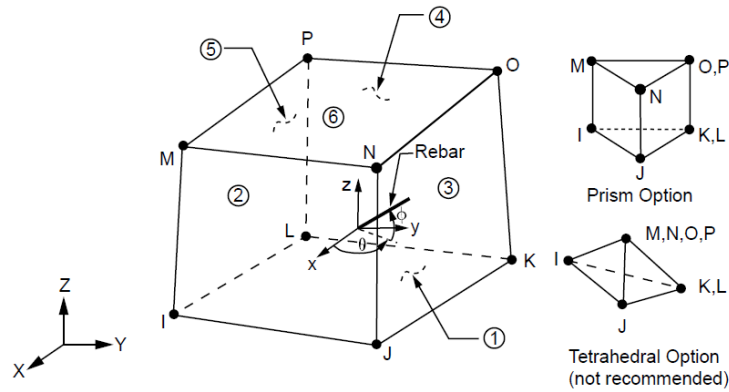


Figure 4.4. Géométrie de l'élément SOLID45

- Les connecteurs (goujons à tete) et les boulons sont modélisés par des éléments poutres (BEAM189) en respectant leurs positions réelles.

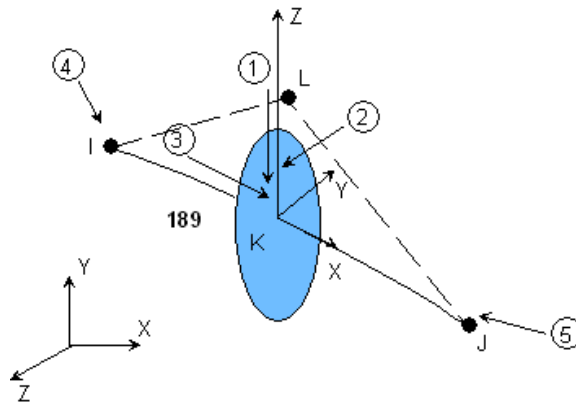


Figure 4.5. Géométrie de l'élément BEAM189

- L'interface de contact (acier-béton) entre la face supérieure de la poutre métallique et la face inférieure de la dalle en béton est modélisée par des éléments de contact (**CONTA173** et **TARGE170**). Ces éléments sont capables de transmettre les charges de la dalle en béton à la poutre métallique et empêchent le chevauchement des nœuds à l'interface de liaison acier-béton tout en permettant leur glissement relatif. Les interfaces de contact (acier-acier) entre la plaque de contact et la semelle du poteau d'une part et entre les tiges des boulons et les trous sont aussi modélisés par des éléments de contact (**CONTA173** et **TARGE170**). Les caractéristiques géométriques de ces éléments sont montrées sur la Figure 4.6.

## d'un assemblage mixte (poteau-poutre)

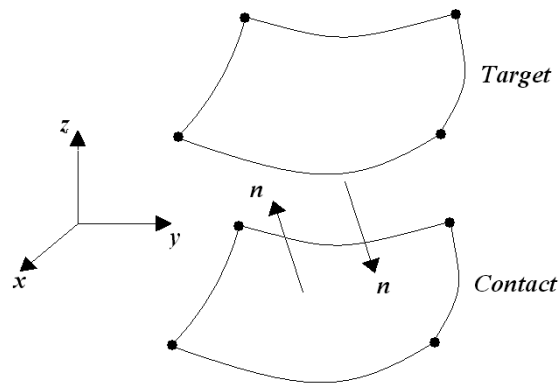


Figure 4.6. Eléments de contact - CONTA173 et TARGE170

L'élément CONTA173 est lié à l'élément TARGE170 par l'intermédiaire d'un ensemble de paramètres incluant le coefficient de frottement et le type des matériaux en contact. Dans notre cas, on affecte au coefficient de frottement une valeur de 0,4 entre l'acier et le béton et la valeur de 0.2 entre l'acier et l'acier.

### IV.3.2 Maillage et conditions aux limites

Le maillage doit reproduire la géométrie de l'assemblage mixte en respectant la position réelle des connecteurs et des boulons d'assemblage. Le degré de raffinement du maillage est choisi en prenant en considération le temps d'analyse et la fidélité des résultats. La Figure 4.7 présente le maillage et les conditions aux limites adoptées pour le modèle tridimensionnel proposé.

## d'un assemblage mixte (poteau-poutre)

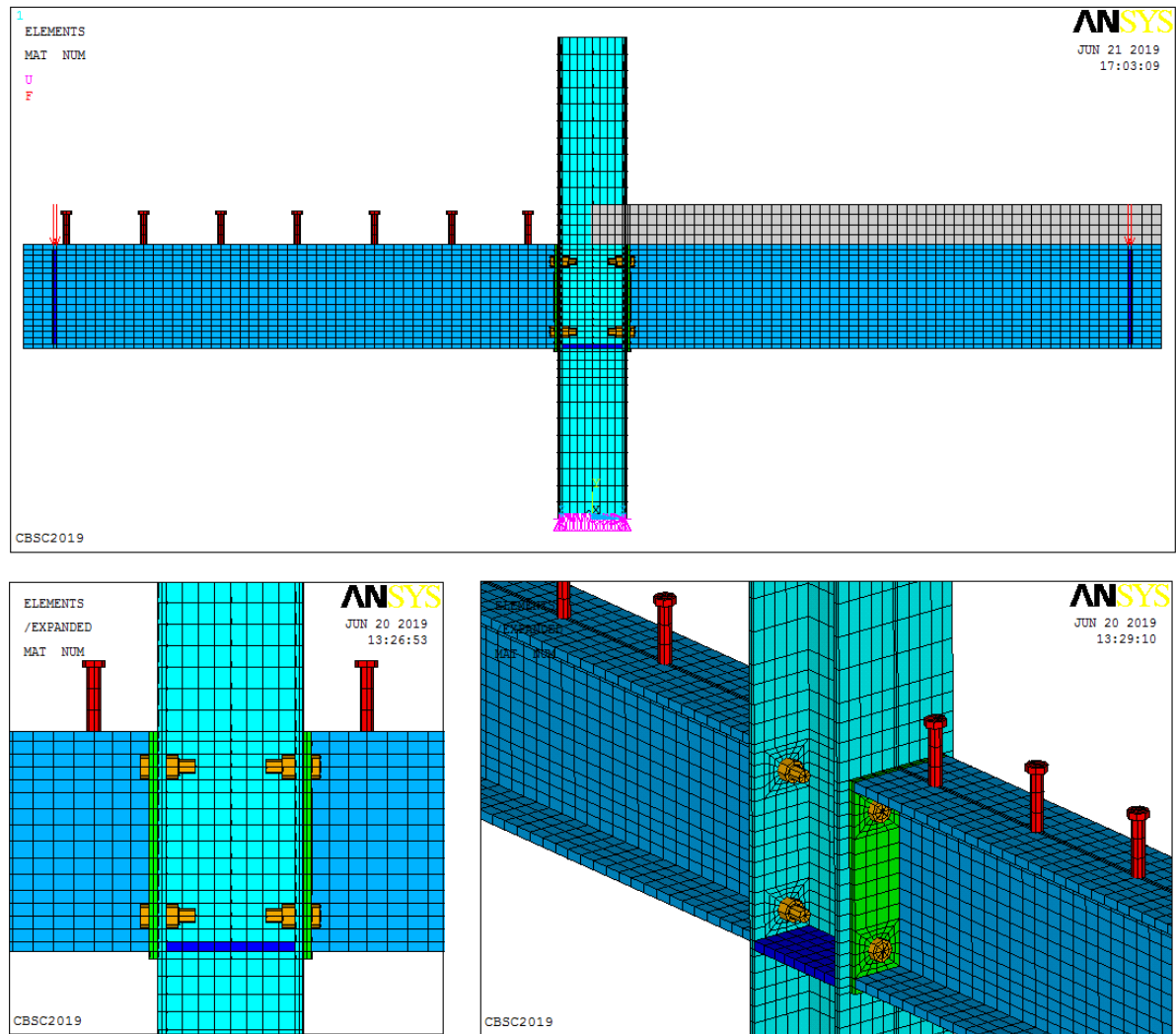


Figure 4.7. Maillage et conditions aux limites

## IV.3.3 Modélisation des matériaux

Le modèle 3D proposé tient en compte la non-linéarité matérielle du béton de la dalle, de l'acier d'armature et de l'acier de construction de la poutre et du poteau de la plaque et raidisseurs, il tient aussi en compte la plasticité de l'acier des boulons et des connecteurs.

## A : Béton de la dalle

Le modèle utilisé pour le béton est celui proposé par l'Eurocode 2 qu'il a une forme non-linéaire en compression et bilinéaire en traction en admettant que le béton tendu résiste encore après sa fissuration grâce à l'adhérence entre le béton et les barres d'armature. Cet effet de raidissement appelé « tension stiffening » est pris en compte en considérant qu'à partir de  $f_t$  la courbe devient horizontale (Fig.4.8).

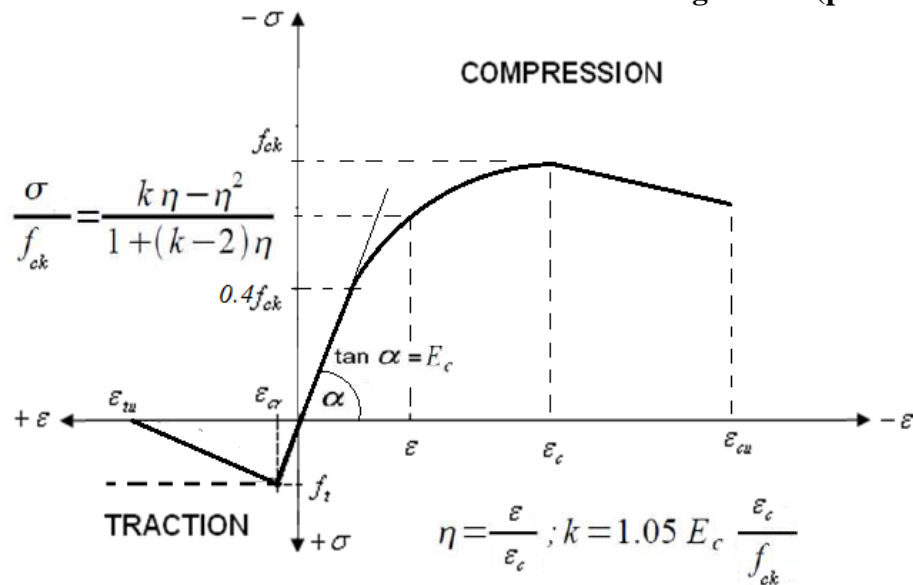


Figure 4.8. Diagramme (contrainte – déformation) pour le béton

- Vu le comportement non linéaire du béton, le module d'élasticité  $E_c$  doit être interprété comme un module sécant moyen. Selon l'Eurocode 2,  $E_c$  peut être établi à l'aide de la relation suivante :

$$E_c = 9,5(f_{ck} + 8)^{1/3} \dots\dots\dots(3.1)$$

$E_c$  est exprimé en  $KN/mm^2$  ;

$f_{ck}$  en  $N/mm^2$ .

- La déformation correspondante à la résistance maximale  $f_{ck}$  est prise égale à  $\epsilon_c = 0.002$ , bien que la déformation ultime correspondante à la rupture du béton comprimé est prise égale à  $\epsilon_{cu} = 0.0035$ .

**B : Acier de construction, acier d'armature, acier des boulons et acier des connecteurs**

Le modèle utilisé pour l'acier de construction, acier d'armature, acier des boulons et acier des connecteurs est un modèle élasto-plastique bilinéaire symétrique en traction et en compression par rapport à l'origine (Fig.4.9). L'utilisateur doit, donc, introduire comme données les valeurs suivantes :

- le module d'élasticité  $E$  et le coefficient de Poisson  $\nu$  ,
- la limite d'élasticité  $f_y$  et la résistance ultime en traction et en compression  $f_u$  ,
- la déformation élastique  $\epsilon_y$  et la déformation ultime en traction et en compression  $\epsilon_u$  .

- L'écrouissage est pris en compte par un module d'élasticité  $E_h = \frac{|f_u - f_y|}{|\epsilon_u - \epsilon_y|}$ .

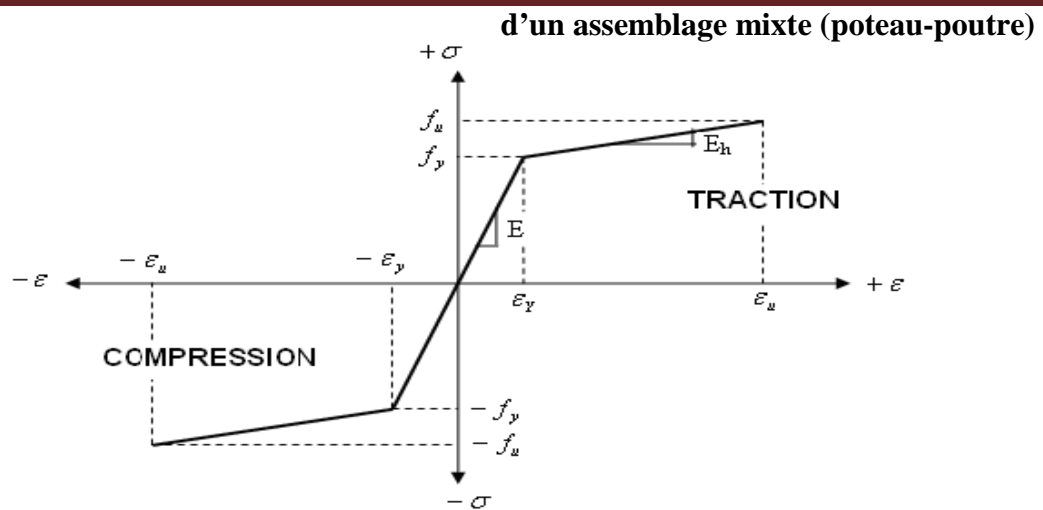


Figure 4.9. Diagramme contrainte-déformation pour l'acier

#### IV.4 Validation du modèle proposé

Pour s'assurer de la bonne représentativité du modèle proposé, il faut présenter les résultats d'analyse numérique en les comparant à ceux obtenus expérimentalement de l'assemblage mixte par platine d'extrémité boulonnée qui a été testé par Richard Liew [?].

La (Fig.4.10) présente l'assemblage mixte (poutre-poteau) par plaque d'extrémité boulonnée testé par Richard Liew [?].



d'un assemblage mixte (poteau-poutre)

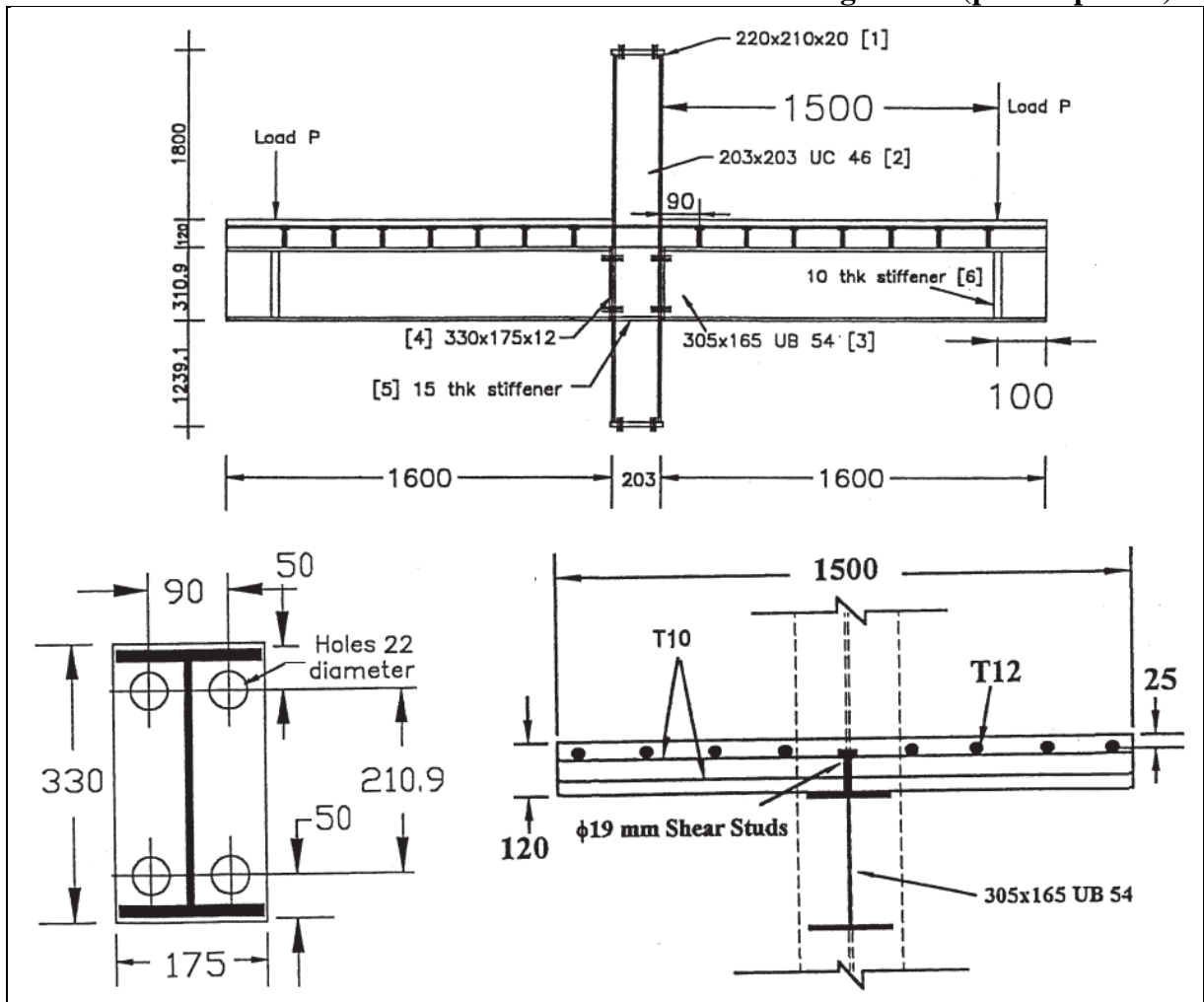


Figure 4.10 : Assemblage mixte (poutre-poteau) par plaque d'extrémité boulonnée testé par Richard Liew

Remarque:

Pendant l'exécution de ce modèle chargé, nous avons rencontré un problème de manque des résultats du logiciel ANSYS 12.1 (version académique) car le nombre de nœuds et d'éléments finis a dépassé le nombre limité par l'ANSYS.

### *Conclusion Générale*

Le travail présenté dans ce mémoire de master a été consacré à la caractérisation et l'étude du comportement des assemblages mixtes poutre - poteau par platine d'extrémité boulonné.

Premièrement nous avons donné des généralités sur la conception des assemblage mixte poutre poteau et nous avons conclu d'après la classification des assemblages par leur résistance ou leur rigidité que la prise en compte de la semi-rigidité des assemblage poutre poteau réduire les moments en appuis, donc elle réduire le nombre de boulons et la section des profilé utilisés, et elle permet d'éviter, autant que possible l'utilisation des raidisseurs et des pièces de renfort qui sont toujours coûteux dans la réalisations des assemblage.

Par rapport à l'assemblage articulé, l'assemblage semi-rigide présente les avantages suivants :

- Une diminution des flèche en travée et des rotation sur appui.
- Une longueur de flambement réduite du poteau sur lequel la poutre est fixée

Par rapport à l'assemblage rigide, l'assemblage semi-rigide présente, en outre , les avantages suivants :

- La possibilité de simplifier les détails de construction
- La réduction du cout de réalisation des assemblages

L'utilisation de la méthode des composantes de l'Eurocode 4 nous a permet d'identifier les caractéristiques fondamentales d'un assemblage mixte à savoir : la rigidité initiale et le moment résistant, qui sont nécessaires pour l'identification de type d'assemblage.

Dans le dernier chapitre on a essayé la modélisation d'un assemblage mixte poutre poteau par le logiciel d'analyse numérique ANSYS12.1, mais le nombre de nœuds et d'éléments de notre model en 3D a dépassé le nombre maximal de nœuds et d'éléments limité par la version académique de l'ANSYS12.1.

## ***REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUE***

- [1]: EN 1994-1-1-Eurocode 4: « design of composite steel and concrete structures ». Part 1-1 General rules and rules for building: draft N°2, April 2000.
- [2]: ENV 1993-1-1-Eurocode 3: Part1-1: Rivised Annex J  
Joint in building frames 1993.
- [3]: C.E.C.M Document N°109. Collection C.T.I.C.M : «Conception et calcul des assemblages mixtes de bâtiments»
- [4] JASPART J.P. –Elément de stabilité des structures de bâtiments métalliques. Notes destinées aux étudiants de CUST de Clermont-Ferrand. 1998
- [5] MUZEAU J.P. – Constructions métalliques-Moyens d'assemblages. Université Blaise Pascal Clermont-Ferrand II. Novembre 2010
- [6] Mimoune M. et Mimoune F.Z. – Analyse du comportement des assemblages boulonnés par platine d'about sollicités en traction. Revue Canadienne de Génie Civil, 30 (4), pp. 615-624. 2003
- [7] MOREL J. – Calcul des Structures métalliques selon l'Eurocode3. Editions Eyrolles.1994.
- [8] Aribert J. M. Lachal A. et Dinga O. N. – Modélisation du comportement d'assemblages métalliques semi rigides de types poutre poteau boulonnés par platine d'extrémité.  
Construction Métallique, N° 1, 22 pages. 1999
- [9]: C.E.C.M Document N°109. Collection C.T.I.C.M : «Conception et calcul des assemblages mixtes de bâtiments»
- [10]: Richard Liew and Shanmugam Yu. (2000). Testing of steel concrete composite connections and appraisal of results. Journal of Constructional Steel Research, Vol.56 pp117–150