

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



**Université Abou Bakr Belkaid Tlemcen**

**Faculté de Technologie**

**Département de Génie Civil**

**Spécialité Master : *Construction Métallique et Mixte***

**Thème :**

**ETUDE DE L'EFFET DES ASSEMBLAGES SEMI-RIGIDE SUR LE  
DIMENSIONNEMENT D'UN BATIMENT METALLIQUE R+4  
SELON L'EUROCODE 3**

**Mémoire du projet de fin d'études en vue de l'obtention  
du diplôme de master en : Génie Civil  
Option : Construction Métallique et Mixte**

**Présenté par :**

**M<sup>me</sup> DJILALI Née HAMIDI Nesrine**

**Membres du jury :**

|                         |            |           |
|-------------------------|------------|-----------|
| Mr. MISSOUM Abdelghani  | M.C.A.     | Président |
| Mr BOUMECHRA Nadir      | Professeur | Encadrant |
| Mr MERAD BOUDIA Sofiane | Docteur    | Examineur |

**Année Universitaire 2020-2021**

# Dédicace

A mes parents : HAMIDI Djilali et ALEM Khadidja

A mes beaux-parents : DJILALI Hocine et BENYOUB.N

A mon marie : DJILALI Mounir Zakaria

A mes frères : Ahmed, Noureddine, Abdel Wahab

A mes sœurs : Karima, Fatiha, Amina, Khiera Anissa

A mes beaux-frères : Ahmed, Charafeddine Mouhamed

A toute la promotion de -CMM-

A tous mes amies et collègues

À tous ceux qui, par un mot, m'ont donné la force de continuer.....

**HAMIDI Nesrine**

# **Remerciements**

*Avant tout je tiens à remercier **ALLAH** tout puissant de nous avoir donné la foi, la force et le courage.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **M. BOUMECHRA Nadir**, Professeur à l'université ABOU BAKR BELKAID-Tlemcen- qui m'a fait l'honneur de diriger ce travail. Il a été la personne qui m'a initié au travail de recherche. A travers nos discussions, souvent longues mais toujours fructueuses, il m'a amené à avoir un regard critique sur un nombre de phénomènes, qui paraissaient souvent être des évidences. Je tiens à lui assurer de mon profond respect et sympathie.*

*Je tiens également à remercier **M. MISSOUM Abdelghani**, Maitre de conférences à l'université ABOU BAKR BELKAID-Tlemcen- d'avoir présidé mon jury de thèse.*

*Je remercie **M. MERAD BOUDIA Sofiane** Docteur à L'université de Tlemcen, pour avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Je tiens à remercier mes parents qui m'ont soutenu pour réaliser mes études et qui m'ont toujours encouragé, ainsi que mes frères et mes sœurs. Je tiens à remercier ma belle-famille et mon mari **DJILALI Zakaria Mounir** pour m'avoir continuellement encouragé et soutenu durant ce travail.*

# SOMMAIRE

|                             |                              |
|-----------------------------|------------------------------|
| Résumé.....                 | 1                            |
| Introduction générale ..... | Error! Bookmark not defined. |

## CHAPITRE (1)

### **Revue Littérature (Assemblages métalliques rigides et semi-rigides)**

|  |    |
|--|----|
| 1-1 Introduction :.....  | 4  |
| 1-2 Caractérisations du comportement des assemblages boulonnés selon l'Eurocode 3 :..... | 4  |
| 1-2-1 Classification des assemblages :.....  | 4  |
| 1-2-1-1 Résistance :.....  | 4  |
| 1-2-1-2 Rigidité :.....  | 5  |
| 1-2-1-3 Ductilité (Capacité de rotation) : .....   | 7  |
| 1-2-2 Courbe générale de comportement des assemblages :.....                             | 8  |
| 1-2-2-1 Analyse globale élastique :.....   | 9  |
| 1-2-2-2 Analyse plastique .....  | 9  |
| 1-2-2-3 Analyse élastique parfaitement plastique :.....                                  | 10 |
| 1-3 Modes et principes de comportement des assemblages boulonnés : .....                 | 11 |
| 1-3-1 Principes de comportement :.....   | 11 |
| 1-3-1-1 Méthode des composantes :.....   | 11 |
| 1-3-1-2 Etapes de la méthode des composantes :.....                                      | 12 |
| 1-3-1-3 Détermination de la rigidité et la résistance d'assemblage : .....               | 12 |
| 1-3-2 Modes de comportement des assemblages boulonnés fournis par l'EC3 : .....          | 15 |
| 1-4 Les effets des assemblages semi-rigides dans le domaine de construction : .....      | 17 |
| 1-5 Modélisation des assemblages semi-rigide :.....                                      | 18 |
| 1-6 Exemples d'analyse globale de structures : .....                                     | 19 |
| 1-6-1 Poutre avec liaisons semi-rigide : .....   | 19 |
| 1-6-2 Portique avec deux assemblages semi-rigides : .....                                | 21 |
| 1-7 Dimensionnement des bâtiments à assemblages semi-rigides :.....                      | 22 |
| 1-8 Conclusion : .....   | 24 |

## CHAPITRE (2)

### **Modélisation mathématique des assemblages semi-rigides**

|   |    |
|---|----|
| 2-1 Introduction :.....   | 26 |
| 2-2 Fonctionnement des assemblages boulonnés de type semi-rigide :..... | 26 |
| 2-3 Les types des assemblages semi-rigides : .....                      | 27 |

|   |    |
|---|----|
| 2-3-1 Les assemblages par une seule cornière d'âme : .....  | 27 |
| 2-3-2 Les assemblages par double cornière d'âme : .....   | 28 |
| 2-3-3 Les assemblages par cornières de semelles : .....   | 29 |
| 2-3-4 Les assemblages par cornières semelles avec doubles cornières d'âme : .....                     | 30 |
| 2-3-5 Les assemblages par platine d'extrémité .....   | 30 |
| 2-3-6 Les assemblages par platine d'about : .....   | 30 |
| 2-4 Modélisation des assemblages semi-rigide : .....  | 31 |
| 2-5 Méthodes de caractérisation des assemblages semi-rigides : .....                                  | 34 |
| 2-4-1 Méthode expérimentale: .....  | 34 |
| 2-4-2 Méthode numérique : .....   | 35 |
| 2-4-3 Méthode analytique : .....  | 35 |
| 2-4-4 Méthode empirique : .....   | 38 |
| 2-4-5 Méthode de calcul mécanique : .....   | 41 |
| 2-5 Détermination de la rigidité initiale et le moment résistant des assemblages semi-rigides : ..... | 43 |
| 2-5-1 Méthode analytique : Modèle kichi-Chen (1986) .....   | 43 |
| 2-5-2 Méthode empirique : Modèle Frye-Morris (1976) .....   | 53 |
| 2-5-2 Méthode a modèle mécanique : Modèle de l'Eurocode 3 .....                                       | 53 |
| 2-6 Conclusion : .....  | 59 |

## **CHAPITRE (3)**

### **Etude numérique des assemblages non linéaires**

|   |    |
|---|----|
| 3-1 Introduction : .....                        | 61 |
| 3-2 Détermination de la rigidité initiale ..... | 64 |
| 3-3 Etude d'un portique 2D .....                | 66 |
| 3-4 Etude d'une structure .....                 | 70 |
| Conclusion général : .....                      | 76 |
| Références bibliographiques .....               | 77 |

## Liste des tableaux

| N°   | Titre de tableau  | Page      |
|--|---|-----------|
| <b>Chapitre (2) : modélisations mathématiques des assemblages semi-rigides</b> |   |           |
| <b>01</b>  | Hypothèses d'assemblage et d'analyse globale de la structure                                | <b>34</b> |
| <b>02</b>  | Modélisation simplifiée des assemblages selon l'Eurocode 3                                  | <b>34</b> |
| <b>03</b>  | Les constantes d'ajustement des courbes pour le modèle polynôme de Frye-Morris              | <b>41</b> |
| <b>04</b>  | Assemblage comportant des actions soudées ou des attaches a cornières de semelle boulonnées | <b>60</b> |
| <b>05</b>  | Assemblage comportant des attaches par platine d'about boulonnées                           | <b>61</b> |
| <b>05</b>  | Caractéristiques des assemblages  | <b>63</b> |

## Liste des figures

| N°   | Titre de figure   | Page      |
|--|---|-----------|
| <b>Chapitre (1) : Assemblage métalliques assemblages rigides et semi-rigides</b> |   |           |
| <b>01</b>  | Limites de classification par résistance  | <b>05</b> |
| <b>02</b>  | Limite de classification par rigidité   | <b>06</b> |
| <b>03</b>  | Classification représentative des assemblages selon leurs rigidités             | <b>08</b> |
| <b>04</b>  | Loi de calcul moment-rotation pour un assemblage                                | <b>08</b> |
| <b>05</b>  | Courbe moment-rotation dans l'analyse élastique                                 | <b>10</b> |
| <b>06</b>  | Modélisation des assemblages (analyse élastique)                                | <b>11</b> |
| <b>07</b>  | Représentation plastique d'une courbe Moment-rotation                           | <b>11</b> |
| <b>08</b>  | Représentation graphique de l'analyse élasto-plastique                          | <b>12</b> |
| <b>09</b>  | Composantes d'assemblage poutre-poteau  | <b>13</b> |
| <b>10</b>  | Approche d'EC 3 pour le calcul de la rigidité initiale d'un assemblage boulonné | <b>14</b> |
| <b>11</b>  | Assemblage boulonné avec plusieurs rangés                                       | <b>15</b> |
| <b>12</b>  | Répartition plastique des forces  | <b>16</b> |
| <b>13</b>  | Répartition élasto-plastique des forces   | <b>16</b> |
| <b>14</b>  | Rotation des poutre (l'effet $P - \Delta$ )                                     | <b>19</b> |
| <b>15</b>  | Influence de la semi-rigidité des assemblages sur la structure                  | <b>20</b> |
| <b>16</b>  | Un assemblage raidi remplacer par un assemblage avec cornière                   | <b>20</b> |
| <b>17</b>  | Elément de l'assemblage   | <b>21</b> |
| <b>18</b>  | Modèle d'élément idéalisé   | <b>21</b> |
| <b>19</b>  | Portique avec assemblages poteau-poutre semi-rigide                             | <b>22</b> |
| <b>Chapitre (2) : modélisations mathématiques des assemblages semi-rigides</b>   |   |           |
| <b>20</b>  | Deux exemples pour un assemblage articulé                                       | <b>30</b> |
| <b>21</b>  | Déformabilité de chaque type d'assemblage                                       | <b>35</b> |
| <b>22</b>  | Modélisation d'un assemblage (Jaspart 1998)                                     | <b>35</b> |
| <b>23</b>  | Idéalisation de courbes moment-rotation de l'assemblage                         | <b>36</b> |
| <b>24</b>  | Modèle et paramètres géométriques de Chen et kishi (1986)                       | <b>38</b> |
| <b>25</b>  | Figure représentative pour la détermination du paramètre n                      | <b>39</b> |

|           |   |           |
|-----------|---|-----------|
| <b>26</b> | Déformation de la cornière du chargement initial + La modélisation de la plaque épaisse modérée de la cornière de semelle | <b>45</b> |
| <b>27</b> | Mécanisme de rupture pour l'assemblage de cornière d'âme  | <b>47</b> |
| <b>28</b> | Configuration des cornières de semelles à l'état élastique  | <b>48</b> |
| <b>29</b> | Mécanisme de rupture de l'assemblage Cornière de semelle  | <b>50</b> |
| <b>30</b> | Configuration des cornières reliées à la poutre et au poteau à l'état élast   | <b>52</b> |
| <b>31</b> | Les forces appliquées à l'état ultime de l'assemblage   | <b>54</b> |

## RESUME

La conception des assemblages influence de manière permanente leur flexibilité, leur capacité de rotation, leur résistance. Les principaux éléments des structures métalliques sont les poteaux, les poutres et leurs assemblages. De façon conventionnelle, les assemblages poutre-poteau sont considérés comme étant soit articulés, soit encastrés (rigides). On reconnaît généralement que le comportement réel des assemblages n'est jamais aussi idéal qu'on le suppose dans l'analyse car en réalité l'assemblage se situe quelque part entre ces deux limites, c'est à dire la semi-rigidité. L'objectif principal de cette recherche est l'étude de l'effet des assemblages semi-rigide dans le dimensionnement des structures métalliques selon l'Eurocode 3. La première partie à caractère bibliographique basée sur la présentation des caractéristiques des assemblages rigides et semi-rigides. La deuxième partie est consacré pour la présentation des modèles mathématiques qui permet de modélisation des assemblages. La partie de la modélisation numériques des assemblages non-linéaires consiste à présenter le modèle de calcul Frye et Morris (1979) qui est utilisé pour modéliser des portiques et une structure R+4 par différents types d'assemblages.

Les Mots clés : Comportement, structures métalliques, assemblages, rigide, rigidité, semi-rigide.

## ABSTRACT

The design of the connections has a permanent influence on their flexibility, their capacity for rotation and their resistance. The main elements of metal structures are columns, beams and their connections. Conventionally, beam-column connections are considered to be either articulated or embedded (rigid). It is generally recognized that the real behavior of the joints is never as ideal as it is supposed in the analysis because in reality the assembly is located somewhere between these two limits, that is to say the semi-rigidity. The main objective of this research is the study of the effect of semi-rigid connections in the dimensioning of metallic structures according to Eurocode 3. The first part of bibliographic character based on the presentation of the characteristics of rigid and semi-rigid connections. The second part is devoted to the presentation of the mathematical models which allows modeling of the connections. The part of the numerical modeling of the nonlinear connections consists in presented the computational model Frye and Morris (1979) which is used to model gantries and a R + 4 structure by different types of connections.

Key words: Behavior, steel structure, connection, rigid, stiffness, semi-rigid

## ملخص

تصميم التجميعات له تأثير دائم على مرونتها وقدرتها على الدوران ومقاومتها. العناصر الرئيسية للهياكل المعدنية هي الأعمدة والعوارض ووصلاتها. تقليدياً، تعتبر توصيلات أعمدة الحزمة إما مفصلية أو مدمجة (صلبة). من المسلم به عمومًا أن السلوك الحقيقي للتجميعات ليس مثاليًا أبدًا كما هو مفترض في التحليل لأنه في الواقع يقع التجميع في مكان ما بين هذين الحدين، أي شبه Eurocode 3. الهدف الرئيسي من هذا البحث هو دراسة تأثير التجميعات شبه الصلبة في تحجيم الهياكل المعدنية وفقًا لـ الصلابة. الجزء الأول من الطبيعة البيولوجرافية على أساس عرض خصائص التجميعات الصلبة وشبه الصلبة. الجزء الثاني مخصص لعرض النماذج الرياضية التي تسمح بنمذجة التجميعات يتكون جزء النمذجة العددية للتجميعات غير الخطية من النموذج الحسابي المقدم بأنواع مختلفة من التجميعات. R + 4 (1979) والذي يستخدم لنمذجة الجسور المتحركة وهيكل Frye and Morris

الكلمات المفتاحية: السلوك، الهياكل المعدنية، التجميعات، الصلابة، شبه الصلبة

## INTRODUCTION GENERALE

Les assemblages de structures métallique permettent d'assurer la continuité entre les éléments : les poteaux et les poutres. Ces assemblages ont une influence sur le comportement global de la structure et ils sont constitués de zones de discontinuité. Le complexe géométrique et mécanique entraîne des difficultés considérables par rapport à l'analyse et au calcul des assemblages, cette complexité engendre de fortes discontinuités et conduit ainsi à un comportement global non linéaire de l'assemblage.

Selon l'Eurocode 3 (EC3), la caractérisation de la loi moment-rotation qui traduit le comportement de l'assemblage soumis à un moment fléchissant, peut se faire par la rigidité initiale ( $S_j$ ,  $iniou S_j$ ), le moment résistant ( $M_j$ ,  $Rd$ ) et la capacité de rotation ( $\Phi_{cd}$ ). Ainsi, la méthode des composantes développée pour la caractérisation du comportement des assemblages est proposée dans l'EC3. Cette méthode considère que l'assemblage est constitué d'un ensemble de composantes élémentaires et permet de fournir les données nécessaires à l'utilisation du nouveau concept de semi-rigidité introduit dans le calcul des structures. Les essais expérimentaux n'ont pas donné des résultats satisfaisants d'où le recours à la voie numérique qui présente un grand intérêt et qui aide à obtenir des résultats détaillés non coûteux comme c'est le cas des essais expérimentaux. La conception des assemblages peut influencer de manière substantielle leur flexibilité, leur capacité d'absorption d'énergie, leur résistance et leur ductilité.

C'est pour cela qu'il est toujours question de l'influence de tels assemblages sur le comportement d'une structure à ossature métallique. Pour répondre à cette problématique, il est proposé tenant compte de certaines hypothèses de faire une étude comparative entre les différents types d'assemblages. Ceci apporterait certainement des éclaircissements qui peuvent constituer une base dans la maîtrise et la compréhension du phénomène.

Ainsi, pour la réalisation de notre mémoire, nous avons scindé notre travail en trois chapitres :

- Le chapitre I, à caractère bibliographique, permet de faire une présentation générale des assemblages structuraux (rigides et semi-rigides). Les différentes caractéristiques d'assemblages boulonnés d'utilisation courante et leurs principales sources de déformabilité sont décrites et définies. Cette représentation est effectuée du point de vue des caractéristiques géométriques et mécaniques et des modes de transmission des efforts. Il est question également de la classification des assemblages, en particulier selon les critères de résistance et de rigidité ainsi que l'idéalisation des courbes moments-rotation, en s'appuyant principalement sur l'EC3
- Le chapitre II, présente les méthodes de caractérisation des assemblages semi-rigides et la détermination de la rigidité de l'assemblage. Plusieurs équations empiriques basées sur la technique d'ajustement de courbe qui permet de modéliser le comportement des assemblages sont brièvement passées en revue pour jeter une certaine lumière à l'approche analytique de calcul des assemblages selon l'Eurocode3
- Le chapitre III est consacré à la modélisation numérique et à l'interprétation des résultats.

Nous terminerons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous présenterons une synthèse du travail, les résultats et les recommandations pour des développements futurs.

# CHAPITRE I

## **Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides**

### 1-1 Introduction :

Les liaisons entre les différents éléments d'une construction métallique représentent ce qu'on appelle habituellement les assemblages. Les types d'assemblages utilisés généralement sont : les assemblages soudés et les assemblages boulonnés. Ils sont conçus suivant : le type de la structure, l'intérêt du concepteur, le type de fixation et le type de chargement. De ce fait, le calcul des structures métalliques change en modifiant les types des assemblages.

Ce chapitre est consacré à une revue de littérature des assemblages rigides et semi-rigides utilisés dans le domaine du bâtiment. Dans un premier temps, on définit les caractéristiques du comportement des assemblages boulonnés, ensuite on présente les modes et les principes de ce dernier. Puis on explique les effets des assemblages semi-rigides dans le domaine de la construction, suivi d'une modélisation de ces derniers. Après on définit les exemples d'analyse globale de structure et on traduit l'organigramme de dimensionnement des bâtiments à assemblages semi-rigide.

### 1-2 Caractérisations du comportement des assemblages boulonnés selon l'Eurocode 3 :

#### 1-2-1 Classification des assemblages :

Les essais expérimentaux sur le comportement des assemblages boulonnés, ont de ce fait permis de dégager des critères de classifications (Anikó Csébfalvi, 2007 et Jaspert 1997) posant ainsi les bases de certains codes de calcul telle que l'Eurocode 3 (EC3, 1993). De ce fait, les caractéristiques mécaniques principales sont : Résistance, Rigidité, Ductilité (capacité de rotation), (Jaspert et Démonceau, 2008).

#### 1-2-1-1 Résistance :

La figure ci-dessous présente les types des assemblages selon leurs résistance :

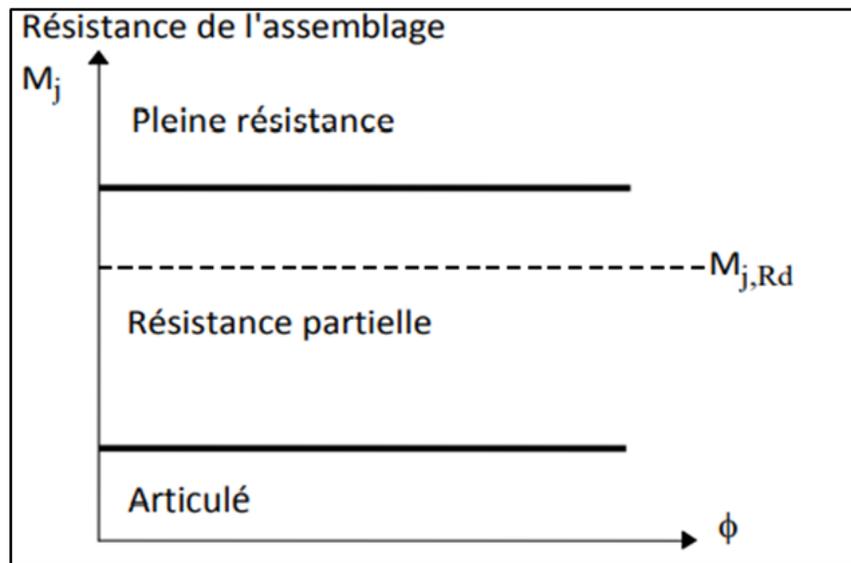


Figure (1) : Limites de classification par résistance

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

-**Résistance complète d'assemblage (pleine)** : l'assemblage dans ce cas possède une résistance plus grande que la poutre assemblée, on peut le considérer si :

$$A/ M_{Rd} > M_{pl,rd} \quad (\text{avec la vérification de la ductilité})$$

$$B/ M_{Rd} > 1.2 M_{pl,rd} \quad (\text{sans vérification de la ductilité})$$

-**Résistance partielle d'assemblage** : par cette résistance l'assemblage doit posséder une capacité de résistance suffisante pour assurer la formation de la rotule plastique, on considère qu'un assemblage est partiellement résistant si :

$$0.25 M_{pl,rd} < M_{Rd} < M_{pl,rd}$$

-**Résistance faible d'assemblage** : qui possède une faible résistance par rapport aux deux précédents, on le considère si :

$$M_{Rd} < 0.25 M_{pl,rd}$$

### 1-2-1-2 Rigidité :

C'est un aspect assez complexe puisqu'il peut influencer sur le comportement de la structure et sur sa stabilité globale. Selon la figure (2) on distingue :

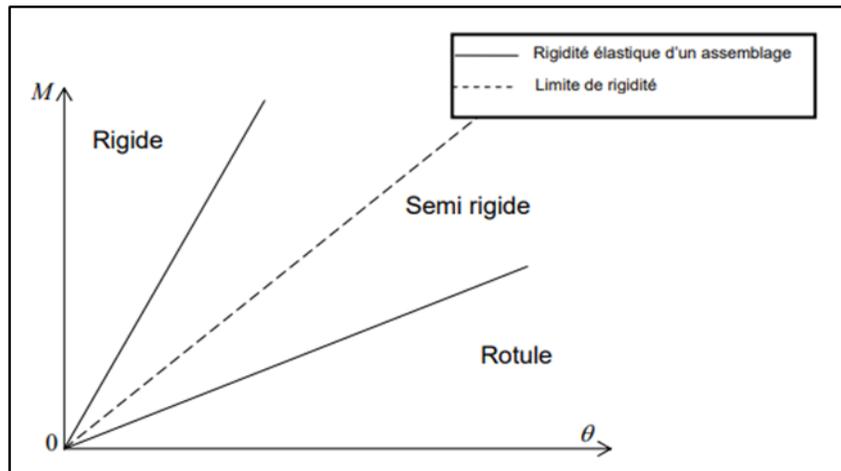


Figure (2) : Limite de classification par rigidité

### -Assemblage rigide :

Les différents aspects de l'assemblage rigide sont :

- Dans l'analyse globale de la structure métallique, ils ont une influence négligeable sur la distribution des efforts sur les déformations.
- Ils sont utilisés dans les structures non contreventées.
- Ils permettent de transmettre à la fois un moment fléchissant, l'effort tranchant et parfois un effort normal.

## **Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides**

---

On le considère si :

$$S_{j.ini} > 8 E \frac{I_b}{L_b} \quad (\text{Structure contreventée})$$

$$S_{j.ini} > 25 E I_b / L_b \quad (\text{Structure non contreventée})$$

### **-Assemblage articulé (rotule) :**

Les différents aspects de l'assemblage articulé sont :

- Ils ont une influence sur la structure métallique car elle devient souple et peut se déformée lors de la rotation.
- Ils sont utilisés dans les structures contreventés.
- Il permet de transmettre qu'un effort tranchant et/ou un effort normal.

On peut distinguer aussi que :

- Les efforts verticaux : transmit de plancher vers la poutre et de poutre au poteau vers la fondation.
- Les efforts horizontaux : sont reprises directement par le système de contreventement vers la fondation.

On le considère si :

$$S_{j.ini} < 0.5 \frac{EI_b}{L_b}$$

### **-Assemblage semi-rigide :**

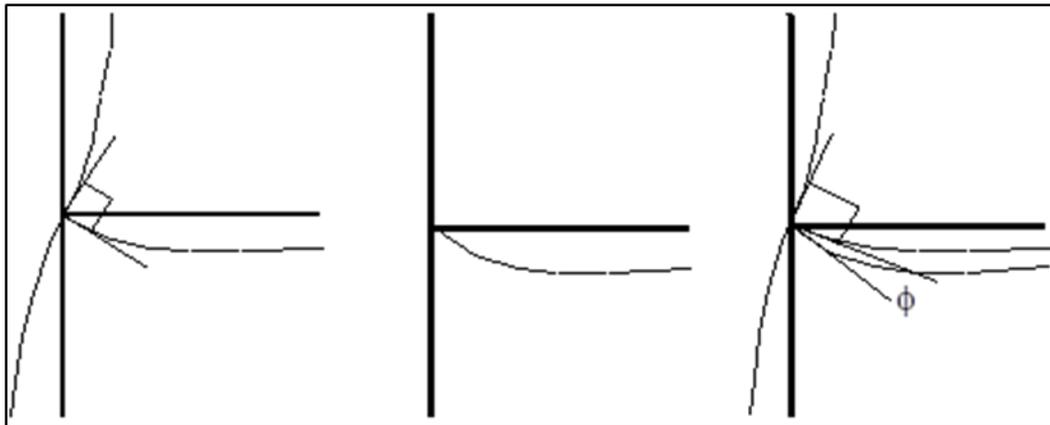
Les différents aspects de l'assemblage semi-rigide sont :

- C'est un assemblage qui ne dépend pas aux critères des assemblages articulé au rigide selon l'EUROCODE 3,
- Ils conduisent à une interaction entre les déformations des assemblages et les efforts dans les éléments de la structure métallique.
- Dans cette interaction, il tenir compte de la courbe de calcul moment-rotation des assemblages.

On le considère si :

$$0.5 EI_b / L_b < S_{j.ini} < 8 EI_b / L_b \quad (\text{Structure contreventé})$$

$$S_{j.ini} < 25 E \frac{I_b}{L_b} (\text{structure non-contreventé})$$



(a) assemblage rigide      (b) assemblage articulé      (c) assemblage semi-rigide

Figure (3) : Classification représentative des assemblages selon leurs rigidités

1-2-1-3 Ductilité (Capacité de rotation) :

C'est une mesure qui se réfère à la capacité maximale de déformation d'assemblage qui peut être atteinte avant que la ruine. L'EUROCODE 3, fournit des informations assez limitées pour ce sujet.

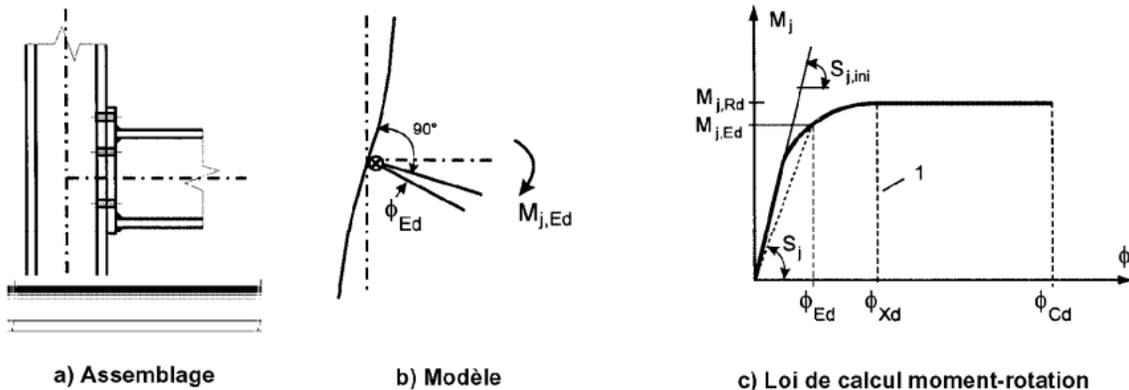


Figure (4) : Loi de calcul moment-rotation pour un assemblage.

La ductilité dépend de la ductilité des composants qui les constituent : la platine d'extrémité, les boulons, les raidisseurs, les soudures, etc. Mais la rotation reste la caractéristique la plus difficile à évaluer à cause du grand nombre de paramètres dont elle dépend.

On peut distinguer 3 types des assemblages selon la ductilité comme représenter dans la figure (3) :

**-Le comportement ductile :** est caractérisé par une courbe moment-rotation qui indique généralement l'apparition de déformations plastiques avant la rupture.

**-Le comportement fragile :** est caractérisé par une rupture, avec une rotation limitée sans déformation plastique.

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

**-Le comportement semi-ductilité** : se situe entre le comportement fragile et le comportement ductile.

### 1-2-2 Courbe générale de comportement des assemblages :

La courbe moment-rotation qui traduit le comportement de l'assemblage dans l'analyse global de la structure est généralement non-linéaire.

L'analyse globale prend en compte les effets du comportement des assemblages sur la distribution des sollicitations dans la structure et ses déformations globales.

En fonction de la classification de l'assemblage, l'analyse globale peut déterminer le type de modèle d'assemblage approprié à partir du Tableau 1.

La loi de comportement moment-rotation de calcul d'un assemblage utilisée dans l'analyse peut être simplifiée en adoptant toute courbe appropriée, l'approche de l'EC3 idéalise le comportement réel des assemblages en utilisant le modèle linéaire, le modèle bilinéaire ou le modèle trilineaire.

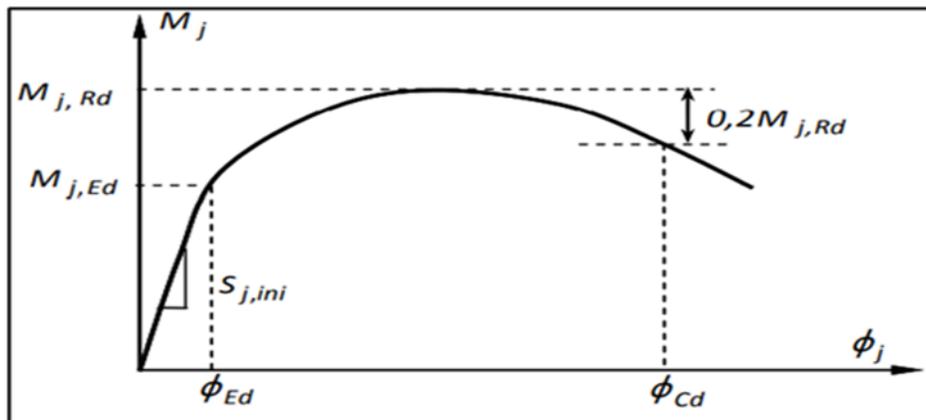


Figure (5) : courbe moment-rotation du comportement d'assemblage selon [EC3]

En effet, la modélisation d'un nœud dépend de type d'analyse le tableau ci-dessous présente cette particularité :

| Méthode d'analyse globale   | Classification de l'assemblage |                             |                                     |
|-----------------------------|--------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
|                             | Nominalement articulé          | Rigide                      | Semi-rigide                         |
| Élastique                   | Nominalement articulé          | Rigide                      | Semi-rigide                         |
| Rigide-plastique            | Nominalement articulé          | Pleine résistance           | Résistance partielle                |
| Élasto-plastique            | Nominalement articulé          | Rigide et pleine résistance | Semi-rigide et résistance partielle |
|                             |                                |                             | Semi-rigide et pleine résistance    |
|                             |                                |                             | Rigide et résistance partielle      |
| Type de modèle d'assemblage | Articulé                       | Continu                     | Semi-continu                        |

Tableau 1 : Types de modèles d'assemblages

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

### 1-2-2-1 Analyse globale élastique :

Cette partie peut être divisée en deux sous parties :

-La première est rectiligne et qui représente la phase du comportement élastique entre l'origine et le premier point de plastification.

-La deuxième est non-rectiligne et qui due à la non-linéarité de comportement d'assemblage avec des plastifications dans les composantes les plus faibles.

Durant l'analyse élastique globale on peut prendre la valeur de la rigidité globale de la structure égal à la valeur de la rigidité initiale si le moment sollicitant est limité ( $M_{Ed} < \frac{2}{3} M_{Rd}$ ) :  $S_j = S_{j,ini}$

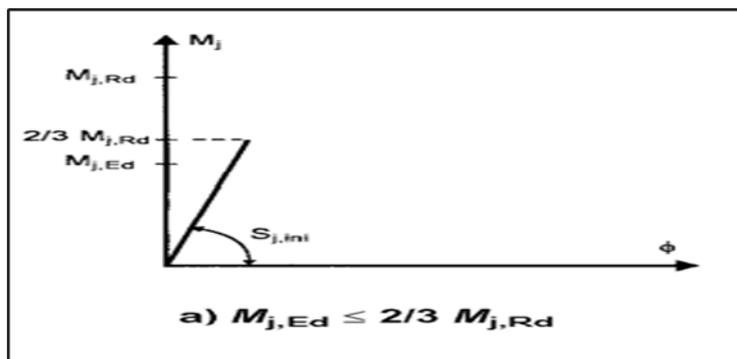


Figure (6) : courbe moment-rotation dans l'analyse élastique

Dans l'analyse élastique chaque type d'assemblage a une courbe correspondante comme représenté dans la figure (6). Cette analyse convient à classer les assemblages selon leur rigidité.

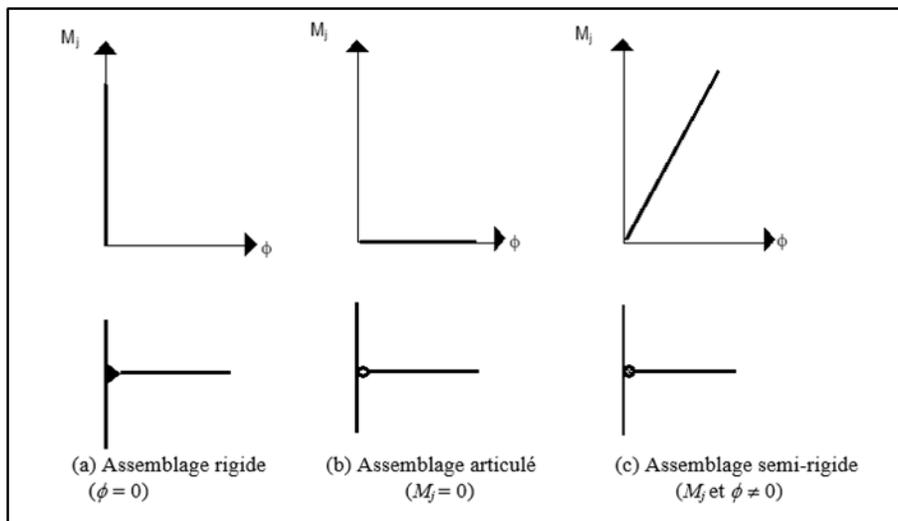


Figure (6) : Modélisation des assemblages (analyse élastique)

1-2-2-2 Analyse plastique : Cette partie présente une plastification successive dans ses divers composant d'assemblage.

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

Cette analyse convient de classer les assemblages en fonction de leur résistance.

Il convient que la capacité de rotation d'un assemblage soit suffisante par rapport aux rotations calculées par l'analyse. Dans cette analyse la rigidité globale de la structure soit égale à :

$$S_j = \frac{S_{j,ini}}{\left(\frac{1.5 M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}}\right) \varphi}$$

$\varphi = 2.7$  pour les assemblages soudé et boulonné par platine d'extrémité

$\varphi = 3.1$  pour ceux par cornières de semelle

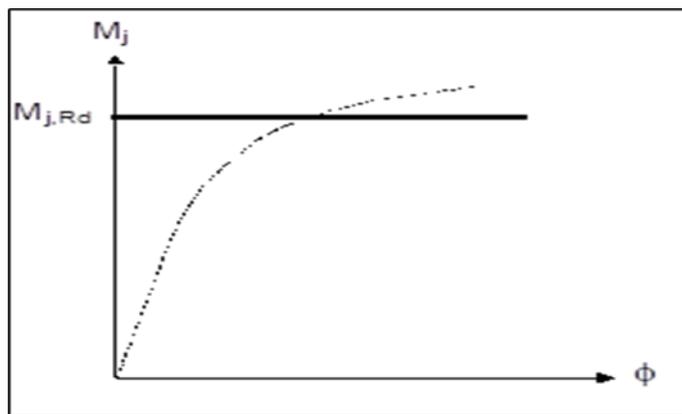


Figure (7) : Représentation plastique d'une courbe Moment-rotation

### 1-2-2-3 Analyse élastique parfaitement plastique :

-Dans cette partie une capacité de rotation est indispensable pour la formation et la rotation de rotules plastiques dans les assemblages susceptibles d'en comporter, cette capacité traduit l'approche de la ruine d'assemblage,

-les assemblages dans ce cas sont classée par la rigidité et la résistance.

-Les idéalisation possibles vont des représentations bilinéaires ou trilinéaires à la courbe totalement non linéaire

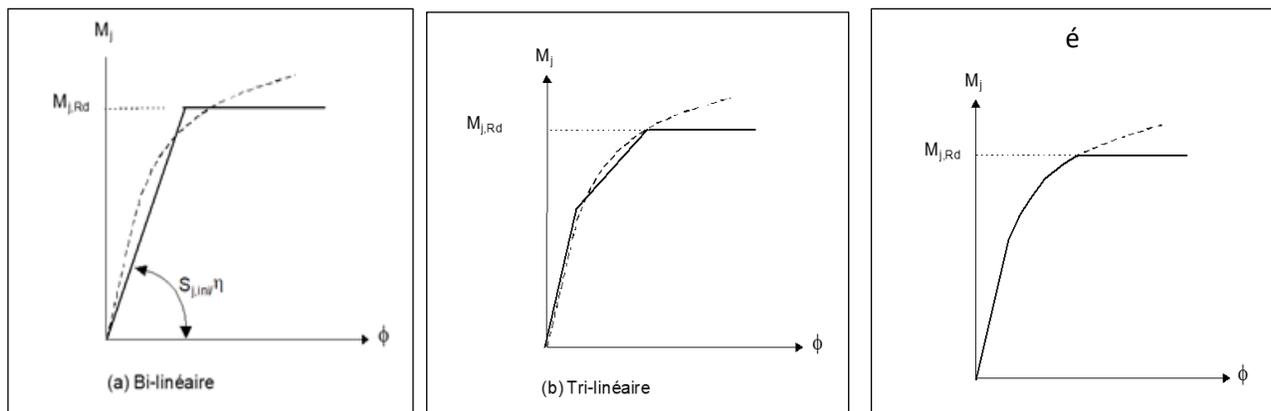
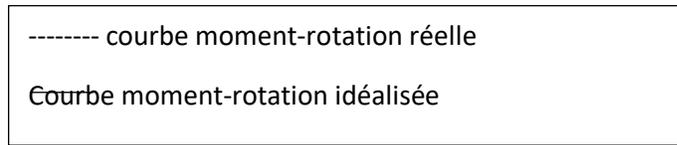


Figure (8) : représentation graphique de l'analyse élasto-plastique



### 1-3 Modes et principes de comportement des assemblages boulonnés :

#### 1-3-1 Principes de comportement :

-Les assemblages boulonnés est largement utilisés dans les constructions métalliques mais ils ont une configuration géométrique variable et complexe. Cette complexité résulte des éléments utilisés : (boulons, platines, cornières, raidisseurs...).

-Ces derniers permettent de solidariser tous les éléments de la structure entre eux par :

- ♦ La transmission des différentes charges (charges statiques : gravitaires, climatiques, etc.) et (charges dynamiques : effets de chocs, vibration etc.)
- ♦ Calculs plus exacts.

#### 1-3-1-1 Méthode des composantes :

-L'utilisation de cette méthode est adopté par l'approche de l'EC3 qui fournit des procédures d'évaluation des caractéristiques de comportement d'assemblage (résistance, rigidité et capacité de rotation).

-En se basant a cette méthode on suppose que l'assemblage boulonné est composé de plusieurs composantes, comme représenté dans la figure (9) [Jaspert 1997, EC3 2005].

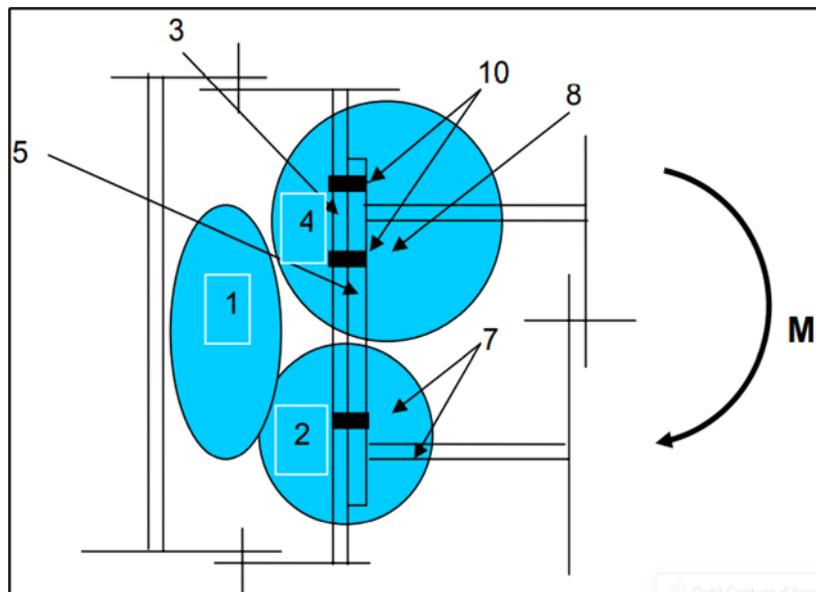


Figure (9) : composantes d'assemblage poutre-poteau

## ***Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides***

---

### 1-Zone cisailée :

Panneau d'âme de poteau.

### 2-Zone comprimée :

Ame de poteau.

Semelle et âme de poutre.

### 4-Zone tendue :

Âme de poteau en traction

10-Boulons en traction

8-Âme de poutre en traction

Et aussi il y 'a :

3-Semelle de poteau en flexion

5-Platine d'extrémité en flexion

-Chacun de ces composantes possède ses propres rigidité et résistance, l'âme de poteau est le seul composant qui soumis simultanément à la traction, compression et le cisaillement.

### 1-1-3-2 Etapes de la méthode des composantes :

- 1) Détermination des composantes nécessaires de l'assemblage considéré.
- 2) L'évaluation des caractéristiques de rigidité et/ou résistance de chaque composante.
- 3) Le montage de l'ensemble des composantes constitutives d'assemblage considéré.

-Une fois les caractéristiques de chaque composante sont connues et les étapes de la méthode est bien définie le comportement des assemblages en termes de rigidité et de résistance peut être déterminé.

### 1-1-3-3 Détermination de la rigidité et la résistance d'assemblage :

#### ♦ **Rigidité :**

-La rigidité d'assemblage est déterminée à partir de la rigidité des composantes, le comportement élastique des assemblages est représenté par un ressort.

-Dans les structures métalliques continues ou semi-continues le principe adopté est que l'assemblage doit être capable de résister à la rotation due à la flexion.

-La relation force-déplacement d'un ressort est donnée par :

$$F_i = \frac{EA_i}{L_i} \Delta_i = K_i \Delta_i$$

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

Pour obtenir la courbe moment-rotation il faut déterminer la rigidité globale de l'assemblage. Les ressorts sont groupés en série ou en parallèle figure (10, a) selon la configuration géométrique de l'assemblage et, tout en respectant la compatibilité de déformation des différentes composantes.

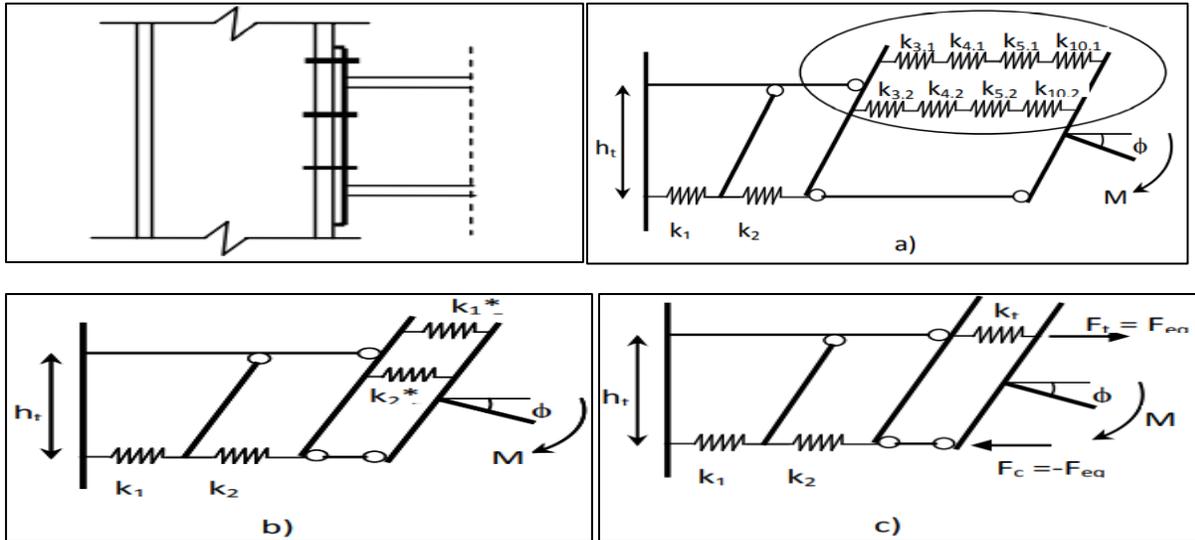


Figure (10) : Approche d'EC 3 pour le calcul de la rigidité initiale d'un assemblage boulonné

De la figure (10, b) la rigidité équivalente de la zone tendue :

$$K_i = \frac{1}{\frac{1}{K_{3,i}} + \frac{1}{K_{4,i}} + \frac{1}{K_{5,i}} + \frac{1}{K_{10,i}}}$$

Puis, dans la figure (10, c) de la zone tendue en cas il y'a plusieurs rangés de boulons :

$$K_t = \frac{\sum_{i=1}^n K_i h_i}{h_t}$$

Avec :

$K_t$  : La rigidité totale de boulons travaille à la traction

$h_i$  : La distance entre le centre de compression d'assemblage et la rangée de boulons

$h_t$  : La distance entre le centre de compression et le centre de traction :

$$h_t = \frac{\sum_{i=1}^n K_i h_i^2}{\sum_{i=1}^n K_i h_i}$$

Donc, la rigidité de rotation de ressort est :

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

$$K_{\theta} = \frac{h_t^2}{\frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_t}}$$

Finalement, la rigidité initiale est donc :

$$S_{j.ini} = EK_{\theta}$$

### ♦ Résistance :

Le moment résistant de l'assemblage est déterminé par l'identification des zones mentionnés ci-dessus (tendue, comprimée et cisailée)

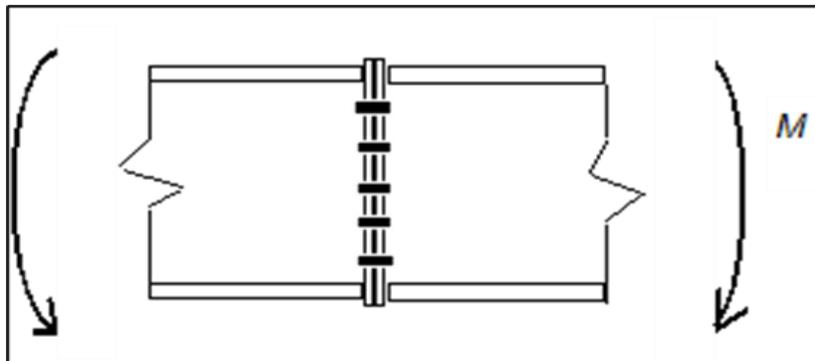


Figure (11) : Assemblage boulonné avec plusieurs rangés

### -Résistance plastique :

Le moment résistant dans ce cas est égal à :

$$M_{Rd} = \sum_{i=1}^{n_b} h_t \cdot F_{Rd,i}$$

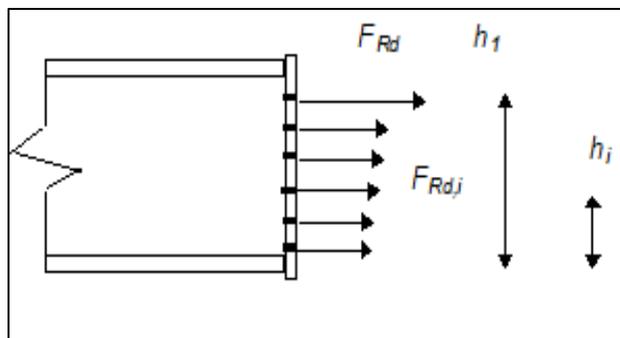


Figure (12) : Répartition plastique des forces

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

-Résistance élasto-plastique : le moment égal à :

$$M_{Rd} = \sum_{i=1}^k F_{Rd,i} \cdot h_i + \frac{F_{Rd,k}}{h_k} \sum_{j=m}^n h_j^2$$

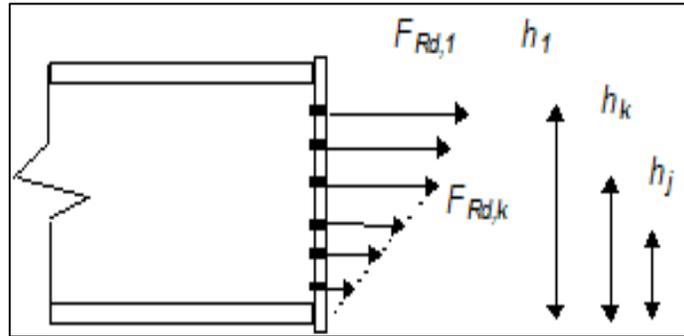


Figure (13) : Répartition élasto-plastique des forces

-Résistance élastique :

$$M_{Rd} = \frac{F_{Rd}}{h_1} \sum h_t^2$$

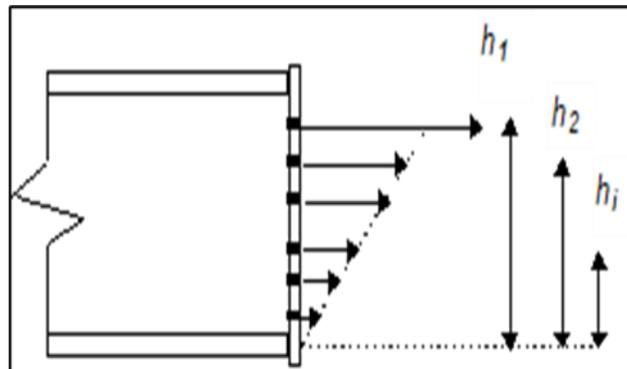
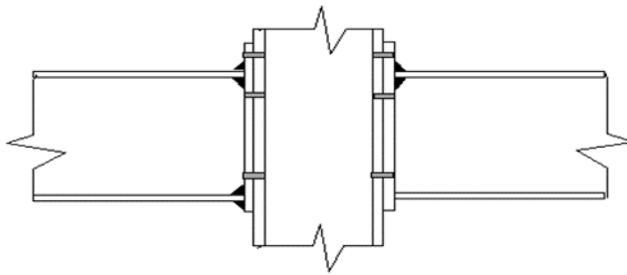
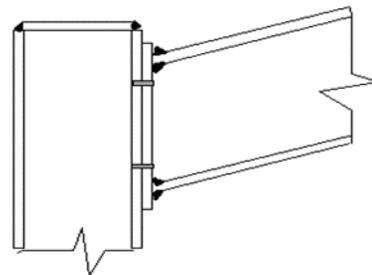


Figure (14) : Répartition élastique des forces

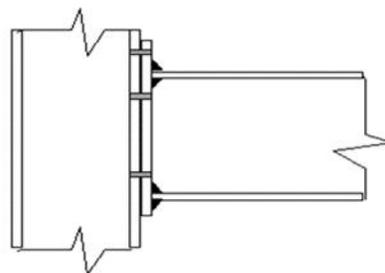
[1-3-2 Modes de comportement des assemblages boulonnés fournis par l'EC3 :](#)



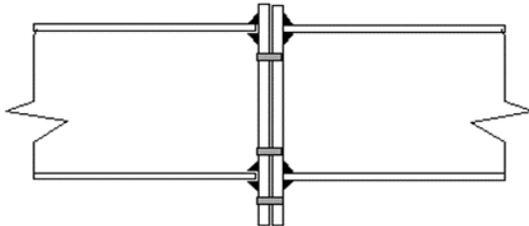
(c) Deux assemblages par platines d'extrémité (Configuration bilatérale)



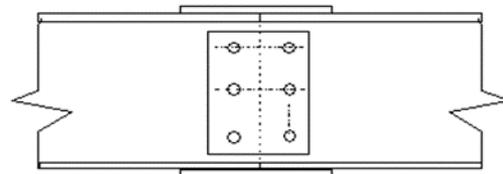
(d) Assemblage par platine d'extrémité



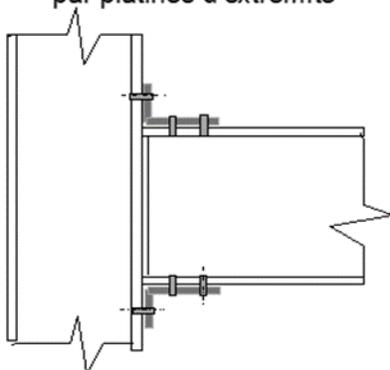
(b) Assemblage par platine d'extrémité boulonné



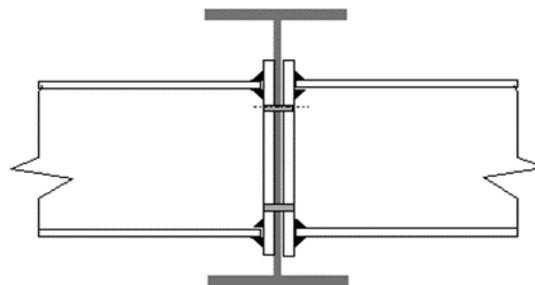
(e) Assemblage de continuité de poutre par platines d'extrémité



(f) Assemblage de continuité de poutre de type couvre-joint



(g) Assemblage boulonné par cornières de semelle



(h) Deux assemblages poutre-poutre (Configuration bilatérale)

**1-4 Les effets des assemblages semi-rigides dans le domaine de construction :**

La recherche du comportement semi-rigide dans les constructions en acier fait l'objet dans le plan expérimental que théorique [J.P JASPART et al. (1988)], le calcul des ossatures est habituellement basé sur deux types assemblages (articulé ou encastré), en pratique les assemblages possèdent généralement une résistance inférieure à celle de la poutre assemblée. De ce fait, les ossatures peuvent être calculés sur la base du comportement semi-rigide [J.W.B Stark et al. (1993)].

-Les assemblages semi-rigides ont une influence sur la stabilité de la structure par la diminution de la rigidité des éléments constituant l'assemblage, ceci affectera sur la période de vibration et par conséquent intensifiera l'effet (P- $\Delta$ ).

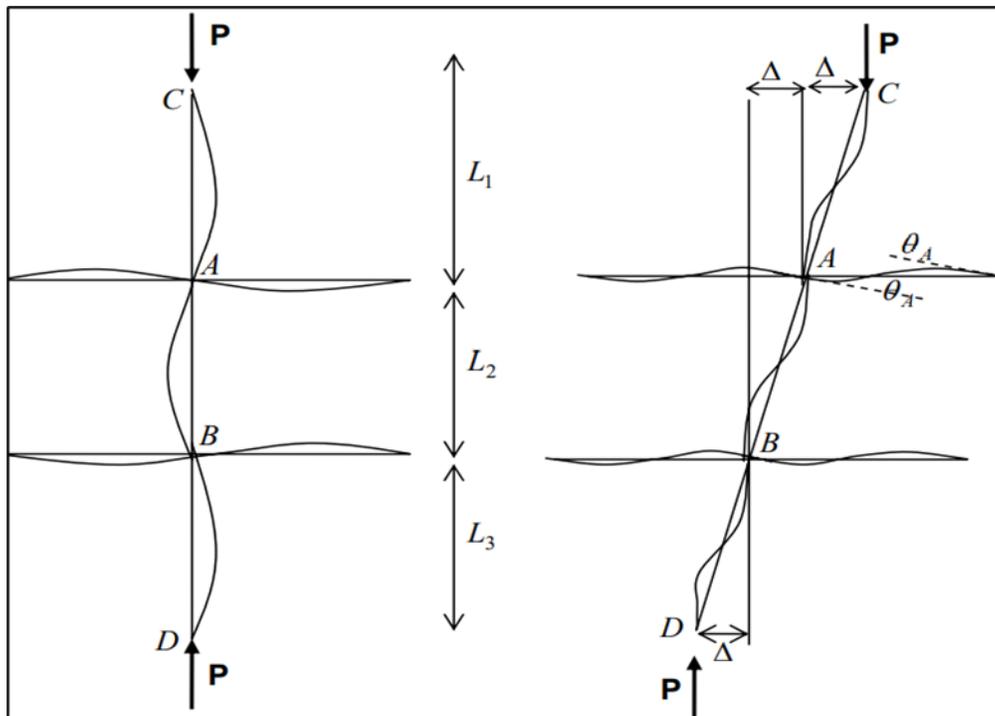


Figure (15) : rotation des poutre (l'effet P -  $\Delta$  )

-La prise en compte de la semi-rigidité des assemblages influence non seulement sur la déformabilité qui dépend de la déformation des éléments constituant l'assemblage [Jaspart (1991) et Ihaddouène (1995)] telle que : (les boulons, les cornières, les platines ...) mais aussi modifie la distribution dans l'élément de l'ossatures figure (16) [Ihaddouène (1995) et Saidani (1998)].

-En effet, le cout des assemblages dans la construction métallique représente 50% du cout totale donc la prise en compte des caractéristiques réelle de résistance et de rigidité sert à une diminution de cout globale des ossatures.

## Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides

-De ce fait, l'intérêt économique de la semi-rigidité doit être mis davantage dans le cadre d'étude de type techno-économique et cette lacune devra être comblée dans un avenir plus proche [J.W. B Stark et al (1993)]. Figure (17).

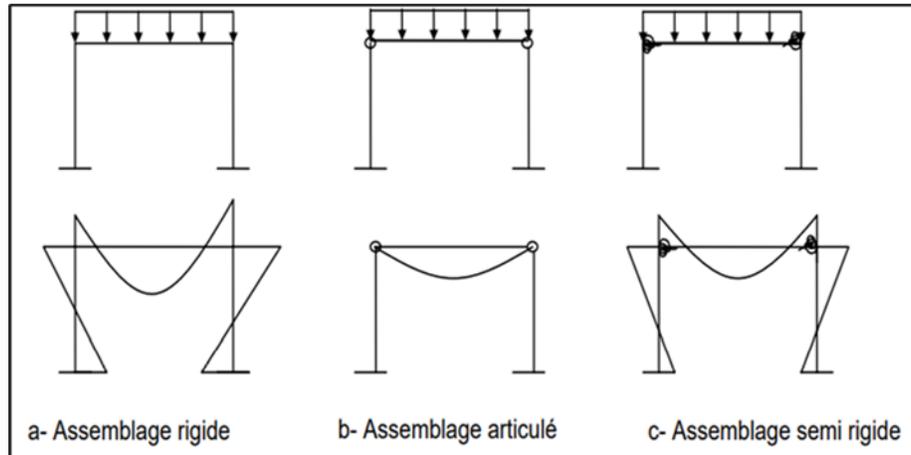


Figure (16) : influence de la semi-rigidité des assemblages sur la structure

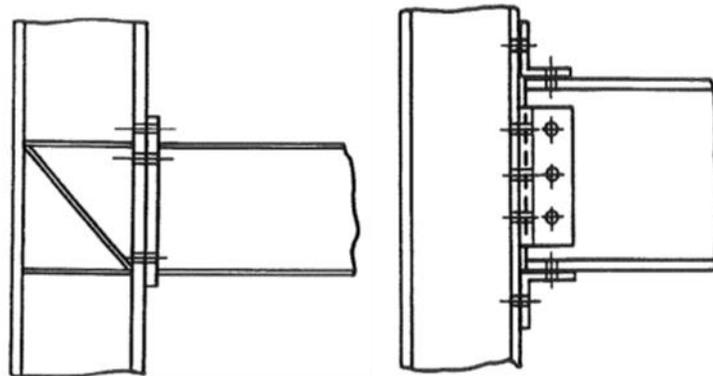


Figure (17) : un assemblage raidi remplacer par un assemblage avec cornière

### 1-5 Modélisation des assemblages semi-rigides :

Le nœud semi-rigide est modélisé comme un élément de ressort. Les hypothèses formulées de cette formulation sont les suivantes :

- Le ressort est une longueur nulle et qui travaille uniquement à la flexion
- Le ressort est couplé à un élément fini de type poutre plane.
- La loi du ressort est non-linéaire.

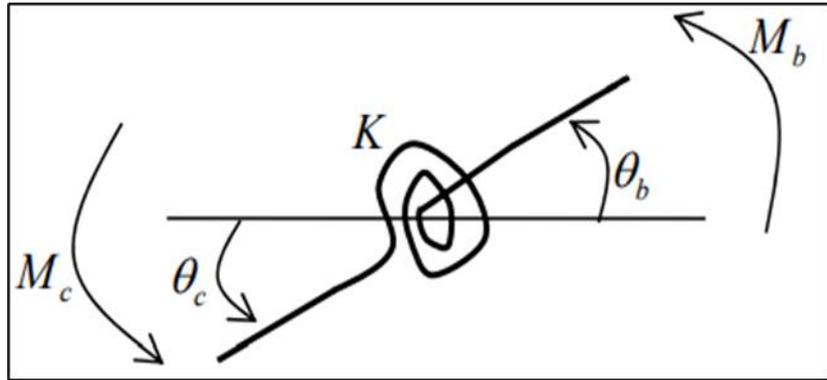


Figure (18) : Elément de l'assemblage

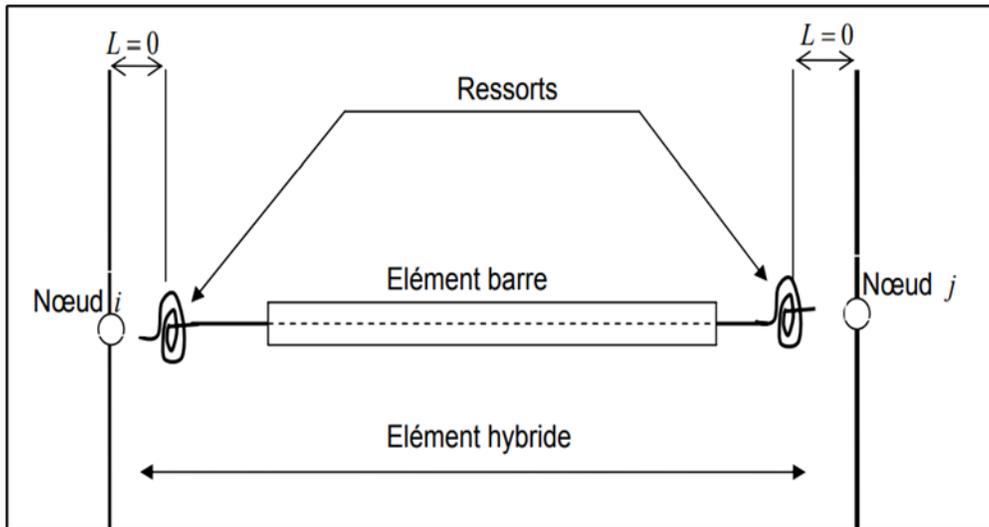
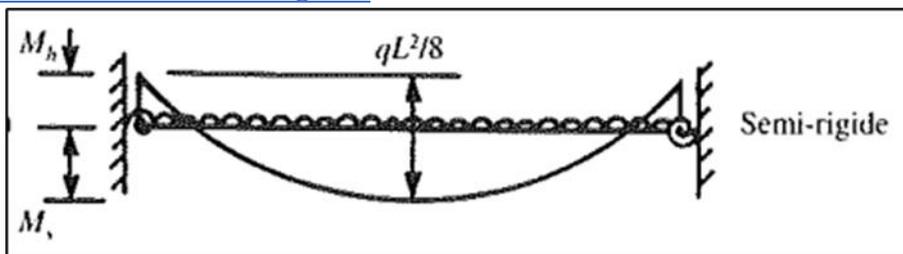


Figure (19) : modèle d'élément idéalisé

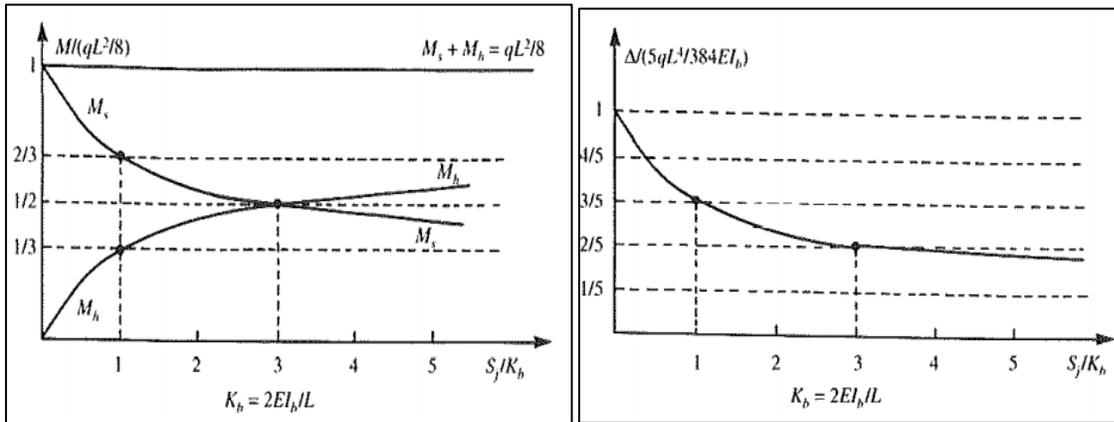
-Les effets des déformations de l'effort axial et les forces de cisaillement sont négligeables devant la déformation due au moment fléchissant [chan et al. (2000)].

## 1-6 Exemples d'analyse globale de structures :

### 1-6-1 Poutre avec liaisons semi-rigide :



Poutre a assemblage semi-rigide



(a)

(b)

Figure (20) : représente la variation du moment de la poutre en fonction de la rigidité (a) et la variation de la flèche à mi-portée en fonction de la rigidité (b)

(a) : cette figure montre le schéma de distribution des moments sur la poutre et son évolution en fonction de la rigidité. Pour obtenir une égalité entre la valeur du moment de travée (M<sub>s</sub>) et la valeur de moment d'appui, il suffit d'avoir une rigidité qui prend la valeur suivante :

$$K_{\theta} = 6 \frac{EI}{L} = S_j$$

-Cette explication montre que le choix rigide de la rigidité de la poutre réduit le moment de calcul.

(b) : cette courbe montre que l'augmentation de la rigidité, diminue la flèche de la mi-portée de la poutre. On peut aussi conclure que la semi-rigidité des assemblages diminue la flèche à mi-travée de la poutre.

-la semi rigidité offre une solution économique de l'ordre 20% par rapport aux assemblages rigide dans les structures non-contreventé. [J. W. B Stark (1994)]

1-6-2 Portique avec deux assemblages semi-rigides :

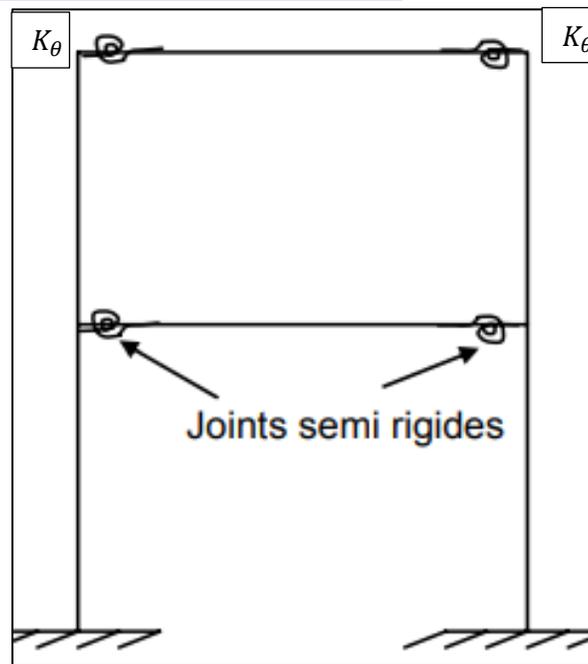


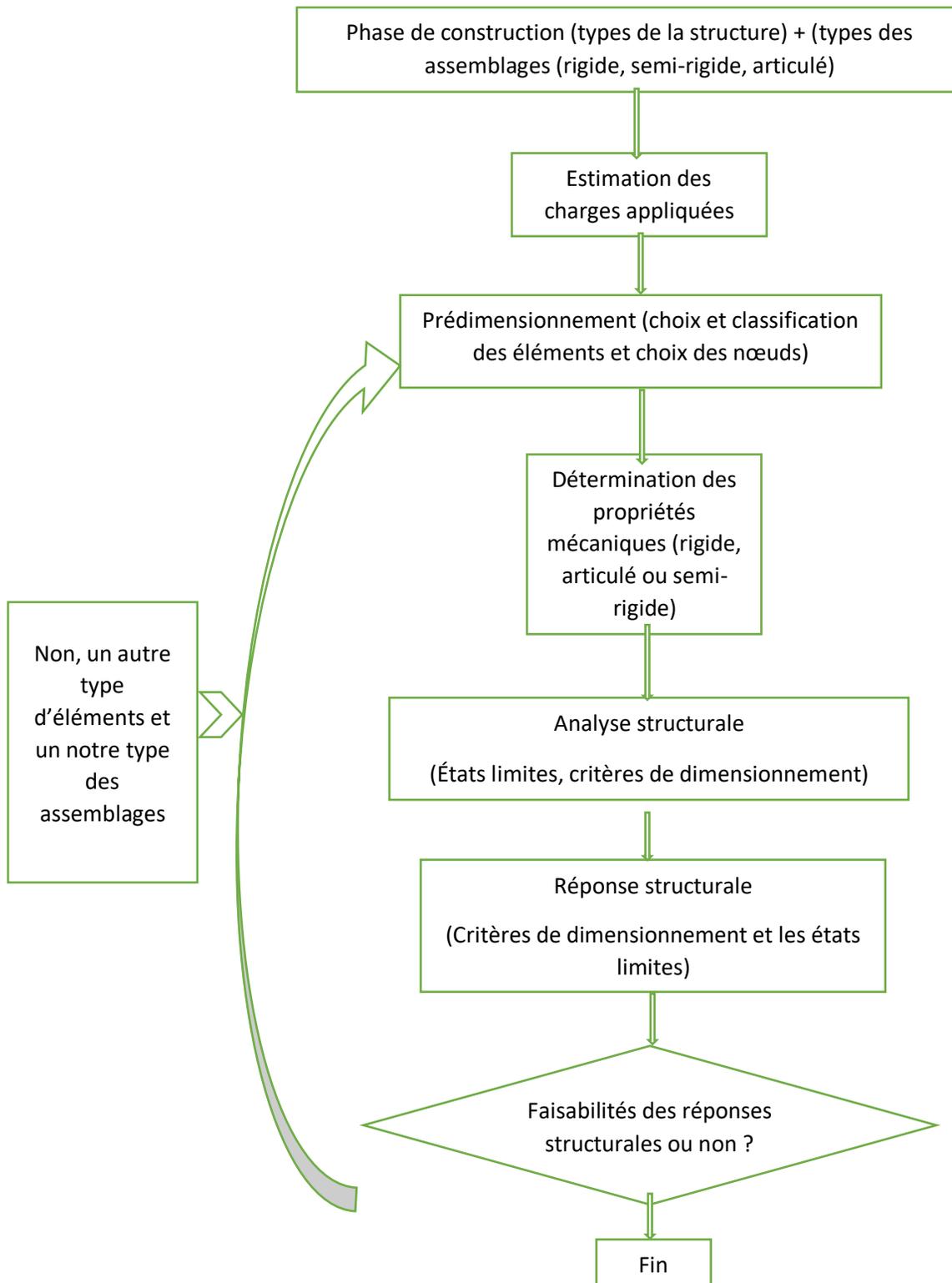
Figure (21) : portique avec assemblages poteau-poutre semi-rigide

-Dans les portiques à assemblages semi-rigide la rigidité des poutres et des poteaux reste constante, par contre la rigidité de l'assemblage change par le changement de coefficient  $K_\theta$  .

-Le modèle des assemblages influence sur les caractéristiques statiques des portiques et

-la prise en compte du comportement semi-rigide réel des assemblages dans la conception des ossatures en acier est à la fois réaliste et économique.

1-7 Dimensionnement des bâtiments a assemblages semi-rigides [4]:



## **Chapitre I : Revue Littérature : Assemblages métalliques rigides et semi-rigides**

---

### **Organigramme de calcul :**

- La première étape traduire les propriétés de la structure utilisés dans l'analyse structurale et qui dépend de type de la structure.
- Dans la deuxième étape les charges de calcul sont bien définies sur la base des codes nationaux et européens.
- Ensuite, l'étape de prédimensionnement qui permet de définir les profilés de poutres au poteaux utilisé dans la structure par l'utilisation des méthodes de dimensionnement avec formulation des hypothèses concernant :
  - Distributions des contraintes dans les profilés (élastique/plastique)
  - Capacité de développement des rotules plastiques dans les profilés.
  - la classe des profilés.

Tout ça doit être vérifier dans l'étape 5

- Puis, l'analyse de la structure qui permet de déterminer les efforts dans toutes les sections de l'élément et aussi dans les assemblages.
  - Cette étape consiste à la vérification de résistance de la stabilité de la structure et le contrôle des déformations et des déplacements et ensuite la vérification de la classe du profilé.
  - Dans cette dernière et lorsque la vérification n'est pas satisfaisante deux solutions sont proposées soit augmenté la section utilisée soit on les réduites.
  - Finalement, le principe de dimensionnements est basé sur une configuration capable entre les éléments et les assemblages de la structure de transmettre les efforts appliques.
- Et lorsque les propriétés mécaniques des assemblages il s'agit de la caractérisation puis l'idéalisation des nœuds pour que le dimensionnement soit optimum [A. JASPERT (1998)]
- Donc on peut conclure le dimensionnement optimum est réaliser par la diminution du cout de la structure ce qui implique que la liaison entre poteau-poutre doit être le plus simple possible c'est-à-dire l'utilisation des assemblages semi-rigide cet dernière permet la transmission du moment de flexion M et une rotation  $\theta$  entre les profilés assemblés [JASPERT et al. (1988)]

### 1-8 Conclusion :

L'introduction de la semi-rigidité dans les codes européens (EC3) et les codes américains dans la recherche est approfondie avec une très grande concentration sur la déformabilité de l'assemblage.

Les critères de classification diffèrent d'un code à un autre, mais la classification par la rigidité initiale est prise comme critère de classification selon l'Eurocode 3.

La prise en compte réelle du comportement des assemblages constitue un avancé majeur dans les codes actuels, mais elle nécessite le développement de modèles des assemblages et de méthodes de conception structurale qui soient adéquats à cette hypothèse.

Comme le future Eurocode s'engage à prendre en compte le comportement réel des assemblages et son influence dans l'ensemble de la structure.

Dans le cadre de ma mémoire, des modèles de la semi-rigidité des assemblages dans différentes cas a été développé pour l'évaluation de l'effet de cette dernière dans le domaine de construction métallique et ensuite je souhaite étudier ce dernier en détail et le modéliser par le logiciel de calcul 'SAP 2000 '.

## Chapitre II

# **Modélisation mathématique des assemblages semi-rigides**

### 2-1 Introduction :

Dans la réalité, le comportement réel se situe entre les deux comportements (rigide ou articulé). Le concept de la semi-rigidité dans l'approche de calcul de la structure sera introduit, ce concept permet d'approcher une nouvelle méthode pour transmettre les efforts de la structure vers la fondation et aussi offre une très grande souplesse dans le choix des assemblages et du dimensionnement dans l'analyse de la structure.

Dans ce chapitre, nous présentons tout d'abord le fonctionnement d'assemblage semi-rigide ainsi que leurs des assemblages, puis nous indiquons la modélisation ces assemblages ensuite on présente les méthodes de caractérisation des assemblages semi-rigide et finalement on termine par la détermination du moment résistant et la rigidité initiale de quelques types des assemblages pour les différents modèles.

### 2-2 Fonctionnement des assemblages boulonnés de type semi-rigide :

Le fonctionnement de ce type dépend de quatre facteurs principaux :

- La rigidité de la poutre isostatique portée dans le cas d'une déformation en flexion qui conditionnent la rotation libre à l'origine.
- La rigidité des deux cornières d'âme susceptible de procurer une rotation capable par l'ouverture des cornières.
- La rigidité de l'élément porteur qui peut être soit nulle, soit infinie ou bien prendre un cas intermédiaire (exemples)
- Le jeu dans les assemblages qui procure une certaine capacité de rotation entre la poutre portée et les cornières, généralement ce facteur est pris en considération lorsqu'on utilise des boulons non-précontraints. L'indication de ce facteur dans un assemblage est caractérisé par la courbe de fonctionnement moment-rotation que l'on peut évaluer comme suit :

- En l'absence du jeu :

La courbe de fonctionnement est semblable par celle de l'assemblage par platine d'about (présentée dans le chapitre (1))

- En présence de jeu :

Dans ce cas on distingue trois types de diagramme de fonctionnement moment-rotation :

- Si l'effort tranchant  $V_{Ed} = 0$  : la rotation de la cornière serait inférieure à la rotation permise par le jeu dans les boulons les plus éloignés du centre de rotation de la poutre portée :

$$\phi_{cornière} < \phi_{poutre\ portée}$$

$\phi_{poutre\ portée}$  : Est caractérisé par  $\phi_j = \frac{2j}{(n-1)p}$ ,  $j = d_0 - d$

N : nombre de boulons et p : pince

- Par contre la présence de l'effort tranchant introduit un cas intermédiaire difficile à évaluer ou la rotation de la cornière soit égale à la rotation de la poutre porteuse et la courbe moment-rotation dans ce cas est compris entre  $+/-\phi_j/2$ .

$$\phi_{cornière} = \phi_{poutre\ porteée}$$

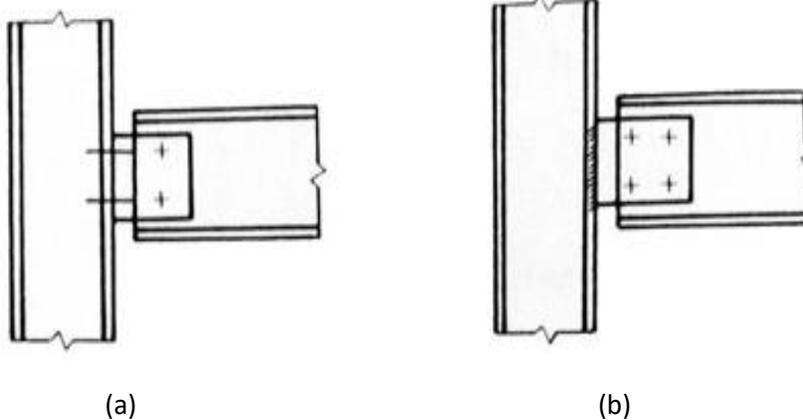
- Si la poutre portée tourne moins que les cornières la rotation des cornières soit supérieur à celle de la poutre portée et la courbe moment-rotation serait décalé par une valeur de  $+/-\phi_j/2$ .

$$\phi_{cornière} > \phi_{poutre\ porteée}$$

$$\phi_{cornière} > \phi_{poutre\ porteée}$$

### 2-3 Les types des assemblages semi-rigides :

#### 2-3-1 Les assemblages par une seule cornière d'âme :



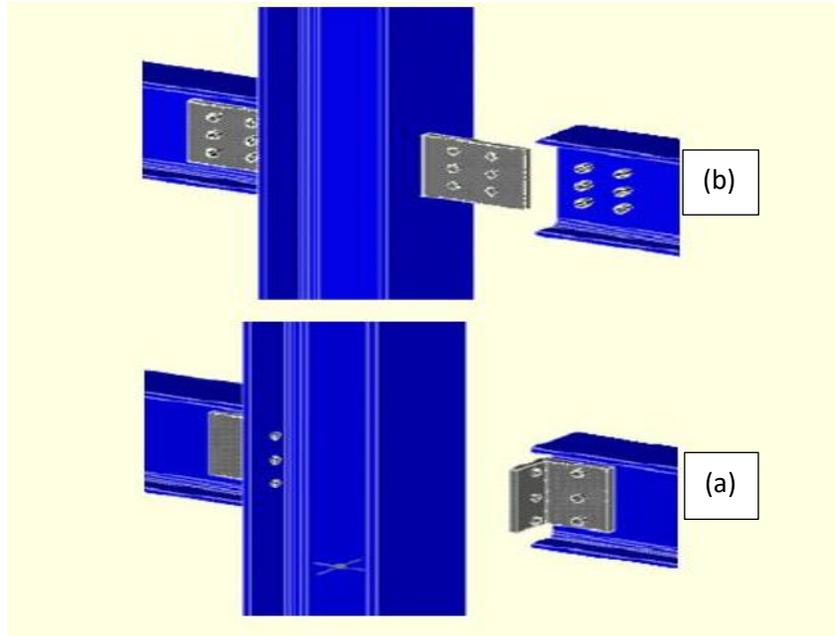
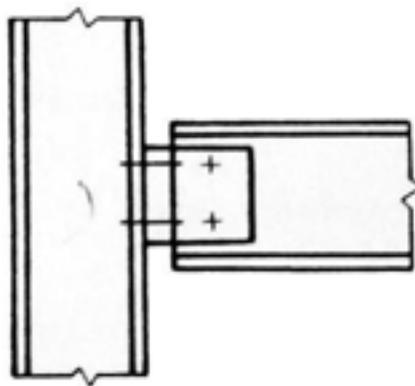


Figure (1) : deux exemples pour un assemblage articulé

L'assemblage représenté dans (figure 1.a) transmette que l'effort tranchant et l'effort axial de la poutre, il doit aussi subir une rotation significative sans transmission des valeurs de moment fléchissant, il est utilisé dans des ossatures lorsque la rigidité latérale est assurée par d'autres moyens comme la palée de stabilité triangulée. La (figure 1.b) présente un type d'assemblage articulé qui utilise une plaque au lieu de la cornière et minimise l'influence de l'excentricité. Ces deux types sont très flexible et ils sont considérés comme des assemblages articulés.

### 2-3-2 Les assemblages par double cornière d'âme :



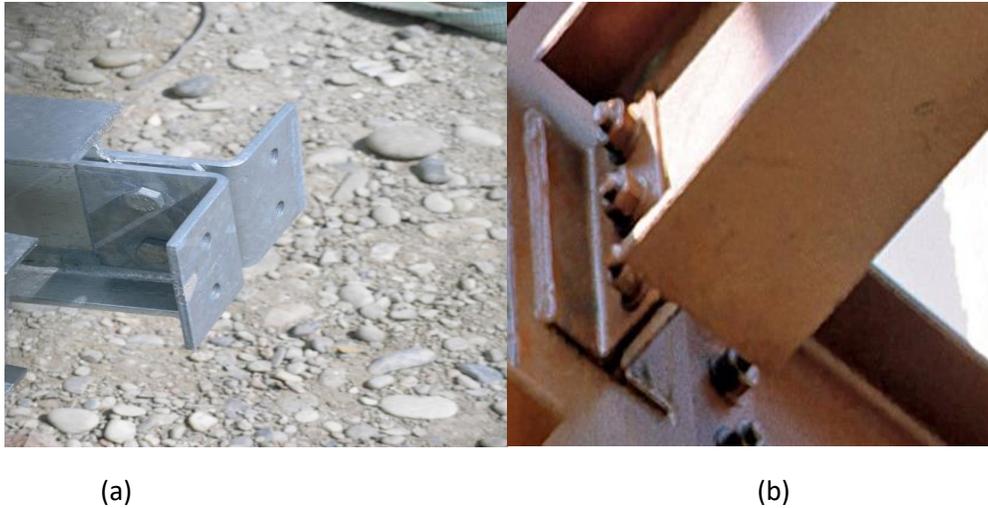


Figure (2) : assemblages par double cornières d'âme

Cet assemblage est considéré comme semi rigide, il est composé de deux cornières d'âme boulonnés (figure 2.a) ou bien soudés (figure 2.b).

2-3-3 Les assemblages par cornières de semelles :

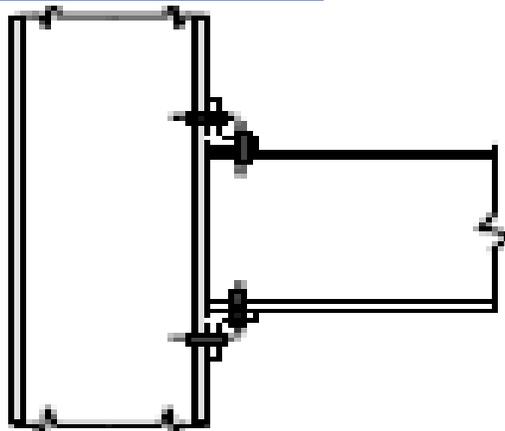


Figure (3) : Assemblage par cornières de semelles

Ces assemblages pourront résister à un certain moment ultime de la poutre et ils sont décrit comme suit :

-la cornière inférieure transmette que les réactions verticales et ne devrait pas donner le moment retenant Significatif sur l'extrémité de la poutre.

-la cornière supérieure est simplement pour la stabilité latérale et n'est pas considéré comme un transporteur des charges. Ces assemblages pourront résister à un certain moment ultime de la poutre.

2-3-4 Les assemblages par cornières semelles avec doubles cornières d'âme :

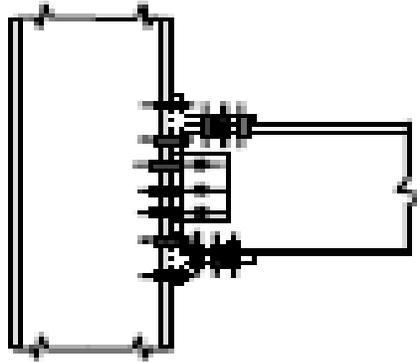


Figure (4) : assemblage par cornière de semelles et cornière d'âme

Ce type d'assemblage est considéré comme encasturé et il est une combinaison d'un assemblage des cornières semelles et l'assemblage double cornier d'âme.

2-3-5 Les assemblages par platine d'extrémité

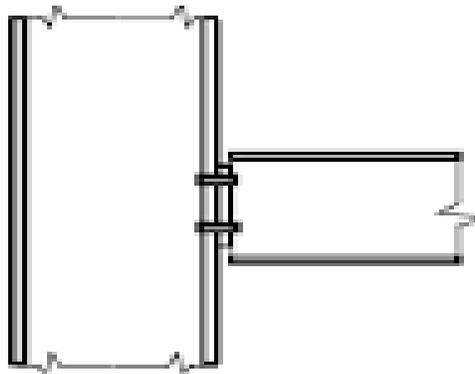


Figure (5) : assemblage par platine d'extrémité

Les caractéristiques moment-rotation de ce type d'assemblage est semblables à celle d'assemblage par double cornière, il se compose d'une plaque dont la longueur est inférieure à la hauteur de la poutre, soudée sur l'âme de la poutre et boulonnée au poteau. L'utilisation d'assemblage de plaque d'extrémité pour but de transmettre l'effort tranchant de poutre au poteau.

2-3-6 Les assemblages 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 (figure 6.a) ou non débordante (Figure 6.b). Ils sont utilisés sous réserve de savoir déterminer le degré d'interaction entre les éléments, ce qui suppose de connaître la caractéristique moment-rotation de l'assemblage.

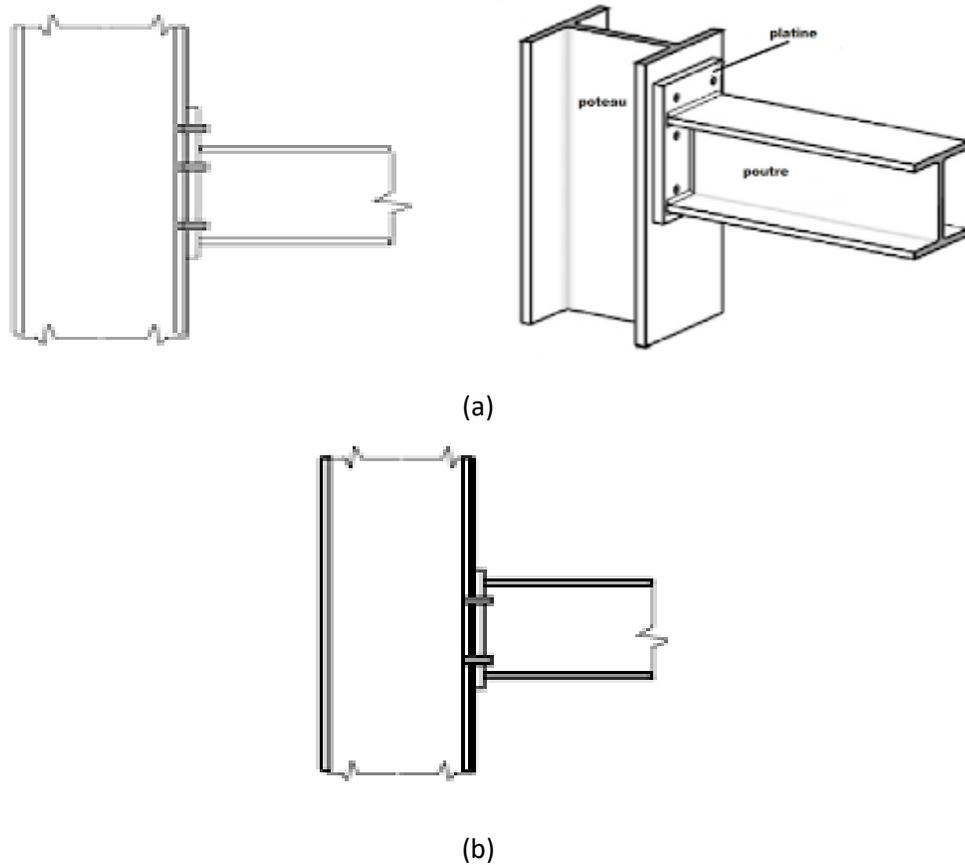


Figure (6) : assemblages par platine d'about

#### 2-4 Modélisation des assemblages semi-rigide :

Le comportement des assemblages affecte le comportement global des structures. La prise en compte du comportement des assemblages permet d'avoir différents types de modèles de structures à savoir les structures simples, continues et semi-continues correspondant respectivement aux modèles d'assemblages articulés, rigides et semi-rigides. Les assemblages semi-rigides peuvent être modélisés sous forme de ressorts en spirale présentant des relations moment-rotation pouvant aller du type linéaire élastique au type non linéaire qui tient compte de la capacité de rotation. Le type d'analyse de la structure utilisé à un effet direct sur le degré de complexité du modèle d'assemblage à considérer : L'utilisation d'un modèle d'analyse globale de la structure linéaire élastique impose une modélisation linéaire élastique des assemblages par l'utilisation de la caractéristique de rigidité et l'utilisation de l'analyse plastique autorise la formation de rotules dans les assemblages par la pris en considération de la résistance de la structure et l'analyse élasto-plastique, un modèle d'assemblage bilinéaire est nécessaire, ce type considère les deux caractéristiques rigidité et résistance.

| Analyse globale           | Types d'assemblages utilisés |                               |   |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|---|
| Elastique                 | Articulation                 | Rigide                        | Semi-rigide   |
| Rigide- plastique         | Articulation                 | Résistance complète           | Résistance partielle  |
| Elastique plastique       | Articulation                 | Rigide et résistance complète | - Semi rigide et résistance partielle<br>- Semi rigide et résistance totale<br>- Rigide et résistance partielle |
| Modélisation de structure | Simple                       | Continue                      | Semi-continue   |

Tableau (1) : Hypothèses d'assemblage et d'analyse globale de la structure

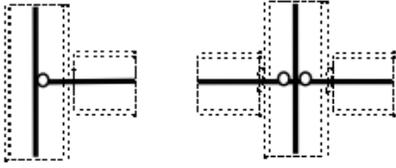
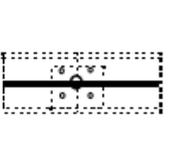
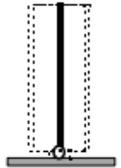
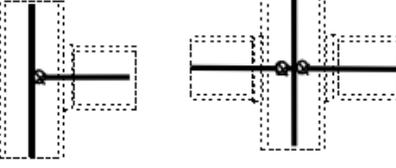
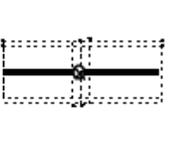
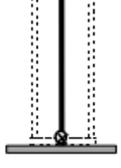
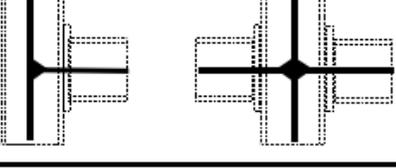
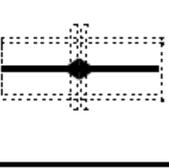
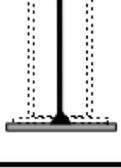
| MODELISATION ASSEMBLAGES | ASSEMB. POUTRE-POTEAU FLEXION / AXE FORT  | ASSEMB. DE CONTINUITÉ  | BASES DE POTEAUX  |
|--------------------------|---|--|---|
| SIMPLE                   |    |    |    |
| SEMI-CONTINUE            |   |   |   |
| CONTINUE                 |  |  |  |

Tableau (2) : Modélisation simplifiée des assemblages selon l'Eurocode 3

En vue d'une analyse globale de la structure, trois types de calcul peuvent être effectués. Ils sont liés à la classification de l'assemblage : un assemblage rigide (figure 7.b) assure la continuité des moments de la liaison, un assemblage semi-rigide (figure 7.c) assure seulement une continuité partielle et un assemblage articulé (figure 7.a) n'assure pas de continuité entre les éléments.

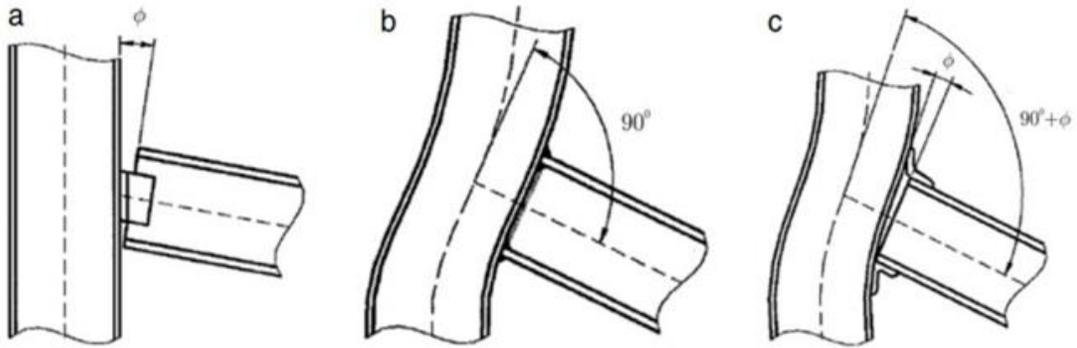


Figure (7) : Déformabilité de chaque type d'assemblage

La prise en compte de la semi-rigidité des assemblages dans l'analyse des structures nécessite de définir une loi de comportement de ses assemblages, qui consiste à présenter et introduire une courbe qui représente la relation (moment-rotation). Cette courbe est le facteur majeur définissant le comportement semi-rigide des assemblages entre les poutres et les poteaux.

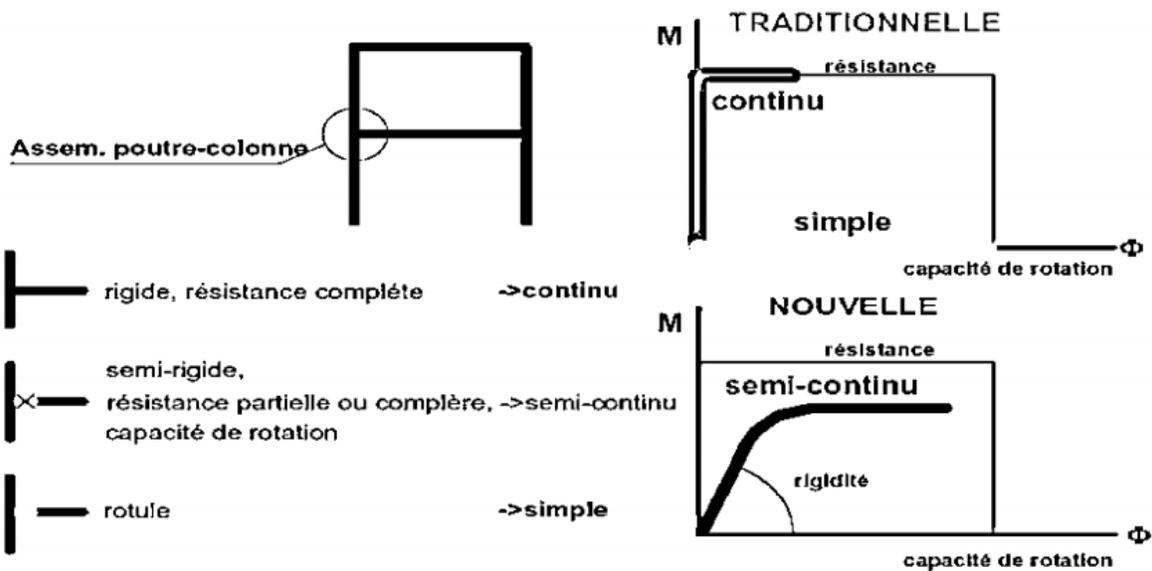


Figure (7) : Modélisation d'un assemblage (Jaspert 1998)

Le comportement moment-rotation des assemblages est généralement décrit à l'aide d'une courbe non-linéaire (figure 8). En effet, l'utilisation de ces courbes demande des programmes d'analyse sophistiqués. L'idéalisation des courbes moment-rotation par des modèles linéaire, bilinéaire et trinéaire selon l'EC3 pour permettre un calcul simple. Ce choix est lié à la méthode d'analyse utilisée et aux outils de calcul disponible comme représenté dans la figure (8). La solution bilinéaire est la plus utilisée.

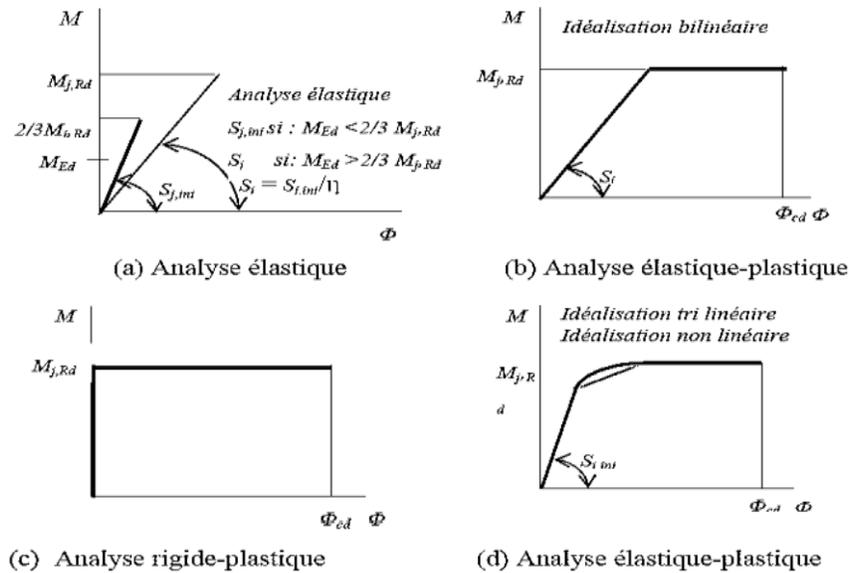


Figure (8) : Idéalisatión de courbes moment-rotation de l'assemblage

## 2-5 Méthodes de caractérisation des assemblages semi-rigides :

Les caractéristiques principales qui représentent le comportement d'un assemblage poutre-poteau sont : la résistance, la rigidité et la capacité de déformation définies à partir de la courbe moment-rotation relative entre les deux éléments assemblés et les méthodes de caractérisation des assemblages se répartissent en : des méthodes expérimentales, numériques, analytiques, empiriques et des méthodes mécaniques.

### 2-4-1 Méthode expérimentale :

Les essais expérimentaux demandent beaucoup de temps et des moyens (humains ou bien matériels), mais ils sont un outil qui fournit des résultats plus proches à la réalité.

Les essais publiés dans la littérature de la recherche scientifique sur les assemblages donnent des bases très importantes dans le développement des connaissances et aident les chercheurs par la compréhension des informations suivantes :

- Les propriétés géométriques et mécaniques de chaque élément de l'assemblage.
- La courbe moment-rotation.
- La rigidité et la résistance des assemblages.

Quelques essais sur des différents types d'assemblages ont été menés par plusieurs chercheurs tels que on trouve :

Zandonini et al. ont étudié l'influence et la contribution de chaque composante sur le comportement global de l'assemblage par un test sur les assemblages par platine d'extrémité débordante, Aggarwal et al. ont étudié l'influence de l'épaisseur de la platine d'about et le diamètre des boulons pour comparer les caractéristiques mécaniques des assemblages par platine d'about débordante dans les zones tendues ou dans les zones tendues et comprimées avec ceux des assemblages par platine d'about non débordante.

Bernuzzi et al étudié une poutre assemblée par un poteau rigide, dans le but d'étudier la variation de la loi moment-rotation en fonction de l'épaisseur de la platine d'about.

Chen et al étudié l'influence des imperfections géométriques initiales de la platine d'about sur le comportement des assemblages boulonnés avec platine d'about débordante, pour déterminer la rigidité et la résistance et pour permettre une analyse des structures en portiques à nœuds semi-rigides.

### 2-4-2 Méthode numérique :

La modélisation par élément finis a pris une meilleure part des productions scientifiques destinées à l'étude des phénomènes physiques complexes et la méthode des éléments finis est un moyen idéal pour construire la courbe moment-rotation des assemblages en acier. Elle est la plus utilisée car elle permet de :

- ♦ surmonter le manque de résultats expérimentaux.
- ♦ mener des études paramétriques approfondies à faible coût comparativement aux essais expérimentaux.
- ♦ comprendre les effets locaux importants qui ne peuvent être mesurés avec une précision suffisante, tel que les forces et les réactions de contact entre les boulons et les composantes de l'assemblage.
- ♦ prédire la distribution des efforts dans les composantes de l'assemblage et leurs modes de ruine.

Une telle analyse reste onéreuse car elle résulte d'interactions complexes entre les différentes composantes de l'assemblage. Ce qui nécessite l'introduction dans le modèle numérique des effets suivants :

- ♦ les non linéarités géométriques et matérielles.
- ♦ la force de précontrainte dans les boulons.
- ♦ l'interaction entre les boulons et les autres composantes de l'assemblage (platine, semelles raidisseurs etc.).
- ♦ Caractéristiques de l'interface modélisée entre pièces assemblées.
- ♦ glissement provenant du jeu trou/boulon.
- ♦ évolution de la zone de contact entre la platine et la semelle de poteau.
- ♦ les imperfections géométriques initiales.

### 2-4-3 Méthode analytique :

L'intérêt de cette méthode est d'étudier le comportement des assemblages à partir d'une analyse théorique. Dans cette partie, on présente quatre méthodes analytiques permettant de caractériser les assemblages poutre-poteau boulonnés.

- Lui et Chen (1986) ont proposé le modèle multiparamétrique exponentielle

$$M = \sum_{j=1}^m C_j \left( 1 - e^{-\frac{|\theta_r|}{2j\alpha}} \right) + M_0 + R_{kf} |\theta_r|$$

Avec :

- $M_0$ : c'est la valeur initiale du moment d'assemblage auquel la courbe est correspondue,

$-R_{Kf}$ : est la rigidité d'écroissage de l'assemblage,  $\alpha$  est un facteur de mise à l'échelle et  $C_j$  est une constante d'ajustement de courbe obtenue à partir d'une analyse de régression linéaire (Lui 1985)

- Kishi et Chen (1986) ont travaillé sur un modèle analytique pour prédire la réponse d'un assemblage à partir de ses propriétés géométriques et mécaniques et ils ont utilisé le modèle de Lui-Chen exponentielle pour s'adapter à tout changement de la pente de la courbe  $M - \theta r$  comme suit :

$$M = \sum_{j=1}^m C_j \left( 1 - e^{-\frac{|\theta_r|}{2j\alpha}} \right) + M_0 + \sum_{K=1}^n D_K (\theta_r - \theta_K) H[\theta_r - \theta_K]$$

Avec :

$-M_0$  et  $\alpha$  sont tels que définis précédemment

$-D_K$  est un paramètre constant pour la partie linéaire de la courbe,  $\theta_r$  est le démarrage de la rotation de la composante linéaire de la courbe,

$-H[\theta]$  est la fonction de Heaviside (1 pour  $\theta \geq 0$ , et zéro pour  $\theta < 0$ ),

-  $C_j$  et  $D_k$  est ajustement des courbes sont des constantes obtenues à partir d'une analyse de régression linéaire (Kishi and Chen, 1986)

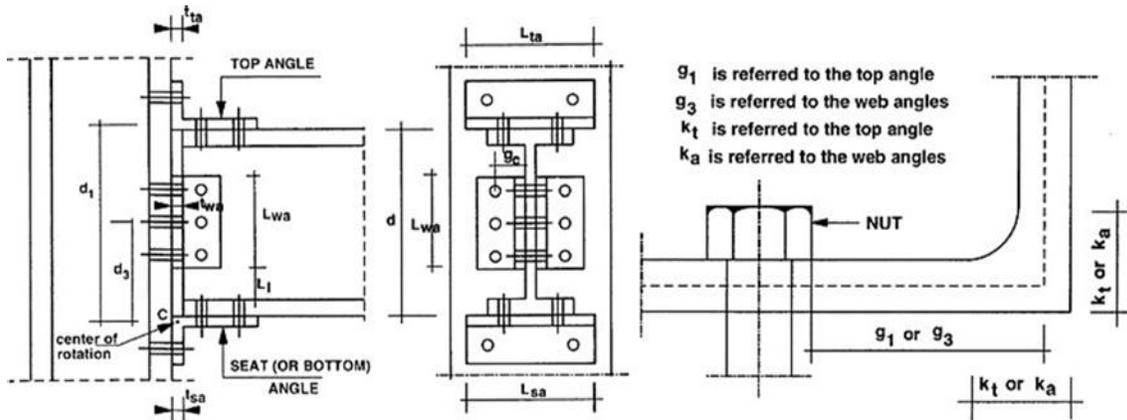


Figure (9) : Modèle et paramètres géométriques de chen et kishi (1986)

- Yee et Melchers (1986) permettant de prédire les relations moment-rotation des assemblages boulonnés avec platine d'about. Le modèle représente une approche analytique prenant en compte les modes de ruine possibles et les déformations des éléments qui entre dans l'assemblage ont proposé le modèle suivant à quatre paramètres exponentielle pour représenter le comportement non-linéaire  $M - \theta r$  des assemblages boulonnés :

$$M = M_p \left[ 1 - \exp \left( \frac{-(R_{ki} - R_{kp} + C\theta)\theta}{M_p} \right) \right]$$

Avec:

- $M_p$  c'est le moment plastique de l'assemblage,

- $R_{ki}$  c'est la rigidité initiale élastique de l'assemblage,

- $R_{kp}$  c'est la rigidité de l'écroissage de l'assemblage.

-C c'est une constante qui contrôle la pente de la courbe et elle est obtenu de façon empirique par ajustement de courbe à des données expérimentales.

- Wu et Chen (1990) ont proposé un modèle à trois paramètres exponentielle pour représenter le comportement moment-rotation des cornières de semelles avec ou sans les doubles cornières d'âme. il a la forme suivante :

$$\frac{M}{M_u} = n \left[ \ln \left( 1 + \frac{\theta_r}{n\theta_0} \right) \right]$$

Avec :

- $M_u$  c'est le moment idéalisé d'un mécanisme élasto-plastique,  $\theta_0$  c'est la rotation de référence ( $M_u/R_{ki}$ )  $R_{ki}$  la rigidité de rotation initiale).

- $n$  c'est un paramètre de forme.  $M_u$  et  $R_{ki}$  sont déterminés analytiquement, tandis que le paramètre de forme,  $n$ , est obtenue par un calibrage vaste avec les données expérimentales.

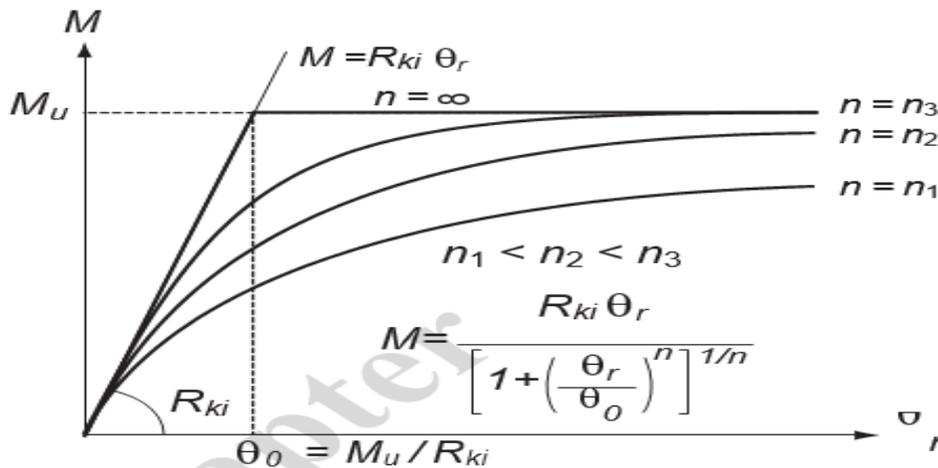


Figure (10) : figure représentative pour la détermination du paramètre  $n$

2-4-4 Méthode empirique :

Le calcul des assemblages par les méthodes empiriques est basé sur des techniques d'adaptation des courbes d'ajustement moment-rotation par lesquelles une expression mathématique reproduit les données expérimentales .

-L'avantage du modèle empirique est qu'une fois les paramètres de la courbe d'ajustement déterminés, la relation moment-rotation peut être exprimée facilement pour dimensionner l'assemblage.

-L'inconvénient principal de ces méthodes est qu'ils ne sont applicables que pour des assemblages dont les configurations concordent avec ceux utilisés pour générer le modèle et aussi il n'est pas possible d'évaluer l'influence de chaque paramètre sur les caractéristiques de l'assemblage.

Dans leur étude, Frye et Morris (1976) ont développé des équations de prévision de la rigidité pour sept (07) types des assemblages couramment utilisés. L'équation de prévision est de la forme générale représentée dans l'équation (1) Les constantes d'ajustement de courbe C1, C2 et C3 et K paramètre de normalisation pour chaque type d'assemblage sont résumés dans le tableau (3), tandis que les paramètres de taille pour chaque type d'assemblage sont représentés schématiquement sur la Fig.3.1.

Ce modèle représente assez bien le comportement  $M - \theta r$  L'inconvénient principal est que la nature d'un polynôme doit maximale et minimale dans un certain intervalle. La rigidité d'assemblage, qui est représentée par la pente de la courbe  $M - \theta r$ , peut devenir négative à certaines valeurs de M. Ceci est physiquement inacceptable. En outre, cette rigidité négative peut causer des difficultés numériques dans l'analyse des structures des cadres si la formule de rigidité tangentielle est utilisée

$$\theta_r = C_1 (KM)^1 + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

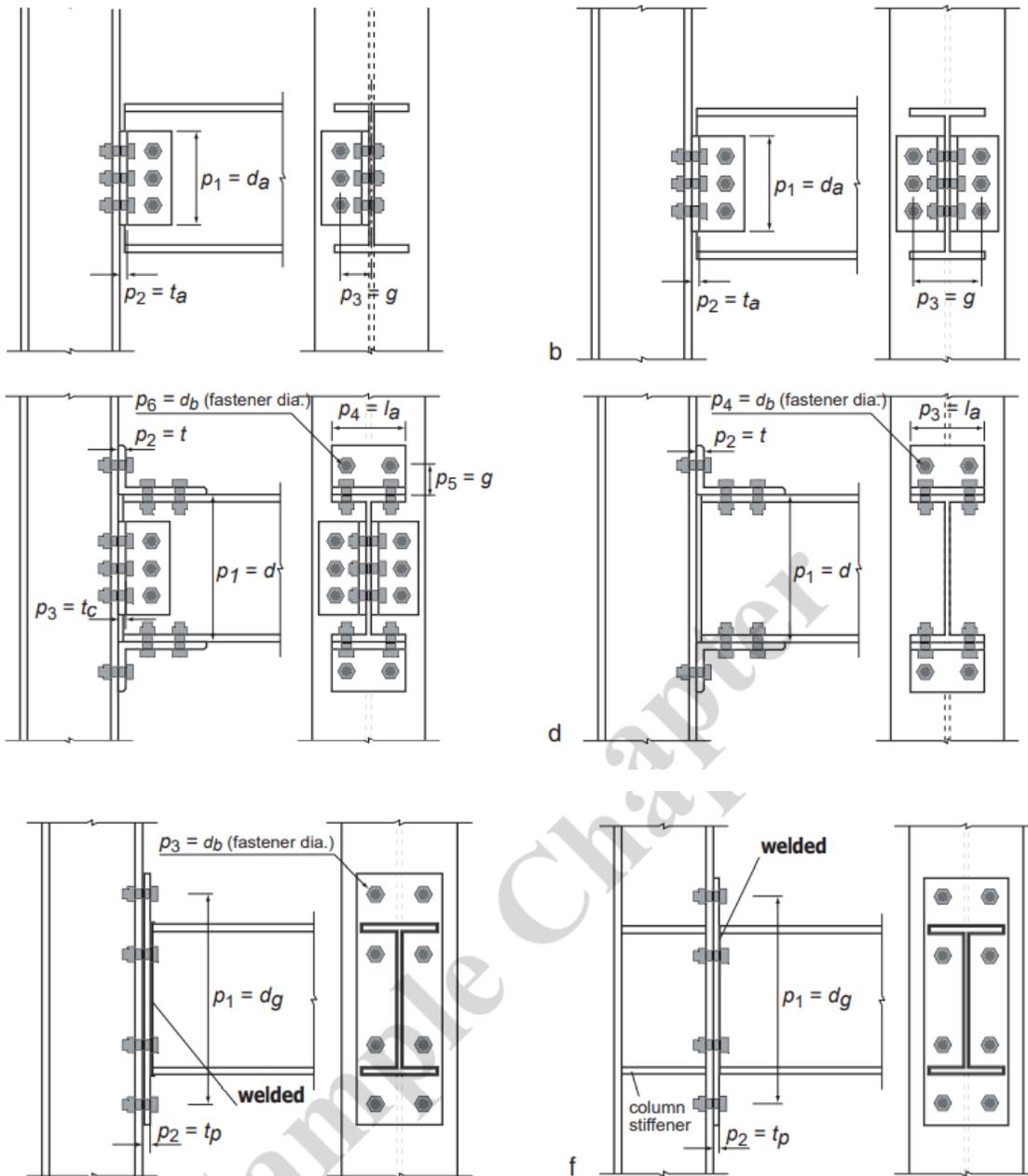
K : est un paramètre de normalisation dépend du type d'assemblage et de la géométrie.

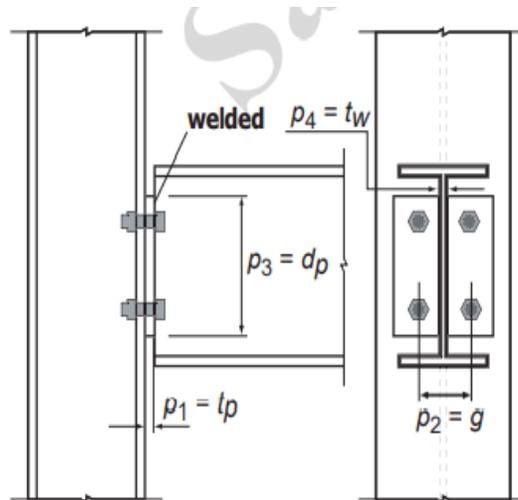
C1, C2 et C3 sont des constantes d'ajustement de courbe.

| Types d'assemblages                      | Les constantes d'ajustement de courbe   | Le paramètre de normalisation         |
|--|---|---------------------------------------|
| Assemblage avec une seule cornière d'ame | $C_1 = 1.67 \times 10^{-0}$<br>$C_2 = 8.56 \times 10^{-2}$<br>$C_3 = 1.35 \times 10^{-3}$ | $K = d_a^{-2.4} t_a^{-1.81} g^{0.15}$ |
| Assemblage avec double cornière d'ame    | $C_1 = 1.43 \times 10^{-1}$<br>$C_2 = 6.79 \times 10^1$<br>$C_3 = 4.09 \times 10^5$       | $K = d_a^{-2.4} t_a^{-1.81} g^{0.15}$ |

|   |   |   |
|---|---|---|
| Assemblage par platine d'extrémité non-débordante         | $C_1 = 6.14 \times 10^{-3}$<br>$C_2 = 1.08 \times 10^{-3}$<br>$C_3 = 6.05 \times 10^{-3}$ | $K = d_p^{-2.3} t_p^{-1.6} g^{1.6} t_w^{-0.5}$                            |
| Assemblage avec double cornière de semelle                | $C_1 = 2.59 \times 10^{-1}$<br>$C_2 = 2.88 \times 10^3$<br>$C_3 = 3.31 \times 10^4$       | $K = d^{-1.5} t^{-0.5} l_a^{-0.7} d_b^{-1.5}$                             |
| Assemblage par plaque d'extrémité sans rigidité du poteau | $C_1 = 8.91 \times 10^{-1}$<br>$C_2 = -1.20 \times 10^4$<br>$C_3 = 1.75 \times 10^8$      | $K = d_g^{-2.4} t_p^{-0.4} d_b^{-1.5}$                                    |
| Assemblage par plaque d'extrémité avec rigidité du poteau | $C_1 = 2.60 \times 10^{-1}$<br>$C_2 = 5.36 \times 10^2$<br>$C_3 = 1.31 \times 10^7$       | $K = d_g^{-2.4} t_p^{-0.6}$   |
| Assemblage avec double cornière d'ame et de semelle       | $C_1 = 1.50 \times 10^{-3}$<br>$C_2 = 5.60 \times 10^{-3}$<br>$C_3 = 4.35 \times 10^{-3}$ | $K = d^{-1.287} t^{-1.128} t_c^{-0.415} l_a^{-0.694} (g - d_b/2)^{1.350}$ |

Tableau (3) : : Les constantes d'ajustement des courbes pour le modèle polynome de Frye-Morris





#### 2-4-5 Méthode de calcul mécanique :

Dans cette méthode les assemblages sont représentés par des ressorts pour introduire les conditions d'équilibre statique, elle intègre toutes les composantes de l'assemblage. Chaque composante d'un assemblage est caractérisée par une loi de comportement par la définition d'un coefficient de rigidité qui sert au calcul de la rigidité de l'assemblage et par une résistance pour calculer la résistance de l'assemblage, la capacité de déformation doit être établie pour chaque type. Pour développer ce modèle, il est nécessaire d'introduire les étapes suivantes :

- Identifier les composantes de l'assemblage ayant une influence significative sur la déformation et la rupture de celui-ci ;
- Définir une loi de comportement pour chaque composante de l'assemblage au moyen d'une méthode analytique, numérique ou expérimentale ;
- Assembler toutes les composantes pour obtenir la courbe moment-rotation entière de l'assemblage.

Les premiers ayant proposé cette méthode de calcul pour étudier le comportement non linéaire des assemblages boulonnés, y compris l'effet de l'effort normal sont Wales et Rossow . La modélisation de l'assemblage a été fait à l'aide de deux barres rigides reliées par un ensemble homogène de ressorts non linéaires indépendants, ce modèle prend en compte l'effet de l'effort normal.

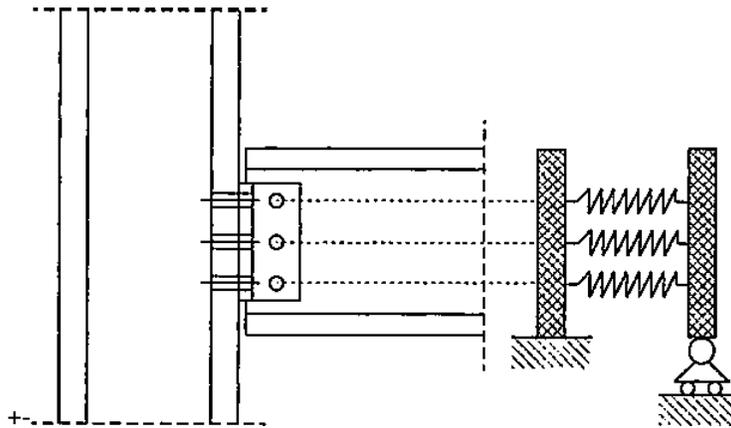


Figure (11) : Modèle mécanique proposé par Wales et Rossow

Les recherche qui suit utilise cette démarche pour développer une méthode analytique afin de prédire la courbe moment-rotation d'un assemblage avec platine d'extrémité jusqu'à ce que la rotation d'extrémité provoque le contact de la semelle inférieure de la poutre avec celle du poteau telle que on trouve Kennedy et Hafez.

Pucinotti a été proposée pour étudier le comportement des assemblages poutre-poteau par cornières de semelles. Un modèle mécanique simplifié est proposé pour ce type d'assemblage figure (12), où il a été expliquer que les contributions des cornières d'âme de poutre ne sont pas toujours négligeables.

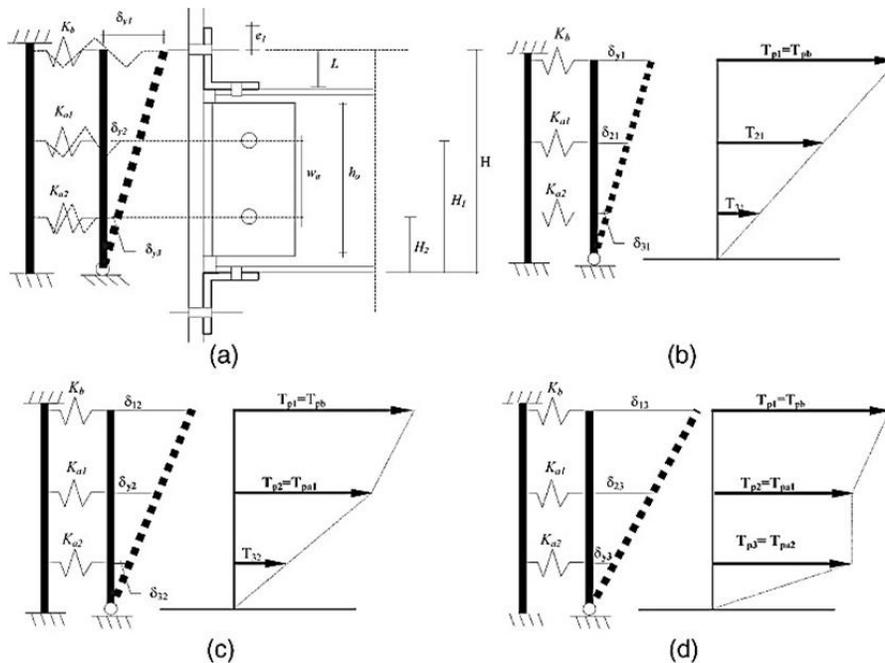


Figure (12):Modèle de calcul mécanique pour un assemblage par cornières de semelle

## 2-5 Détermination de la rigidité initiale et le moment résistant des assemblages semi-rigides :

### 2-5-1 Méthode analytique : Modèle kichi-Chen (1986)

a-assemblage avec seule/double cornière d'ame :

- ♦ La rigidité initiale :

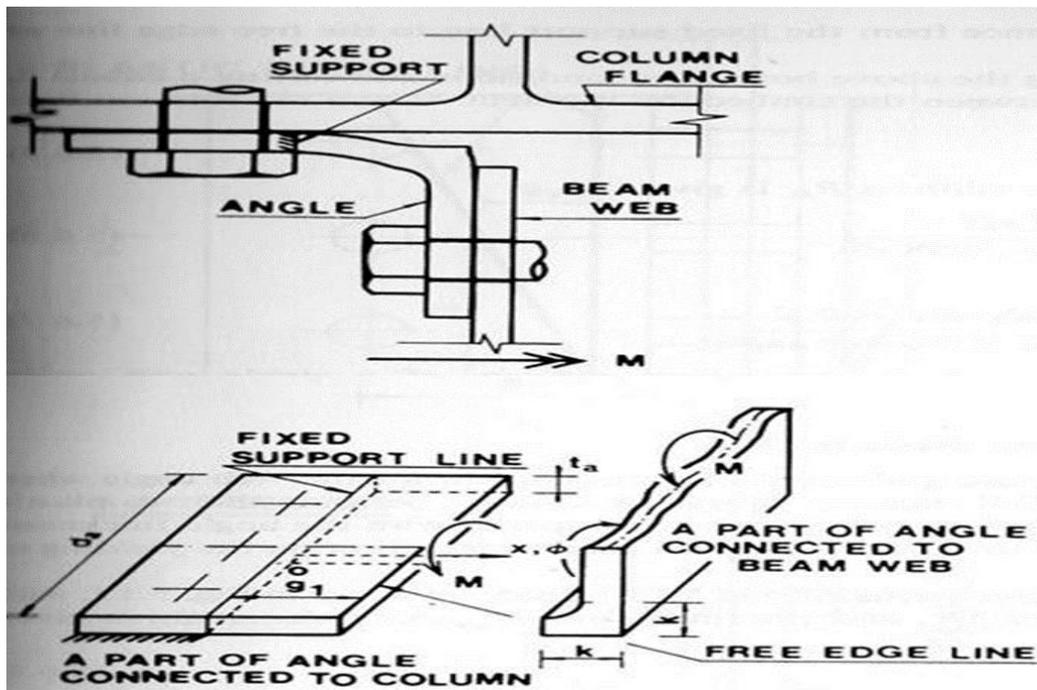


Figure (13) : Déformation de la cornière lors de la chargement initial + La modélisation de la plaque épaisse modérée de la cornière de semelle

La cornière d'âme dans la zone élastique initiale est supposée se comporter de la manière suivante :

- ♦ L'effet de l'effort tranchant lors de la déformation de l'assemblage est annulé.
- ♦ La partie de la cornière reliée à la colonne se comporte d'une manière élastique linéaire, mais la partie de la cornière reliée à la poutre se comporte comme un élément rigide.
- ♦ La déformation de l'assemblage est petite.

En utilisant ces hypothèses, et en appliquant la théorie de torsion-flexion simple à la partie de la cornière reliée à la colonne comme représenté dans la figure 13, l'équation différentielle de rotation  $\varphi$  peut être écrite comme:

$$GJ \frac{d^2 \varphi}{dx^2} - EC_w \frac{d^4 \varphi}{dx^4} = 0 \quad (1)$$

Avec :

J : la constante de torsion uniforme.

$C_w$  : la constante de gauchissement.

E et G sont le module de Young et de cisaillement respectivement.

Les conditions au limite sont représenté sur la figure (13) :

- À l'extrémité libre ( $x = g_1$ ) :

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = 0$$
$$GJ \frac{d\phi}{dx} - EC_w \frac{d^3\phi}{dx^3} = M$$

- A l'extrémité fixée ( $x = 0$ )

$$\frac{d\phi}{dx} = 0, \quad \phi = 0$$

Ensuite en résoudre l'équation (1) jusqu'à obtenu une relation de m en fonction de rotation :

$$M = R_{ki} \theta_r$$

Ou la rigidité initiale s'exprime comme suit :

$$R_{ki} = G \frac{t_a^3}{3} \frac{\alpha \cosh(\alpha\beta)}{(\alpha\beta) \cosh(\alpha\beta) - \sinh(\alpha\beta)}$$

- $\alpha$  et  $\beta$  sont définis comme :

$\alpha = 4.2967$  lorsque le coefficient de poisson est égale à 0.3

et :

$$\beta = \frac{g_1}{d_a}$$

da : la hauteur de la cornière de l'âme

- ♦ Moment résistant :

La figure (14) présente le mécanisme de rupture global supposé pour la cornière d'âme quand l'assemblage atteint sa capacité de résistance complète, la distance entre les deux rotules plastiques est du même ordre de grandeur par rapport à l'épaisseur de la cornière, il faut donc considérer l'effet de l'interaction de l'effort tranchant en flexion sur le rendement de la matière.

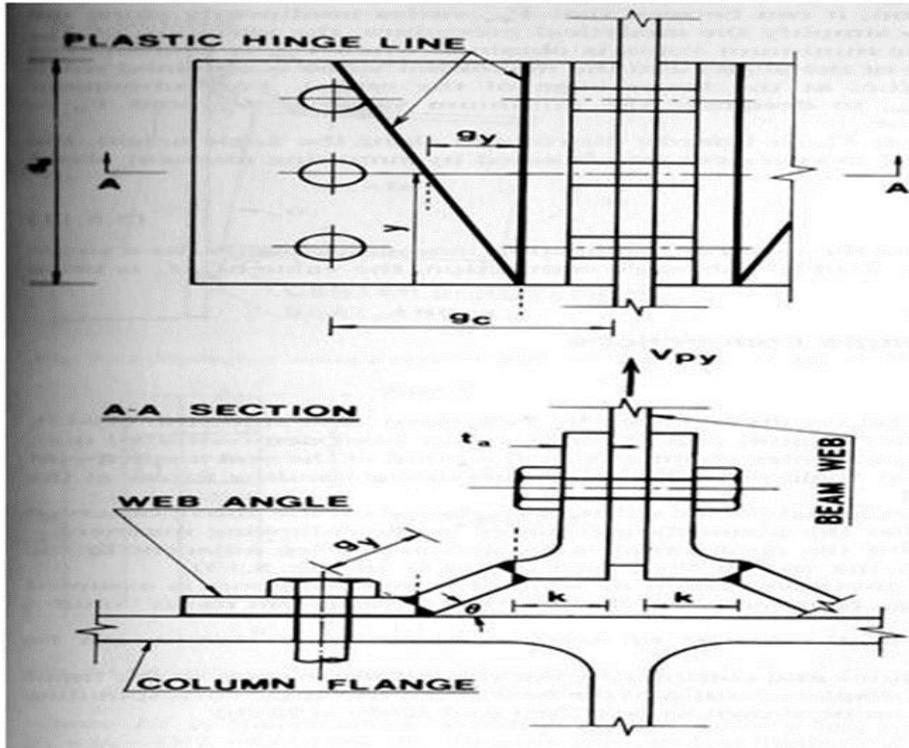


Figure (14) :: Mécanisme de rupture pour l'assemblage de cornière d'ame

L'équation de travail pour le mécanisme dans une section arbitraire "y" avec le moment plastique  $M_{py}$  et l'effort tranchant  $V_{py}$  par unité de longueur, est donnée par :

$$2M_{py}\theta = V_{py}g_y\theta \quad \boxed{1}$$

La combinaison du moment de flexion  $M_{py}$  et de l'effort tranchant  $V_{py}$  utilisé, est donné par :

$$\left(\frac{M_{py}}{M_0}\right) + \left(\frac{V_{py}}{V_0}\right)^4 = 1 \quad \boxed{2}$$

Avec :

- $M_0$  et  $V_0$  sont le moment de flexion plastique pur en l'absence de l'effort tranchant et l'effort tranchant par unité de longueur, en l'absence de flexion de la cornière d'âme, respectivement.

En utilisant le critère de tresca et en remplaçant 1 dans 2 , l'équation peut être écrite comme :

$$\left(\frac{V_{py}}{V_0}\right)^4 + \frac{g_y}{t_a}\left(\frac{V_{py}}{V_0}\right) - 1 = 0$$

A partir de l'équation ci-dessus, il est constaté que  $V_{py}$  varie de manière non linéaire le long de la hauteur de l'âme de cornière. Cette variation est supposée linéaire. La valeur minimale est obtenue lorsque  $V_{py}$  est évaluée à  $y = d_a$  et la valeur maximale est obtenue lorsque  $V_{py}$  est évaluée à  $y = 0$ . Pour la suite, donc l'utilisation de  $V_p$  est pour désigner la valeur minimale de  $V_{py}$  et  $V_0$  pour désigner la valeur maximale.

Le moment ultime de l'assemblage peut être obtenu par sommation des moments sur le bord inférieur de la cornière.

Cette équation est pour l'assemblage d'une seule cornière d'âme. Pour l'assemblage de double cornière d'âme,  $M_u$  est le double de la valeur.

$$M_u = \left( \frac{2V_{pu} + V_0}{6} \right) d_a^2$$

### b- Assemblages cornières semelles :

- ♦ Rigidité initiale :

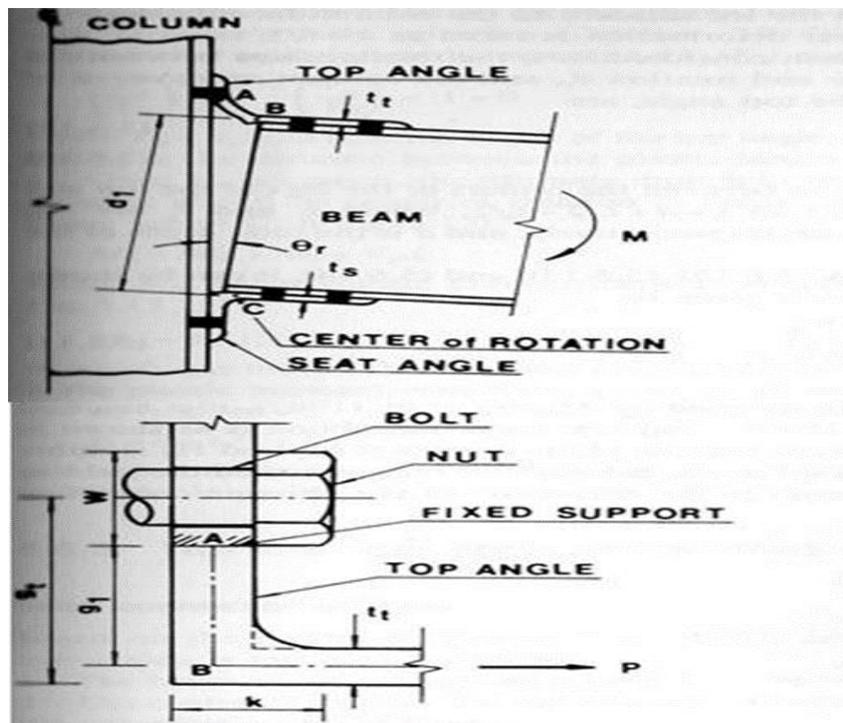


Figure (15) : Configuration des cornières de semelles à l'état élastique

Pour déterminer la rigidité initiale élastique  $R_{ki}$ , il est supposé que l'assemblage se comporte de la manière suivante :

- 1- Le centre de rotation de l'assemblage est situé au pied adjacent de la semelle de la poutre de compression à l'extrémité de la poutre (point C sur la Fig.15),

- 2- La cornière supérieure agit comme une poutre en porte à faux, dans laquelle l'appui fixe est supposé être sur le bord de maintien de dispositif de fixation. Ce dernier se trouve à proximité de la semelle de la poutre dans le pied à côté de la face de la colonne comme indiqué dans la Fig.15
- 3- Le moment résistant à l'axe de rotation est si petit qu'il peut être négligé.

À partir des équations cinématiques et d'équilibre, la relation entre le déplacement horizontal  $\Delta$  et la rotation d'extrémité  $\theta_r$ , et le moment d'assemblage  $M$  et la force de la poutre  $P$  agissant sur la cornière supérieure, sont

$$\Delta = d_1 \theta_r \quad (3)$$

$$M = d_1 P \quad (4)$$

Où :

$d_1$  est la distance entre les centres des pieds des cornières inférieurs comme montré à la Fig.15.

Remplaçant les valeurs de  $\Delta$  et  $P$  (3) et (4) dans l'équation suivante, on peut alors retrouver la rigidité initiale d'assemblage par l'expression suivant:

$$\Delta = \frac{P g_1^3}{3(EI)} \left( 1 + \frac{0.78 l_t^2}{g_1^2} \right)$$

On peut alors retrouver la rigidité initiale d'assemblage par l'équation suivant:

$$R_{ki} = \frac{M}{\theta_r} = \frac{3(EI)}{1 + \left( \frac{0.78 l_t^2}{g_1^2} \right)} \left( \frac{d_1^2}{g_1^3} \right)$$

- ♦ Moment résistant :

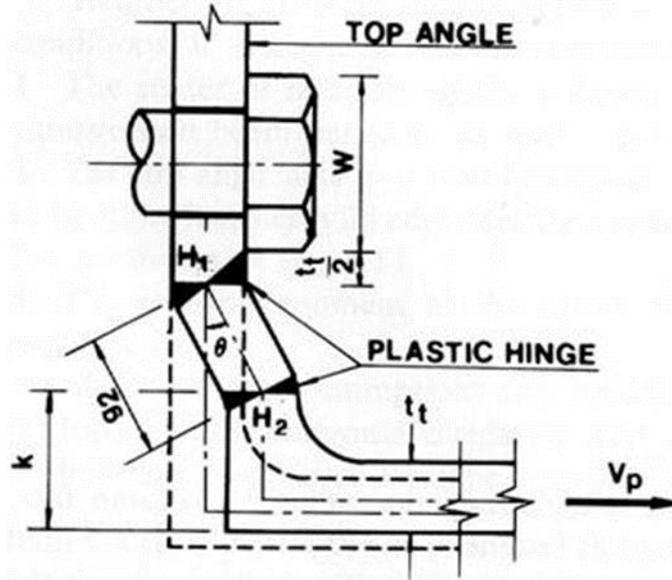


Figure (16) : Mécanisme de rupture de l'assemblage Cornière de semelle

Il est supposé que le mécanisme de rupture de l'assemblage des cornières de semelles montré sur la figure 16, comme la distance entre les deux rotules plastiques H1 et H2 est courte par rapport à l'épaisseur de la cornière supérieure, l'effet de l'effort tranchant sur le rendement de la matière est pris en compte dans le calcul du moment ultime de l'assemblage

En utilisant l'équation de travail pour le mécanisme représenté sur la Fig.16, une équation du quatrième ordre par rapport à  $(V_p / V_0)$  peut être écrite comme

$$\left(\frac{V_p}{V_0}\right)^4 + \frac{g_2}{t_t} \left(\frac{V_p}{V_0}\right) - 1 = 0$$

Où :  $V_0 = \sigma_y \cdot l_t \cdot t_t / 2$

-  $l_t$  : la largeur de la cornière supérieur,

-  $t_t$  est l'épaisseur de le cornière supérieur)

-  $g_2$  est la distance entre les rotules plastiques H1 et H2.

Le moment ultime  $M_u$  est obtenue en additionnant moment autour du centre de rotation et le moment plastique au pied adjacent à la semelle de la poutre de compression. (Point C sur la Fig.15)

$$M_u = M_{0s} + M_p + V_p d_2$$

Où :

$$M_{0s} = \frac{\sigma_y l_s t_s^2}{4}$$

avec :

- $l_s$  est la largeur de la cornière inférieure
- $t_s$  est l'épaisseur de la cornière inférieure

Et  $M_p$  est la moment plastique au point H2 de la cornière supérieure de la figure3.6.

$$M_p = \frac{V_p g_2}{2}$$

Et  $d_2$  est donné par

$$d_2 = d + \frac{t_s}{2} + k$$

Où :

$k$  c'est la distance à partir du talon de la cornière supérieure à la cible d'évaluation du filet, comme montré dans la Fig.16.

c- Assemblage cornières des semelles avec double de cornières d'âme :

- ♦ Rigidité initiale :

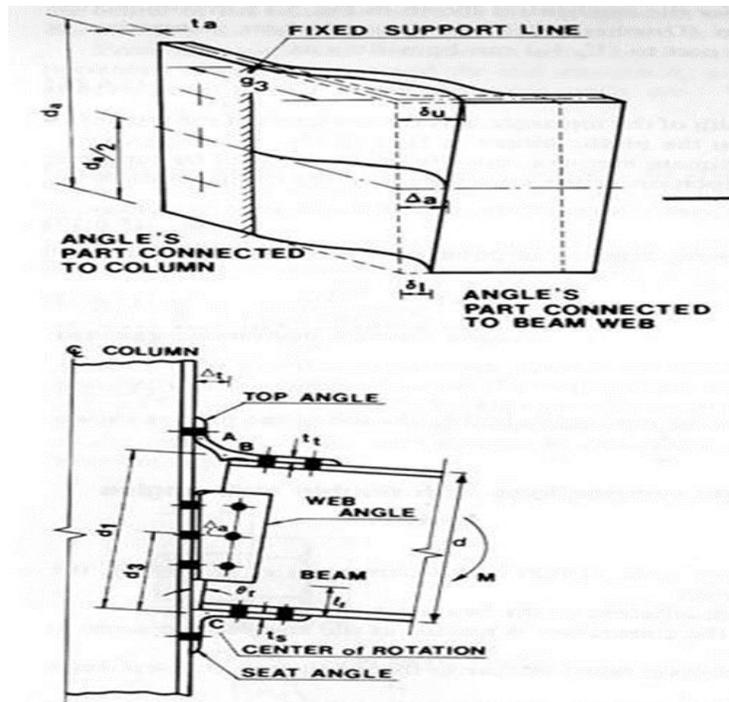


Figure (17) : Configuration des cornières reliées à la poutre et au poteau à l'état élastique

L'assemblage est modélisé à l'aide des hypothèses suivantes :

- La poutre et le pied de la cornière adjacente sur la poutre considéré comme des éléments rigides.
- Le centre de rotation de l'assemblage est situé au pied de la cornière adjacente à la semelle de la poutre de compression.
- La cornière supérieure agit comme une poutre en porte à faux semblable à celle de l'assemblage des cornières de semelle (Fig.15).
- La cornière d'âme agit comme une poutre en porte à faux semblable au comportement de la cornière supérieure montrée dans la Fig.17.
- Le moment résistant au centre de rotation est négligeable.

De ces hypothèses on peut tirer :

Le déplacement horizontal  $\Delta_t$  du pied de la cornière supérieure est due grâce à la force de semelle de la poutre  $P_t$  (semblable à P sur la Fig.15)

$$\Delta_t = \frac{P_t g_1^3}{3(EI_t)} \left( 1 + \frac{0.78 t_t^2}{g_1^2} \right)$$

et la valeur moyenne du déplacement horizontal  $\Delta_a$  du pied de la cornière correspondant à la force de la cornière d'âme  $P_a$  (fig 17)

$$\Delta_a = \frac{P_a g_3^3}{3(EI_a)} \left( 1 + \frac{0.78 t_a^2}{g_3^2} \right)$$

où :

- $EI_t$  et  $EI_a$  sont les rigidités de flexion des pieds adjacents à la face de poteau de la cornière supérieure et la cornière d'âme, respectivement,  $g_1$  est définie dans l'équation suivante :

$$\Delta = \frac{P g_1^3}{3(EI)} \left( 1 + \frac{0.78 l_t^2}{g_1^2} \right)$$

- $t_t$  est l'épaisseur de la cornière supérieure,

- $g_3 = g_c - W/2 - t_a/2$  ( $W$  est le diamètre de l'écrou et  $t_a$  est l'épaisseur de la cornière supérieure).

Autrement, en supposant que  $P_a$  agit à mi-hauteur de la cornière d'âme et en référence à la configuration déviée montrée dans la Fig.17, les relations cinématiques pour  $\Delta_t$  et  $\Delta_a$  exprimées en termes de  $\theta_r$  la rotation d'assemblage peut être écrite comme suit :

$$\Delta_a = d_3 \theta_r$$

$$\Delta_t = d_1 \theta_r$$

et :

$$d_3 = \frac{d}{2} + \frac{t_s}{2}$$

Les variables  $d_1$ ,  $d_3$ ,  $d$  et  $t_s$  sont montrés dans la Fig.17.

Le moment autour le point C de la cornière inférieure montré de la Fig.17, le moment de

$$M = P_t d_1 + 2P_a d_3$$

l'assemblage est obtenu comme :

Remplaçant les valeurs  $\Delta t$ ,  $\Delta a$ ,  $P_t$  et  $P_a$ , dans l'équation de  $M$  La rigidité initiale de l'assemblage peut être écrite comme :

$$R_{ki} = \frac{M}{\theta_r} = \frac{3(EI_t)d_1^2}{g_1(g_1^2 + 0.78t_t^2)} + \frac{6(EI_a)d_3^2}{g_3(g_3^2 + 0.78t_a^2)}$$

- ♦ Moment résistant :

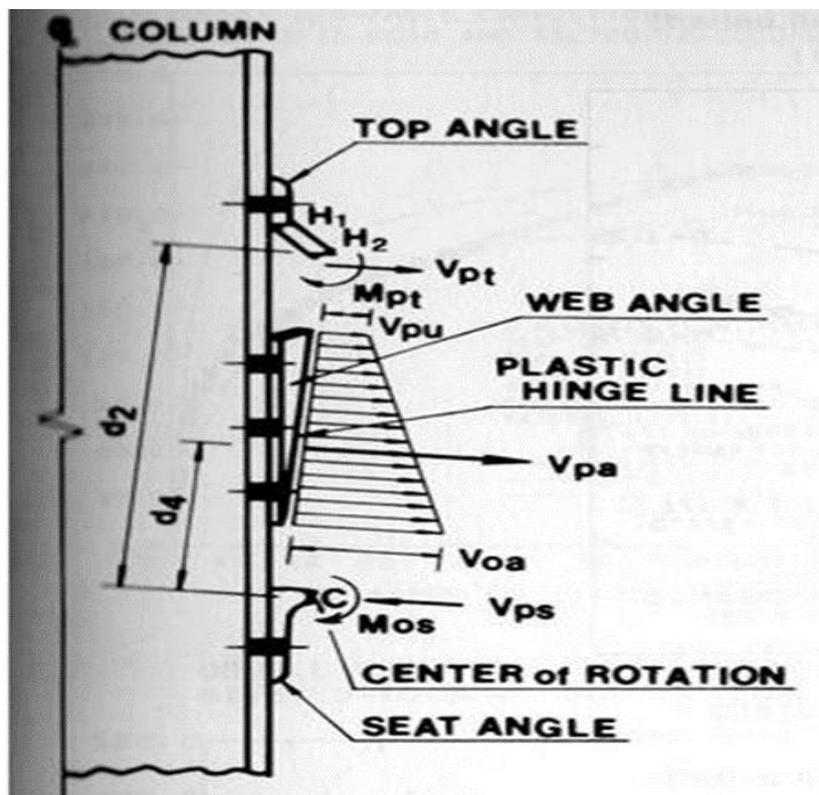


Figure (18) : Les forces appliquées à l'état ultime de l'assemblage

e mécanisme de rupture de l'assemblage des cornières semelles avec doubles cornières d'âme est supposée être une combinaison de mécanismes de rupture d'assemblage des cornières d'âme et l'assemblage des cornières de semelle .

Dans un premier temps, il faut considérer le moment ultime de la cornière supérieure. En se référant à la Fig.16, et en supposant  $M_{pt}$  et  $V_{pt}$  être le moment de flexion plastique et l'effort tranchant agissant sur les rotules plastique H1 et H2 respectivement, le critère de Drucker de rendement comme peut être écrit comme suit:

$$\left(\frac{V_{pt}}{V_{0t}}\right)^4 + \frac{g_2}{t_t} \left(\frac{V_{pt}}{V_{0t}}\right) - 1 = 0$$

Avec :

$(V_{0t} = \sigma_y \cdot l_t \cdot t_t / 2)$  : l'effort tranchant plastique du pied de la cornière supérieure lorsque l'effet de flexion est ignoré ( $l_t$ , correspond à la largeur de la cornière supérieure,  $t_t$  est l'épaisseur de la cornière supérieure) et  $g_2$  est la distance entre les rotules plastiques H1 et H2 comme montré la Fig.16).

Une fois  $V_{pt}$  est connu, le moment ultime de la cornière supérieure  $M_{pt}$  est obtenu à partir :

$$M_{pt} = \frac{V_{pt} g_2}{2}$$

Puis, le moment ultime de la cornière inférieure est donné par :

$$M_{0s} = \sigma_y l_s \frac{t_s^2}{2}$$

Où :

$l_s$ , correspond à la largeur de la cornière inférieure,  $t_s$  est l'épaisseur de la cornière inférieure.

L'effort tranchant plastique  $V_{pa}$  agissant sur une seule cornière d'âme est exprimée par :

$$V_{pa} = \left(\frac{V_{pu} + V_{0a}}{2}\right) d_a$$

Où :

- $V_{pu}$  est la valeur de l'effort tranchant au niveau de l'extrémité supérieurs

- $V_{0a}$  est la valeur de l'effort tranchant au niveau de l'extrémité inférieure

La valeur de  $V_{pa}$  est double pour un assemblage à double cornière d'âme.

La figure (18) montre les forces agissantes sur l'assemblage à l'état ultime. En utilisant les équations de résistance ultime exprimées par les relations et en additionnant le moment autour de l'axe de rotation (point C), le moment ultime de l'assemblage  $M_u$  peut être exprimé comme suit :

$$M_u = M_{0s} + M_{pt} + V_{pt} d_2 + 2V_{pa} d_4$$

Avec :

$$d_4 = \frac{(2V_{pu} + V_{0a})}{3(V_{pu} + V_{0a})} d_a + l_1 + \frac{t_s}{2}$$

### 2-5-2 Méthode empirique : Modèle Frye-Morris (1976)

Le tableau (3) montre les caractéristiques des assemblages (constantes d'ajustement, paramètres de normalisation) qui ont utilisés pour le développement de l'équation suivante :

$$\theta = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

Et a partir de cette dernière on peut calculé la rigidité initial de chaque type d'assemblage par l'équation suivante :

$$K_{j,ini} = \frac{1}{\left(\frac{\partial \theta}{\partial M}\right)_{(\theta=0 \text{ ou } M=0)}}$$

### 2-5-2 Méthode a modèle mécanique : Modèle de l'Eurocode 3

#### ♦ Rigidité initiale :

La détermination de la rigidité initiale d'un assemblage convient à partir de calcul de coefficient de rigidité élastique de chaque composantes  $K_i$  :

**-Un panneau d'âme de poteau non raidi en cisaillement :**

$$k_1 = \frac{0.38A_{vc}}{\beta_z}$$

$A_{vc}$  : est l'aire de cisaillement du poteau,

$Z$  : est le bras de levier

$\beta$  : est le paramètre de transformation

**-Une âme de poteau non raidie comprimée :**

$$k_2 = \frac{0.7b_{eff,c,wc}t_{wc}}{d_c}$$

$b_{eff,c,wc}$  : est la largeur efficace de l'âme du poteau comprimée

$d_c$  : est la hauteur libre de l'âme du poteau

$t_{wc}$  : est l'épaisseur de l'âme du poteau.

**-Une âme de poteau tendue :**

$$k_3 = \frac{0.7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_c}$$

$b_{eff,t,wc}$  : est la largeur efficace de l'âme du poteau tendue

**-Une semelle de poteau fléchie :**

$$k_4 = \frac{0.85l_{eff}t_{fc}^3}{m^3}$$

$l_{eff}$  : est la plus petite des longueurs efficaces (isolément ou comme partie d'un groupe de boulons)

$m$  : est tel que défini à la Figure (19)

$t_{fc}$  : est l'épaisseur de la semelle de poteau.

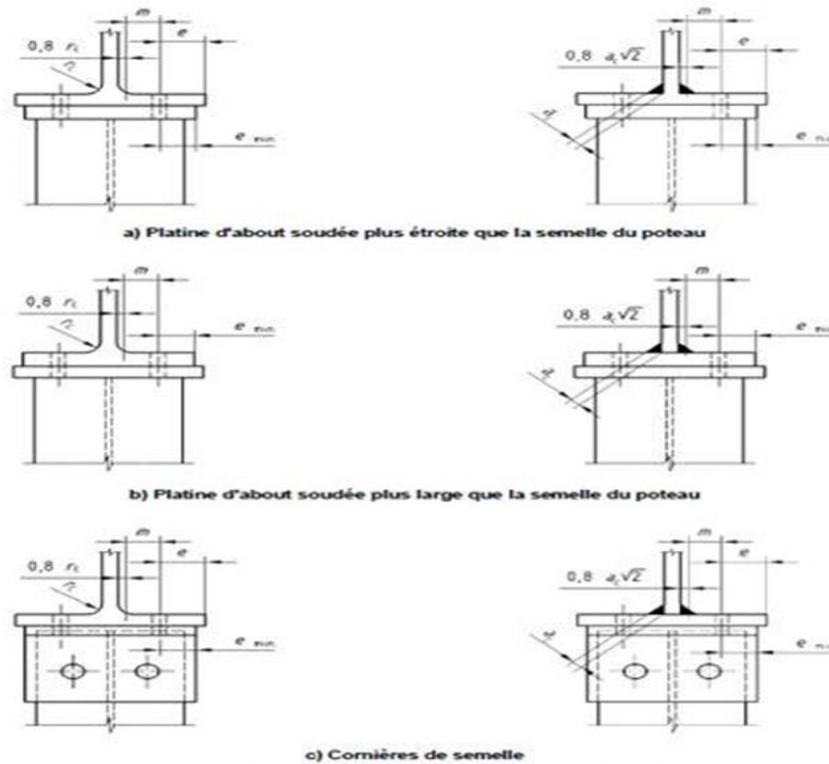


Figure (19) : Dimensions  $e_{min}$  et  $m$  pour une semelle de poteau

-Une platine d'about fléchie :

$$k_5 = \frac{0.85l_{eff}t_p^3}{m^3}$$

-  $l_{eff}$  : est la plus petite des longueurs efficaces (isolément ou comme partie d'un groupe de boulons)

-  $m$  : est défini dans la Figure (19)

-Les boulons tendus :

$$k_{10} = 1.6 \frac{A_s}{L_b}$$

$A_s$  : est l'aire de la section résistante en traction du boulon.

$L_b$  : est la longueur utile d'allongement du boulon, prise égale à la longueur serrée.

**-Les boulons non précontraints en cisaillement :**

$$k_{11} = \frac{16n_b d^2 f_{ub}}{E d_{M16}}$$

d : est le diamètre nominal des boulons ;

dM16 : est le diamètre nominal d'un boulon M16 ;

fub : est la résistance à la rupture en traction des boulons ;

nb : est le nombre de rangées de boulons.

**- Les boulons non précontraints en pression :**

$$k_{12} = \frac{24n_b k_b k_t d f_u}{E}$$

Avec :

|                          |                 |
|--------------------------|-----------------|
| kb = kb1                 | Mais kb ≤ kb2   |
| kb1 = 0,25 eb / d + 0,5  | Mais kb1 ≤ 1,25 |
| kb2 = 0,25pb / d + 0,375 | Mais kb2 ≤ 1,25 |
| kt = 1,5 tj / dM16       | Mais kt ≤ 2,5   |

Après avoir déterminé toutes ces coefficients de flexibilités de chaque composante il est nécessaire donc de calculer la rigidité initiale :

$$S_j = \frac{E z^2}{\mu \sum_i \frac{1}{k_i}}$$

Cette relation est applicable si :

$$N_{sd} < 10\% N_{pl,Rd}$$

Et

$$M_{j,Sd} < M_{j,Rd}$$

Avec :

Ki : est le coefficient de rigidité pour la composante i

Z : est le bras de levier, voir Annexe J.2.5

μ : est déterminé de la façon suivante :

-Si  $M_{j,Sd} < 2/3 M_{j,Rd}$  :  $\mu = 1$

-Si  $2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Sd} \leq M_{j,Rd}$   $\mu = (1,5 M_{j,Sd} / M_{j,Rd})^\psi$

:

Où : le coefficient  $\psi$  est tiré du Tableau J.9. (Annexe J) :

**Tableau J.9 — Valeur du coefficient  $\psi$**

| Type d'attache                  | $\psi$ |
|---------------------------------|--------|
| Soudé                           | 2,7    |
| Platine d'about boulonnée       | 2,7    |
| Cornières de semelle boulonnées | 3,1    |

## Chapitre II : Modélisation mathématique des assemblages semi-rigides

Les tableaux ci-dessous montre et explique les cas des différentes types d'assemblages pour la pris en compte des coefficients de rigidité  $K_i$  pour chaque composante Tableau J.10 (Annexe J) :

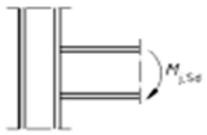
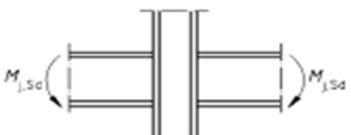
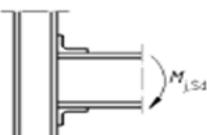
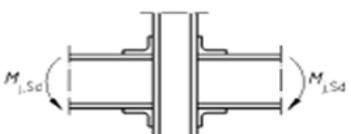
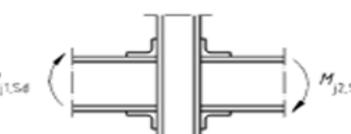
| Assemblage poutre-poteau comportant des attaches soudées  | Coefficients de rigidité $k_i$ à prendre en compte                  |
|---|---|
|  <p>Unilatéral</p>   | $k_1 : k_2 : k_3$   |
|  <p>Bilatéral — Moments égaux et opposés</p>   | $k_2 : k_3$   |
|  <p>Bilatéral — Moments inégaux</p>  | $k_1 : k_2 : k_3$   |
| Assemblage poutre-poteau comportant des attaches à cornières boulonnées   | Coefficients de rigidité $k_i$ à prendre en compte                  |
|  <p>Unilatéral</p>  | $k_1 : k_2 : k_3 : k_4 : k_6 : k_{10} : k_{11}^{*)} : k_{12}^{**)}$ |
|  <p>Bilatéral — Moments égaux et opposés</p>   | $k_2 : k_3 : k_4 : k_6 : k_{10} : k_{11}^{*)} : k_{12}^{**)}$       |
|  <p>Bilatéral — Moments inégaux</p>  | $k_1 : k_2 : k_3 : k_4 : k_6 : k_{10} : k_{11}^{*)} : k_{12}^{**)}$ |
| <p>*) Deux coefficients <math>k_{11}</math>, un pour chaque semelle ;<br/>                 **) Quatre coefficients <math>k_{12}</math>, un pour chaque semelle et un pour chaque cornière</p> |   |

Tableau (4) : Assemblage comportant des actions soudées ou des attaches a cornières de semelle boulonnés

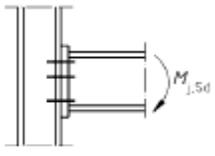
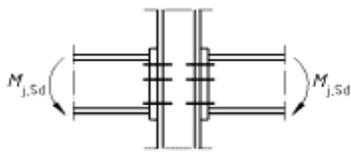
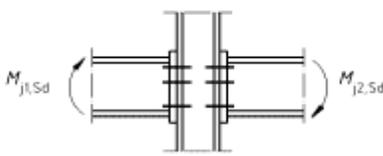
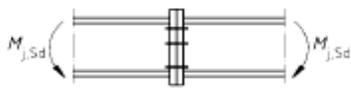
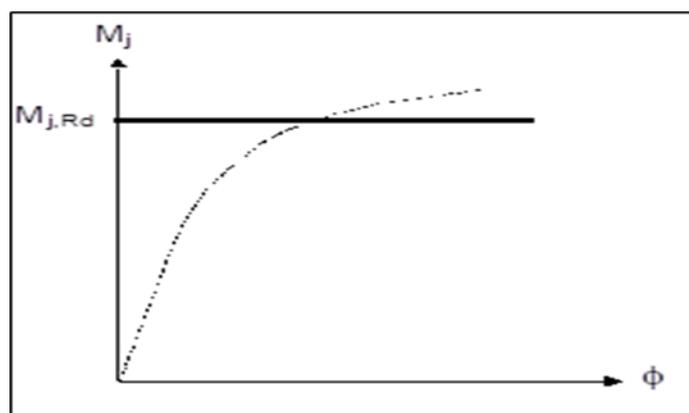
| Assemblage poutre-poteau comportant des attaches par platines d'about boulonnées  | Nombre de rangées de boulons tendus        | Coefficients de rigidité $k_i$ à prendre en compte                   |
|---|--|--|
|  <p>Unilatéral</p>                           | Une  | $k_1 ; k_2 ; k_3 ; k_4 ; k_5 ; k_{10}$                               |
|   | Deux ou plus                               | $k_1 ; k_2 ; k_{eq}$   |
|  <p>Bilatéral — Moments égaux et opposés</p> | Une  | $k_2 ; k_3 ; k_4 ; k_5 ; k_{10}$                                     |
|   | Deux ou plus                               | $k_2 ; k_{eq}$   |
|  <p>Bilatéral — Moments inégaux</p>          | Une  | $k_1 ; k_2 ; k_3 ; k_4 ; k_5 ; k_{10}$                               |
|   | Deux ou plus                               | $k_1 ; k_2 ; k_{eq}$   |
| <b>Assemblage de continuité de poutres avec platines d'about boulonnées</b>   | <b>Nombre de rangées de boulons tendus</b> | <b>Coefficients de rigidité <math>k_i</math> à prendre en compte</b> |
|    | Une  | $k_5$ [gauche] ; $k_5$ [droite] ; $k_{10}$                           |
|   | Deux ou plus                               | $k_{eq}$   |

Tableau (5) : Assemblage comportant des attaches par platine d'about boulonnées

♦ Moment résistant :

Dans ce modèle de calcul le moment résistant est pris égale a le moment maximum de la courbe moment-rotation comme indiqué dans la figure (20) :



Courbe moment-rotation

### **2-6 Conclusion :**

Dans ce chapitre, une très grande importance est donnée à plusieurs équations qui modélisent le comportement moment-rotation des assemblages semi-rigides. Ce chapitre présente aussi l'importance d'intégrer le comportement non linéaire des assemblages dans l'analyse des constructions en acier. Tandis que, l'analyse doit choisir un modèle d'assemblage approprié qui représente de façon claire le comportement réel des assemblages.

Dans les pratiques, le choix d'un modèle d'assemblage doit être guidé par sa précision, sa simplicité. Étant donné que tous les assemblages avec tous les détails possibles et les dimensions ont été testés et documentés, l'utilisation d'un modèle analytique simple est tout à fait justifiée. Ces modèles sont basés sur les paramètres d'assemblage qui peuvent être déterminés à partir de la configuration de l'assemblage et de leur détails, se prêterait donc pour des utilisations pratiques.

## Chapitre III

# **Etude numérique des assemblages non linéaires**

### 3-1 Introduction :

Les modèles mathématiques présentés dans le chapitre (2) utilisent très souvent des systèmes d'équations aux dérivées partielles non linéaires dont la solution analytique est inconnue et permettant la représentation des phénomènes physiques complexes. La résolution numérique de ces problèmes est devenue aujourd'hui incontournable pour présenter ces phénomènes. Pour résoudre des problèmes concrets issus des recherches dans les domaines de l'industrie on a souvent recours à la méthode des éléments finis pour passer d'un problème continu régit à un problème approché discret.

Ce chapitre a pour but de présenter les non linéarités considérées dans cette étude et la comparaison des assemblages suivants (assemblage par platine d'about avec raidisseurs poteau, assemblage par platine d'about sans raidisseurs poteau, assemblages par cornières sur semelles, assemblages par cornières sur âme) par la modélisation des portiques 2D et 3D sous différents chargements puis une modélisation d'une structure R+4 a usage d'habitation en utilisant le logiciel SAP2000 le modèle mathématique Frye et Morris (1976).

#### 3-1 Détermination de la rigidité initiale des quatre types d'assemblages :

Dans cette étude la rigidité sera déterminée par le modèle polynomial de Frye et Morris (1976) :

$$\theta = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

|    | Assemblage -<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau | Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles | Assemblage<br>Cornières sur<br>Ame |
|----|---|---|---|------------------------------------|
| K  | 0.00008386  | 0.0000476   | 0.0002745                               | 8.68E-04                           |
| C1 | 0.26  | 0.891   | 0.259                                   | 0.143                              |
| C2 | 536   | -1.20E+04   | 2280                                    | 67.9                               |
| C3 | 1.31E+07  | 1.75E+08  | 33100                                   | 409000                             |

Tableau (1) : Caractéristiques mathématiques des assemblages

#### -Assemblage par platine d'about ; poteau raidi :

$$d_g = 42 \text{ cm} \quad t_p = 2 \text{ cm}$$

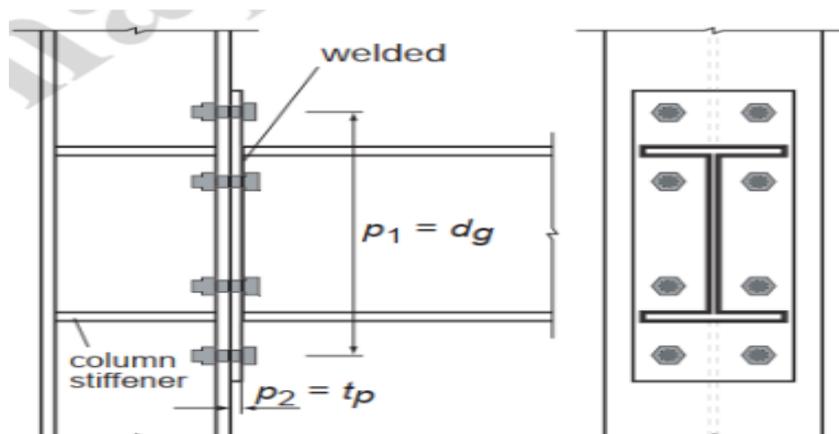


Figure (1) : Assemblage par platine d'about sur un poteau raidi

D'après le tableau (1) :

-Calcul de k : (constante de normalisation)

$$K = d_g^{-2.4} t_p^{-0.6}$$

$$K = 42^{-2.4} 2^{-0.6} = 8,386 \cdot 10^{-5}$$

-Constantes d'ajustement de la courbe Moment-rotation :

$$C_1 = 0.26 \quad C_2 = 536 \quad C_3 = 1,31 \cdot 10^7$$

$$\theta = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

$$\theta = 2,18 \cdot 10^{-5} M + 3,161 \cdot 10^{-10} M^3 + 5,433 \cdot 10^{-14} M^5$$

$$K_{j,ini} = \frac{1}{\left(\frac{\partial \theta}{\partial M}\right)_{(\theta=0 \text{ ou } M=0)}} = 45863 \text{ KN.m/Rad}$$

**-Assemblage par platine d'about poteau non raidi :**

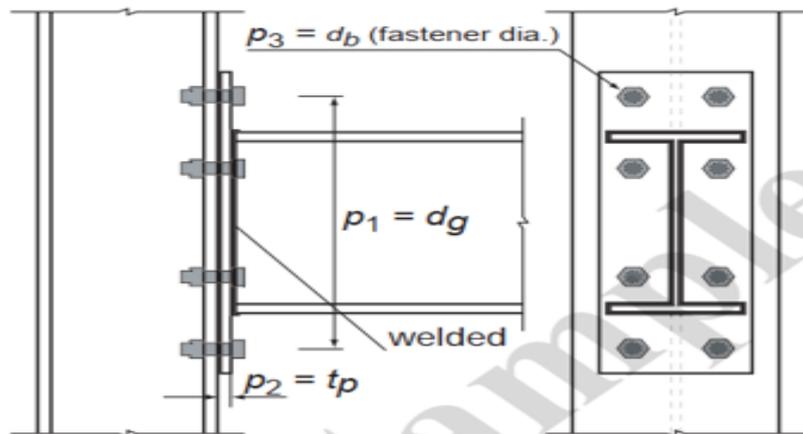


Figure (2) : Assemblage par platine d'about sur un poteau non raidi

-calcul de k :

$$d_g = 42 \text{ cm} \quad t_p = 2 \text{ cm} \quad d_b = 16 \text{ mm} = 1.6 \text{ cm}$$

$$k = d_g^{-2.4} t_p^{-0.4} d_b^{-1.5}$$

$$k = 42^{-2.4} 2^{-0.4} 1.6^{-1.5} = 4.76 \cdot 10^{-5}$$

-constante d'ajustement de la courbe moment-rotation :

$$C_1 = 0.891 \quad C_2 = -1.2 \cdot 10^4 \quad C_3 = 1.75 \cdot 10^8$$

$$\theta = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

$$\theta = 4,24 \cdot 10^{-5} M - 1,294 \cdot 10^{-9} M^3 + 4,276 \cdot 10^{-14} M^5$$

$$K_{j,ini} = \frac{1}{\left(\frac{\partial \theta}{\partial M}\right)_{(\theta=0 \text{ ou } M=0)}} = 23585 \text{ KN.m/Rad}$$

**-Assemblage avec double cornières sur âme :**

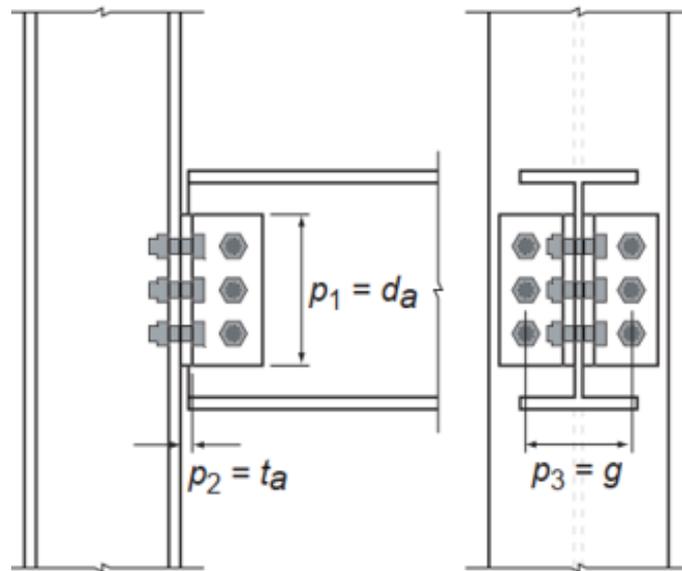


Figure (3) : Assemblage avec double cornière d'âme

-Calcul de k :

$$K = d_a^{-2.4} t_a^{-1.8} g^{0.15}$$

$$K = 22^{-2.4} 1^{-1.8} 11.71^{0.15} = 8.679 \cdot 10^{-4}$$

-constante d'ajustement de la courbe moment-rotation :

$$C_1 = 0.143 \quad C_2 = 67.9 \quad C_3 = 4.09 \cdot 10^5$$

$$\theta = C_1 (kM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

$$\theta = 1,241 \cdot 10^{-4} \cdot M + 4,439 \cdot 10^{-8} \cdot M^3 + 2,014 \cdot 10^{-10} \cdot M^5$$

$$K_{j,ini} = \frac{1}{\left(\frac{\partial \theta}{\partial M}\right)_{(\theta=0 \text{ ou } M=0)}} = 8058 \text{ KN.m/Rad}$$

**- Assemblage avec cornières sur semelles :**

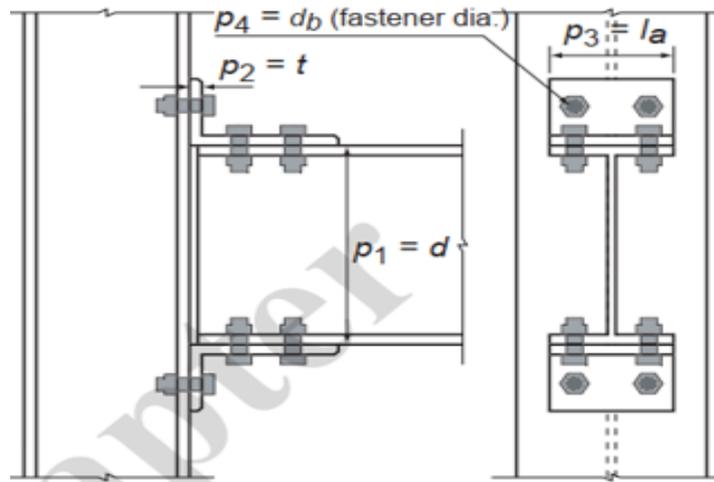


Figure (4) : Assemblage par cornière de semelles

-Calcul de k : (constante de normalisation) :

$$K = d^{-1.5} t^{-0.5} I_a^{-0.7} d_b^{-1.1}$$

$$K = 22^{-1.5} 10^{-0.5} 15^{-0.7} 1.6^{-1.1} = 2.745 \cdot 10^{-4}$$

-Constantes d'ajustement de la courbe Moment-rotation :

$$C_1 = 0.259 \quad C_2 = 2880 \quad C_3 = 3,31 \cdot 10^4$$

$$\theta = C_1 (KM) + C_2 (KM)^3 + C_3 (KM)^5$$

$$\theta = 7,11 \cdot 10^{-5} M + 5,96 \cdot 10^{-8} M^3 + 5,159 \cdot 10^{-14} M^5$$

$$K_{j,ini} = \frac{1}{\left(\frac{\partial \theta}{\partial M}\right)_{(\theta=0 \text{ ou } M=0)}} = 14065 \text{ KN.m/Rad}$$

### **3-2 Etude d'un portique 2D :**

Le portique 2D étudié a les dimensions suivantes : une hauteur de 5000 mm et une longueur de 6000 mm, Les profilés utilisés sont des HEA240 pour les poteaux et des IPE 300 pour la poutre.

Ce portique est étudié sous des différents chargements : charge horizontale  $P= 100 \text{ KN}$  et une charge uniformément répartie :  $Q= 20 \text{ KN/ml}$ .

La modélisation de ce portique est réalisée par les quatre types d'assemblage, les assemblages sont placés à notre structure l'un après l'autre sur une distance de  $L=50 \text{ mm}$

Les résultats obtenus sont le déplacement au niveau du nœud 4 dans 10 pas de chargement et ils sont montrés dans le tableau (4).

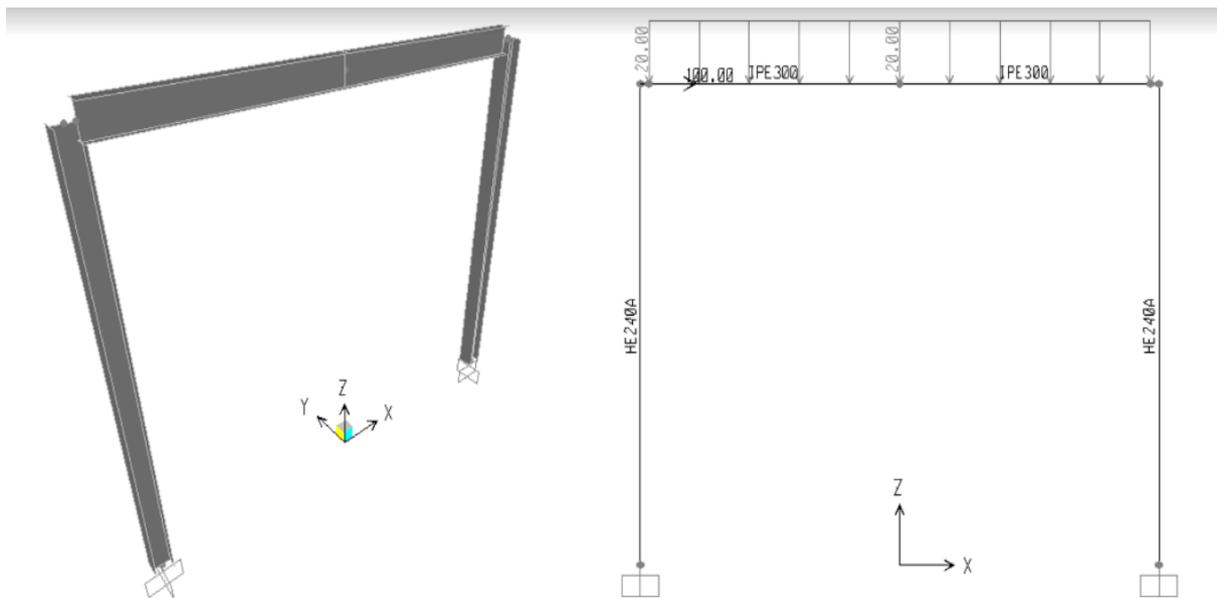


Figure (5) : représente le portique étudié avec les chargements appliqués (cas 1)

| Assemblage - Platine d'about avec raidisseurs poteau |                | Assemblage par platine d'about sans raidisseurs poteau |                | Assemblage Cornières sur Semelles |                | Assemblage Cornières sur Ame |                |
|--|----------------|--|----------------|-----------------------------------|----------------|------------------------------|----------------|
| M (kN.m)   | $\theta$ (rad) | M (kN.m)   | $\theta$ (rad) | M (kN.m)                          | $\theta$ (rad) | M (kN.m)                     | $\theta$ (rad) |
| 0  | 0              | 0  | 0              | 0                                 | 0              | 0                            | 0              |
| 40   | 8.98E-04       | 40   | 1.62E-03       | 20                                | 1.80E-03       | 8                            | 1.02E-03       |
| 80   | 2.08E-03       | 80   | 2.87E-03       | 40                                | 5.87E-03       | 16                           | 2.38E-03       |
| 120  | 4.51E-03       | 120  | 3.92E-03       | 60                                | 1.45E-02       | 24                           | 5.20E-03       |
| 160  | 1.05E-02       | 160  | 5.97E-03       | 80                                | 3.00E-02       | 32                           | 1.22E-02       |
| 200  | 2.43E-02       | 200  | 1.18E-02       | 100                               | 5.48E-02       | 40                           | 2.84E-02       |
| 240  | 5.29E-02       | 240  | 2.63E-02       | 120                               | 9.13E-02       | 48                           | 6.22E-02       |
| 280  | 1.07E-01       | 280  | 5.71E-02       | 140                               | 1.42E-01       | 56                           | 1.26E-01       |
| 320  | 2.00E-01       | 320  | 1.15E-01       | 160                               | 2.10E-01       | 64                           | 2.36E-01       |
| 360  | 3.51E-01       | 360  | 2.13E-01       | 180                               | 2.98E-01       | 72                           | 4.15E-01       |
| 400  | 5.85E-01       | 400  | 3.72E-01       | 200                               | 4.08E-01       | 80                           | 6.93E-01       |
| $K_{j, ini}$<br>(kN.m/rad)                           | 4.59E+04       | 2.36E+04   |                | 14065                             |                | 8056                         |                |

Tableau (2) : Caractéristiques de quelques types des assemblages semi-rigides.

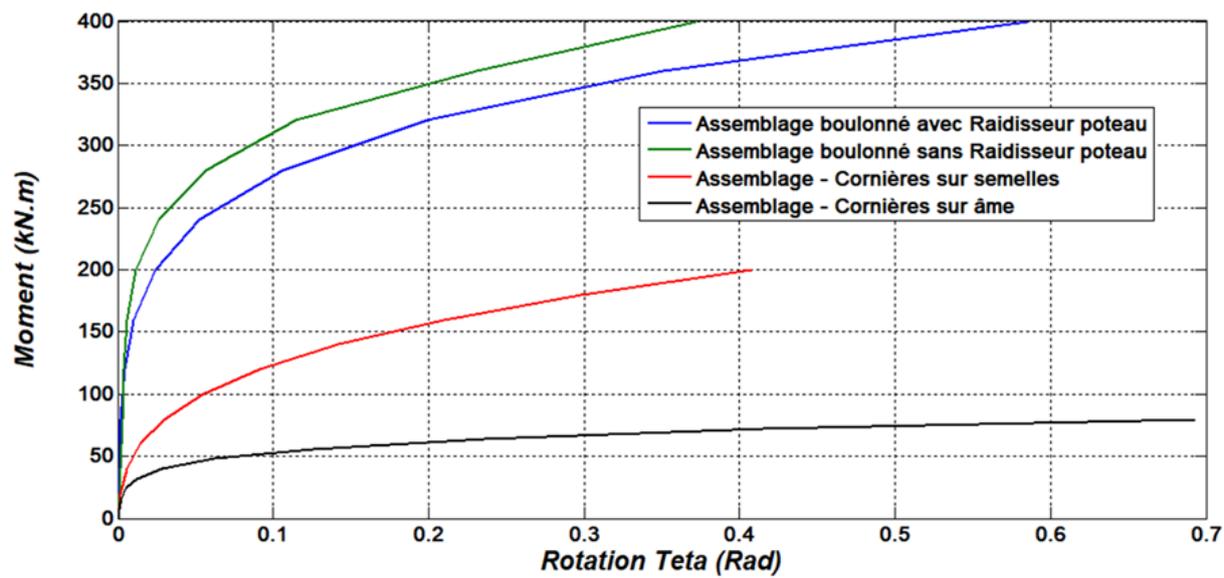


Figure (6) : Courbe moment-rotation des assemblages semi-rigides

-Déplacement du nœud 4

|    | Assemblage -<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau | Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles | Assemblage<br>Cornières sur<br>Ame |
|----|---|---|---|------------------------------------|
| 0  | 0   | 0   | 0                                       | 0                                  |
| 1  | 0.0233  | 0.0235  | 0.0295                                  | 0.0351                             |
| 2  | 0.0468  | 0.0465  | 0.0672                                  | 0.0816                             |
| 3  | 0.0750  | 0.0710  | 0.1095                                  | 0.1323                             |
| 4  | 0.1083  | 0.0998  | 0.1543                                  | 0.1838                             |
| 5  | 0.1451  | 0.1321  | 0.2011                                  | 0.2368                             |
| 6  | 0.1843  | 0.1681  | 0.2486                                  | 0.2897                             |
| 7  | 0.2269  | 0.2055  | 0.2975                                  | 0.3427                             |
| 8  | 0.2705  | 0.2460  | 0.3467                                  | 0.3965                             |
| 9  | 0.3158  | 0.2887  | 0.3962                                  | 0.4503                             |
| 10 | 0.3623  | 0.3327  | 0.4468                                  | 0.5041                             |

Tableau (4) : Les valeurs de déplacement du nœud 4

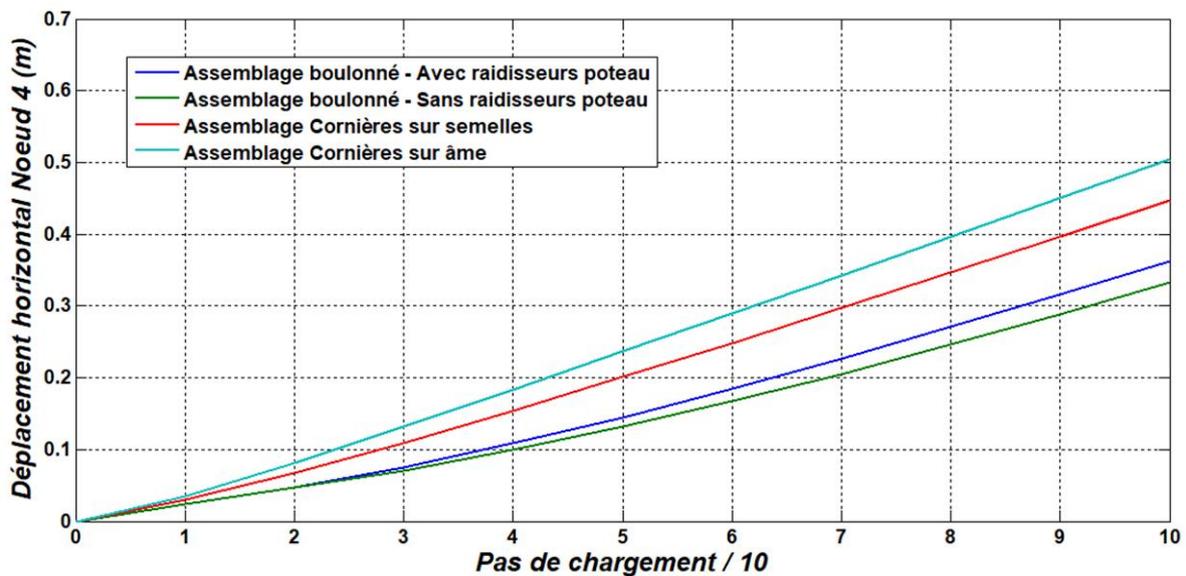


Figure (7) : courbe représentative de déplacement en fonction de pas de chargement

Le portique étudié a les dimensions suivantes : une hauteur de 5000 mm et une longueur de 6000 mm, Les profilés utilisés sont des HEA240 pour les poteaux et des IPE 300 pour la poutre.

Ce portique est étudié sous des différents chargements : charge horizontale  $P= 400$  KN et une charge uniformément répartie :  $Q= 100$  KN/ml.

La modélisation de ce portique est réalisée par les quatre types d'assemblage, les assemblages sont placés à notre structure l'un après l'autre sur une distance de  $L=50$  mm

Les résultats obtenus sont de moment 3-3 au niveau de la barre 7 dans 10 pas de chargement et ils sont montrés dans le tableau (5).

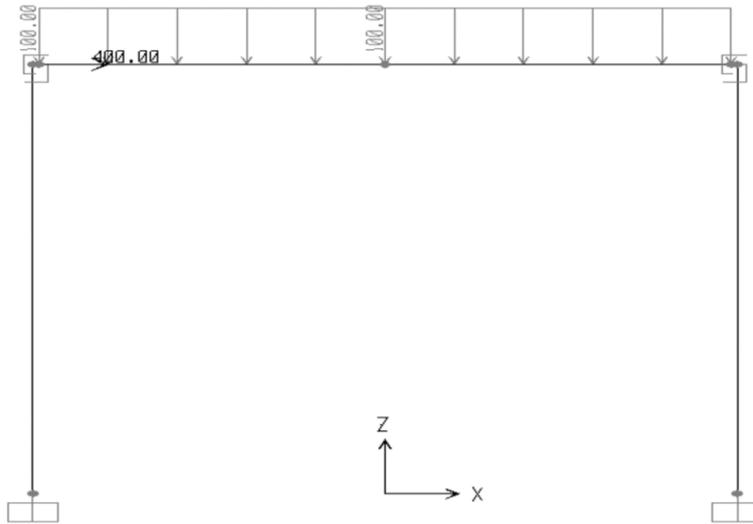


Figure (8) : représente le portique étudié avec le chargement appliqué (cas2 )

|    | Assemblage -<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau | Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles | Assemblage<br>Cornières sur<br>Ame |
|----|---|---|---|------------------------------------|
| 0  | 0   | 0   | 0                                       | 0                                  |
| 1  | 32.49   | 34.83   | 39.02                                   | 41.62                              |
| 2  | 68.13   | 69.1  | 82.5                                    | 86.8                               |
| 3  | 106.87  | 105.75  | 125.15                                  | 131.15                             |
| 4  | 151.42  | 147.7   | 169.39                                  | 175.06                             |
| 5  | 196.96  | 195.18  | 213.6                                   | 218.34                             |
| 6  | 242.23  | 245.85  | 257.46                                  | 261.62                             |
| 7  | 286.62  | 295.67  | 301.1                                   | 305.73                             |
| 8  | 332.12  | 345.12  | 345.01                                  | 350.01                             |
| 9  | 374.78  | 392.93  | 388.4                                   | 394.18                             |
| 10 | 417.39  | 438.5   | 432.93                                  | 438.34                             |

Tableau (5)

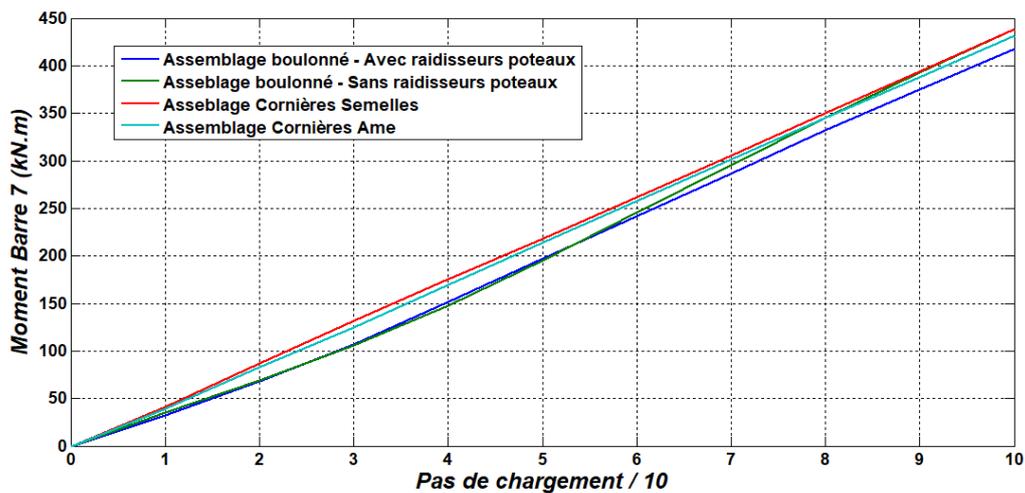


Figure (9) : Courbe du moment en fonction du pas de chargement

### **Interprétation des résultats :**

- La figure (1) représente la courbe moment-rotation des assemblages semi-rigide telle que on remarque que la courbe qui représente le cas des assemblages boulonnées avec raidisseur poteau prend la forme idéale avec une valeur maximum de la rigidité initiale comme indiqué dans le tableau (2), par contre les autres types qui représente les assemblages semi-rigides prend des cas différents et des valeurs de rigidité inférieures à celles des assemblages rigides et On peut observer aussi que la rotation de l'assemblage augmente en fonction du moment résistant qui varie aussi à son tour avec la variation de l'effort appliqué à l'intersection des axes poteau poutre. On remarque que la plastification de l'assemblage non raidi survient plus tôt que le non raidi.
- La figure (2) représente les courbes de déplacement de chaque type d'assemblage en fonction de pas du chargement telle que on remarque que le déplacement au niveau des assemblages semi-rigides est supérieur à celles des assemblages rigides.
- La figure (3) représente les courbes de moment de chaque type d'assemblage en fonction de pas de chargement telle que on remarque que le moment au niveau des assemblages semi-rigide est supérieur à celle de l'assemblage rigide.

### **3-3 Etude de la structure 3D :**

Le projet étudié concerne un bâtiment d'habitation. L'ouvrage est conçu d'un rez-de-chaussée surmonté par quatre étages et il se présente sous la forme suivante :

- Longueur : 22.05 m
- Largeur : 6.3 m
- Hauteur : 14.4 m

Le bâtiment contient 7 portiques et 4 étages (dernier étage : terrasse inaccessible), les profilés utilisés sont les HEA 200 pour les poteaux et IPE 140 pour les poutres. La stabilité de la couverture est assurée par un système de contreventement de type UPN 220 et UPN 100

Les charges appliquées sont expliquées comme suit :

#### **1- Descente de Charges :**

- Plancher Étage Courant :

|                                     |           |                      |
|-------------------------------------|-----------|----------------------|
| Dalle de sol (2cm)                  | 0.02*2200 | 44 kg/m <sup>2</sup> |
| Sable de pose (2cm)                 | 0.02*1800 | 36                   |
| Dalle pleine en béton armé (10cm)   | 0.10*2500 | 250                  |
| Coffrage perdu en Tôle TN40 (10/10) |           | 5                    |

---

|                                       |                         |
|---------------------------------------|-------------------------|
|                                       | G=335 kg/m <sup>2</sup> |
| Surcharge d'Exploitation (Habitation) | Q=150 kg/m <sup>2</sup> |
| Surcharge d'Exploitation (Balcon)     | Q=350 kg/m <sup>2</sup> |

- Plancher Terrasse Inaccessible :

|                                     |           |                      |
|-------------------------------------|-----------|----------------------|
| Gravillon Protection (5cm)          | 0.05*1500 | 75 kg/m <sup>2</sup> |
| Étanchéité multicouche (2cm)        | 0.02*1200 | 24                   |
| Forme de pente (10cm)               | 0.10*2200 | 220                  |
| Dalle pleine en béton armé (6cm)    | 0.10*2500 | 250                  |
| Coffrage perdu en Tôle TN40 (10/10) |           | 5                    |

---

G=574 kg/m<sup>2</sup>

Surcharge d'Exploitation Q=100 kg/m<sup>2</sup>

- Maçonnerie :

|                                |           |                       |
|--------------------------------|-----------|-----------------------|
| Brique creuse (15cm)           | 0.15*1400 | 210 kg/m <sup>2</sup> |
| Brique creuse (10cm)           | 0.10*1400 | 140                   |
| Enduit mortier de ciment (2cm) | 0.02*2000 | 40                    |
| Enduit de plâtre (2cm)         | 0.02*1200 | 24                    |

---

G=414 kg/m<sup>2</sup>

Poids propre du mur :  $p=(70\%)*414*1.0*(3.10-0.25)=825 \text{ kg/ml}$

## 2- Paramètres du Calcul Dynamique :

- Zone Tlemcen → zone I  
Portique en béton armé avec remplissage rigide : Groupe 2 / Zone I → A=0.12
- Catégorie de sol « S<sub>3</sub> » → T<sub>1</sub>=0.15s & T<sub>2</sub>=0.50s
- Portique métallique avec remplissage rigide : Amortissement  $\xi=5\%$
- Facteur de qualité : Q=1.20 : le plus pénalisant pour notre structure.
- Coefficient de comportement : R=4.00
- Coefficient C<sub>T</sub>=0.085

Masse du plancher niv+5.080, +8.480 & +11.880m :

|                    |                 |                    |
|--------------------|-----------------|--------------------|
| Charge permanente  | 0.335*243.00    | 81.41 <sup>T</sup> |
| Surcharge Plancher | 0.2*0.15*238.00 | 7.14               |
| Surcharge Balcon   | 0.2*0.35*6.00   | 0.42               |
| Maçonnerie         | 0.80*65.70      | 52.56              |
| Poteaux            | 24*3.40*0.0603  | 4.92               |
| Poutres            | 8*10.80*0.0361  | 3.12               |
| Chaînages          | 3*22.05*0.0129  | 0.85               |
| Poutrelles         | 6*22.05*0.0081  | 1.07               |
| Contreventement    | 310.4*0.0294    | 9.13               |

---

M<sub>1</sub>=160.62<sup>T</sup>

Masse du plancher Terrasse niv+15.280m :

|                    |                 |                     |
|--------------------|-----------------|---------------------|
| Charge permanente  | 0.574*243.00    | 139.48 <sup>T</sup> |
| Surcharge Plancher | 0.2*0.10*243.00 | 4.86                |
| Maçonnerie         | 0.50*0.80*65.70 | 26.28               |
| Acrotère           | 0.20*65.70      | 13.14               |

|                 |                   |                |
|-----------------|-------------------|----------------|
| Poteaux         | 24*1.70*0.0603    | 2.46           |
| Poutres         | 8*10.80*0.0361    | 3.12           |
| Chaînages       | 3*22.05*0.0129    | 0.85           |
| Poutrelles      | 6*22.05*0.0081    | 1.07           |
| Contreventement | 0.50*310.4*0.0294 | 4.56           |
|                 |                   | $M_2=195.82^T$ |

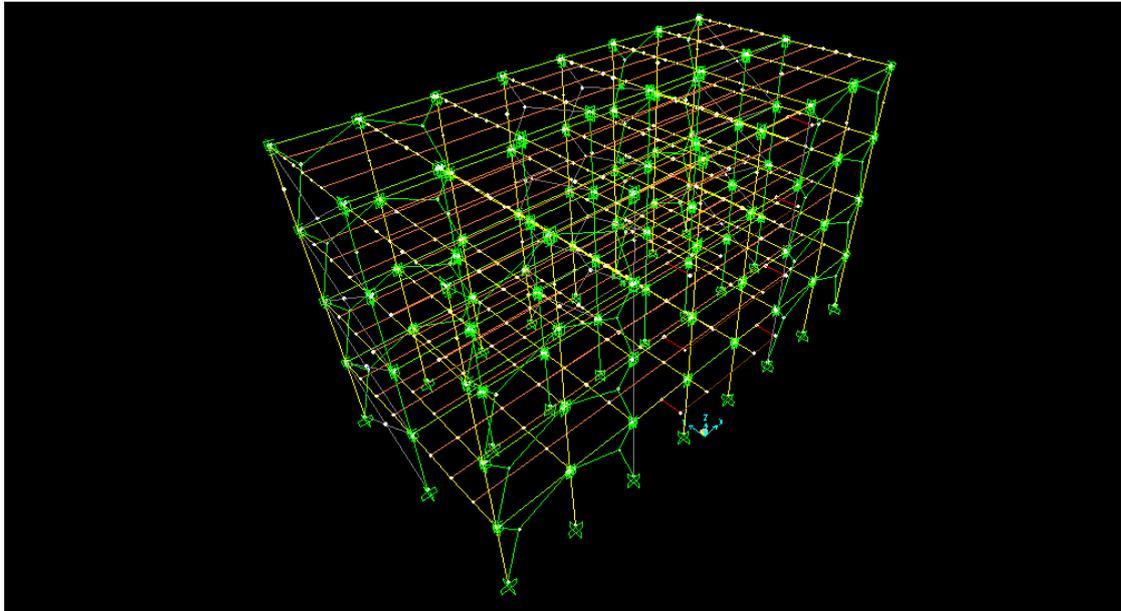


Figure (10) : la modélisation de la structure dans le logiciel SAP2000

**ELU :**

**1/Efforts normaux :**

| Type d'assemblage   | Poteau RDC centrale86 | Poteau dernier étage |
|---|-----------------------|----------------------|
| Assemblage -<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau   | N=-50.962 KN          | N=-3.781KN           |
| Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | N=-50.781 KN          | N=-3.894 KN          |
| Assemblage<br>Cornières sur Ame                                 | N=-50.213 KN          | N=-4.195 KN          |
| Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles                         | N=-50.412 KN          | N=-4.093 KN          |

Tableau (6) : Les valeurs des efforts normaux dans le poteau de RDC et du Dernière niveau

## 2/ Les efforts tranchants :

| Type d'assemblage   | Poteau RDC centrale86 | Poteau dernier étage |
|---|-----------------------|----------------------|
| Assemblage –<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau   | $V_{2,2}=0.18$ KN     | $V_{2,2}=1.34$ KN    |
| Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | $V_{2,2}=0.199$ KN    | $V_{2,2}=1.308$ KN   |
| Assemblage<br>Cornières sur Ame                                 | $V_{2,2}=0.57$ KN     | $V_{2,2}=1.135$ KN   |
| Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles                         | $V_{2,2}=0.237$ KN    | $V_{2,2}=1.208$ KN   |

Tableau (7) : Les valeurs des efforts tranchants dans le poteau de RDC et du Dernière niveau

## 3/ Les moments 3-3 :

| Type d'assemblage   | Poteau RDC centrale | Poteau dernier étage |
|---|---------------------|----------------------|
| Assemblage –<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau   | $M_{3,3}=0.1521$ KN | $M_{3,3}=0.1665$ KN  |
| Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | $M_{3,3}=0.1822$ KN | $M_{3,3}=0.1787$ KN  |
| Assemblage<br>Cornières sur Ame                                 | $M_{3,3}=0.2752$ KN | $M_{3,3}=0.202$ KN   |
| Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles                         | $M_{3,3}=0.2428$ KN | $M_{3,3}=0.1952$ KN  |

Tableau (8) : Les valeurs de moment 3-3 dans le poteau de RDC et du Dernière niveau

|                                  |               | Assemblage –<br>Platine d'about<br>avec raidisseurs<br>poteau | Assemblage par<br>platine d'about<br>sans raidisseurs<br>poteau | Assemblage<br>Cornières sur<br>Ame | Assemblage<br>Cornières sur<br>Semelles |
|----------------------------------|---------------|---|---|------------------------------------|---|
| Poutre principale<br>2eme niveau | $M_T$ (KN.ml) | 0.31  | 0.313   | 0.316                              | 0.3109                                  |
|                                  | $M_A$ (KN.ml) | 0.6205  | 0.6207  | 0.6221                             | 0.6215                                  |

Tableau (9) : le moment en travée et en appui de la poutre N 1386

**G+Q+E<sub>x</sub> :**

| Type d'assemblage        | Platine d'about raidi | Platine d'about non raidi | Cornière d'âme | Cornière des semelles |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-----------------------|
| $\Delta_x$ (Nœud 88) (m) | $1,44.10^{-2}$        | $1,44.10^{-2}$            | $1,45.10^{-2}$ | $1,45.10^{-2}$        |

Tableau (10) : Les valeurs des déplacements de nœud 88 dans la combinaison sismique /x

**G+Q+E<sub>y</sub> :**

| Type d'assemblage        | Platine d'about raidi | Platine d'about non raidi | Cornière d'âme | Cornière des semelles |
|--------------------------|-----------------------|---------------------------|----------------|-----------------------|
| $\Delta_y$ (Nœud 88) (m) | $1,69.10^{-2}$        | $1,69.10^{-2}$            | $1,82.10^{-2}$ | $1,78.10^{-2}$        |

Tableau (11) : Les valeurs des déplacements de nœud 88 dans la combinaison sismique /y

### **Interprétation des résultats :**

Fondamentalement, un assemblage poutre-poteau peut être identifié par la compréhension des caractéristiques comportementales de l'assemblage. Idéalement, ces caractéristiques comportementales peuvent être représentées par une relation entre le moment et la rotation de l'élément connecté. Cette relation est utile et importante et elle peut être illustrée par une courbe. dans l'analyse globale des structures poutres-poteaux en acier, l'assemblage boulonné par platine d'extrémité non-raidi, dimensionné pour ne transmettre aucun moment de flexion, qui n'empêche aucune rotation (rotation élevée) des sections assemblées ; l'assemblage boulonné par platine d'extrémité avec raidisseurs, dimensionné pour transmettre l'ensemble des sollicitations, qui interdit toute rotation relative (rotation nulle) entre les sections assemblées.

L'analyse numérique par la méthode des éléments finis permet d'obtenir des informations détaillées et variées et l'analyse de notre structure montre les résultats suivants dans les tableaux ci-dessus :

- Les efforts normaux du poteau au niveau de RDC reste presque constantes pour les quatre types d'assemblages et augment au niveau du dernière étage.
- Le moment au niveau de RDC et dernière étage est maximum pour les assemblages semi-rigides.
- L'effort tranchant pour les deux cas de poteau augmente juste pour les assemblages semi-rigides.
- Le moment au niveau de travée augmente pour les assemblages semi-rigides et diminue au niveau des appuis ce qui implique une grande modification dans le dimensionnement des structures
- Pour les déplacements maximums, on remarque une augmentation pour les structures à assemblage semi-rigide d'une façon mono tom par rapport à celles à assemblage rigide. On remarque aussi que le déplacement de la structure dans les combinaisons sismiques dans les assemblages semi-rigide est supérieur à celle des assemblages rigides comme indiqué dans les tableaux (10) et (11).

## Conclusion générale

---

Le but principal de ce mémoire est l'étude de l'effet des assemblages semi rigides sur le comportement des structures métalliques, boulonnés et à l'aide de cornières comme configuration. Cela étant fait sous l'effet d'un spectre de réponse et de différents modèles de rigidités afin de déterminer les caractéristiques principales de ces assemblages ( $M_{j,Rd}$ ,  $S_{j,ini}$ ). Cela a pour finalité de mettre en évidence les différents paramètres ayant une influence sur le comportement global des structures. Pour cela, deux démarches ont été utilisées. La première a été consacrée pour la recherche théorique, une importance a été donnée à plusieurs équations de prévision qui modélisent le comportement moment-rotation des assemblages semi-rigides. La recherche a été basée sur des modèles d'assemblage qui représentent de façon adéquate le comportement réel des assemblages par la présentation des différentes caractéristiques. Ces modèles ont été basés sur les paramètres qui peuvent être déterminés facilement à partir de la configuration d'assemblage et de leur détail. A ce sujet, le modèle polynôme de Frye-Morris, le modèle de puissance de Kishi-Chen, le modèle proposé par l'Eurocode 3 ont été présentés.

Une démarche de validation par laquelle une étude comparative entre les différents assemblages a été effectué, deux portiques ont été étudiés, ces portiques composés de quatre types d'assemblages, présentent une géométrie régulière en plan et en élévation. Ainsi les principaux résultats ont permis de faire un certain nombre de remarques. Les assemblages semi-rigides ont une très grande influence sur la modélisation des portiques. Pour les structures 4 étages les assemblages semi-rigides présentent un déplacement latéral supérieur par rapport à ceux résultant dans les structures avec assemblage rigides, le rapport est entre 3% et 20%. Le modèle proposé par l'Eurocode 3 décrit de façon satisfaisante le comportement global moment- rotation par rapport aux autres modèles. Les objectifs tracés lors de cette recherche en termes d'études comparatives des modèles ont été atteints et surtout l'avantage que présente l'effet de la semi rigidité dans le dimensionnement des structures.

Enfin, d'un point de vue personnel, le travail qui a été entrepris a été l'occasion pour améliorer et approfondir les connaissances dans le domaine des structures métalliques et en particulier les assemblages leur modélisations et leur caractéristique.

Par ailleurs les résultats obtenus dans ce travail doivent être confrontés avec les valeurs obtenues par d'autres approches expérimentales, ou d'éléments finis, ce qui fera l'objet éventuellement d'un travail plus approfondi rentrant dans le cadre d'une thèse de doctorat.

Finalement, on peut dire que le dimensionnement des structure qui contient des assemblages semi-rigide est complètement différent car les efforts de sollicitation de cette dernière change .

### Références bibliographiques

- [1] J.W. B Stark et al. « Calcul d'ossature et assemblages : Considération économique » -CECM- (1993)
- [2] Anikó Csébfalvi « Optimal design of frame structures with semi-rigid joints » - Civil Engineering (2007)
- [3] L. M. C. Sinoes « OPTIMIZATION OF FRAMES WITH SEMI-RIGID CONNECTIONS » - Departamento de Engenharia Civil, Faculdade de Ciências e Tecnologia Universidade de Coimbra, 3049 Coimbra Codex, Portugal- (29 April 1995)
- [4] J. P JASPERT et V de VILLE de GOYET « étude expérimentale et numérique du comportement des structures composés de poutres à assemblage semi-rigide » -Construction Métallique n°2 – (1988)
- [5]NF EN 1993-1-8 « Eurocode 3 -Calcul des structures en acier-Partie 1-8 : calcul des assemblages » -P22-318-1 -AFNOR- Décembre 2005-
- [6] A. U Ozturk et Y. Yesilce « THE STATICAL ANALYSIS OF SEMI-RIGID FRAMES BY DIFFERENT CONNECTION TYPES » - Institut des sciences et technologies DPU- (juillet 2005).
- [7] Leonardo Pinheiroa and Ricardo A. M. Silveira « Computational procedures for nonlinear analysis of frames with semi-rigid connections » - Latin American Journal of Solids and Structures- (2 (2005) 339–367).
- [8] M.N. NaderA.Astaneh « Dynamic behavior of flexible, semi-rigid and rigid steel frames » - Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, California 94720, USA- (1990)
- [9] JASPERT JP « Contributions to recent advances in the field of steel joints. Column bases and further configurations for beam to column joints and beam splices ».-Université de liège- (1997)
- [10] JASPERT et Demonceau JF « European design recommendations for simple joints in steel structure » - Journal of constructional steel research, (2008)
- [11] Saidani M. « the effect of eccentricity connection on the distribution of axial force and bending moment » - Journal of constructional steel research- (1998)
- [12] lhaddoudène ANT « Analyse non-linéaire des structures métalliques a assemblage semi-rigides » (1995)
- [13] Mimoune Mostefa et Mimoune FZ « construction métallique règles de calculs de vérifications » (2011)
- [14] Jean-pierre muzeau « La construction métallique avec les Eurocodes » - APK afnor editions- (2014)
- [15] CSTB « Assemblages poteau-poutre et poutre-poutre » -guide Eurocode- (2005)
- [16] Crisinel, Michel « Dimensionnement des assemblages mixtes semi-rigides » - Ingénieurs et architectes suisses- (1997)
- [17] Leonardo Pinheiroa et Ricardo A. M. Silveira «Computational procedures for nonlinear analysis of frames with semi-rigid connections » - Latin American Journal of Solids and Structures- (2005)
- [18] Eurocodes pour les Structures en Acier Élaboration d'une Approche Transnationale -assemblages structuraux –
- [19] SAADI Mohamed « Comportement des structures métalliques avec assemblage semi-rigide en zone sismique » -Mémoire de Magister en Génie Civil-
- [20] MADJOUR Abdelhalim« MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU COMPORTEMENT DES ASSEMBLAGES POTEAU-POUTRE DESOSSATURES MÉTALLIQUES» -THÈSE DE DOCTORAT- (2019)