

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR**

**ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**

**UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA - BEJAIA**

**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Préparer Par :

**Mr. Sadek SADOUN**

**Mr. Massinissa IRZANE**

## **Thème**

---

**Simulation numérique par l'approche contacte du comportement élastoplastique de l'assemblage par platine d'extrémité débordant et par boulons précontraints de deux profilés métalliques**

---

Soutenu le 06 Juillet 2023 devant le jury composé de:

|                         |            |
|-------------------------|------------|
| Mr. Abdelatif BELAMRI   | Président  |
| Mr. Abdelhamide BECHEUR | Rapporteur |
| Mr. Madjide HADJOU      | Examineur  |

**Année Universitaire 2022-2023**

# Remerciements

*Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre profonde gratitude à Dieu le tout-puissant, qui nous a accordé l'aide, la force, la volonté et la patience nécessaires pour mener à bien ce modeste travail.*

*Nous tenons également à exprimer notre sincère reconnaissance envers notre promoteur, Monsieur BECHEUR Abdelhamid, pour sa patience, sa modestie et le temps précieux qu'il nous a accordé. Sa qualité d'encadrement, ses encouragements, ainsi que ses précieux conseils et remarques ont grandement contribué à la réussite de ce projet.*

*Nous souhaitons également remercier chaleureusement les membres du jury pour avoir consacré leur temps à la lecture et à l'évaluation de ce mémoire, ainsi que pour leur appréciation du travail accompli.*

*Une pensée particulière est adressée à nos collègues et amis de l'université A. Mira-Bejaia. Les moments passés ensemble ont été extrêmement agréables et nous sommes reconnaissants de leur soutien et de leur compagnie tout au long de ce parcours.*

*Enfin, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance envers toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à l'accomplissement de ce travail par leurs encouragements et leurs conseils. Votre soutien a été inestimable et nous vous en sommes infiniment reconnaissants.*

# Dédicaces

*Je dédie ce travail à toutes les personnes qui ont contribué à ma réussite et à mon épanouissement :*

*À ma mère, ma source d'inspiration et de soutien inébranlable. C'est grâce à toi que j'ai trouvé la force et le courage d'aller de l'avant.*

*À mon père, celui qui m'a offert tant d'amour et d'opportunités. Tu m'as propulsé vers de nouveaux horizons et tu as cru en moi lorsque j'en avais le plus besoin.*

*À mon frère et sœurs, mes compagnons de vie, qui ont partagé mes joies et mes peines. Votre présence a été un véritable pilier dans ma vie.*

*À mes amis précieux : Karim, Cylia, Aymen, Amir, Fahima, Kenza, Lamine, Mathio, et Elliot. Vous avez illuminé mon parcours avec votre amitié sincère et votre soutien indéfectible.*

*À mes collègues du Club Génie Mécanique Ainsi le forum des étudiants entrepreneur de Bejaia, avec qui j'ai partagé des moments de travail acharné et d'entraide. Votre collaboration a été inestimable et a enrichi mon expérience universitaire.*

*À tous les étudiants, enseignants et membres du personnel de notre université.*

*Et surtout, je n'oublie pas toutes les personnes qui m'aiment du fond du cœur. Votre amour inconditionnel m'a donné la confiance nécessaire pour relever les défis et poursuivre mes rêves.*

*Enfin, cette dédicace s'adresse à tous ceux qui s'investissent pour que la science soit lumière. Votre engagement à promouvoir le savoir et à repousser les limites de la connaissance est une inspiration pour moi.*

*Merci du fond du cœur à chacun d'entre vous. Votre soutien et votre présence ont été les fondations de mon parcours et de la réalisation de ce travail.*

**Sadek SADOUN**

## ***Dédicaces***

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents, pour leur patience sans limite et leur sacrifice de tous les instants.*

*Mes frères.*

*Mes sœurs.*

*Merci, Monsieur BOUCHER Abdelhamid, pour votre confiance en moi, pour votre infinie patience et pour être un excellent encadrant. Je serai éternellement reconnaissant de l'impact positif que vous avez eu sur ma vie.*

*À mes précieux amis : Nassim, Kamel, Ali, Lakhdar, Fares, Mounir, Karim, nadjat, Lina, Linda. Vous avez illuminé mon parcours avec votre amitié sincère et votre soutien indéfectible.*

*Je dédie humblement ce travail à*

*Je souhaite également exprimer ma gratitude à tous mes amis, collègues de promotion en master.*

*Enfin, un grand merci à tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.*

***Massinissa IRZANE***

# Sommaire

## Table des matières

|                           |     |
|---------------------------|-----|
| Remerciements.....        | i   |
| Dédicaces.....            | ii  |
| Table des matières.....   | iii |
| Listes des figures.....   | iv  |
| Liste des tableaux .....  | v   |
| Abréviation .....         | vi  |
| Introduction générale ... | vii |

### Chapitre I

#### Les assemblages dans les structures métalliques

|   |    |
|---|----|
| I.1 – Introduction.....   | 1  |
| I.2 – Moyens d’assemblage .....                                   | 2  |
| I.2.1 – Assemblage par soudure .....                              | 2  |
| I.2.1.1 – Procédés de soudage.....                                | 2  |
| I.2.1.2 – Les avantages et les inconvénients .....                | 3  |
| I.2.1.3 – Types de soudures.....                                  | 3  |
| I.2.2 – Assemblage boulonnés.....                                 | 4  |
| I.2.2.1 – Caractéristique géométriques des boulons.....           | 4  |
| I.2.2.2 – Caractéristiques mécanique des boulons.....             | 5  |
| I.2.3 – Transmission des efforts – Analyse du besoin.....         | 6  |
| I.2.3.1 – Cas de liaison bout à bout .....                        | 6  |
| i – Transmission des efforts par un moment fléchissant .....      | 6  |
| ii – Transmission des efforts par glissement .....                | 7  |
| iii – Transmission des efforts par traction.....                  | 7  |
| I.2.3.2 – Cas de liaison d’une poutre IPE sur un poteau HEB ..... | 7  |
| I.2.4 – Transmission des efforts pas cisaillement .....           | 8  |
| I.2.4.1 – La butée : Boulons ordinaires.....                      | 9  |
| I.2.4.2 – Le frottement : Boulons haute résistance .....          | 9  |
| i – Paramètres liés aux boulons précontraints .....               | 10 |

|  |    |
|--|----|
| ii– Etat de surface des pièces en contact .....  | 11 |
| iii– Les traitements nécessaires pour les différentes classes selon l’Eurocode 3 ..... | 11 |
| iv– Résistance des boulons HR .....  | 12 |
| v– Mise en fonctionnement .....  | 12 |
| vi– Dispositions constructives .....   | 13 |
| I.3 – Configurations d'assemblages poutre-poteau .....                                 | 13 |
| I.3.1 – Assemblage par platine d'about .....   | 13 |
| I.4 – Classification générale des assemblages .....                                    | 14 |
| I.4.1 – Classification des assemblages selon l'EC3 .....                               | 14 |
| I.4.2 – Classification par rigidité .....  | 15 |
| I.4.3 – Classification par résistance.....   | 16 |
| I.4.4 – Classification par capacité de rotation .....                                  | 16 |
| I.5 – conclusion .....   | 17 |

## **Chapitre II**

### Les problèmes de contact dans les structures métalliques

|  |    |
|--|----|
| II.1 – Introduction.....   | 20 |
| II.1.1 – L’aire de contact .....                                     | 20 |
| II.1.2 – Les pressions de contact .....                              | 20 |
| II.1.3 – Les types de contacts.....                                  | 21 |
| II.1.4 – Condition de non pénétration .....                          | 21 |
| II.2 – Les frottements .....   | 22 |
| II.2.1 – Les lois de frottement existantes dans la littérature ..... | 22 |
| II.2.1.1 – La loi de Tresca .....                                    | 23 |
| II.2.1.2 – La loi de frottement de Coulomb.....                      | 23 |
| II.2.1.3 – La loi de Coulomb régularisée .....                       | 25 |
| II.2.1.4 – Autres lois de frottement .....                           | 25 |
| II.2.1.5 – La Loi de Coulomb en quasi statique .....                 | 26 |
| II.3 – Formulation mathématique du problème de contact .....         | 26 |
| II.3.1 – Cas du contact unilatéral sans frottements.....             | 28 |
| II.3.2 – Cas du contact unilatéral avec frottements.....             | 28 |

|  |    |
|--|----|
| II.4 – Le cas particulier du problème de signorini ..... | 29 |
| II.5 – Conclusion .....                                  | 30 |

### **Chapitre III**

#### Caractérisation des assemblages boulonnés par platine d'extrémité

|  |    |
|--|----|
| III.1 – Introduction.....                                  | 32 |
| III.2 – Présentation de la méthode des composantes.....    | 32 |
| III.2.1 – Identification des composantes.....              | 32 |
| III.2.2 – Caractérisation des composantes.....             | 35 |
| III.2.2.1 – Calcul de la rigidité initiale .....           | 35 |
| III.2.2.2 – Calcul de la résistance .....                  | 37 |
| III.2.2.3 – Détermination de la capacité de rotation ..... | 38 |
| III.2.3 – Assemblage des composantes.....                  | 39 |
| III.3 – Tronçon en té .....                                | 39 |
| III.3.1 – Fonctionnement du tronçon en té .....            | 40 |
| III.3.2 – Modèle théorique du tronçon en té.....           | 40 |
| III.3.3 – Résistance du tronçon en té.....                 | 41 |
| III.3.4 – Rigidité du tronçon en té.....                   | 42 |
| III.3.4 – Longueur efficace du tronçon en té .....         | 42 |
| III.4 – Conclusion .....                                   | 66 |

### **Chapitre IV**

#### Résolution du problème de contact par la méthode des éléments fini

|   |    |
|---|----|
| IV.1 – Introduction.....  | 65 |
| IV.2 – Avantages et inconvénient de la méthode des éléments finis ..... | 65 |
| IV.2.1 – Les Avantages .....  | 65 |
| IV.2.2 – Les inconvénients .....  | 65 |
| IV.3 – mise en œuvre de la méthode EF.....                              | 65 |
| IV.3.1 – Choix du type d'élément finis.....                             | 65 |
| IV.3.2 – Qualité d'un élément finis .....                               | 66 |

|   |    |
|---|----|
| IV.3.3 – Type d’élément finis .....                           | 66 |
| IV.3.3.1 – Les éléments unidimensionnels (1D) .....           | 66 |
| IV.3.3.2 – Les éléments bidimensionnels (2D) .....            | 66 |
| IV.3.3.3 – Les éléments tridimensionnels (3D).....            | 67 |
| IV.3.4 – Démarche de la construction d’un élément finis ..... | 68 |
| IV.3.5 – Taille des éléments finis .....                      | 69 |
| IV.3.6 – Formulation des éléments finis .....                 | 69 |
| IV.3.7 – Procédure d’analyse par éléments finis .....         | 69 |
| IV.4 – Le maillage.....                                       | 70 |
| IV.4.1 – Règles de maillage .....                             | 70 |
| IV.4.2 – Utilité du maillage .....                            | 71 |
| IV.5 – Étapes du calcul par éléments finis.....               | 71 |
| IV.6 – Les méthodes de résolution .....                       | 72 |
| IV.7 – Conclusion .....                                       | 72 |

## **Chapitre V**

### Présentation l’logiciel de simulation CAST3M

|  |    |
|--|----|
| V.1 – Introduction.....                                      | 77 |
| V.2 – Le langage de cast3m GIBIANE.....                      | 77 |
| V.3 – Système d’unités .....                                 | 79 |
| V.4 – Règles syntaxiques générales.....                      | 80 |
| V.5 – Généralités sur le maillage .....                      | 80 |
| V.6 – Procédure de résolution d’un problème sur CAST3M ..... | 81 |
| V.7 – Les avantage et les inconvénients.....                 | 82 |
| V.7.1 – Les avantage .....                                   | 82 |
| V.7.2 – les inconvénients .....                              | 82 |
| V.8 – conclusion.....  | 82 |

## **Chapitre VI**

### Modélisation par éléments finis, Résultats et discussion

|   |    |
|---|----|
| VI.1 – Introduction.....                | 84 |
| VI.2 – description de l’assemblage..... | 84 |

|   |    |
|---|----|
| VI.3 – Types d'élément fini utilisé.....  | 85 |
| VI.4 – Analyse paramétrique .....   | 88 |
| VI.4.1 – Influence de l'épaisseur de la plaque d'extrémité.....                                   | 88 |
| VI.4.2 – Influence de la présence de raidisseur de colonne.....                                   | 90 |
| VI.4.3 – Influence du raidisseur de nervure dans la zone étendue de la plaque<br>d'extrémité..... | 92 |
| VI.5 – Conclusion.....  | 93 |

# Liste des figures

## Liste des figures

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. I.1</b> – Différentes liaisons dans une structure métallique. ....                          | 2  |
| <b>Figure. I.2</b> – Procédés à l’arc électrique.....  | 3  |
| <b>Figure. I.3</b> – Procédés chimique au chalumeau .....  | 3  |
| <b>Figure. I.4</b> – Assemblage par boulons = vis-écrous. ....   | 4  |
| <b>Figure. I.5</b> – liaison bout à bout de deux profilés.....   | 6  |
| <b>Figure. I.6</b> – Déplacement dû à un moment fléchissant. ....                                      | 6  |
| <b>Figure. I.7</b> – Déplacement dû à un moment fléchissant. ....                                      | 7  |
| <b>Figure. I.8</b> – Déplacement dû à un effort normal. ....   | 7  |
| <b>Figure. I.9</b> – liaison poutre-poteau.....  | 8  |
| <b>Figure. I.10</b> – Déplacement dû à un moment fléchissant. ....                                     | 8  |
| <b>Figure. I.11</b> – Cisaillement obtenu par butée.....   | 9  |
| <b>Figure. I.12</b> – Boulon ordinaire soumis à une traction.....                                      | 9  |
| <b>Figure. I.13</b> – Principe de la précontrainte avec boulons HR. ....                               | 10 |
| <b>Figure. I.14</b> – Zone d’influence d’un boulon précontraint. ....                                  | 10 |
| <b>Figure. I.15</b> – exemple de loi de comportement d’un boulon HR sollicité en traction.....         | 12 |
| <b>Figure. I.16</b> – Pincés et entraxes minimales.....  | 13 |
| <b>Figure. I.17</b> – Assemblage par platine d’about. ....   | 14 |
| <b>Figure. I.18</b> – Limites de classification par rigidité. ....                                     | 15 |
| <b>Figure. I.19</b> – Limites de classification par rigidité. ....                                     | 16 |
| <b>Figure. I.20</b> – Limites de classification par rigidité. ....                                     | 17 |
| <b>Figure. II.1</b> – Différentes modes de contacts. ....  | 20 |
| <b>Figure. II.2</b> – Régularisation de loi de contact unilatéral. ....                                | 21 |
| <b>Figure. II.3</b> – loi de TRESCA.....   | 22 |
| <b>Figure. II.4</b> – loi de COULOMB.....  | 23 |
| <b>Figure. II.5</b> – cône de COULOMB en 2D .....  | 23 |
| <b>Figure. II.6</b> – cône de COULOMB en 3D .....  | 23 |
| <b>Figure. II.7</b> – loi de COULOMB régularisée.....  | 24 |
| <b>Figure. II.8</b> – loi de NORTON-HOFF. ....   | 25 |
| <b>Figure. II.9</b> – Deux corps élastiques déformables en contact unilatéral.....                     | 26 |
| <b>Figure. II.10</b> – Corps élastique déformable en contact avec un socle rigide indéformable .....   | 28 |
| <b>Figure. III.1</b> – Composantes d’un assemblage poutre-poteau boulonné par platine d’extrémité..... | 31 |

|  |    |
|--|----|
| <b>Figure. III.2</b> – Approche EUROCODE 3 pour le calcul de la rigidité initiale d'un assemblage.....   | 34 |
| <b>Figure. III.3</b> – Assemblage par platine d'extrémité sous forme de tronçons en té.....  | 37 |
| <b>Figure. III.4</b> – mode de ruine du tronçon en té.....   | 38 |
| <b>Figure. III.5</b> – mode de ruine du tronçon en té.....   | 39 |
| <b>Figure. VI.1</b> – trois types de forme d'élément à une dimension.....  | 43 |
| <b>Figure. IV.2</b> – types de formes d'élément à deux dimensions.....   | 44 |
| <b>Figure. IV.3</b> – types de forme d'éléments à trois dimensions.....  | 45 |
| <b>Figure. IV.4</b> – structures modélisées par éléments finis.....  | 47 |
| <b>Figure. V.1</b> – Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M.....   | 54 |
| <b>Figure VI.1</b> Connexion boulonnée entre une colonne en acier (HEA 400) et une poutre en acier (IPE 600).....  | 57 |
| <b>Figure VI.2</b> Courbes de contrainte et de déformation pour les aciers utilisés pour les boulons de nuance S420 et de classe 10.9.....   | 57 |
| <b>Figure VI.3</b> Modèle EF 3D de la connexion avec raidisseurs dans la colonne (à gauche) et raidisseur de nervure (à droite).....   | 57 |
| <b>Figure VI.4</b> de gauche à droite maillage de contact utilisé, et exemple des champs de déplacement relatif normal et tangent (en mm) sous $M = 144$ kNm et $V = 576$ kN.....                                | 58 |
| <b>Figure VI.5</b> Zones de glissement (en rouge) et de détachement (en noir) obtenues avec des seuils, de gauche à droite, de 30, 50 et 70 $\mu\text{m}$ respectivement sous $M = 144$ kNm et $V = 576$ kN..... | 59 |
| <b>Figure VI.6</b> Courbes d'évolution des taux de détachement en fonction des valeurs seuils de 30, 50 et 70 $\mu\text{m}$ .....  | 60 |
| <b>Figure VI.7</b> évolution des taux de détachement pour un seuil adopté de 50 $\mu\text{m}$ .....  | 62 |
| <b>Figure VI.8</b> Courbes d'évolution des taux de décollement en fonction de la présence ou non de raidisseurs de poteaux.....  | 63 |
| <b>Figure VI.9</b> Courbes d'évolution des taux de détachement en fonction de la présence ou non de raidisseurs nerveux.....   | 64 |

# Liste des tableaux

## Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| <b>Tableau. I.1</b> – Différentes formes possibles de soudure dans un assemblage.....  | 4  |
| <b>Tableau. I.2</b> – Caractéristiques géométriques des boulons.....   | 5  |
| <b>Tableau. I.3</b> – Classes et résistance des boulons.....   | 5  |
| <b>Tableau. III.1</b> – Liste des composantes d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité.....  | 32 |
| <b>Tableau. V.1</b> – Description de quelque directive.....  | 51 |
| <b>Tableau. V.2</b> – Description de quelque Opérateur.....  | 52 |
| <b>Tableau. V.3</b> – Exemples des systèmes d'unités de mesure cohérents.....  | 52 |
| <b>Tableau VI.1</b> – Représentation des trois zones de contact : adhésion (vert), glissement (rouge) et zone de détachement (noir) en fonction des épaisseurs de la plaque d'extrémité et des intensités de force appliquées..... | 62 |
| <b>Tableau VI.2</b> – Représentation des zones de contact : adhésion (vert), glissement (rouge) et détachement (noir) en fonction de la présence ou non des raidisseurs de colonne.....  | 64 |

# Abréviation

### Abréviation

|                   |  |
|-------------------|--|
| $h_b$             | Hauteur hors tout  |
| $B_{fb}$          | Largeur des semelles (supposées identiques)                    |
| $t_{fb}$          | Épaisseur des semelles (supposées identiques)                  |
| $H_{wb}$          | Hauteur de l'âme   |
| $t_{wb}$          | Épaisseur de l'âme   |
| $R_b$             | Rayon de congé âme - semelle (si laminé)                       |
| $F_{yb}$          | Limite d'élasticité  |
| $A_{ub}$          | Résistance ultime à la traction                                |
| $A_{xb}$          | Section brute  |
| $A_{vz,b}$        | Aire de cisaillement   |
| $I_{yb}$          | Inertie de flexion   |
| $W_{el,b}$        | Module élastique   |
| $W_{pl,b}$        | Module plastique   |
| $h_p$             | Hauteur  |
| $b_p$             | Largeur  |
| $t_p$             | Épaisseur  |
| $f_{yp}$          | Limite d'élasticité  |
| $f_{up}$          | Résistance ultime à la traction                                |
| $a_{fp}$          | Gorge de soudure entre les semelles de la poutre et la platine |
| $a_{wp}$          | Gorge de soudure entre l'âme de la poutre et la platine        |
| $h_c$             | Hauteur hors tout  |
| $b_{fc}$          | Largeur des semelles (supposées identiques)                    |
| $t_{fc}$          | Épaisseur des semelles   |
| $h_{wc}$          | Hauteur de l'âme   |
| $t_{wc}$          | Épaisseur de l'âme   |
| $r_c$             | Rayon de congé âme - semelle (si laminé)                       |
| $a_c$             | Gorge de soudure âme - semelle (si P.R.S.)                     |
| $d_{wc}$          | Hauteur droite de l'âme du poteau                              |
| $d_b$             | diamètre de boulon   |
| $d_{ob}$          | Diamètre de perçage  |
| $A_s$             | Section résistante   |
| $- f_{yb}$        | Limite d'élasticité  |
| $- f_{ub}$        | Résistance ultime à la traction                                |
| $n_{br}$          | Nombre total de rangées de boulons                             |
| $h_{r,i}$         | Distance du centre de compression à la rangée de boulons « i » |
| $p, p_1, p_{1,i}$ | Espacement vertical entre les rangées de boulons               |

|                      |   |
|----------------------|---|
| $\gamma_{M0} = 1$    | Coefficient partiel pour la résistance de l'acier   |
| $\gamma_{M1} = 1$ :  | Coefficient partiel pour la résistance de l'acier en présence d'instabilités  |
| $\gamma_{M2} = 1,25$ | Coefficient partiel pour la résistance des assemblages  |
| $M_{c,Rd}$           | Moment résistant de calcul de la section transversale de poutre (plastique, élastique ou efficace selon la classification de la poutre) |
| $F_{t,Rd}$           | Résistance à la traction d'un boulon  |
| $F_{v,Rd}$           | Résistance au cisaillement d'un boulon  |
| $F_{b,Rd}$           | Résistance à la pression diamétrale d'un boulon   |
| $F_{c,fb,Rd}$        | Résistance de calcul à la compression de la semelle et de la zone comprimée adjacente de l'âme de la poutre                             |
| $F_{c,wc,Rd}$        | Résistance de calcul à la compression transversale de l'âme (raidie) du poteau  |
| $V_{wc,Rd}$          | Résistance de calcul au cisaillement du panneau d'âme du poteau   |
| $M_{j,Rd}$           | Moment résistant de calcul de l'assemblage  |
| $S_{j,ini}$          | Effort normal résistant de l'assemblage   |
| IPE                  | Poutrelles européennes en I   |
| ZAT                  | Zone affectée thermique   |
| HR                   | Haute résistance  |
| MEF                  | Méthode des éléments finis  |
| CEA                  | Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives  |
| HEB                  | Poutrelles européennes en H à larges ailes  |

# Introduction générale

### Introduction générale

L'analyse des problèmes de contact dans les assemblages poutre-poteau, qu'ils soient munis d'une platine d'extrémité débordante ou non, revêt une grande importance dans le domaine de la construction métallique. Lorsqu'une charge est appliquée, les surfaces de contact entre la platine d'extrémité de la poutre et la semelle du poteau peuvent être classifiées en trois catégories : les zones d'adhérence, les zones de glissement et les zones de décollement. Afin de mieux comprendre le comportement de ces assemblages, il est nécessaire d'effectuer des simulations numériques en utilisant une approche tridimensionnelle par éléments finis qui tient compte du contact.

L'objectif de cette étude est d'analyser l'évolution de la distribution de ces zones de contact afin d'identifier et de quantifier l'influence de paramètres essentiels tels que l'épaisseur de la platine et la présence de raidisseurs dans les poteaux. Plus précisément, nous nous concentrerons sur l'étude de l'influence des raidisseurs dans cet assemblage, ainsi que l'influence de l'épaisseur de la platine débordante.

Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons un modèle de calcul basé sur la méthode des éléments finis en trois dimensions, en utilisant des éléments de contact surfaciques. Notre travail sera structuré en six chapitres, comme suit :

**Chapitre 1 : Assemblages dans les structures métalliques** Ce chapitre présentera les différentes configurations d'assemblages utilisées, en fournissant des définitions sur les modes de transmission des efforts et les méthodes d'assemblage.

**Chapitre 2 : Mécanique du contact** Ce chapitre traitera des fondements de la mécanique du contact, en fournissant des définitions des différents types de contact et en abordant les lois utilisées pour modéliser les frottements.

**Chapitre 3 : Caractérisation des assemblages** Ce chapitre expliquera l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour le calcul et la caractérisation des assemblages.

**Chapitre 4 : Introduction à la méthode des éléments finis** Ce chapitre introduira la méthode des éléments finis en décrivant la procédure d'analyse par éléments finis et en détaillant les différentes étapes de calcul.

**Chapitre 5 : Présentation du logiciel de calcul CAST3M** Ce chapitre offrira une brève présentation du logiciel de calcul CAST3M, en expliquant son fonctionnement et les procédures de calcul utilisées.

**Chapitre 6 : Étude tridimensionnelle d'un assemblage poutre-poteau** Dans ce dernier chapitre, nous réaliserons une étude tridimensionnelle d'un assemblage poutre-poteau avec une platine d'extrémité débordante à l'aide du logiciel CAST3M. Nous examinerons

les conditions de contact entre la platine et la semelle, ainsi que les interactions des boulons avec les autres éléments de l'assemblage.

Enfin, nous concluons ce travail par une synthèse générale des résultats obtenus.

# Chapitre I

**Les assemblages dans les structures métalliques**

## I.1 – Introduction

Les liaisons entre les différents éléments d'une construction métallique représentent ce qu'on appelle habituellement les assemblages. On peut distinguer deux types de liaisons.

**Une liaison indémontable** : c'est une liaison entre deux ou plusieurs éléments dans une structure, et les objets assemblés ne sont pas conçus pour être démontés. Pour séparer les composantes assemblées, il faut briser l'objet ou l'organe de liaison. Cette dernière peut être assurée par les assembleurs suivants :

- Une soudure ;
- Des rivets ;
- Une résine de coulage.

**Une liaison démontable** : c'est une liaison entre deux ou plusieurs éléments une structure, et les objets assemblés peuvent être séparés sans briser l'organe ou l'objet de liaison. Cette dernière peut être assurée par les assembleurs suivants :

- Les boulons ordinaires ;
- Les boulons précontraints.

Généralement, l'assemblage est un dispositif qui permet de réunir et de solidariser plusieurs pièces entre elles.

Il assure la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les pièces (les éléments de la structure, par exemple), sans générer de sollicitations parasites.

**Remarque** : les types d'assemblages utilisés généralement sont les assemblages soudés et les assemblages boulonnés.

Dans la plupart des constructions métalliques, trois grands types de liaison peuvent être identifiés :

- Les liaisons entre les éléments ayant des fonctions différentes et des directions différentes, exemple **A (voir la figure I.1)** ;
- Les liaisons entre les individus ayant les mêmes fonctions et destinées à assurer la continuité d'un seul et même élément, exemple **B (voir la figure I.1)** ;
- Les liaisons entre éléments de nature différente, exemple **C (voir la figure I.1)**.

La figure ci-dessous résume les trois situations de liaison sur une structure classique semi-rigide.

**Remarque** : une explication est proposée dans la partie classification des assemblages page 14.

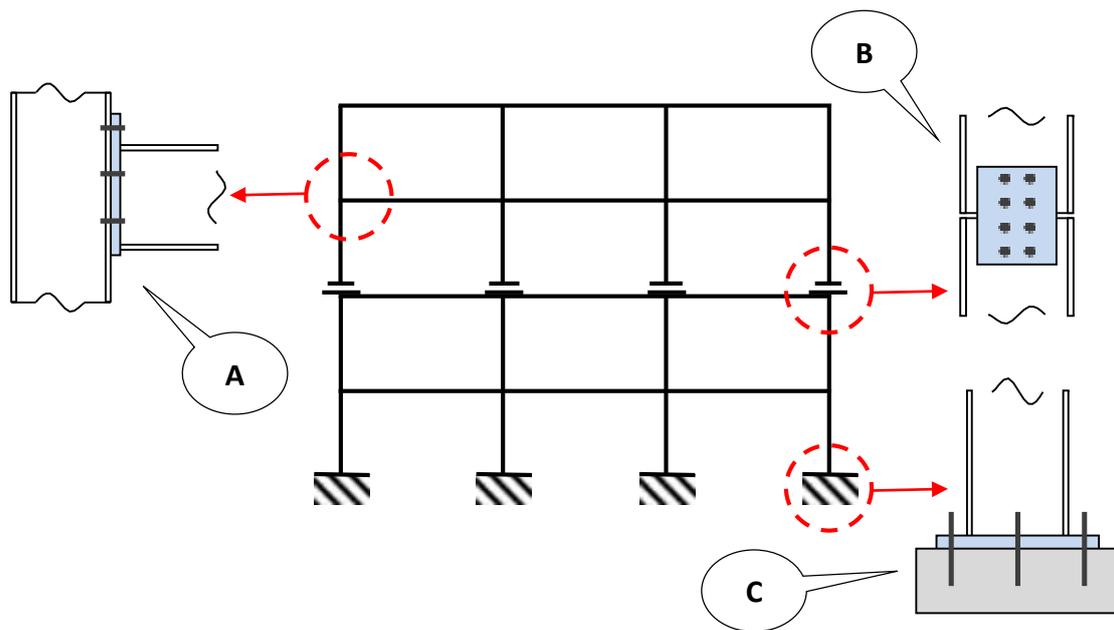


Figure I.1 – Différentes liaisons dans une structure métallique.

## I.2 – Moyens d'assemblage

### I.2.1 – Assemblage par soudure

Le soudage est une opération d'assemblage permanent dont l'objectif est d'assurer la continuité de la matière à assembler. Pour réaliser un soudage, il est nécessaire que les matériaux à assembler soient aptes à être soudés, c'est-à-dire qu'ils présentent une soudabilité suffisante. Le soudage est assuré par l'apport d'une source de chaleur qui permet la fusion des matériaux à assembler. Cette source de chaleur peut être d'origine électrique, chimique, mécanique, etc. Une fois que la fusion a eu lieu et que les matériaux ont été solidifiés, on obtient un joint homogène dont les caractéristiques sont plus ou moins proches de celles du métal de base, ou un joint hétérogène dans le cas de métaux différents.

**Remarque :** La soudabilité à haute température dépend des qualités propres du matériau, notamment :

- Les modifications de la structure physico-chimique du matériau ;
- L'apparition de fissures et de craquelures au refroidissement ;
- L'apparition de déformations géométriques dues aux effets de dilatation et de retrait.

#### I.2.1.1 – Procédés de soudage

Il existe plusieurs techniques et procédés de soudage comme par exemple :

- Procédés par résistance électrique ;
- Procédés par friction ;

- Procédés chimique au chalumeau oxyacétylénique ;
- Procédés au laser ;
- Procédés à l'arc électrique ;

La figure I.2 et I.3 ci-dessous représente les deux procédés les plus utilisés en construction métallique.



Figure I.2 – Procédés à l'arc électrique.



Figure I.3 – Procédés chimique au chalumeau.

#### I.2.1.2 – Les avantages et les inconvénients

Les assemblages soudés présentent certains avantages :

- Ils offrent une grande liberté de conception de forme ;
- Assurent une continuité de la matière (une bonne transmission des efforts) ;
- Pas de diminution de la section (sections brutes) ;
- Ils n'exigent pas l'utilisation d'éléments secondaires.

En revanche, leurs inconvénients sont :

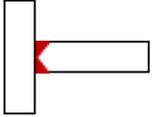
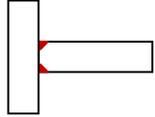
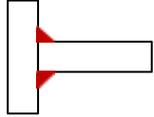
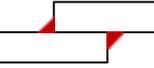
- Le contrôle des soudures est nécessaire et onéreux ;
- Exigent une main-d'œuvre qualifiée ;
- L'aptitude des aciers à être soudés (certains aciers nécessitent parfois une amélioration de leur composition).

Ils engendrent des déformations initiales et/ou des contraintes résiduelles. [1]

#### I.2.1.3 – Types de soudures

Dans la construction soudée de bâtiments, environ **80 %** des soudures sont des soudures d'angle et **15 %** sont des soudures bout à bout. Les **05 %** restants correspondent aux soudures en bouchon, en entaille et par points. [2]

Les combinaisons possibles entre les types de soudure et les formes de l'attache sont présentées dans le **tableau I.1** ci-dessous.

| Attache          | Soudure   |  |   |
|------------------|---|--|---|
|                  | Pénétration totale  | Pénétration partielle  | Cordon d'angle  |
| Bout à bout      |  |  | -   |
| En té ( T )      |  |  |  |
| Par recouvrement | -   | -  |  |

**Tableau I.1** – Différentes formes possibles de soudure dans un assemblage.

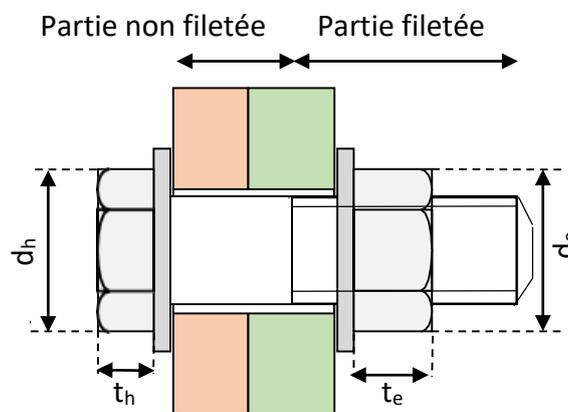
**I.2.2 – Assemblage boulonnés**

Le boulonnage est un procédé d'assemblage utilisé en charpente métallique. Il consiste à assembler des éléments moyennant des boulons posés dans des trous préalablement percés dans les pièces. Ces éléments d'attaches fonctionnent donc par leurs corps pour résister aux sollicitations imposées.

Pour la pose, le boulon est introduit dans un trou circulaire pratiqué dans les pièces à réunir, l'assemblage est obtenu par serrage des pièces entre la tête du boulon et l'écrou. Du fait de sa simplicité de pose et des possibilités de réglage qu'il autorise, le boulon est un moyen d'assemblage très utilisé.

**I.2.2.1 – Caractéristique géométriques des boulons**

Un boulon se compose d'une tige filetée sur tout ou partie de sa longueur, d'un écrou et éventuellement de rondelles (**voir la figure I.4**). La désignation d'un boulon se fait par son diamètre en millimètres de sa tige non filetée (**voir le Tableau I.2**) et par sa classe de résistance.



**Figure I.4** – Assemblage par boulons = vis-écrous.

Les tableaux I.2 présentent les caractéristiques géométriques principales des boulons en fonction du diamètre.

| Désignation                       | M8   | M10  | M12  | M14  | M16  | M18  | M20  | M22  | M24  | M27  |
|-----------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| d (mm)                            | 8    | 10   | 12   | 14   | 16   | 18   | 20   | 22   | 24   | 27   |
| j (mm)                            | 1    | 1    | 1    | 1    | 2    | 2    | 2    | 2    | 2    | 3    |
| d <sub>0</sub> (mm)               | 9    | 11   | 13   | 15   | 18   | 20   | 22   | 24   | 26   | 30   |
| A (mm <sup>2</sup> )              | 50.3 | 78.5 | 113  | 154  | 201  | 254  | 314  | 380  | 452  | 573  |
| A <sub>s</sub> (mm <sup>2</sup> ) | 36.6 | 58   | 84.3 | 115  | 157  | 192  | 245  | 303  | 353  | 459  |
| t <sub>h</sub> (mm)               | 5.3  | 6.4  | 7.5  | 8.8  | 10   | 11.5 | 12.5 | 14   | 15   | 17.5 |
| t <sub>e</sub> (mm)               | 6.8  | 8.4  | 10.8 | 12.8 | 14.8 | 15.8 | 18   | 19.4 | 21.5 | 23.8 |
| t <sub>r</sub> (mm)               | 2    | 2    | 3    | 3    | 3    | 4    | 4    | 4    | 4    | 5    |
| d <sub>h</sub> (mm)               | 13   | 16   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 34   | 36   | 41   |
| d <sub>e</sub> (mm)               | 13   | 16   | 18   | 21   | 24   | 27   | 30   | 34   | 36   | 41   |
| d <sub>r</sub> (mm)               | 16   | 20   | 24   | 27   | 30   | 34   | 36   | 40   | 44   | 50   |

Tableau I.2 – Caractéristiques géométriques des boulons. [NF EN 1993-1-8]

Avec:

d : Diamètre nominal du boulon ;

j : Jeu du trou ;

d<sub>0</sub> : Diamètre du trou ;

A : Aire de la partie non filetée ;

A<sub>s</sub> : Aire de la partie filetée ;

t<sub>h</sub> : Hauteur de la tête de boulon ;

t<sub>e</sub> : Hauteur de l'écrou ;

t<sub>r</sub> : Hauteur des rondelles ;

d<sub>h</sub> : Diamètre de la tête de boulon ;

d<sub>e</sub> : Diamètre de l'écrou ;

d<sub>r</sub> : Diamètre des rondelles .

**Remarque :** La désignation d'un boulon se fait par le diamètre (d en mm) de la partie non filetée du corps du boulon précédé de la lettre majuscule ( M ) : Par exemple, si d=18mm, le boulon est désigné par M18.

#### I.2.2.2 – Caractéristiques mécanique des boulons

Les caractéristiques mécaniques des boulons nécessaires aux calculs sont la limite d'élasticité  $f_{y,bl}$  et la résistance à la traction  $f_{u,bl}$ .

Le tableau I.3 donne les valeurs de  $f_{y,bl}$  et  $f_{u,bl}$  pour chaque classe.

| Classe                          | 4.6 | 4.8 | 5.6 | 5.8 | 6.8 | 8.8 | 10.9 | 12.9 |
|---------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|
| $f_{y,bl}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 240 | 320 | 300 | 400 | 480 | 640 | 900  | 1080 |
| $f_{u,bl}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 400 | 400 | 500 | 500 | 600 | 800 | 1000 | 1200 |

Tableau I.3 – Classes et résistance des boulons. [NF EN 1993-1-8]

Les boulons de classe 8.8, 10.9 et 12.9 sont appelés boulons à haute résistance et leur désignation (HR).

Alors nous distinguons deux types de boulons, boulons ordinaires et boulons HR.

### I.2.3 – Transmission des efforts – Analyse du besoin

#### I.2.3.1 – Cas de liaison bout à bout

Envisageons par exemple, La liaison bout à bout de deux profilés A et B dans le plan de leurs âmes X Z par boulons et couvre-joints C.

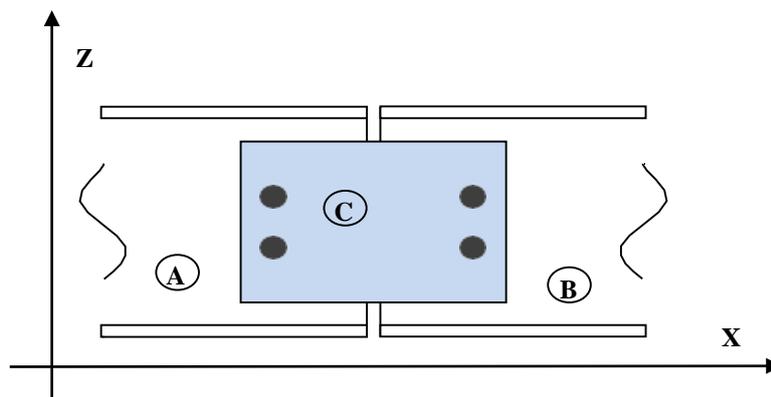


Figure I.5 – liaison bout à bout de deux profilés.

Dans cet exemple de liaison (voir la figure I.5), nous pouvons distinguer trois modes de transmission des efforts.

#### i – Transmission des efforts par un moment fléchissant

Dans le cas où la transmission des efforts de la poutre A vers la poutre B implique un moment fléchissant qui est porté par l'axe Y perpendiculaire aux axes Z et X, le mouvement relatif des deux poutres A et B ainsi que du couvre-joint C est une rotation autour de l'axe Y. Ainsi, la rotation de C par rapport aux âmes des poutres A et B se traduit par un glissement plan sur plan à l'interface du couvre-joint et de l'âme (voir la figure I.6).

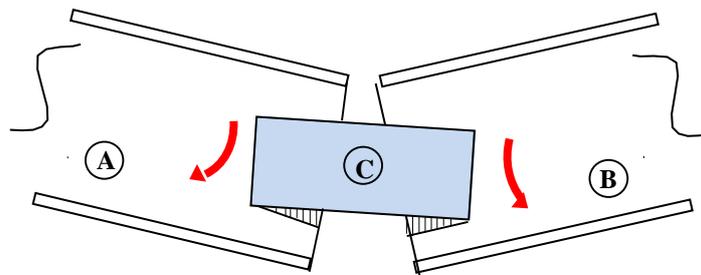


Figure I.6 – Déplacement dû à un moment fléchissant.

### ii – Transmission des efforts par glissement

Dans le cas où la transmission des efforts de la poutre A vers la poutre B implique un effort tranchant, le mouvement relatif des deux poutres A et B sera une translation de direction Z, et le couvre-joint C par rapport à l'âme des deux poutres se traduira par un glissement plan sur plan entre l'âme et le couvre-joint (voir la figure I.7).

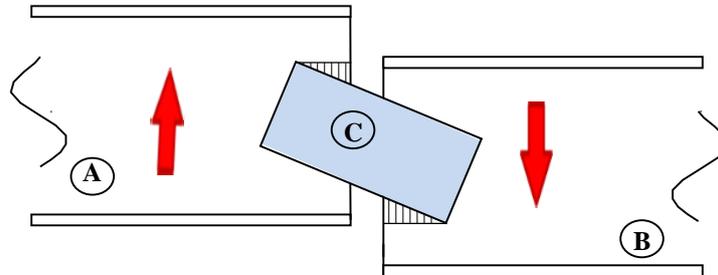


Figure I.7 – Déplacement dû à un moment fléchissant.

### iii – Transmission des efforts par traction

Dans le cas où la transmission des efforts de la poutre A vers la poutre B implique un effort normal, la poutre B subit une translation suivant X par rapport à la poutre A, et le déplacement relatif entre l'âme et le Couvre-joint se traduit par un glissement plan sur plan à l'interface (Voir la figure I.8).

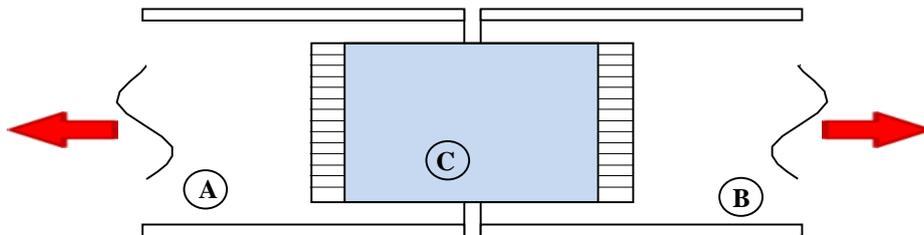


Figure I.8 – Déplacement dû à un effort normal.

#### I.2.3.2 – Cas de liaison d'une poutre IPE sur un poteau HEB

Prenons par exemple la liaison d'une poutre IPE sur un poteau HEB (voir la figure I.9) présentée ci-dessous.

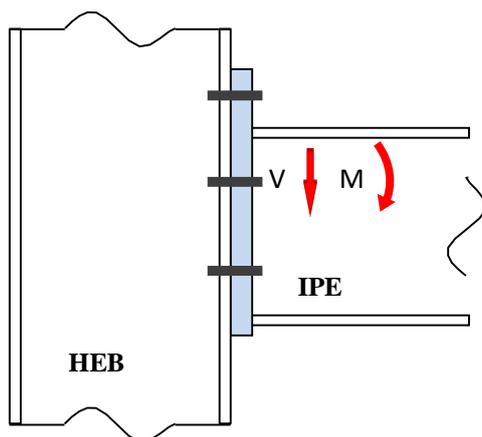


Figure I.9 – liaison poutre-poteau

Dans cette configuration, l'effort tranchant  $V$  crée un glissement plan à l'interface platine-semelle du HEB. Le moment fléchissant  $M$  a tendance à écarter la platine de la semelle du poteau dans un mouvement de rotation (**voir la figure I.10**). Les boulons doivent donc non seulement créer des contraintes de cisaillement pour s'opposer au glissement, mais aussi développer des contraintes de traction pour éviter l'écartement de la platine et de la semelle du poteau ou encore permettre l'équilibre des contraintes normales engendrées par le moment fléchissant  $M$ .

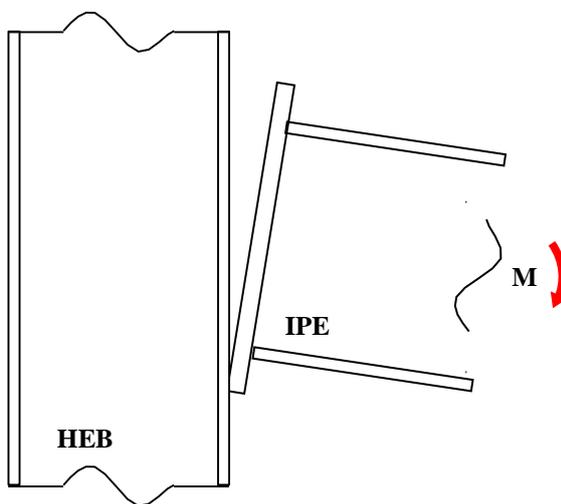


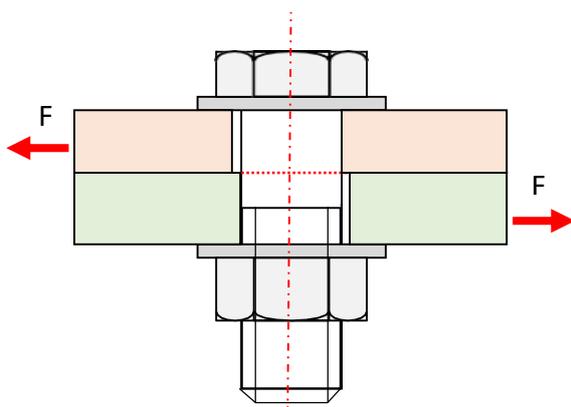
Figure I.10 – Déplacement dû à un moment fléchissant.

#### I.2.4 – Transmission des efforts pas cisaillement

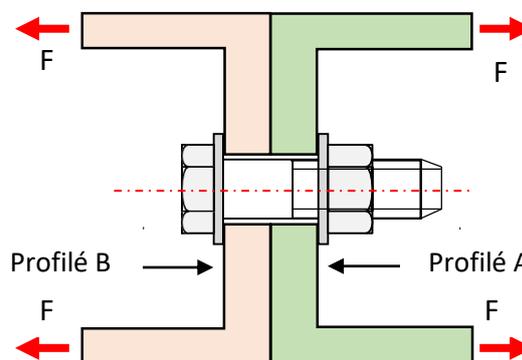
La création du champ de contraintes de cisaillement nécessaire à la transmission des efforts peut être obtenue par deux principes : le frottement et la butée.

#### I.2.4.1 – La butée : Boulons ordinaires

Appelés aussi boulons normaux ou boulons de charpente, leurs classes de résistance sont celles du **tableau I.3**, c'est-à-dire qu'elles vont de la classe 4.6 à la classe 12.9. La mise en place des boulons ordinaires ne nécessite pas de préparation des surfaces de contact, ni de spécification particulière lors du serrage. En général, l'usage de rondelles n'est pas obligatoire. Le corps du boulon joue alors un rôle de butée (**voir la figure I.11**). Les boulons ordinaires travaillent essentiellement en traction (**voir la figure I.12**) et/ou en cisaillement.



**Figure I.11** – Cisaillement obtenu par butée.



**Figure I.12** – Boulon ordinaire soumis à une traction

#### I.2.4.2 – Le frottement : Boulons haute résistance

Un B.H.R est l'abréviation de "boulon à haute résistance". Le B.H.R ne présente pas de différence géométrique importante avec un boulon ordinaire, à l'exception de l'utilisation obligatoire de rondelles. Selon les exigences conformes à l'Eurocode 3, seules les classes 8.8 et 10.9 du tableau 3 peuvent être utilisées comme boulons à haute résistance pour la construction, en raison de la limite élastique élevée de l'acier des boulons.

Les boulons HR sont fortement serrés (serrage contrôlé), ce qui leur transmet un effort de précontrainte qui tend la tige du boulon. Cette précontrainte agit perpendiculairement aux plans de contact des pièces assemblées et développe une forte résistance au glissement relatif des pièces grâce au frottement mutuel. Le serrage des boulons doit être contrôlé à l'aide d'une clé dynamométrique, dont la valeur du couple de serrage nommée **C** en [Nm] est donnée dans la formule suivante (**voir l'équation I.1**), en fonction de la force de précontrainte  $F_{p,cd}$ . Cette force est estimée à 70% de la limite ultime du boulon (**voir l'équation I.2**), conformément à l'Eurocode 3. [2]

$$C = 0.19 d F_p \tag{I.1}$$

$$F_{p, cd} = 0.7 A_s f_{u, bl} / 1.1 \tag{I.2}$$

Un exemple de principe de fonctionnement d'un assemblage par boulons précontraints présenté dans la figure I.13.

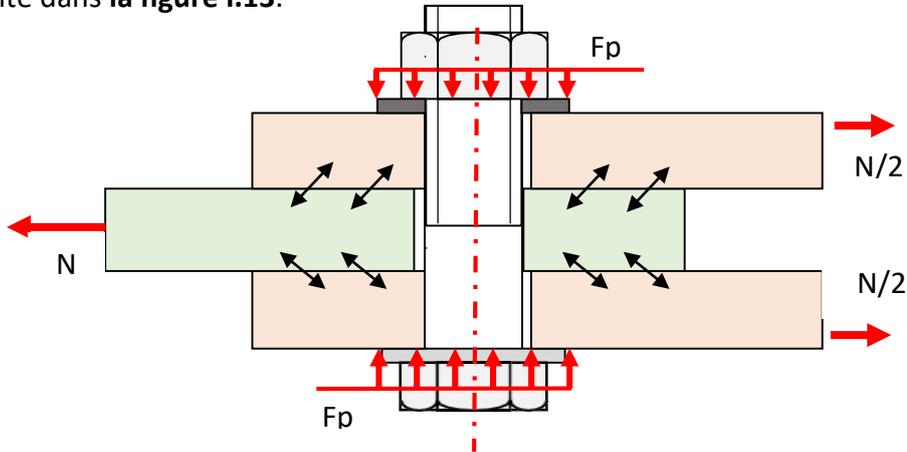


Figure I.13 – Principe de la précontrainte avec boulons HR.

**Remarque 1 :** Contrairement aux boulons ordinaires, les boulons HR ne travaillent pas en obstacle (leurs tiges ne sont pas en contact avec les frontières des trous des pièces assemblées), mais transmettent les efforts par frottement.

**Remarque 2 :** Dans certains cas, les tiges peuvent venir en contact avec les pièces (soit en raison d'un serrage insuffisant, soit en raison d'un coefficient de frottement insuffisant). Dans ce cas, les boulons HR fonctionneront comme des boulons ordinaires.

**i – Paramètres liés aux boulons précontraints**

Le boulon précontraint engendre une contrainte normale à l'interface des pièces de l'assemblage. Chaque boulon possède une zone d'action limitée (voir la figure I.14).

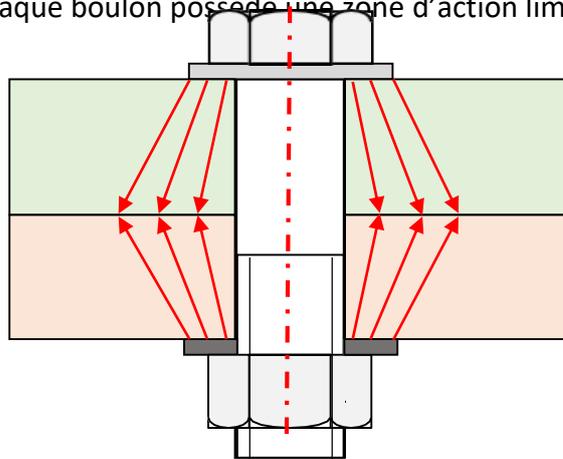


Figure I.14 – Zone d'influence d'un boulon précontraint.

La performance mécanique de l'assemblage est liée non seulement aux caractéristiques mécaniques des boulons eux-mêmes, mais aussi aux dispositions techniques du montage. Les paramètres qui influencent l'efficacité d'un boulon précontraint sont les suivants :

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

#### **ii- Etat de surface des pièces en contact**

Puisque la transmission de l'effort repose sur le frottement à l'interface des pièces, l'état de surface des plans en contact revêt un caractère fondamental. Le coefficient de frottement ( $\mu$ ) défini dans l'Eurocode 3 correspond au rapport de l'effort de cisaillement sur l'effort de pincement à l'état limite de glissement. Le coefficient de frottement ( $\mu$ ) doit correspondre à sa valeur de calcul. Cela nécessite une préparation de surfaces, par brossage ou grenailage, pour éliminer toute trace de rouille, de calamine, de graisse, etc.

Les valeurs du coefficient de frottement ( $\mu$ ) sont les suivantes :

- $\mu = 0,5$  pour les surfaces de classe A
- $\mu = 0,4$  pour les surfaces de classe B
- $\mu = 0,3$  pour les surfaces de classe C
- $\mu = 0,2$  pour les surfaces de classe D

#### **iii- Les traitements nécessaires pour les différentes classes selon l'Eurocode 3**

##### **Pour la classe A :**

- Décapage par grenailage ou sablage avec enlèvement de toutes les plaques de rouille non adhérentes, ce qui donne des surfaces sans piquûre de corrosion ;
- Décapage pour grenailage ou sablage puis métallisation des surfaces par projection d'aluminium ;
- Décapage pour grenailage ou sablage puis protection par projection d'un revêtement à base de zinc.

##### **Pour la classe B :**

- Sablage par jet de sable sous pression avec de l'air comprimé ou grenailage, puis protection par une peinture au silicate de zinc alcalin d'épaisseur 50 à 80  $\mu\text{m}$ .

##### **Pour la classe C :**

- Brossage à la brosse métallique ou nettoyage à la flamme pour enlever la fleur de rouille et la calamine.

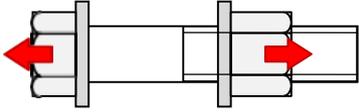
##### **Pour la classe D :**

- Dans le cas où aucun traitement n'est effectué, on admet un coefficient de frottement  $\mu = 0,20$ .

**iv- Résistance des boulons HR**

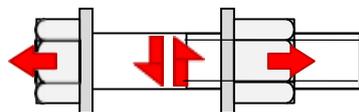
D'après l'Eurocode 3, la résistance d'un boulon à la traction (voir l'équation I.3) et à la traction cisaillement-combiné (voir l'équation I.4) est donnée par les formules suivantes :

**Résistance à la traction :**



$$F_{t,Rd} = \frac{0.9f_{u,bl}A_s}{\gamma_{M2}} \tag{I.3}$$

**Traction et cisaillement combinés :**



$$\frac{F_{t,Ed}}{1.4F_{t,Rd}} + \frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \leq 1 \tag{I.4}$$

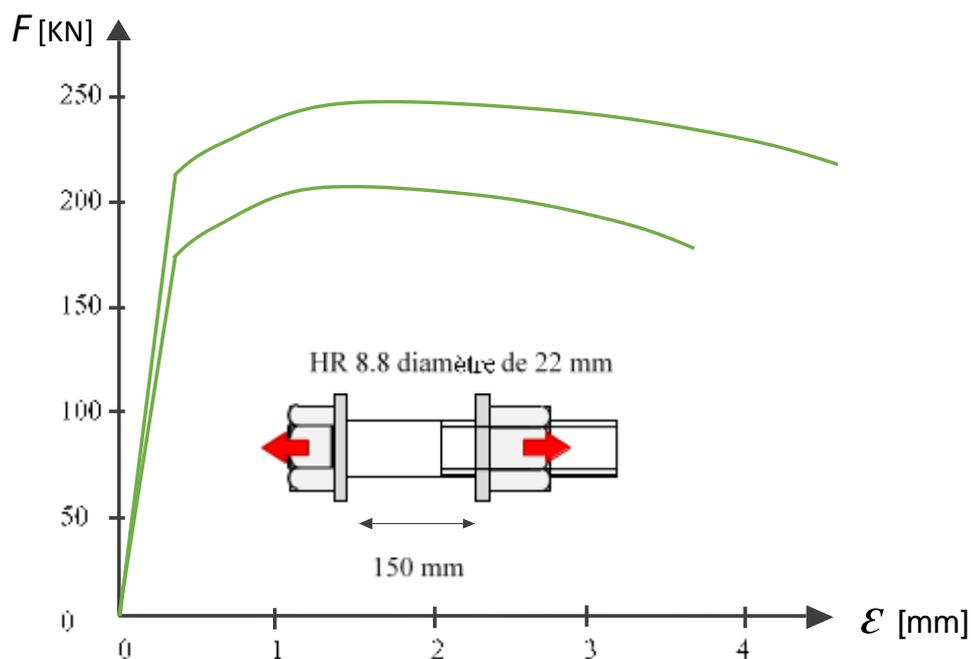
Avec:

$F_{t,Ed}$  : Effort de traction sollicitant.

$F_{v,Ed}$  : Effort de cisaillement sollicitant.

**v- Mise en fonctionnement**

Un serrage trop intense peut conduire à un déplacement de la limite d'élasticité et de grandes déformations, alors qu'une intensité trop faible réduit l'efficacité du boulon au sein de l'assemblage.



**Figure I.15** – exemple de loi de comportement d'un boulon HR sollicité en traction. [3]

**vi- Dispositions constructives**

Lors de la disposition des boulons, les entraxes et les pinces des boulons (voir la figure I.16) doivent être comprises entre des limites comme il est indiqué dans l'Eurocode 3. Les valeurs minimales sont définies pour assurer une meilleure mise en place des boulons et pour éviter la rupture de la plaque lorsque la pince est trop faible. Il n'y a pas de valeurs maximales d'entraxe, de pinces longitudinale et transversale sauf dans les cas suivants

- pour les barres comprimées afin d'éviter le voilement local et les prévenir de la corrosion lorsqu'elles sont exposées ;
- pour les barres tendues exposées dans un milieu agressif afin de prévenir la corrosion.

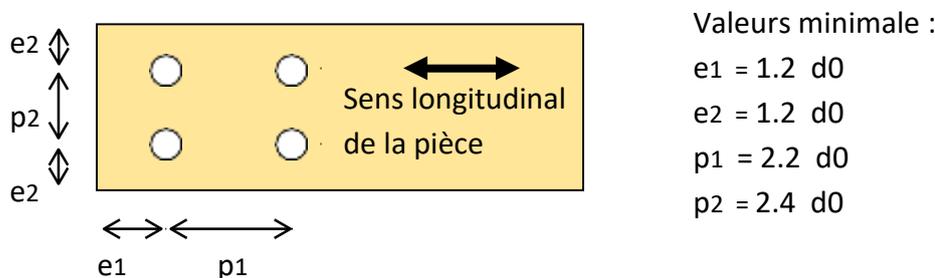


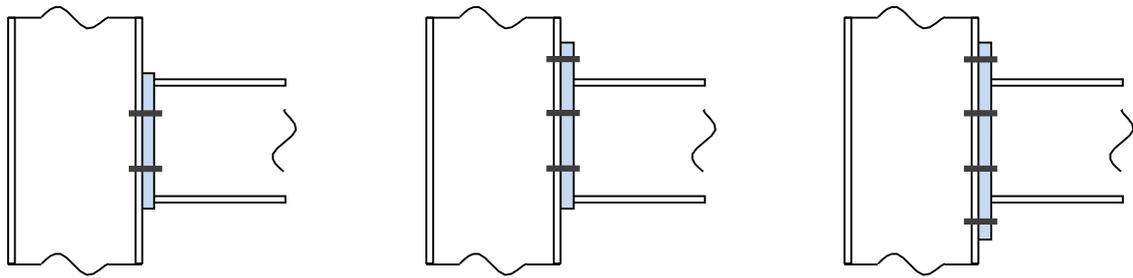
Figure I.16 – Pinces et entraxes minimales.

**I.3 – Configurations d'assemblages poutre-poteau**

Dans la pratique, nous pouvons rencontrer une diversité de modes constructifs en fonction du besoin et des performances recherchées.

**I.3.1 – Assemblage par platine d'about**

Ce mode d'assemblage est réalisé à l'aide d'une plaque appelée platine d'about (représentée en bleu dans la figure I.17), soudée à l'extrémité de la pièce et attachée à une autre pièce porteuse par le biais de boulons disposés en plusieurs rangées verticales. Selon la géométrie de la platine, nous pouvons trouver en pratique trois variantes en fonction de son débord : platine non débordante, avec un débord d'un seul côté ou avec des débords des deux côtés (voir la figure I.17-A). Ce mode constructif est largement répandu, [4] [5] et peut être utilisé dans les assemblages poteau-poutre, ainsi que dans les assemblages de continuité (voir la figure I.17-B) et les pieds de poteaux (voir la figure I.17-C). À noter que dans les assemblages pied de poteau, la platine d'about prend l'appellation de platine ou plaque d'assise. Ce type d'assemblage est souvent considéré comme encastrement transmettant tous types d'efforts (M-N-V), bien que dans certains cas, il puisse être considéré comme articulé. Le passage de l'articulation à l'encastrement dépend de certains paramètres constructifs, tels que le débord ou non de la plaque d'extrémité, le raidissage éventuel ainsi que la position des boulons ou des tiges d'ancrage pour les platines d'about ou d'assise respectivement.

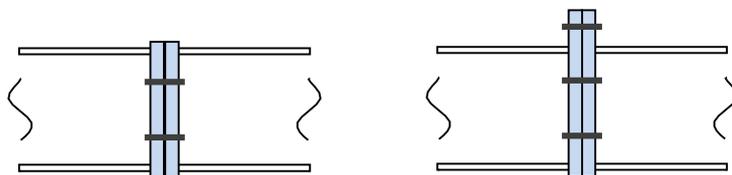


Platine non débordante

débord d'un seul côté

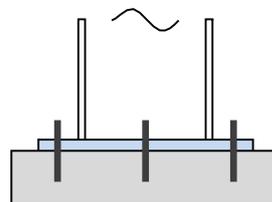
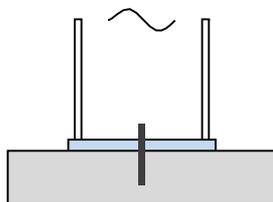
débord des deux côtés

A - Assemblage poteau poutre.



B - Assemblage de continuité de poutre.

Pied de poteau avec une seule rangée des tiges, considéré comme articulé



Pied de poteau avec une six tiges, considéré comme articulé

C - Assemblage de pied de poteau.

Figure I.17 – Assemblage par platine d'about.

### I.4 – Classification générale des assemblages

Nous pouvons classer les assemblages selon les catégories suivantes :

#### I.4.1 – Classification des assemblages selon l'EC3

Selon la norme européenne EC3, nous pouvons distinguer trois classifications pour les assemblages : la classification en termes de rigidité, en termes de résistance et en termes de capacité de rotation. Les critères de ces classifications sont décrits ci-dessous.

### I.4.2 – Classification par rigidité

Selon la réglementation européenne L'EC3, la classification d'un assemblage selon sa rigidité est définie par un rapport entre la rigidité initiale de l'assemblage ( $S_{j,ini}$ ), qui correspond à 2/3 du moment résistant plastique, et la rigidité flexionnelle de la poutre ( $E_b I_b / L_b$ ). La liaison est considérée comme rigide lorsque cette valeur est suffisamment élevée et supérieure à 8. La connexion est considérée comme articulée lorsque le rapport est inférieur à 0,5. Entre ces deux valeurs, l'assemblage est considéré comme semi-rigide (voir la figure I.18). Cette classification se traduit par les vérifications suivantes :

$$\text{- Assemblage rigide si : } \frac{\delta_{j,ini}}{E_b I_b / L_b} > k_b \quad (1.5)$$

$$\text{- Assemblage semi-rigide si : } 0.5 \leq \frac{\delta_{j,ini}}{E_b I_b / L_b} \leq k_b \quad (1.6)$$

$$\text{- Assemblage articulé si : } \frac{\delta_{j,ini}}{E_b I_b / L_b} < 0.5 \quad (1.7)$$

Avec :

$S_{j,ini}$  : rigidité initiale ;

$E_b$  : module de Young de la poutre ;

$I_b$  : moment d'inertie de la poutre ;

$L_b$  : longueur de la poutre ;

$k_b = 8$  pour les ossatures où le système de contreventement réduit le déplacement horizontal d'au moins 80 % ;

$k_b = 25$  pour les autres ossatures.

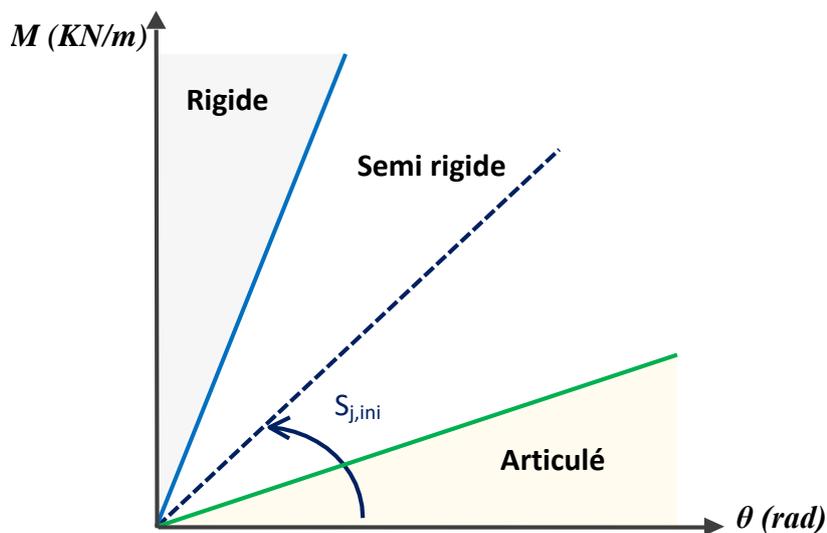


Figure I.18 – Limites de classification par rigidité.

### I.4.3 – Classification par résistance

Un assemblage peut être classé comme étant à résistance complète, nominalement articulé ou à résistance partielle en comparant son moment résistant  $M_{j,Rd}$  avec les moments résistants des barres attachées. L'EC3 définit les limitations suivantes (voir la figure I.19) :

- Un assemblage à résistance complète possède une résistance supérieure à celle des éléments structuraux assemblés (poutre, poteau).
- Un assemblage articulé possède une faible résistance, inférieure à 25% de la résistance minimale des éléments assemblés.
- Un assemblage à résistance partielle représente une solution intermédiaire.

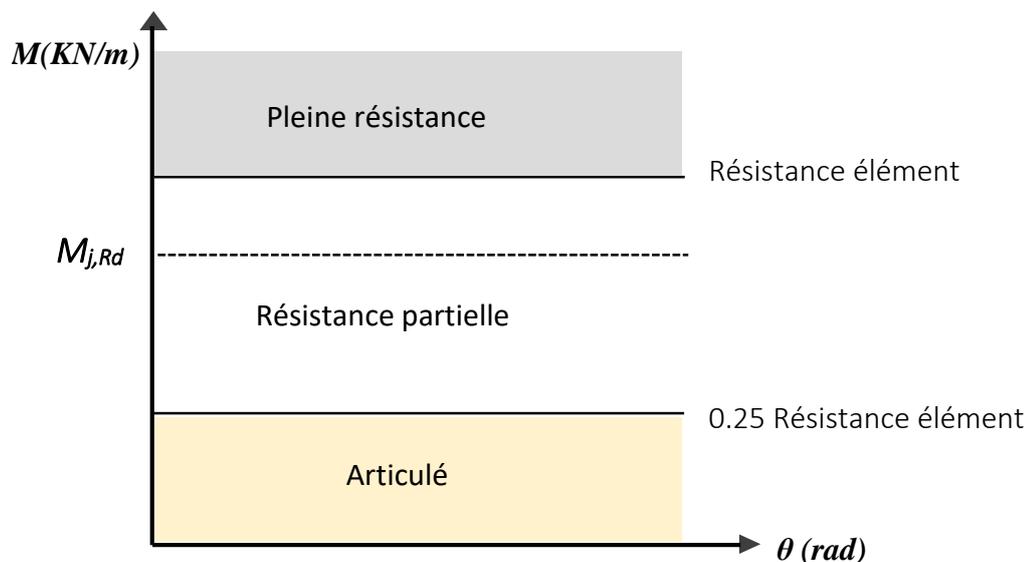


Figure I.19 – Limites de classification par résistance.

### I.4.4 – Classification par capacité de rotation

Les assemblages peuvent être classifiés en fonction de la capacité de rotation. Cette classification constitue une mesure de leur capacité de déformation par rapport à celle de la poutre assemblée. L'intérêt pratique d'une telle classification est de contrôler la plasticité entre la poutre et l'assemblage afin d'éviter une ruine fragile prématurée d'un côté et d'un autre côté, de vérifier si une analyse globale plastique peut être effectuée pour atteindre un mécanisme de ruine plastique ce qui conduit à la formation des rotules plastiques dans un certain assemblage. D'après [6] [7] [8] ils ont classifié les assemblages par leur capacité de rotation par rapport à celle de la poutre en trois classe: ductile, semi-ductile et fragile (voir la figure I.20).

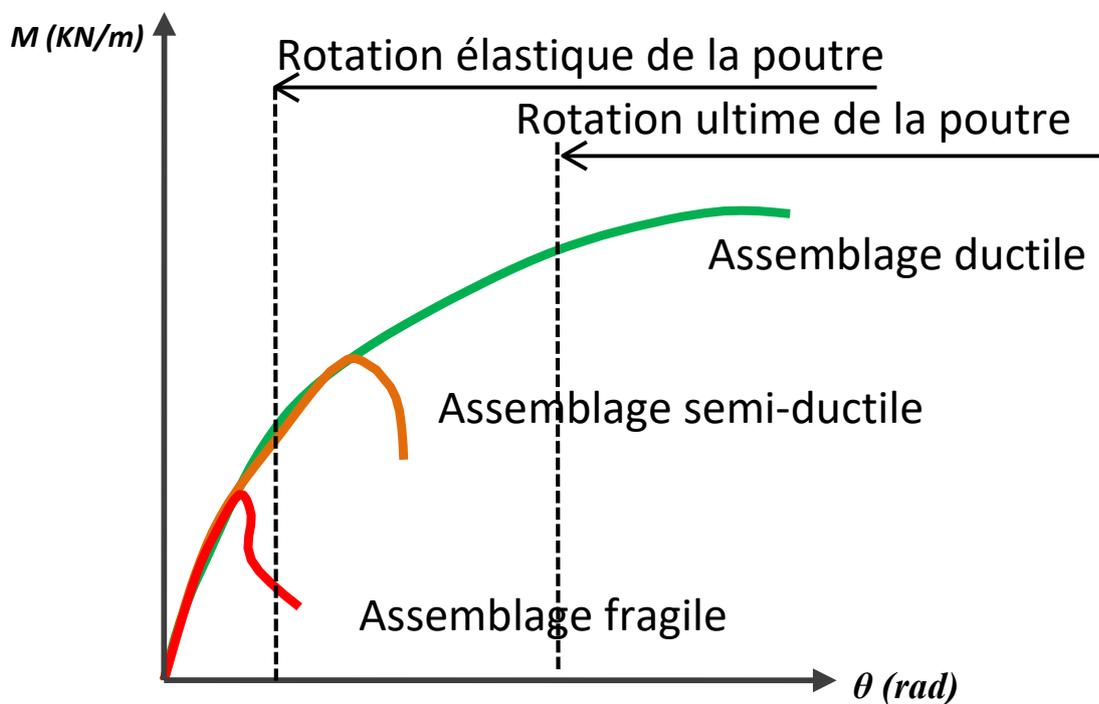


Figure I.20 – Limites de classification par rotation.

**Remarque 01 :** Cette classification reste un paramètre difficile à évaluer et l'EC3 ne propose aucune limite en termes de capacité de rotation.

**Remarque 02 :** Il est seulement recommandé que le moment résistant de calcul  $M_{j,Rd}$  de l'assemblage soit au moins égal à 1,2 fois la résistance plastique de calcul  $M_{b,Rd}$  de la section de la poutre attachée pour une analyse globale plastique.

### **I.5 – conclusion**

Ce chapitre sur les assemblages dans les structures métalliques a permis une étude générale des différentes méthodes d'assemblage utilisées dans le domaine de la construction et de l'ingénierie des structures. Nous avons présenté les moyens d'assemblage tels que la soudure et les assemblages boulonnés, en analysant les procédés de soudage, leurs avantages et inconvénients, ainsi que les différents types de soudures. De plus, nous avons effectué une analyse approfondie des caractéristiques géométriques et mécaniques des boulons, tout en étudiant les principes de transmission des efforts.

En poursuivant notre recherche, nous nous sommes concentrés sur les configurations spécifiques des assemblages poutre-poteau, en mettant en évidence l'assemblage par platine d'about comme exemple concret. Nous avons également exploré la classification générale des assemblages en fonction de critères tels que les normes EC3, la rigidité, la résistance et la capacité de rotation.

En résumé, ce chapitre nous a permis de saisir pleinement l'importance des méthodes d'assemblage dans la construction de structures métalliques. Nous avons acquis des connaissances approfondies sur les différentes techniques d'assemblage, en comprenant leurs avantages et inconvénients, ainsi que leur classification selon divers critères.

Sur la base de ces fondations solides, nous sommes désormais prêts à approfondir notre exploration des sujets avancés liés aux assemblages dans les chapitres à venir.

# Chapitre II

**Les problèmes de contact dans les structures  
métalliques**

## II.1 – Introduction

Dans les problèmes de mécanique des solides et des structures, il existe trois formes de non-linéarité :

- Les non-linéarités de type matérielles portent sur la loi de comportement du matériau, telles que la plasticité, l'endommagement, etc ;
- Les non-linéarités de type géométrique sont prises en compte en cas de grandes déformations ou de grands déplacements, lorsque la configuration déformée ne peut plus être confondue avec la configuration non déformée ;
- Les non-linéarités de type contact sont associées au fait que dans un contact parfait entre deux solides, du décollement ou du glissement peut apparaître.

Les non-linéarités de type contact sont parmi les cas les plus difficiles à traiter car elles mettent en jeu des changements brusques de comportement. En d'autres termes, l'étude des contacts entre les solides qui composent une structure est délicate à mettre en œuvre car on maîtrise difficilement tous les paramètres suivants :

- La forme et les états des surfaces en contact ;
- La vitesse relative ;
- Les conditions de lubrification (cas des pièces mécaniques) ;
- La température ;
- La répartition des pressions de contact.

Les applications dans lesquelles interviennent des problèmes de contact avec frottement sont nombreuses. Le traitement numérique des problèmes de contact engendre de nombreuses difficultés. Contrairement aux conditions aux limites classiques, de type déplacements imposés ou forces imposées, les problèmes de contact sont généralement définis comme des problèmes de conditions aux limites dans lesquels deux corps interagissent selon le principe des milieux continus. Les surfaces de contact et les intensités des contraintes sont les inconnues du problème. Avec les récents développements de la méthode des éléments finis associée à des méthodes numériques adéquates, aujourd'hui, on peut traiter ce genre de problèmes avec précision et dans un temps record.

### II.1.1 – L'aire de contact

L'aire de contact correspond à la surface de contact entre deux solides, définie par leur forme géométrique nominale.

### II.1.2 – Les pressions de contact

Les pressions de contact désignent les forces et les réactions appliquées entre deux solides en contact par unité de surface. Leurs points d'application se trouvent uniquement sur l'aire de contact.

### II.1.3 – Les types de contacts

On distingue deux types de contacts :

**Le contact bilatéral** : le contact est maintenu indépendamment de l'application de forces, de direction et d'orientation ;

**Le contact unilatéral** : le contact est maintenu si l'application des efforts des solides les uns contre les efforts de l'autre.

Du point de vue de la zone de contact, on peut distinguer trois modes de contacts :

**Le contact surfacique** : la zone de contact est initialement une surface. Exemple **A**, le contact de deux surfaces circulaires ;

**Le contact linéique** : la zone de contact est initialement une ligne. Exemple **B**, le contact d'un cylindre avec un autre cylindre ;

**Le contact ponctuel** : la zone de contact initiale se résume à un point. Exemple **C**, le contact entre un cône et un cylindre.

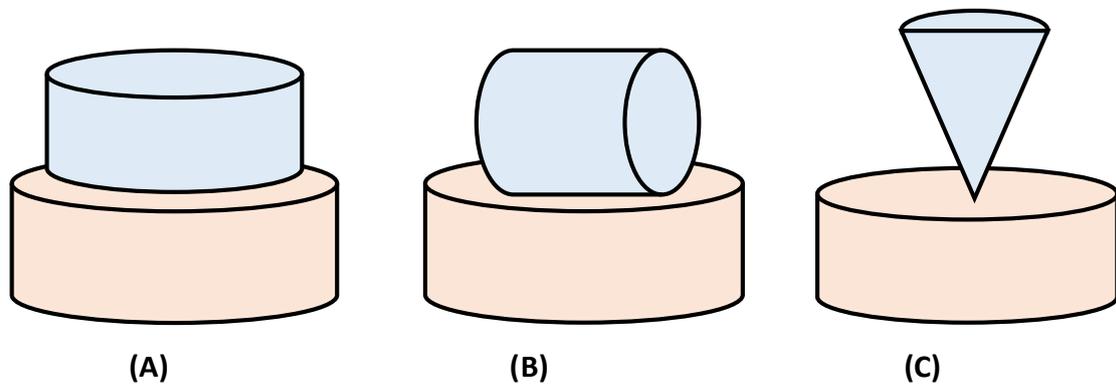


Figure. II.1 – Différents modes de contacts.

### II.1.4 – Condition de non pénétration

Le contact en général est une condition qui est définie entre deux corps A et B, afin d'empêcher la pénétration de l'un dans l'autre. Autrement dit, quelles que soient les forces appliquées sur le corps A, les points appartenant à la surface de ce dernier qui sont en contact avec le corps B doivent se trouver au maximum au même endroit que les points situés à la surface de contact du corps B. Cette condition est connue sous le nom de "condition de non-pénétration"

$$U_n^c = U_n^1 - U_n^2$$

### II.2 – Les frottements

Le frottement est la relation qui existe entre les forces tangentes (forces de frottement) sur la zone de contact et le mouvement tangentiel relatif des deux corps. Sa formule est donnée comme suit :

$$F = \mu N \tag{II.2}$$

Avec :

F : force de frottement ;

$\mu$  : coefficient de frottement ;

N : force normale.

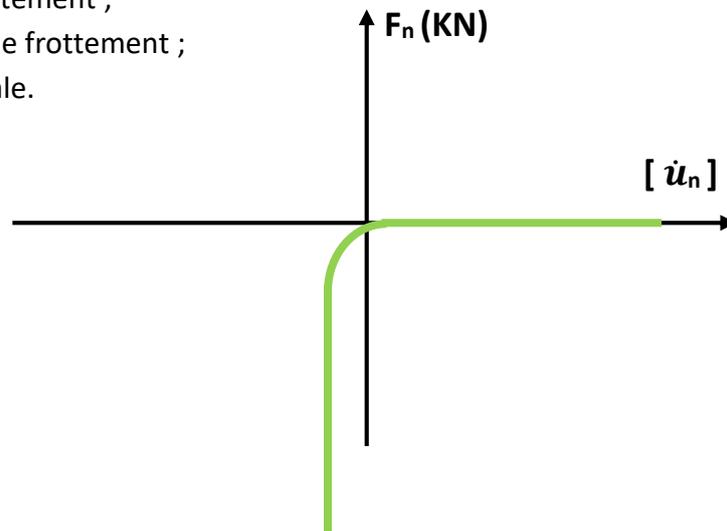


Figure. II.2 – Régularisation de loi de contact unilatéral.

### II.2.1 – Les lois de frottement existantes dans la littérature

Une loi de frottement doit essentiellement tenir compte de trois phénomènes :  
L'existence d'un seuil d'effort en dessous duquel aucun glissement n'est possible.  
Une éventuelle dépendance de ce seuil vis-à-vis de l'intensité des efforts normaux appliqués.

L'existence, dans le cas d'un déplacement de glissement, d'une relation entre les forces de frottement et la vitesse de glissement.

Il est clair que ces relations de frottement ne doivent intervenir que lorsqu'il n'y a pas de décollement sur la zone de contact. Pour pouvoir définir les lois de frottement, on définit d'abord le glissement (**voir l'équation II.3**) et la vitesse de glissement (**voir l'équation II.4**) par les formules suivantes :

$$u_t = ((u_2 - u_1) - (u_2 - u_1) \cdot n) \cdot n \quad (\text{II.3})$$

$$u_t = \frac{\partial u_t}{\partial t} \quad (\text{II.4})$$

Avec :

$u_1, u_2$  : vecteurs de glissements ;

$u_t$  : glissement ;

$n$  : vecteur normal.

### II.2.1.1 – La loi de Tresca

Parmi les lois de frottement, la loi de Tresca semble être relativement la plus simple et la plus facile à utiliser en simulation numérique. La raison est que le seuil de glissement utilisé dans cette loi est à la fois constant et indépendant des intensités des pressions de contact.

Elle s'écrit de la manière suivante :

Soient  $F_n$  et  $F_t$  les composantes normales et tangentielles des forces de contact respectivement, et telles que :

$$\left| \begin{array}{ll} \text{Si } F_t \leq g & \text{alors } \dot{u}_t = 0 \quad (\text{Adhérence}) \\ \text{Si } F_t = g & \text{alors } \exists \lambda > 0 \text{ tel que } \dot{u}_t = -\lambda F_t \quad (\text{Glissement}) \end{array} \right. \quad (\text{II.5})$$

Où  $g$  est un seuil d'adhérence/glissement fixé à priori. Il dépend, entre autres, de la limite d'élasticité du matériau. Toutefois, cette loi demeure non linéaire. En effet, nous pouvons observer la non-linéarité de cette loi sur la courbe présentée ci-dessous (voir la figure II.3).

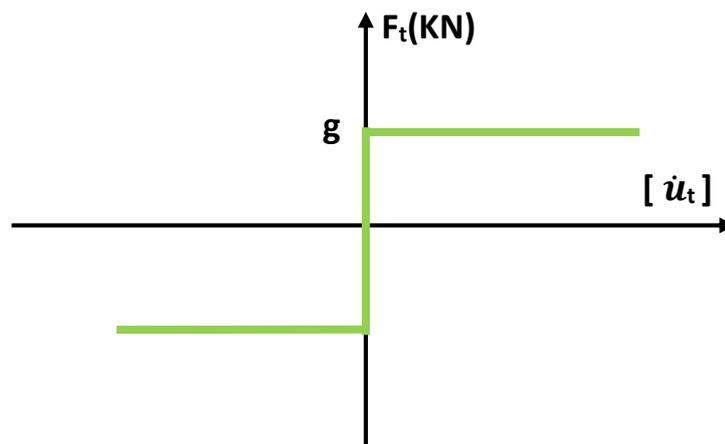


Figure. II.3 – loi de TRESCA.

### II.2.1.2 – La loi de frottement de Coulomb

Dans la loi précédente, le seuil  $g$  de glissement est indépendant de l'intensité des efforts normaux. Ce qui ne correspond pas à la réalité. Pour tenir compte de cette dépendance, Coulomb (1785) a modifié cette loi en adoptant un seuil  $g$  proportionnel à l'effort normal.

$$\left| \begin{array}{ll} \text{Si } F_t \leq \mu F_n & \text{alors } \dot{u}_t = 0 \quad (\text{Adhérence}) \\ \text{Si } F_t = \mu F_n & \text{alors } \exists \lambda > 0 \text{ tel que } \dot{u}_t = -\lambda F_t \quad (\text{Glissement}) \end{array} \right. \quad (\text{II.6})$$

Avec  $\mu$ , le coefficient de frottement qui dépend des états des surfaces en contact, la courbe de cette loi est tracée sur la figure suivante (voir la Figure II.4).

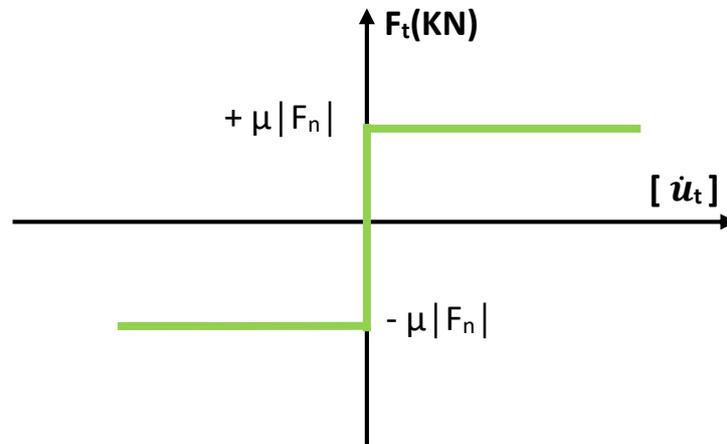


Figure. II.4 – loi de COULOMB.

Le lieu géométrique de l'extrémité du vecteur force de contact peut être représenté sous forme d'un cône, en 2D (voir la figure II.5) ou en 3D (voir la figure II.6). Ce cône est appelé le cône de Coulomb. L'enveloppe de ce cône représente la surface seuil du glissement, dont la définition et l'utilisation sont similaires à celles de la surface seuil en plasticité.

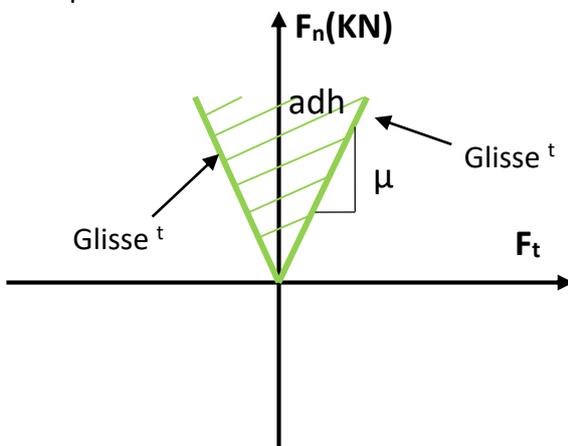


Figure. II.5 – cône de COULOMB en 2D.

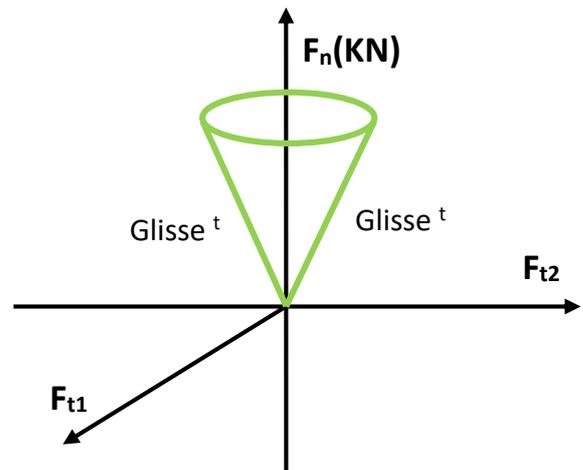


Figure. II.6 – cône de COULOMB en 3D

Les inconvénients majeurs de la loi de Coulomb sont les suivants :

- Le manque de relation biunivoque entre les forces de frottement et la vitesse de glissement. En effet, il n'est pas possible de déterminer la vitesse de glissement qui correspond à une force de frottement située sur le seuil de glissement en utilisant cette loi ;
- Le caractère non différentiable de la loi ;
- Le changement brutal de comportement au passage adhérence/glissement. Ces inconvénients sont similaires à ceux d'une loi de plasticité parfaite.

### II.2.1.3 – La loi de Coulomb régularisée

Pour remédier à ces inconvénients, il est souvent nécessaire d'utiliser des lois régularisées qui sont plus douces. Une loi régularisée autorisant un glissement élastique réversible, paramétrée par une raideur élastique  $K_e$ , est souvent utilisée. Nous pouvons l'observer sur la courbe suivante (voir la figure II.7). Toutefois, évaluer cette raideur est difficile car elle dépend essentiellement de l'élasticité des aspérités des zones en contact. Sa valeur est généralement très grande pour être proche de la loi de Coulomb, ce qui peut entraîner des problèmes numériques d'instabilités lors de la résolution.

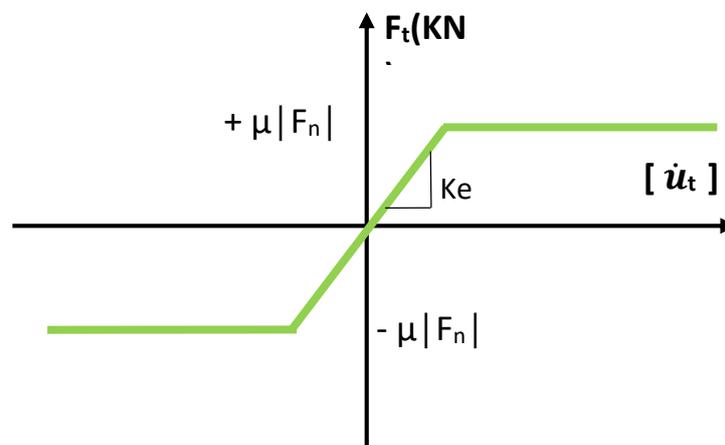


Figure. II.7 – loi de COULOMB régularisée.

Nous signalons également que pour la loi de Coulomb régularisée, l'inconvénient majeur de la relation non biunivoque entre les efforts et les vitesses lorsqu'il y a un glissement irréversible est toujours présent.

### II.2.1.4 – Autres lois de frottement

Parmi les lois les plus couramment utilisées, nous pouvons citer la loi de Norton-Hoff (voir la figure II.8) qui s'écrit sous la forme suivante :

$$F_t = \mu \cdot f_n \cdot \dot{u}_t^{(\rho-1)} \cdot \dot{u}_t \quad (II.7)$$

Avec :

$\mu$  = coefficient de frottement

$\dot{u}_t$  = vitesse de glissement

$F_n$  = force normale

$\vec{u}_t$  = vecteur vitesse de glissement

$\rho$  = seuil de glissement

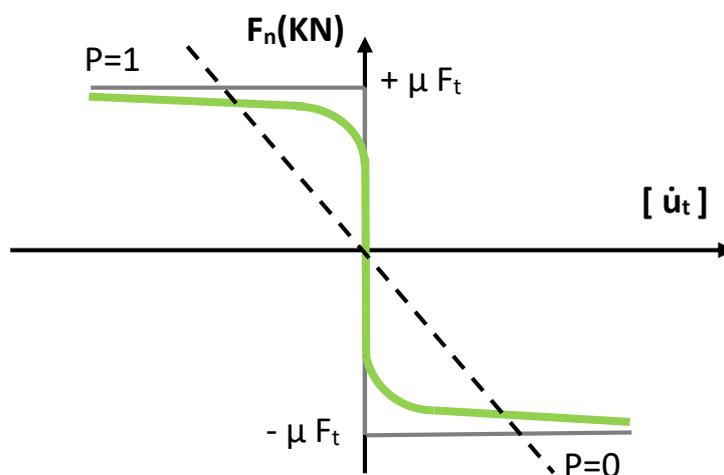


Figure. II.8 – loi de NORTON-HOFF.

### II.2.1.5 – La Loi de Coulomb en quasi statique

Dans le cas de problèmes statiques ou monotones quasi-statiques, la loi de Coulomb peut être réduite à une relation entre les forces de frottement et les déplacements de glissement, plutôt qu'à une relation entre les forces de frottement et la vitesse de glissement.

$$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Si } F_t \leq \mu F_n & \text{alors } u_t = 0 \quad (\text{Adhérence}) \\ \text{Si } F_t = \mu F_n & \text{alors } \exists \lambda > 0 \text{ tel que } u_t = -\lambda F_t \quad (\text{Glissement}) \end{array} \right. \quad (\text{II.8})$$

Toutefois, cette formulation ne peut être adoptée et utilisée que si la variation des efforts est monotone en tout point de la zone de contact, ce qui est le cas des pieux en contact avec le sol.

**II.3 – Formulation mathématique du problème de contact**

Considérons le problème du contact unilatéral entre deux solides élastiques notés  $\Omega^1$  et  $\Omega^2$  respectivement (voir la figure II.9). Nous supposons que chaque frontière  $\partial\Omega^l$  de  $\Omega^l$   $l = 1,2$ . Est divisée en trois parties :

- Sur la première partie, notée  $\partial_1\Omega^l$ , nous supposons que le champ de déplacement est donné par :

$$U_{\partial_1\Omega^l}^l = U_d^l, \quad l = 1,2 \tag{II.9}$$

Par souci de simplicité, on supposera que :

$$U_d^l = 0, \quad l = 1,2 \tag{II.10}$$

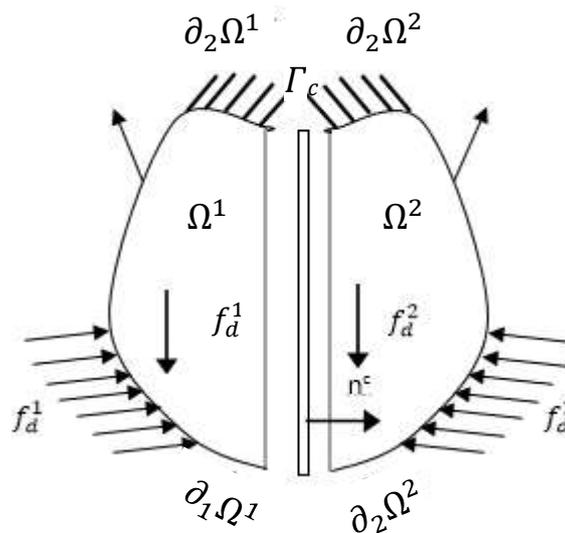
- Sur la seconde partie notée  $\partial_2\Omega^l$ , une densité surfacique de forces  $F_d^l$  est appliquée
- La dernière partie (complémentaire) notée  $\partial_c\Omega^l$ , telle que  $\partial_c\Omega^l = \partial\Omega^l - (\partial_1\Omega^l \cup \partial_2\Omega^l)$  Est la zone de contact.

Nous supposons que  $\partial_c\Omega^1 = \partial_c\Omega^2$  que nous noterons  $\Gamma_c$ .

Par ailleurs, les corps  $\Omega^l$   $l = 1,2$ , sont soumis à des densités de forces volumiques  $f_d^l$ .

Nous supposons que le tenseur des déformations  $\epsilon$  est linéarisé et nous noterons  $k^l$ , l'opérateur d'élasticité du matériau associé à  $\Omega^l$ .

$n^l$ : Est la normale à la frontière de  $\Omega^l$  orientée positivement vers l'extérieur.



**Figure. II.9 – Deux corps élastiques déformables en contact unilatéral.**

Nous considérons la zone de contact  $\Gamma_c$  comme une entité mécanique à part entière munie de sa propre loi constitutive. Pour cela, choisissons l'orientation positive de la normale à  $\Gamma_c$ , en posant  $n^c = n^1$  et introduisons alors sur l'interface  $\Gamma_c$ , les fonctions  $W^1, W^2, R^1, R^2$  et  $R^C$  qui représentent :

Les deux champs de déplacement  $W^1$  et  $W^2$  (sur chaque côté de l'interface  $\Gamma_c$ ), les deux champs de densité de forces surfaciques  $R^1$  et  $R^2$  (densité des efforts de réaction transmis entre  $\Omega^1$  et  $\Omega^2$ ), et qui correspondent aux pressions de contact, et un champ intérieur à l'interface, de densité de forces surfaciques  $R^C$  tel que l'équilibre interne de l'interface soit représenté par :

$$R^C = R^1 \quad \text{et} \quad R^C = -R^2 \quad \text{sur} \quad \Gamma_c \quad (\text{II.11})$$

$$\text{Et tel que :} \quad R^l = \sigma^l : n^l \quad l=1,2 \quad (\text{II.12})$$

### II.3.1 – Cas du contact unilatéral sans frottements

Soit  $W^c$  la définition, au niveau de l'interface, du saut en déplacement qui joue un rôle similaire à celui de la déformation, avec :

$$W^c = W_1 - W_2 \quad (\text{II.13})$$

Pour tout vecteur  $Z$ , soient :

$$Z_n = z^T n^c \quad \text{Et} \quad Z_t = Z - Z_n n^c \quad (\text{II.14})$$

Les champs de déplacement,

$$W^c = W_n^c n + W_t^c t \quad (\text{II.15})$$

Et les champs de densités de forces,

$$R^c = R_n^c + R_t^c \quad (\text{II.16})$$

Vérifient les conditions de contact sans frottements à l'interface  $\Gamma_c$ .

Ces conditions peuvent être formulées de la manière suivante :

$$W_n^c \leq 0 \quad (\text{II.17})$$

$$R_n^c \leq 0 \quad (\text{II.18})$$

$$W_n^c R_n^c = 0 \quad (\text{II.19})$$

$$R_t^c = 0 \quad (\text{II.20})$$

(L'inéquation II.17) indique qu'il ne peut y avoir que décollement et non pénétration.

(L'inéquation II.18) indique que les composantes normales des densités de réactions ne peuvent correspondre qu'à de la compression. (L'équation II.19) est appelée condition de complémentarité ; elle indique qu'en tout point il y soit contact, soit décollement.

Enfin, (l'équation II.20) statue sur la nullité des composantes tangentielles de vectrices densités de réactions. Ce qui reflète l'absence de frottements.

**II.3.2 – Cas du contact unilatéral avec frottements**

Nous adoptons comme loi de frottement, la loi de Coulomb en quasi statique. Les champs de déplacement  $W^C$  et les champs de densités de réactions  $R^C$  tels que définis dans le paragraphe précédent, vérifient les conditions de contact avec frottement à l'interface  $\Gamma_C$ .

Ceci peut être formulé de la manière suivante :

$$W_n^c = W_n^1 - W_n^2 \leq 0 \tag{II.21}$$

$$R_n^l \leq 0, \quad l = 1,2 \tag{II.22}$$

$$R_n^l W_n^c = 0, \quad l = 1,2 \tag{II.23}$$

$$|R_t^l| \leq \mu |R_n^l| \quad l = 1,2 \tag{II.24}$$

$$|R_t^l| < \mu |R_n^l| \rightarrow W_t^l = 0 \quad l = 1,2 \tag{II.25}$$

$$|R_t^l| = \mu |R_n^l| \rightarrow \exists \lambda \geq 0 \text{ tel que } W_t^l = -\lambda R_t^l, \quad l = 1,2 \tag{II.26}$$

**II.4 – Le cas particulier du problème de signorini**

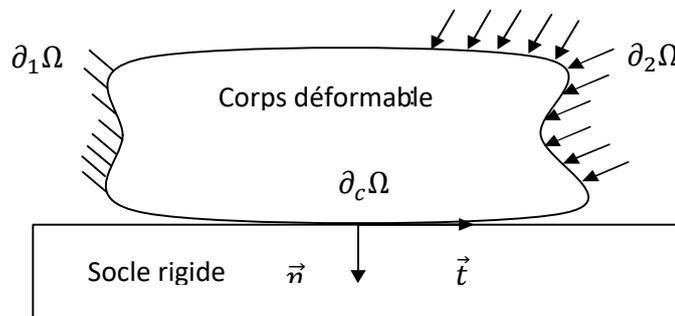
Ce Problème fut introduit, pour la première fois, par Signorini en 1933 en posant le problème général de l'équilibre d'un corps élastique en contact sans frottement sur un socle rigide. Dans ce cas, il ne s'agit plus (comme dans le cas du paragraphe précédent) du contact entre deux corps élastiques déformables, mais d'un corps élastique déformable appuyé sur un autre corps supposé indéformable. En effet, ce problème de Signorini, a trouvé un vaste champ d'applications dans les domaines de la mécanique que du génie civil Ce problème consiste à considérer le cas d'un solide  $\Omega$  élastique et déformable (**voir la figure II.10**), en contact avec un socle rigide indéformable. Soit  $\partial\Omega$  la frontière de  $\Omega$ , avec :

$$\partial\Omega = \partial_1\Omega \cup \partial_2\Omega \cup \partial_c\Omega \text{ et tel que } \partial_1\Omega \cap \partial_2\Omega \cap \partial_c\Omega = \emptyset$$

$\partial_1\Omega$  : est la zone sur laquelle le champ de déplacement est imposé ;

$\partial_2\Omega$  : La zone sur laquelle un champ de densités de forces surfaciques est appliqué ;

$\partial_c\Omega$  : est la zone de contact avec le socle rigide.



**Figure. II.10** – Corps élastique déformable en contact avec un socle rigide indéformable (problème de Signorini).

De la même manière que dans les cas précédents, en introduisant l'interface  $\Gamma_c$  tel que  $\Gamma_c = \partial_c \Omega$ , et sur laquelle nous définissons deux inconnues supplémentaires : le champ de déplacements  $W$ , ainsi que le champ de densité de réaction  $R$ , les conditions de contact peuvent être formulées de la manière suivante.

$$W_n \leq 0 \quad (\text{II.27})$$

$$R_n \leq 0 \quad (\text{II.28})$$

$$W_n R_n = 0 \quad (\text{II.29})$$

- Pour le cas sans frottements :

$$R_t \leq 0 \quad (\text{II.30})$$

- Pour le cas avec frottements de Coulomb :

$$|R_t| \leq \mu |R_n| \quad (\text{II.31})$$

$$|R_t| < \mu |R_n| \rightarrow W_t = 0 \quad (\text{II.32})$$

$$|R_t| = \mu |R_n| \rightarrow \exists \lambda \geq 0 \text{ Tel que } W_t = -\lambda R_t \quad (\text{II.33})$$

## II.5 – Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé les problèmes de contact entre deux corps avec frottement. Nous avons examiné deux lois de frottement principales, à savoir la loi de Coulomb et la loi de Tresca. Parmi ces lois, la loi de Coulomb semble être plus réaliste. Cependant, cette loi présente quelques difficultés, notamment en trois dimensions, pour converger vers une solution exacte lorsque le coefficient de frottement atteint des valeurs élevées.

# Chapitre III

**Caractérisation des assemblages boulonnés par  
platine d'extrémité**

### III.1 – Introduction

Les études analytiques, bien que limitées dans leur portée, ont toujours joué un rôle crucial dans l'avancement des recherches sur les assemblages en général. Dans ce chapitre, nous aborderons l'une des méthodes les plus couramment utilisées pour le calcul et la caractérisation des assemblages

### III.2 – Présentation de la méthode des composantes

La compréhension du comportement mécanique d'un assemblage, en termes de résistance, rigidité et capacité de rotation, est un phénomène complexe. Pour analyser ce comportement complexe, la méthode des composantes est largement utilisée. Cette méthode consiste à décomposer l'assemblage en différents éléments, où chaque élément représente une composante dont le comportement est étudié de manière individuelle. Ainsi, le comportement mécanique de l'assemblage dans son ensemble peut être déterminé en combinant les contributions des différentes composantes, en utilisant un modèle mécanique de type ressort.

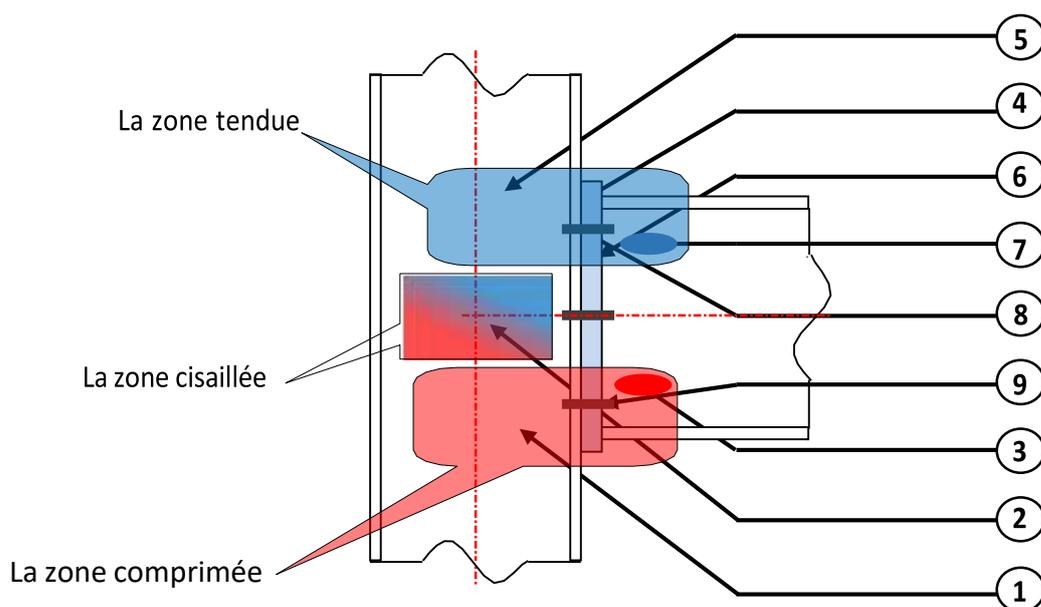
L'application de la méthode des composantes se déroule en trois étapes essentielles :

- **Étape 01** : Identification des composantes ;
- **Étape 02** : Caractérisation des composantes ;
- **Étape 03** : Assemblage des composantes.

Ces étapes permettent d'analyser de manière approfondie le comportement mécanique de l'assemblage, en prenant en compte les propriétés individuelles de chaque composante et leur interaction au sein de l'ensemble. [L'EC3]

#### III.2.1 – Identification des composantes

L'identification des composantes consiste à déterminer les éléments actifs au sein de l'assemblage qui sont soumis à des forces de compression, de traction et de cisaillement (voir le tableau III.1). La figure ci-dessous illustre les différentes composantes d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité, conformément à l'approche de l'Eurocode 3 (voir la figure III.1).



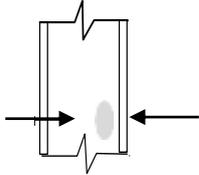
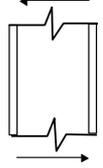
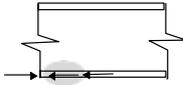
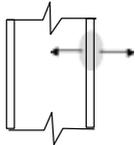
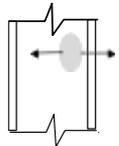
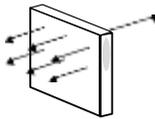
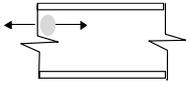
**Figure. III.1** – Composantes d'un assemblage poutre-poteau boulonné par platine d'extrémité.

À partir de la **Figure III.1**, les composantes de base identifiées en fonction des sollicitations qu'elles subissent sont les suivantes :

- **Région de compression** : âme de poteau, semelle et âme de poutre ;
- **Région de traction** : âme de poteau, boulons et âme de poutre en traction, semelle de poteau et platine d'about en flexion ;
- **Région de cisaillement** : Panneau d'âme de poteau.

Chaque composante élémentaire possède sa propre résistance et rigidité en traction, en compression ou en cisaillement. Cependant, l'âme du poteau est soumise à une combinaison d'efforts de compression, de traction et de cisaillement. Cette combinaison de plusieurs composantes au sein du même élément d'assemblage peut entraîner des interactions de contraintes susceptibles de diminuer la résistance des composants élémentaires.

**Tableau III.1** – Liste des composantes d'un assemblage boulonné par platine d'extrémité

| N° | Composante                               |   |
|----|--|---|
| 1  | Ame de poteau en compression.            |    |
| 2  | Panneau d'âme de poteau en cisaillement. |    |
| 3  | Semelle et âme de poutre en compression. |    |
| 4  | Semelle de poteau en flexion.            |   |
| 5  | Ame de poteau en traction.               |  |
| 6  | Platine d'extrémité en flexion.          |  |
| 7  | Ame de poutre en traction.               |  |
| 8  | Boulon en traction.                      |  |
| 9  | Boulon précontraint                      |  |

### III.2.2 – Caractérisation des composantes

Chaque composante est caractérisée par sa résistance et sa rigidité, qui sont déterminées individuellement. Dans l'approche de l'Eurocode 3, l'assemblage est caractérisé par sa rigidité initiale, son moment résistant de calcul et sa capacité de rotation. Ces caractéristiques permettent au concepteur de déterminer la courbe moment-rotation calculée de l'assemblage, quel que soit le type d'analyse globale effectuée.

#### III.2.2.1 – Calcul de la rigidité initiale

La rigidité en rotation des assemblages soumis à la flexion est une caractéristique cruciale de leur comportement. Elle représente la résistance à la rotation de l'assemblage au début du chargement. Pour évaluer cette rigidité, prenons l'exemple d'un assemblage poutre-poteau par platine d'extrémité boulonnée, illustré dans **la figure III.2**. Le comportement de chaque rangée de boulons (i) résulte de la contribution des différentes composantes, qui dépendent du nombre de boulons en traction et de leur position. Ces composantes incluent l'âme du poteau en traction, la semelle du poteau en flexion, la platine d'extrémité en flexion et les boulons en traction, avec leurs coefficients de rigidité ( $k_i$ ) associés en série, comme indiqué dans **la figure III.2.A**.

Le déplacement  $\delta$  est calculé en utilisant le coefficient de rigidité  $k_i$ , qui permet de prendre en compte l'effet de chaque composante sur la rigidité totale de l'assemblage.

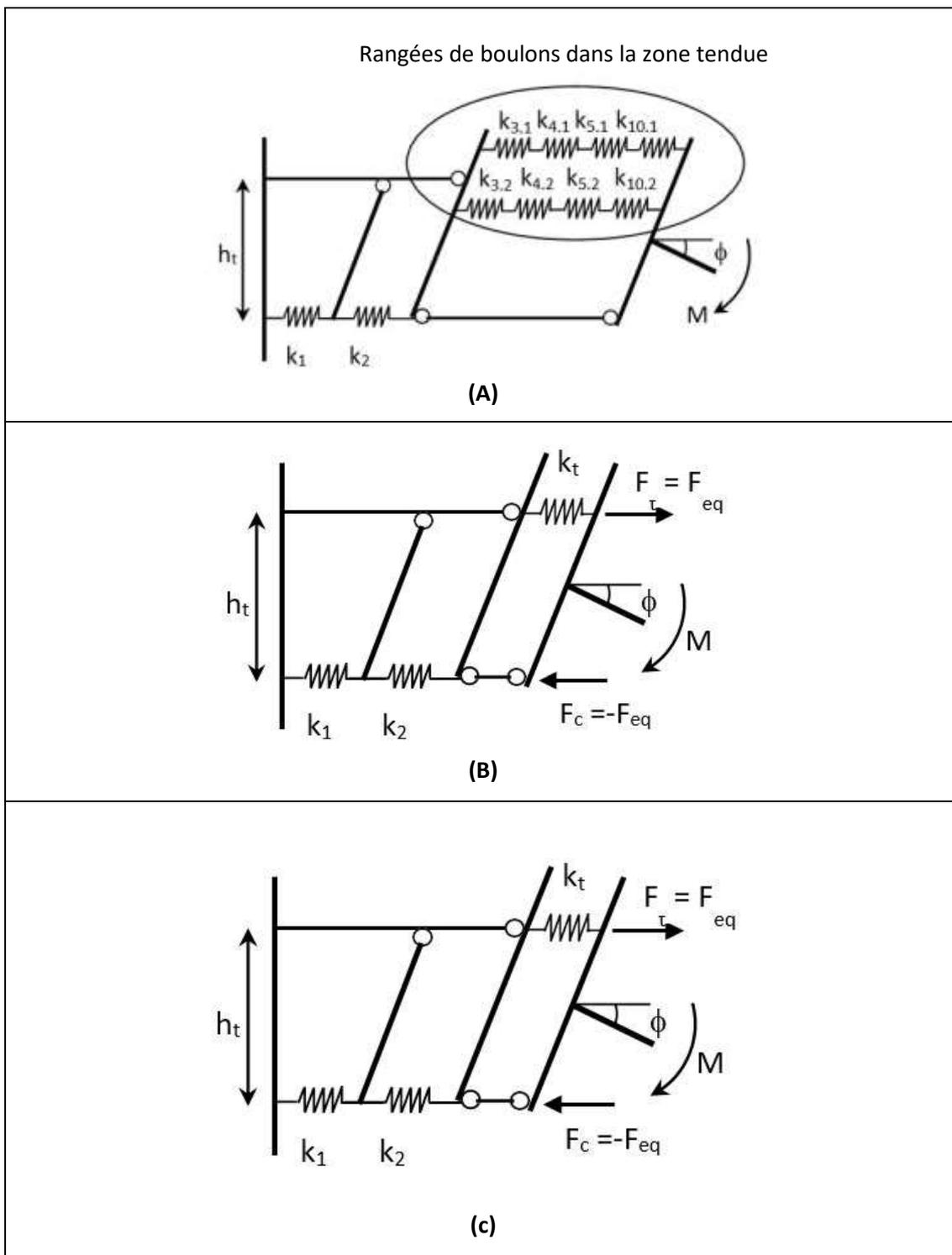
$$\delta_i = \frac{F_i}{K_i E} \quad (\text{III.1})$$

Avec :

$F$  : la force dans la composante ;

$k_j$  : le coefficient de rigidité ;

$E$  : le module d'élasticité de l'acier.



**Figure. III.2** – Approche EUROCODE 3 pour le calcul de la rigidité initiale d'un assemblage Poutre poteau par platine d'extrémité boulonnée

Chaque rangée de boulons en traction peut être regroupée en un seul coefficient de rigidité  $k_i^*$  en combinant les coefficients de rigidité des différentes composantes de cette rangée, comme illustré dans **la figure III.2.B**. Ainsi, pour chaque rangée de boulons, nous pouvons déduire :

$$K_i^* = \frac{1}{\frac{1}{K_{3,i}} + \frac{1}{K_{4,i}} + \frac{1}{K_{5,i}} + \frac{1}{K_{10,i}}} \quad (\text{III.2})$$

Où :

$k_{3,i}$ ,  $k_{4,i}$ ,  $k_{5,i}$  et  $k_{10,i}$  représentent respectivement les rigidités de l'âme du poteau en traction, de la semelle du poteau en flexion, de la platine d'extrémité en flexion et des boulons en traction.

#### III.2.2.2 – Calcul de la résistance

Le moment résistant désigne la valeur maximale de moment que l'assemblage est en mesure de supporter. Pour déterminer le moment résistant d'un assemblage poutre-poteau avec une platine d'extrémité boulonnée, il est nécessaire d'identifier les trois zones suivantes :

- La zone de traction de l'assemblage, qui est directement influencée par plusieurs facteurs, tels que la flexion de la plaque d'extrémité, la flexion de la semelle du poteau, la traction exercée par les boulons, la traction au niveau de l'âme du poteau et la traction au niveau de l'âme de la poutre.
- La zone de compression de l'assemblage, qui englobe l'âme du poteau ainsi que l'âme et la semelle de la poutre. Cette zone est soumise à des forces de compression qui doivent être prises en compte lors du calcul du moment résistant.
- La zone de cisaillement au niveau de l'âme du poteau, qui nécessite une évaluation distincte. Les contraintes de cisaillement jouent un rôle important dans la détermination du moment résistant de l'assemblage.

Le calcul du moment résistant en flexion de l'assemblage se fait selon la formule suivante :

$$M_{Rd} = \sum_{r=1}^{n_b} h_t F_{Rd,i} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

$F_{Rd,i}$  : Résistance de la rangée de boulons ( $i$ ) soumise à la traction ;

$n_b$  : Nombre de rangées de boulons en traction ;

$h_i$  : Distance de la rangée de boulons ( $i$ ) du centre de compression situé au milieu de la semelle comprimée de la poutre.

Lors de l'évaluation du moment résistant de calcul d'un assemblage poutre-poteau, il est important de prendre en compte les limitations liées à la résistance de la semelle de la poutre en compression ainsi que celle de l'âme du poteau en compression. Il est donc nécessaire de procéder à une vérification selon la formule suivante :

$$\sum_{j=1}^m F_j = F_{c,Rd} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

m : Indice de la dernière rangée supposée soumise à un effort de traction ;

$F_j$  : Effort de traction dans la rangée de boulon  $j$  ;

$F_{c,Rd}$  : Résistance de calcul de la semelle comprimée de la poutre.

L'évaluation de la résistance en traction des différentes rangées de boulons est effectuée en considérant des tronçons en té équivalents. Ainsi, trois modes de ruine sont possibles et nous pouvons associer à chacun d'eux une résistance en traction, qui dépend de la longueur efficace  $L_{eff}$  du tronçon.

#### III.2.2.3 – Détermination de la capacité de rotation

L'EC3 ne fournit pas de formule précise pour calculer la capacité de rotation des assemblages boulonnés. Cependant, le règlement stipule qu'un assemblage par platine d'about boulonnée est considéré comme ayant une capacité de rotation adéquate pour une analyse plastique si le moment résistant de l'assemblage est principalement influencé par la résistance de la semelle du poteau en flexion. Pour cela, l'épaisseur de la semelle, représentée par  $t$ , doit satisfaire la condition suivante :

$$t \leq 0,36d \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}} \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$d$  : Diamètre nominal du boulon ;

$f_{ub}$  : Résistance ultime du boulon en traction ;

$f_y$  : Limite d'élasticité.

Si la résistance calculée de cet assemblage est supérieure ou égale à 1,2 fois la résistance plastique calculée de la poutre, il n'est pas nécessaire de vérifier sa capacité de rotation. Cependant, dans le cas d'un assemblage à résistance partielle, il est crucial que la capacité de rotation ne soit pas inférieure à celle requise pour permettre le développement de toutes les rotules plastiques.

### III.2.3 – Assemblage des composantes

- Le passage des relations force déplacement de composantes individuelles à la courbe (moment-rotation) de l'assemblage s'obtient en satisfaisant aux exigences de compatibilité et d'équilibre, ainsi qu'aux limitations de résistance et de capacité de déformation.
- Suivant le niveau de précision désiré, l'assemblage des composantes peut mener. Soit aux seules propriétés clés de l'assemblage, soit à l'ensemble de la courbe de comportement ( $M - \phi$ ).

Puisque le modèle de composantes sophistiqué nécessite des boucles itératives suite à l'interaction complexe, les (Euro-codes) proposent le modèle de composantes simplifié où la somme des ressorts des composantes de base est déduite en ajoutant pas à pas les ressorts agissant en parallèle ou en série. [l'EC3]

### III.3 – Tronçon en té

L'une des composantes clés d'un assemblage boulonné avec une platine débordante de type poteau-poutre est le tronçon en té, qui constitue la zone tendue de l'assemblage. Ce tronçon en té peut être considéré à la fois comme un assemblage élémentaire autonome ou comme faisant partie d'une configuration plus complexe.

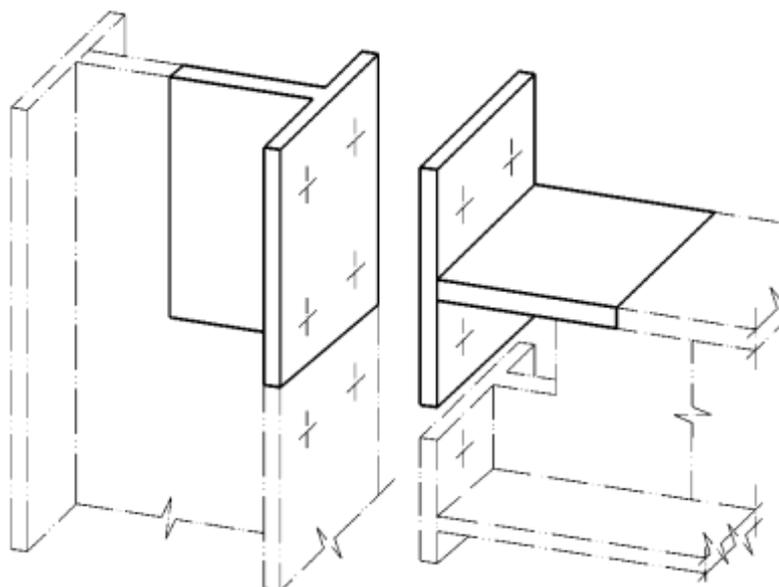


Figure. III.3 – Assemblage par platine d'extrémité sous forme de tronçons en té.

### III.3.1 – Fonctionnement du tronçon en té

La déformation du tronçon en té est influencée à la fois par le comportement des boulons soumis à la traction et par l'état de déformation de la semelle ou de la platine sollicitée en flexion. Un aspect important du comportement des tronçons en té réside dans le développement de forces de levier sous la semelle. Ces forces secondaires, qui s'ajoutent à la traction directe, peuvent entraîner une défaillance prématurée. **La figure III.4** présente une illustration du mécanisme de levier dans un tronçon en té, où une force  $F$  appliquée sur l'âme du tronçon génère des forces de levier  $Q$  en raison de la flexion de la semelle.

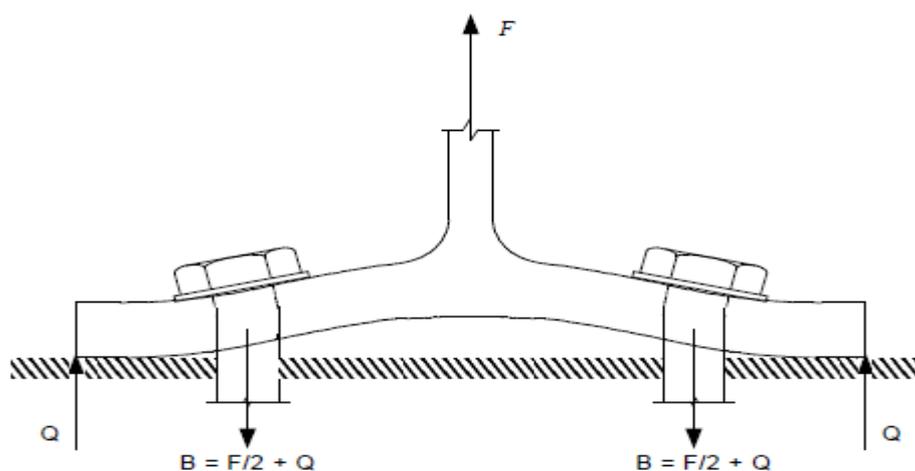


Figure. III.4 – mode de ruine du tronçon en té.

$$B = \left( \frac{F}{2} + Q \right) \quad (\text{III.6})$$

Avec :

$Q$  : force de levier = amplification de la traction (boulon) ;

$B$  : l'effort dans le boulon.

### III.3.2 – Modèle théorique du tronçon en té

La réponse globale en termes de loi force-déplacement est clairement définie dans les domaines élastique et plastique, et des règles de calcul ont été établies à cet égard. Selon l'EC3, les trois modes de rupture envisagés dépendent du rapport entre les résistances de la semelle du tronçon en flexion et celles des boulons en traction. Ces trois modes de rupture sont identifiés par la défaillance de la platine due à la formation d'un mécanisme plastique (mode 1), la défaillance mixte de la platine et des boulons (mode 2) ou la défaillance des boulons (mode 3) (voir figure III.5).

Figure 1 Figure. III.5 – mode de ruine du tronçon en té

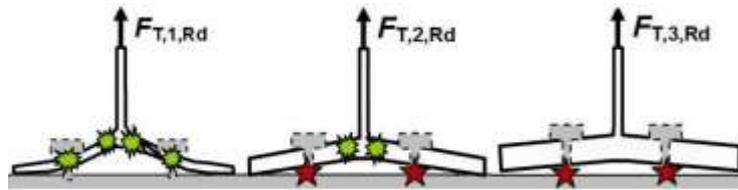


Figure. III.5 – mode de ruine du tronçon en té.

- **Mode 1** : Il se caractérise par la défaillance du tronçon en té par formation d'un mécanisme plastique, avant d'atteindre la rupture des boulons. Les lignes de plastification se forment au niveau des rangées de boulons et à la jonction des congés de raccordement.
- **Mode 2** : Ce mode correspond à l'atteinte de la résistance des boulons alors que les lignes de plastification se sont déjà développées à la jonction entre la semelle et l'âme du tronçon.
- **Mode 3** : Il est associé à la rupture des boulons. La grande rigidité des semelles du tronçon en té entraîne la séparation des plaques sans qu'un effet de levier ne se produise.

### III.3.3 – Résistance du tronçon en té

La résistance à considérer est celle donnée par la valeur minimale de ruine des trois modes  $F_{T,Rd} = \min(F_{T,Rd,1}, F_{T,Rd,2}, F_{T,Rd,3})$ . Celles-ci sont données par les équations suivantes :

**Mode 1 :**

$$F_{T,Rd,1} = \frac{4M_p + 2M_{bp}}{m} \quad (\text{III.7})$$

**Mode 2 :**

$$F_{T,Rd,2} = \frac{M_p + n \sum B_{T,Rd}}{m+n} \quad (\text{III.8})$$

**Mode 3 :**

$$F_{T,Rd,3} = \sum B_{T,Rd} \quad (\text{III.9})$$

Avec :

$n$  : nombre totale de rangées de boulon ;

$m$  : rangée dont la capacité de déformation est insuffisante ;

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

$M_{pb}$  : le moment plastique de la contre plaque ;

$M_{pl}$  : le moment plastique de la semelle.

Ils sont calculés en utilisant la valeur de la longueur efficace.

$$M_{pl,1,Rd} = \frac{0,25 \sum l_{eff,1} * (t_f)^2 * f_y}{\gamma_{m0}} \quad (III.10)$$

$$M_{pl,2,Rd} = \frac{0,25 \sum l_{eff,2} * (t_f)^2 * f_y}{\gamma_{m0}} \quad (III.11)$$

$$M_{bp,Rd} = \frac{0,25 \sum l_{eff,1} * (t_{bp})^2 * f_{y,bp}}{\gamma_{m0}} \quad (III.12)$$

Avec :

$f_{y,bp}$  : limite d'élasticité des contre plaques ;

$t_{bp}$  : épaisseur de contre plaque ;

$f_{T,Rd}$  : Résistance à la traction d'un boulon ;

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

### III.3.4 – Rigidité du tronçon en té

Selon l'EC3, pour évaluer la rigidité initiale d'un tronçon en té avec une seule rangée de boulons, il est nécessaire de prendre en compte la contribution de différents éléments en série. Cela comprend la semelle du poteau (premier tronçon), la platine d'about (deuxième tronçon) et les boulons avec leurs coefficients de rigidité respectifs. Ainsi, la rigidité de la rangée de boulons est déterminée de la manière suivante :

$$K_{ini} = \frac{E}{\left[ \frac{1}{K_f} + \frac{1}{K_p} + \frac{1}{K_b} \right]} \quad (III.13)$$

Où :

$K_f$ ,  $K_p$  et  $K_b$  sont les rigidités de la semelle du poteau, de la platine d'about et des boulons.

### III.3.4 – Longueur efficace du tronçon en té

L'équivalence entre un tronçon en té et une composante d'un assemblage boulonné par une platine d'extrémité est exprimée par la détermination d'une longueur équivalente, appelée longueur efficace et notée  $L_{eff}$ . La longueur efficace d'un tronçon en té équivalent est une valeur théorique qui ne correspond pas nécessairement à la longueur physique de la composante de base qu'elle représente.

### III.4 – Conclusion

L'objectif de la méthode des composantes est d'identifier les caractéristiques clés d'un assemblage, à savoir le moment rotation et la rigidité initiale. Il convient de souligner que la résistance du moment et la rigidité de l'assemblage dépendent directement de la résistance des composants les plus faibles.

# Chapitre IV

**Résolution du problème de contact par la méthode  
des éléments fini**

### IV.1 – Introduction

La méthode des éléments finis (MEF) représente l'aboutissement d'une suite de cours traitant des théories, méthode et outils utilisées pour calculer la résistance de pièce, d'assemblage et de structure. Par conséquent, aborder un élément fini (EF) en mécanique demande de très bonnes connaissances en résistance des matériaux et plus généralement en élasticité. Ainsi, la base de l'application de la MEF en mécanique est la théorie des poutres ainsi que la théorie plus générale de l'élasticité.

La méthode des éléments finis est une méthode générale d'analyse structurale dans laquelle la solution d'un problème dans la mécanique continue est rapprochée par l'analyse d'un assemblage des éléments finis qui sont reliés ensemble à un nombre de points nodaux finis et représentent le domaine de solution du problème. Elle est maintenant bien admise en tant qu'une technique générale plus puissante pour la solution numérique des problèmes de technologie variée. Les applications s'étendent de l'analyse de contrainte des solides la solution des phénomènes acoustiques, de la physique et des problèmes dynamique liquides.

### IV.2 – Avantages et inconvénient de la méthode des éléments finis

#### IV.2.1 – Les Avantages

- La puissance de la méthode des éléments finis réside essentiellement dans sa généralité et sa souplesse ;
- Elle peut être applicable à une variété de problèmes physique. La géométrie du domaine peut être quelconque, les forces et les conditions aux limites peuvent être aussi de nature quelconque ;
- La méthode des éléments finis réside dans le fait que le modèle qu'elle utilise est très proche de la structure réelle.

#### IV.2.2 – Les inconvénients

- Elle donne un résultat numérique particulier pour un problème spécifique ;
- Les programmes généraux de calcul doivent être fortement documentés ;
- L'expérience et un grand sens de l'ingénieur sont indispensables à la définition d'un bon modèle.

### IV.3 – mise en œuvre de la méthode EF

Pour appliquer la méthode des éléments finis on passe par les différentes étapes qui elle sera décrites ci-dessous d'une manière générale.

#### IV.3.1 – Choix du type d'élément finis

La première étape consiste à choisir le type d'élément le plus adapté au problème donné, ensuite on discrétise le milieu continu en un certain nombre d'éléments. En

général, les points suivants sont à prendre en considération dans la sélection du type d'élément

### IV.3.2 – Qualité d'un élément finis

Un bon élément fini doit réunir les propriétés suivantes :

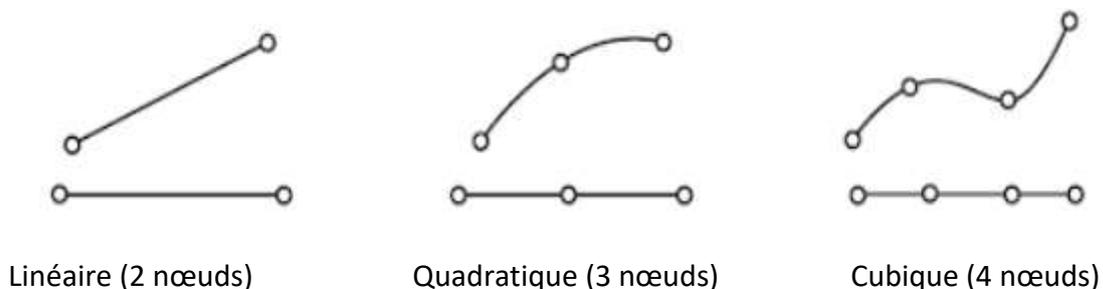
- Aucun défaut de base ;
- Convergence rapide ;
- Bonne précision ;
- Qualités de convergence et précision conservée pour une distorsion raisonnable ;
- Vecteurs forces consistants ;
- souplesse d'emploi ;
- Connexion (conforme) possible avec d'autres modèles ;
- Dérivation théorique simple et claire ;
- Programmation claire et efficace.

### IV.3.3 – Type d'élément finis

La MEF utilise de nombreux types d'éléments qui ont été développés, au cours du temps, pour des besoins spécifiques. Ces éléments se distinguent en termes de forme géométrique et de comportement sous-jacent.

#### IV.3.3.1 – Les éléments unidimensionnels (1D)

Ces éléments sont illustrés (**voire la figure IV.1**) se distinguent uniquement par leur degré, qui est directement relié à leur forme et au nombre de nœuds qui définissent.



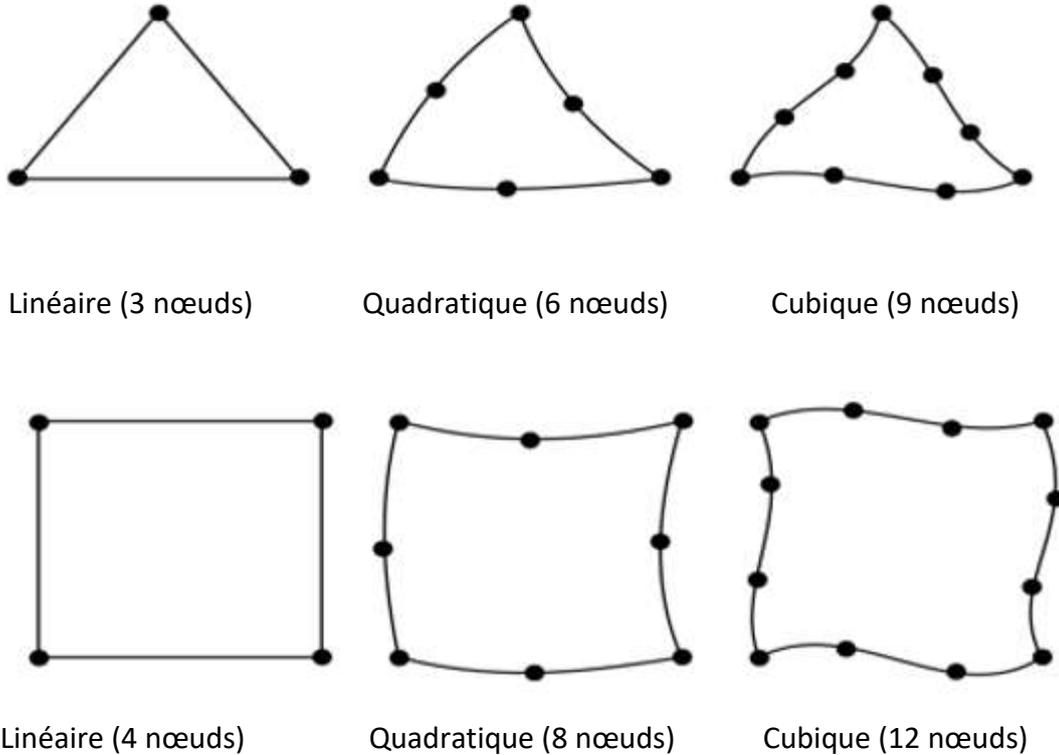
**Figure. VI.1** – trois types de forme d'élément à une dimension.

#### IV.3.3.2 – Les éléments bidimensionnels (2D)

Les éléments à deux dimensions sont de deux types principaux :

- Les éléments triangulaires (à trois côtés) ;
- Les éléments quadrangulaires (à quatre côtés).

Ces éléments sont illustrés (**voire la figure IV.2**) se distinguent ensuite également, pour chaque type, par leur degré qui est directement relié à leur forme et au nombre de nœuds qui les défissent, tout comme pour les éléments à une dimension.



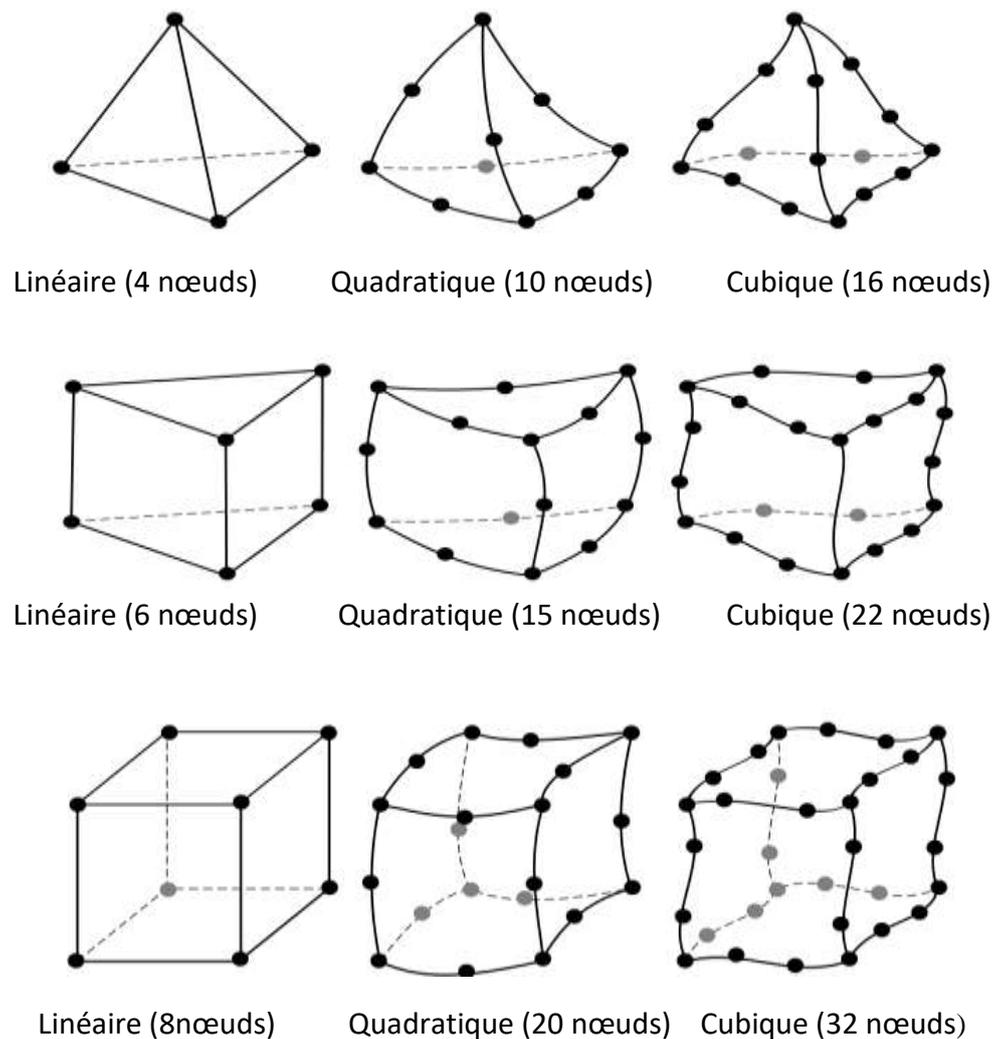
**Figure. IV.2** – types de formes d'élément à deux dimensions.

#### IV.3.3.3 – Les éléments tridimensionnels (3D)

Les éléments à trois dimensions sont de trois types principaux :

- Les éléments tétraédriques (à quatre faces triangulaires)
- Les éléments hexaédriques (à six faces quadrangulaires)
- Les éléments pentaédriques ou prismatique (à deux faces triangulaires et trois faces quadrangulaires).

Ces éléments sont illustrés (**voire la figure IV.3**) se distinguent ensuite également, pour chaque type, par leur degré qui est directement relié à leur forme et au nombre de nœuds qui les défissent, tout comme pour les éléments à une dimension.



**Figure. IV.3** – types de forme d'éléments à trois dimensions.

#### IV.3.4 – Démarche de la construction d'un élément finis

Les principales étapes de construction d'un modèle finis, sont les suivantes [9] :

- Discrétisation du milieu continu en sous domaines
- Construction de l'approximation nodale par sous domaine
- Calcul des matrices élémentaires correspondant à la forme intégrale du problème
- Assemblage des matrices élémentaires
- Prise en compte des conditions aux limites
- Résolution du système d'équations

### IV.3.5 – Taille des éléments finis

En général plus le maillage est fin plus les résultats obtenus sont meilleurs, mais en même temps un grand effort de programmation est requis. Le nombre d'éléments utilisés sera la fonction du type de la structure à analyser, mais généralement plus d'éléments sont requis dans les régions où les contraintes varient rapidement que dans les régions où elles varient graduellement. Cependant pour les éléments complexes les maillages grossiers donneront des résultats aussi bons que ceux des maillages fins ayant des éléments simples.

### IV.3.6 – Formulation des éléments finis

La méthode des éléments finis représente l'extension de la méthode de rigidité pour les portiques à l'étude bidimensionnelle et tridimensionnelle des structures continues (exemple : plaque, coque ,etc.).

Dans la méthode des éléments finis, la structure continue est remplacée par une structure idéalisée équivalente composée d'un ensemble d'élément appelé « élément fini », qui est censé relier les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds.

On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque « élément fini », qui est censé relier les uns aux autres en un nombre fini de points appelés nœuds. On définit de manière unique le champ des déplacements à l'intérieur de chaque « élément fini » qui est une approximation du problème. Cette approximation de la fonction choisie par un élément appelé une « interpolation » qui est exprimée en fonction des déplacements aux nœuds.

Il est possible, par l'utilisation des théorèmes de l'énergie, de déterminer la matrice de rigidité qui relie les forces nodales avec les déplacements nodaux d'un « élément fini ». La matrice de rigidité de l'assemblage des éléments est obtenue de la même manière que le cas des portiques (Méthode des rigidités). Si les conditions d'équilibre sont appliquées, chaque nœud de la structure modélisée, on obtient un système d'équations simultanées résoudre.

### IV.3.7 – Procédure d'analyse par éléments finis

La procédure d'analyse par éléments finis comporte les étapes suivantes :

- L'idéalisation et la discrétisation de la structure en éléments finis par un maillage constitue de lignes ou de surfaces imaginaires. Les éléments sont supposés reliés en un nombre fini de points nodaux situés sur leurs frontières. Les déplacements de ces points nodaux seront les inconnues de base du problème. Il est apparent que la méthode des éléments finis est applicable pour les structures des matériaux de

propriétés hétérogènes ou de formes géométriques compliqués et irrégulières (bords courbes, trous,).

- On choisit une fonction de déplacement permettant de définir de manière unique le champ des déplacements à l'intérieure de chaque « élément fini » en fonction des déplacements de ces nœuds. On se basant sur cette fonction de déplacement, nous déduisons- la matrice de rigidité de l'élément qui lie les forces nodales avec les déplacements nodaux et la matrice masse en utilisant le principe des travaux virtuels ou le principe de l'énergie potentielle totale minimale.
- L'analyse de la structure idéalisée de l'assemblage des éléments. Cette analyse procède de la manière classique qui a été décrite par la méthode des rigidités. En fin la solution de ces équations nous permet d'évaluer les déplacements et les efforts internes dans la structure (contrainte, déformation).

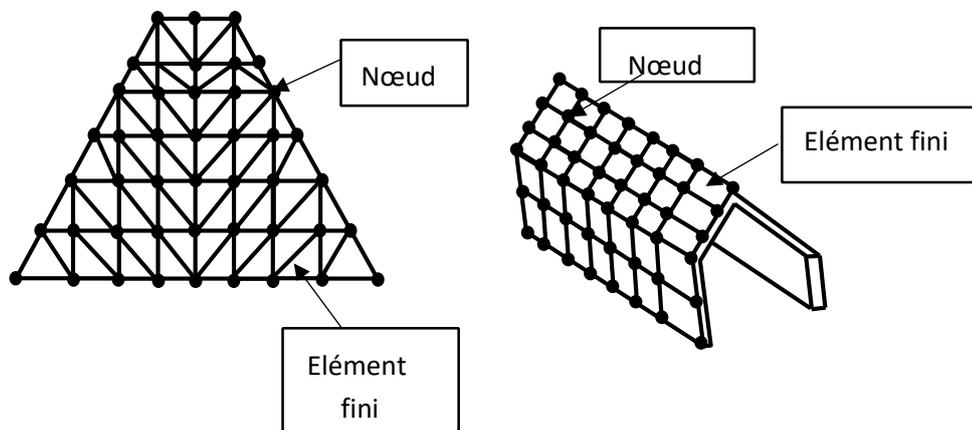


Figure. IV.4 – structures modélisées par éléments finis.

#### IV.4 – Le maillage

Cette opération consiste à subdiviser le domaine  $\Omega$  en un ensemble de formes simples, en 2D le domaine  $\Omega$  est subdivisé soit en forme triangles, soit en forme quadrangles. En 3D la subdivision se fait principalement en utilisant des tétraèdres, des pentaèdres ou prismes ainsi que les hexaèdres ou cubes, les éléments finis ainsi définis sont connectés entre eux par les points situés sur leurs contours et sommets ces points sont appelés « NŒUDS » chaque nœud possède des degrés de liberté qui sont les composants du vecteur déplacement.

#### IV.4.1 – Règles de maillage

Le domaine  $\Omega$  peut être maillé avec différents types d'éléments (1D rectiligne ou curviligne, 2D plan ou surfacique, 3D). Toutefois, cette opération du maillage doit respecter un certain nombre de règles concernant la manière dont ces éléments doivent se connecter les uns aux autres, elles comme suit :

- Le maillage doit recouvrir la totalité du domaine  $\Omega$  ;
- Deux éléments voisins d'un maillage ne doivent pas se chevaucher, et leur connexion doit se faire sur leur frontière commune, ils peuvent être connectés par un nœud commun ;
- Les connexions entre éléments de degrés différents sont proscrites ;
- Les nœuds communs peuvent représenter soit la continuité de la matière, soit la liaison mécanique entre les éléments.

#### IV.4.2 – Utilité du maillage

L'opération de maillage du domaine  $\Omega$  permet de :

- Calculer plus facilement les intégrales sur le domaine  $\Omega$ , ceci consiste en la sommation des intégrales calculer sur chaque élément ;
- De pouvoir exprimer mathématiquement la solution recherchée comme un assemblage de solution de forme assez simple sur chaque élément.

### IV.5 – Étapes du calcul par éléments finis

#### A. Préprocesseur

1. Choisir le type d'éléments ;
2. Entrer les propriétés géométriques ;
3. Créer le modèle géométrique ;
4. Créer le maillage : définir les nœuds et les éléments ;
5. Entrer les paramètres physiques ;
6. Appliquer les sollicitations ;
7. Imposer les conditions aux limites ;
8. Choisir le type d'analyse (statique, dynamique, etc).

#### B. Calcul

1. Construire la matrice et le vecteur élémentaire  $[K_e]$ ,  $\{f_e\}$  ;
2. Assembler  $[K_e]$  et  $\{f_e\}$  dans  $[K]$  et  $\{F\}$  ;
3. Prendre en compte les conditions aux limites ;
4. Résoudre le système d'équations  $[K] \{U\} = \{F\}$ .

#### C. Post processeur

1. Présenter les résultats de façon claire et synthétique : sous forme numérique et sous forme graphique

### IV.6 – Les méthodes de résolution

Les problèmes discrets à résoudre se présentent sous la forme de problèmes d'optimisation, et peuvent être résolus par des méthodes de calcul de minimum ou de recherche de point de selle. Et parmi ces méthodes :

- La méthode de point fixe (ou bien méthode des statuts) ;
- Les méthodes de projection ;
- La méthode de la pénalisation ;
- La méthode de multiplicateurs de Lagrange ;
- Les méthodes mixtes, tels que le lagrangien augmenté ou le Lagrangien perturbé, etc.

### IV.7 – Conclusion

La méthode des éléments finis est une approche puissante pour résoudre des problèmes d'ingénierie complexes. Malgré quelques inconvénients, ses avantages prédominants expliquent sa popularité et son utilisation répandue dans de nombreux domaines de l'ingénierie. Avec des avancées continues dans les techniques de modélisation et de calcul, la méthode des éléments finis continuera à jouer un rôle essentiel dans l'analyse et la conception des structures et des systèmes.

# Chapitre V

**Présentation l'logiciel de simulation CAST3M**

## V.1 – Introduction

Cast3M est un code de calcul pour l'analyse de structures par la méthode des éléments finis (E F) et la modélisation en mécanique des fluides.

A l'origine, ce code a été développé au Service d'études mécaniques et thermiques (SEMT) du Département de modélisation des systèmes et structures (DM2S, anciennement Département de Mécanique et de Technologie, DMT) du Commissariat français à l'Energie Atomique (CEA). Le développement de Cast3M entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique, le but étant de définir un instrument de haut niveau, pouvant servir de support valable pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants, dans le domaine nucléaire comme dans le secteur industriel classique.

Dans cette optique, Cast3M présente un système complet, intégrant non seulement les fonctions de calcul proprement dites, mais également des fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et de traitement des résultats (post-processeur).

Cast3M permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statique et dynamique (extraction de valeurs propres), des problèmes de thermique, des problèmes non linéaires (comportements, grands déplacements, grandes déformations, contact, frottement, etc.), des problèmes dynamiques « pas-à-pas » selon un schéma implicite, la ruine des structures , problèmes couplant calculs fluides et structuraux, etc.

## V.2 – Le langage de cast3m GIBIANE

GIBIANE est un langage de haut niveau permettant à l'utilisateur de communiquer directement avec le programme par un échange de données. Toutes les opérations exécutées avec GIBIANE consistent en une manipulation des objets existants, dans le but de les modifier ou d'en créer de nouveaux. La syntaxe d'une opération élémentaire peut faire intervenir plusieurs objets et se présente sous différentes formes, selon que le résultat obtenu consiste en une modification d'un ou de plusieurs objets existants ou en la création d'un ou de plusieurs nouveaux objets. Dans le premier cas, l'instruction est du type :

- DIRECTIVES OPERANDES ;

Par exemple, dans « *ELIM 0.001 GEOM ;* », la DIRECTIVE (ELIM) indique le nom de la fonction à exécuter et les OPERANDES (GEOM, 0.001) les objets à utiliser.

Dans le second cas, l'instruction est du type :

- RESULTATS = OPERATEUR OPERANDES ;

Par exemple, dans l'instruction : « *LIGNE = DROI P1 P2 S ;* » l'OPERATEUR (DROI) indique le nom de la fonction à exécuter, les OPERANDES (P1 P2 S) représentent les objets fournis comme argument dans l'énoncé de l'opérateur et le RESULTATS (LIGNE) sont les objets créés au terme de l'opération.

Les opérations sont exécutées par des opérateurs agissant directement sur des objets fournis en argument. Les opérands peuvent être des objets déjà disponibles, contenant des informations caractéristiques de l'analyse à effectuer, ou des objets spécifiques définis à seule fin de permettre l'exécution de l'opération requise. Ainsi, le simple fait de donner un nom à un nombre entier ou réel (PAR = 12, PI = 3.14) permet de générer les objets correspondants de type ENTIER et FLOTTANT, pouvant alors être utilisés pour effectuer des opérations algébriques avec d'autres objets (multiplication, division, etc.). Les opérations exécutées sur les objets conduisent à la création de nouveaux objets pouvant être du même type que les opérands ou de type différent. Ainsi, les opérateurs de type algébrique tels que : +, -, \*, /, par exemple, ou l'opérateur ET, qui unit deux ou plusieurs objets, sont généralement utilisés pour créer de nouveaux objets, de même type que les objets d'origine. En revanche, des opérateurs plus sophistiqués créent des objets de type différent, par exemple : l'opérateur MODL utilise un objet de type MAILLAGE et des objets de type MOT pour créer un nouvel objet de type MMODEL contenant les références à la géométrie, à la formulation élément fini, au comportement du matériau de la structure analysée.

Quelques directives et opérateurs avec leurs descriptions dans les deux tableaux suivants :

| Directive        | Description  |
|------------------|--|
| OPTI             | Déclare les principaux paramètres du programme   |
| ELIM             | Remplace tous les doubles nœuds par un seul point  |
| TRAC             | Trace ou bien dessine l'objet de type maillage, vecteur, ...ets                                |
| TITR             | Donne un nom à l'étude   |
| SI, SINON, FINSI | Permet l'exécution conditionnelle des données suivant la valeur d'une variable de type logique |

**Tableau. V.1** – Description de quelque directive.

| Opérateur | Description   |
|-----------|---|
| DIME      | Dimension de l'espace   |
| ELEM      | Type d'éléments géométriques utilisé  |
| DROI      | Construit un linge entre deux points  |
| REGL      | Construit une surface réglée  |
| ROTA      | Construit une surface engendrée par la rotation d'un linge                                      |
| DALL      | Construit une surface   |
| VOLU      | Construit des volumes   |
| SYME      | Construit l'objet résultant de la symétrie d'un autre objet par rapport à une droite ou un plan |
| MODE      | Définie un type de comportement et une formulation élément fini a un objet maillage             |
| MATE      | Définie les propriétés physiques du matériau pour un modèle donné                               |

**Tableau. V.2** – Description de quelque Opérateur.

### V.3 – Système d'unités

Cast3M ne dispose d'aucun système particulier d'unités de mesure. C'est à l'utilisateur de fournir les données dans un système cohérent vérifiant la loi fondamentale de la dynamique : Une fois que les unités de mesure utilisées dans les données définies, tous les résultats seront exprimées dans ces mêmes unités.

| Longueur  | Masse                    | Force    | Temps      | Masse Volumiques              | Pression                      |
|-----------|--------------------------|----------|------------|-------------------------------|-------------------------------|
| <i>m</i>  | <i>Kg</i>                | <i>N</i> | <i>Sec</i> | <i>Kg/m<sup>3</sup></i>       | <i>Pa (N/m<sup>2</sup>)</i>   |
| <i>mm</i> | <i>10<sup>3</sup> kg</i> | <i>N</i> | <i>Sec</i> | <i>10<sup>-6</sup> kg /m3</i> | <i>MPa (N/mm<sup>2</sup>)</i> |

**Tableau. V.3** – Exemples des systèmes d'unités de mesure cohérents.

#### V.4 – Règles syntaxiques générales

Voici la liste des principales règles syntaxiques à observer lors de l'utilisation du langage GIBIANE :

- Les caractères espace, virgule, égal et deux-points sont des séparateurs ;
- Le point-virgule termine une instruction ;
- Une instruction doit être écrite sur moins de 9 lignes, mais une même ligne peut contenir plusieurs instructions ;
- L'interpréteur GIBIANE ignore toute ligne dont le premier caractère est un astérisque, d'où la possibilité pour l'utilisateur d'insérer des commentaires ;
- Les opérateurs et les directives sont définis par leurs 4 premiers caractères, les caractères suivants n'étant pas pris en compte ;
- L'instruction est interprétée de gauche à droite ;
- Seuls les 72 premiers caractères d'une ligne sont pris en compte ;
- Le signe = permet à l'utilisateur de donner un nom au résultat de l'instruction ;
- La longueur du nom attribué à un objet ne doit pas dépasser 8 caractères.

#### V.5 – Généralités sur le maillage

L'objet du maillage est de discrétiser géométriquement le domaine d'analyse de manière à pouvoir ultérieurement associer une formulation éléments finis au support géométrique. Concrètement cette discrétisation s'effectue par la création d'objets de type maillage (points, lignes, surfaces, volumes) à l'aide des opérateurs géométriques. La technique à suivre est : (presque toujours la même)

- Construction des points ;
- Construction des lignes à partir des points ;
- Construction des surfaces à partir des lignes ;
- Construction des volumes à partir des surfaces.

### V.6 – Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M

Tout problème (mécanique, thermique, chimique, etc.) résolu avec CAST3M doit être construit de la manière suivante :

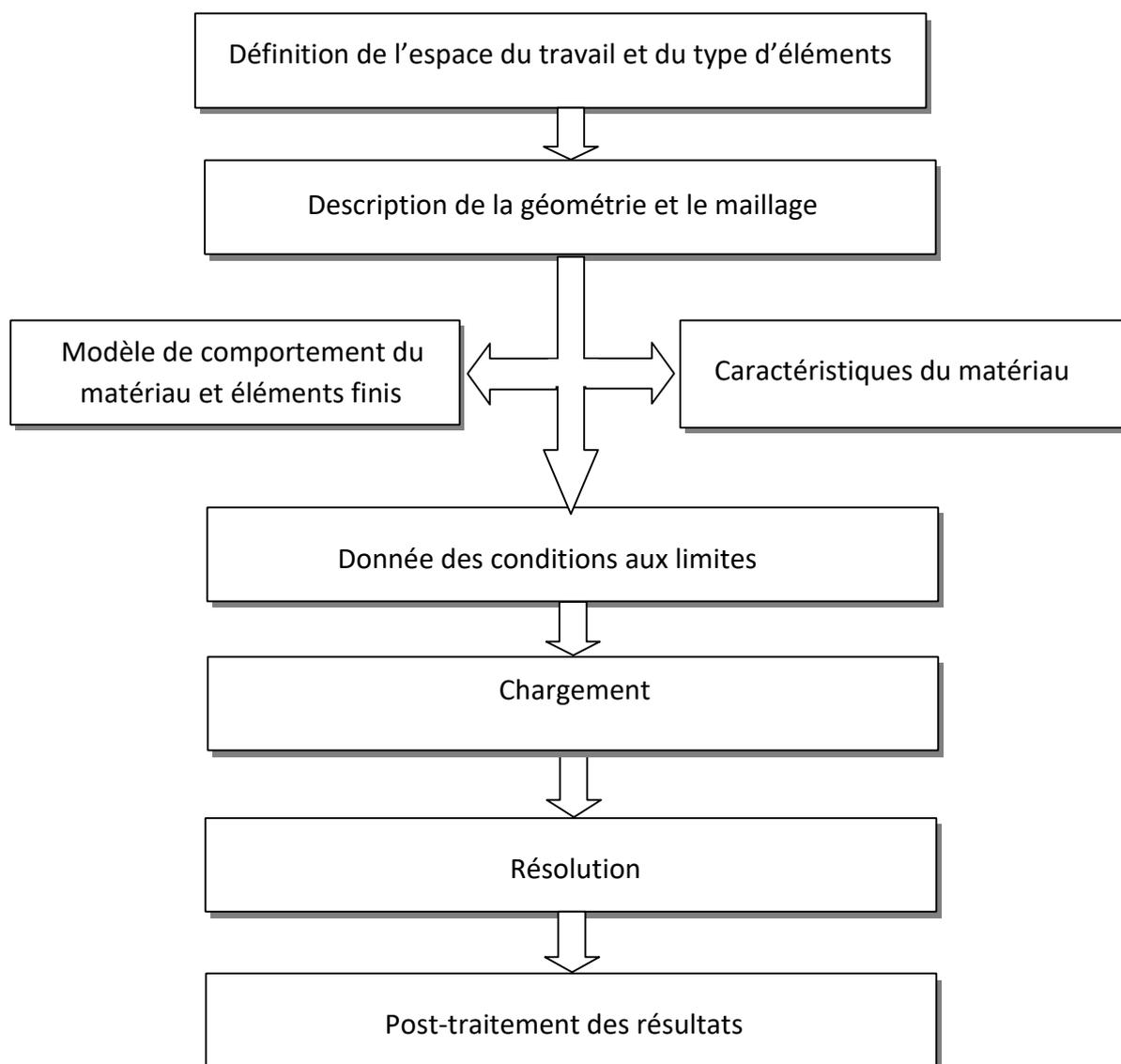


Figure. V.1 – Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M.

## **V.7 – Les avantage et les inconvénients**

### **V.7.1 – Les avantage**

- Choix de maillage ;
- Ce n'est pas nécessaire de faire une nouvelle modalisation pour changer les dimensions de modèle ;
- Certaines procédures sont déjà programmées et inséré dans l'installation CAST3M ;
- Tous les opérateurs et les directives sont expliqués dans la notice CAST3M avec des exemples d'application.

### **V.7.2 – les inconvénients**

- Certains problèmes ou bien erreur sont difficile à reconnaitre ;
- Nécessité d'utilisation un matériel informatique puissant pour certaine modélisation ;
- Inconvénient de temps de programmation et des calculs numériques.

## **V.8 – conclusion**

Cast3M est un logiciel de simulation numérique puissant qui peut être utilisé dans une grande variété de domaines, tels que la mécanique des structures, la mécanique des fluides, la thermique, l'électromagnétisme et bien plus encore. En utilisant Cast3M, les ingénieurs et les chercheurs peuvent modéliser des problèmes complexes et obtenir des résultats précis qui peuvent aider à la prise de décision dans de nombreux contextes.

# CHAPITRE VI

**Modélisation par éléments finis Résultats et  
discussion**

## VI.1 – Introduction

Dans ce chapitre, nous avons utilisé la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel CAST3M, pour modéliser numériquement les assemblages métalliques de type poutre poteau avec platine d'extrémité débordante et raidisseurs d'angles. Nous avons développé des modèles tridimensionnels pour ces assemblages et nous avons également appliqué une approche basée sur la mécanique du contact.

L'objectif de ce travail était d'étudier l'influence de différents paramètres sur le comportement de ces assemblages. Les paramètres étudiés étaient les suivants :

- La présence ou l'absence de deux raidisseurs de colonnes au niveau des poteaux ;
- L'épaisseur de la platine, avec des options de platine mince (10 mm), épaisseur (20 mm) épaisseur (30 mm) ;
- La présence d'un raidisseur nervuré dans la zone de débordement de la platine.

Les résultats obtenus à partir de ces modèles ont été analysés et discutés afin de comprendre l'influence de ces paramètres sur le comportement global des assemblages métalliques. Ces résultats peuvent fournir des informations nécessaires pour une meilleure compréhension du comportement de ce type d'assemblage.

## VI.2 – Description de l'assemblage

Dans cette section, nous étudions les connexions boulonnées précontraintes entre une colonne en acier (HEA 400) et une poutre en acier (IPE 600). La poutre est soudée à une plaque d'extrémité de différentes épaisseurs (10 mm, 20 mm et 30 mm) dans trois cas distincts (**Figure VI.1**). Toutes les connexions analysées utilisent sept (7) rangées de boulons M18 à haute résistance, espacées de 100 mm.

Cette analyse utilise de l'acier de grade S420, qui présente une contrainte d'écoulement de 431 MPa, une contrainte de rupture de 595 MPa, un module d'élasticité longitudinal de 210 000 MPa et un coefficient de Poisson de 0,3. Les boulons précontraints sont de classe mécanique 10.9, avec une contrainte d'écoulement de 893 MPa et une contrainte de rupture de 974 MPa. En plus de l'option adoptée de grandes déformations pour la non-linéarité géométrique, la non-linéarité du matériau est représentée par les courbes contrainte-déformation utilisées (Fig. 3) avec un comportement élastoplastique et un écrouissage isotrope, comme introduit initialement par Bursi et Jaspert (1998).

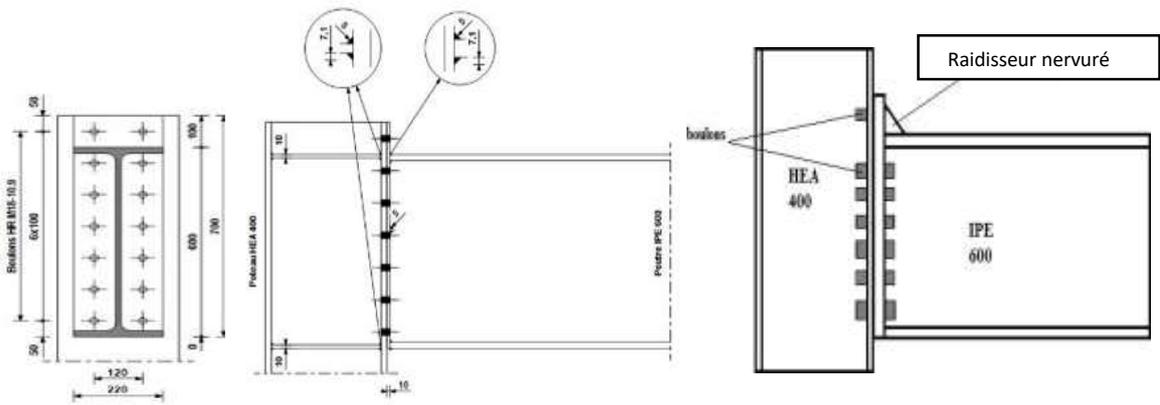


Figure VI.1 Connexion boulonnée entre une colonne en acier (HEA 400) et une poutre en acier (IPE 600).

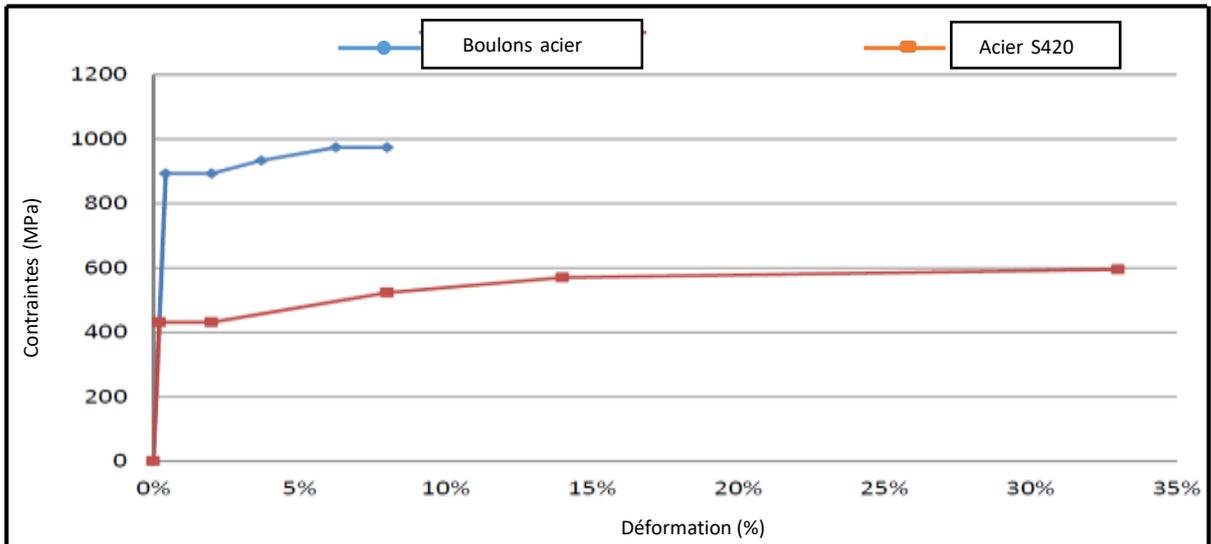


Figure VI.2 Courbes de contrainte et de déformation pour les aciers utilisés pour les boulons de nuance S420 et de classe 10.9

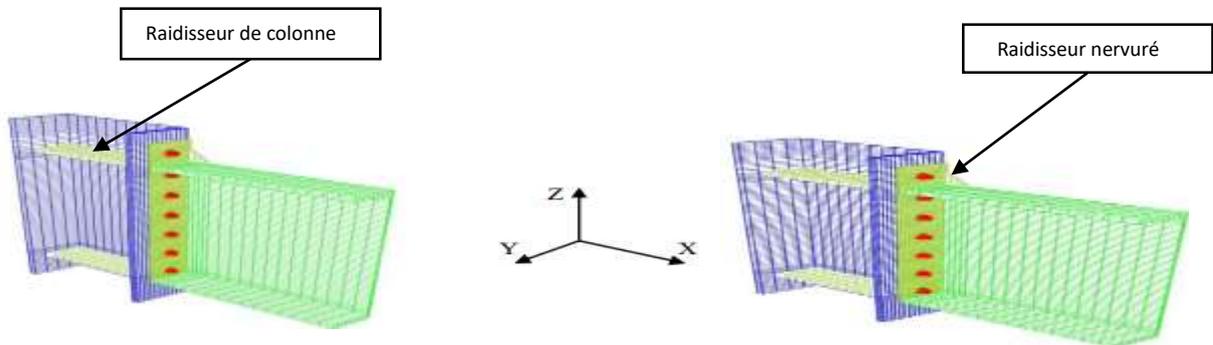
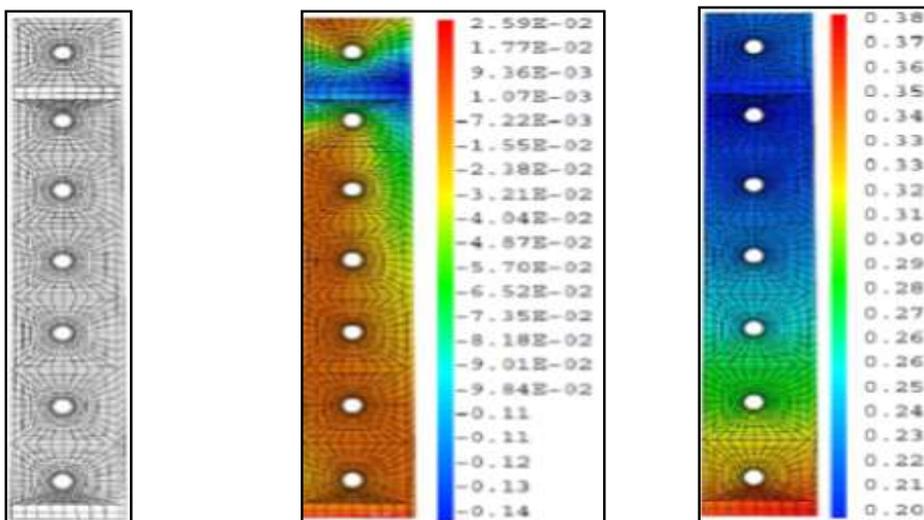


Figure VI. 3 Modèle EF 3D de la connexion avec raidisseurs dans la colonne (à gauche) et raidisseur de nervure (à droite).

### VI.3 – Type d'élément fini utilisé

Les simulations numériques ont été réalisées à l'aide de CAST3M, un code de calcul développé par le Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives (CEA). Les maillages éléments finis ont utilisé un modèle tridimensionnel basé sur le déplacement, employant des éléments hexaédriques isoparamétriques à huit nœuds (éléments CUB8) avec trois degrés de liberté translationnels par nœud (**Figure VI.3**). Ces éléments CUB8 ont été utilisés pour mailler tous les composants, y compris les boulons.

Pour optimiser l'efficacité de calcul en termes de temps et d'utilisation de la mémoire, l'analyse a été menée sur la moitié de la connexion seulement. Cela a permis d'exploiter le plan de symétrie situé dans les plans moyens des âmes de la poutre et de la colonne (**Figure VI.3, à droite**). Pour assurer l'équilibre statique, les degrés de liberté des nœuds sur la partie inférieure de la colonne ont été fixés. De plus, une charge de surface a été appliquée directement sur la surface supérieure des semelles supérieures de la poutre. Toutefois, pour éviter une flexion localisée, la charge a été limitée à l'âme de la poutre, de sorte que seuls les éléments situés dans le plan de l'âme ont été soumis à la charge.

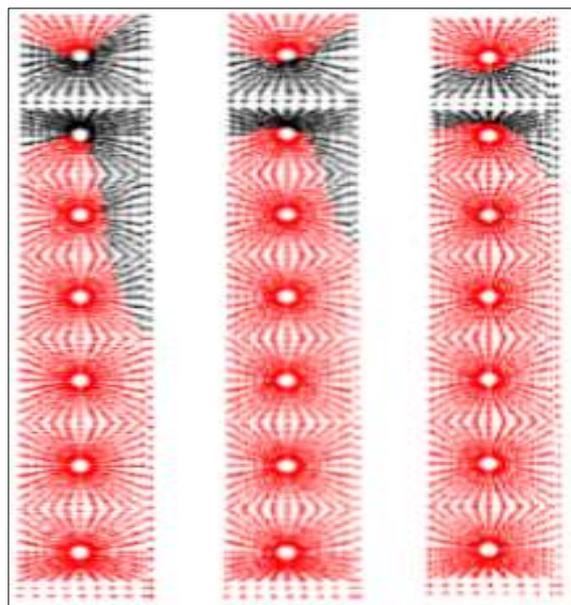


**Figure VI.4** de gauche à droite maillage de contact utilisé, et exemple des champs de déplacement relatif normal et tangent (en mm) sous  $M = 144$  kNm et  $V = 576$  kN.

Pour tenir compte des boulons précontraints, des relations de contact par friction ont été mises en œuvre entre la plaque d'extrémité et la semelle de la colonne.

Un maillage compatible a été utilisé pour ces surfaces de contact, garantissant que les nœuds opposés partagent les mêmes coordonnées (**FigureIV.5**). Des éléments quadrangulaires linéaires à quatre nœuds (éléments QUA4 dans CAST3M) ont été choisis pour ces régions de contact. Deux surfaces de contact supplémentaires ont été considérées : le contact entre la tête de vis et la face interne des semelles de la colonne, et le contact entre l'écrou et la face interne de la plaque d'extrémité.

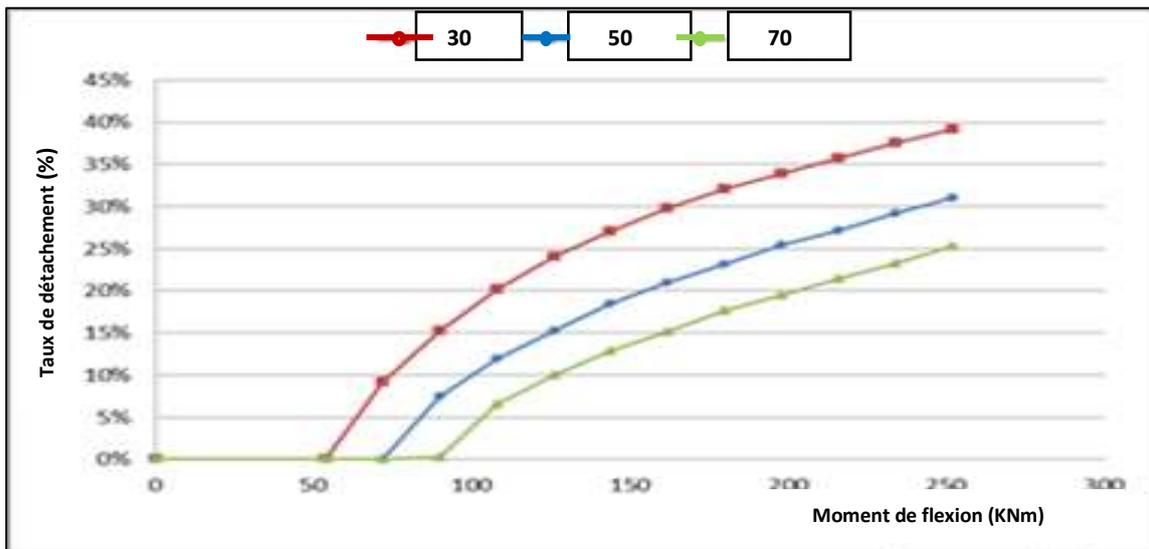
Un défi majeur dans ce domaine est l'absence de méthodes bien définies pour déterminer les valeurs seuils de détachement. Pour résoudre ce problème, nous avons utilisé une approche de calcul a posteriori en trois étapes. Cette approche consistait à comparer les composantes normales des déplacements relatifs avec trois valeurs seuils : 30  $\mu\text{m}$ , 50  $\mu\text{m}$  et 70  $\mu\text{m}$ . À titre d'exemple illustratif, la **Figure VI.5** montre les zones de détachement et de glissement pour l'interface entre les colonnes et les plaques d'extrémités sous un moment de flexion ( $M$ ) de 144 kNm et une force de cisaillement ( $V$ ) de 576 kN. Comme le montre la Fig. 6, les zones de détachement (représentées en noir) présentent des tailles distinctes mais des formes similaires. Cela suggère qu'avec l'augmentation des intensités de charge, les zones de détachement correspondant à des seuils plus élevés (50  $\mu\text{m}$  et 70  $\mu\text{m}$ ) vont finalement converger vers la zone observée pour 30  $\mu\text{m}$ . Mathématiquement, la zone définie par le seuil de 70  $\mu\text{m}$  est entièrement contenue dans la zone de 50  $\mu\text{m}$ , qui elle-même est contenue dans la zone de 30  $\mu\text{m}$ . Cela confirme la similarité géométrique des zones de détachement pour différents seuils de séparation. Cette caractéristique permet de caractériser l'évolution des limites au sein de ces zones en fonction de l'augmentation des charges appliquées ou des forces internes transmises.



**Figure VI.5** Zones de glissement (en rouge) et de détachement (en noir) obtenues avec des seuils, de gauche à droite, de 30, 50 et 70  $\mu\text{m}$  respectivement sous  $M = 144$  kNm et  $V = 576$  kN.

De plus, le taux moyen de séparation est défini comme le rapport entre la surface de séparation et la surface de contact totale. La **Figure VI.6** illustre l'évolution de ces taux avec l'augmentation des intensités du moment de flexion. Bien que les courbes présentent des variations d'amplitude, elles partagent des formes et des tendances similaires.

Ces observations suggèrent qu'une seule valeur seuil fixe (discutée précédemment) peut efficacement capturer à la fois l'évolution de la zone de séparation et le taux moyen de séparation, ce qui nous permet d'explorer l'influence des paramètres détaillés dans la section suivante. Cependant, pour une validation approfondie, nous avons réalisé des calculs paramétriques supplémentaires en utilisant des seuils alternatifs. Les résultats ont confirmé que l'utilisation d'un seuil unique était suffisante pour cette analyse. Par conséquent, pour des raisons de cohérence et de clarté, nous adopterons une valeur seuil fixe de 50  $\mu\text{m}$  pour les conditions de détachement.



**Figure VI.6** Courbes d'évolution des taux de détachement en fonction des valeurs seuils de 30, 50 et 70  $\mu\text{m}$ .

## VI.4 Analyse paramétrique

Nous commençons par étudier l'influence de l'épaisseur de la plaque d'extrémité, Ensuite, l'effet des raidisseurs de colonne. Enfin, l'impact des raidisseurs nervurés dans la plaque d'extrémité allongée (**Figure VI.3**).

### VI.4 .1 Influence de l'épaisseur de la plaque d'extrémité

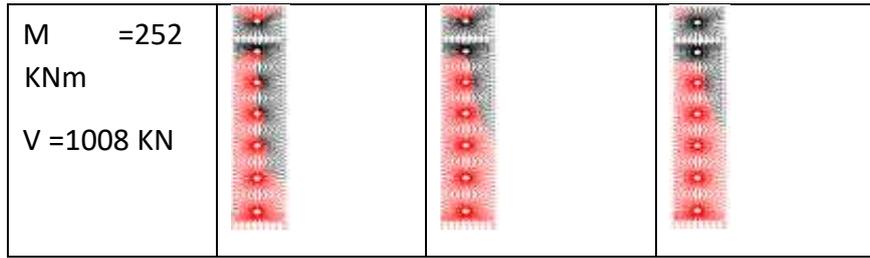
L'influence de l'épaisseur de la plaque d'extrémité a été étudiée en utilisant trois valeurs distinctes : 10 mm, 20 mm et 30 mm. Des calculs ont été effectués pour des incréments croissants de moments de flexion transmis ( $M$ ) et de forces de cisaillement ( $V$ ), comme détaillé dans le tableau 1.

Comme décrit dans la section précédente, un seuil de détachement constant de 50  $\mu\text{m}$  a été systématiquement appliqué. Cela nous permet d'identifier et de visualiser trois zones de contact dans le **tableau VI1** : adhésion (vert), glissement (rouge) et détachement (noir). Les figures illustrent clairement l'évolution de la zone de détachement près de l'âme de la poutre sur la section droite, soutenant ainsi la fondation théorique de l'Eurocode 3, qui utilise des T-stubs déformables comme

éléments de calcul. De plus, il est observé que le glissement se produit plus rapidement que le détachement, englobant l'ensemble de la surface de la plaque. Cela est principalement attribué à l'intensité considérable des forces de cisaillement transmises.

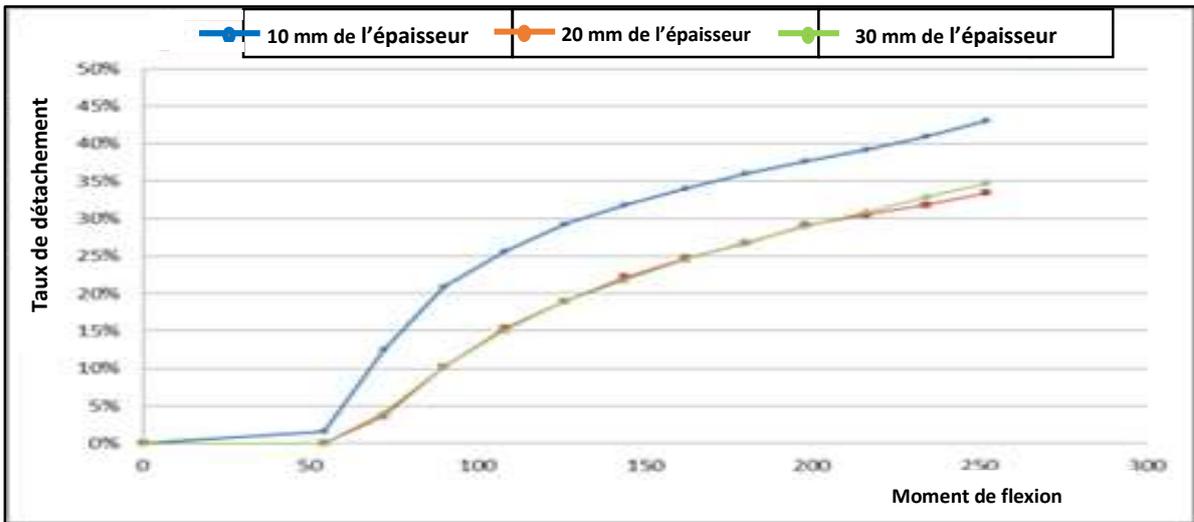
La **Figure VI.7** illustre en outre l'impact de l'épaisseur de la plaque d'extrémité sur le comportement de détachement. Les courbes représentent les taux moyens de détachement obtenus pour les différents cas présentés dans le **tableau VI1**. Il convient de noter que la plaque de 10 mm présente des taux de détachement nettement plus élevés (environ 9,17 %) par rapport aux plaques de 20 mm et de 30 mm, dont les courbes se chevauchent presque.

| efforts appliqués       | 10 mm épaisseur | 20 mm épaisseur | 30 mm épaisseur |
|-------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| M =36 KNm<br>V =144 KN  |                 |                 |                 |
| M =72 KNm<br>V =288 KN  |                 |                 |                 |
| M =144 KNm<br>V =576 KN |                 |                 |                 |
| M =216 KNm<br>V =864 KN |                 |                 |                 |



**Tableau VI.1** Représentation des trois zones de contact : adhésion (vert), glissement (rouge) et zone de détachement (noir) en fonction des épaisseurs de la plaque d'extrémité et des intensités de force appliquées.

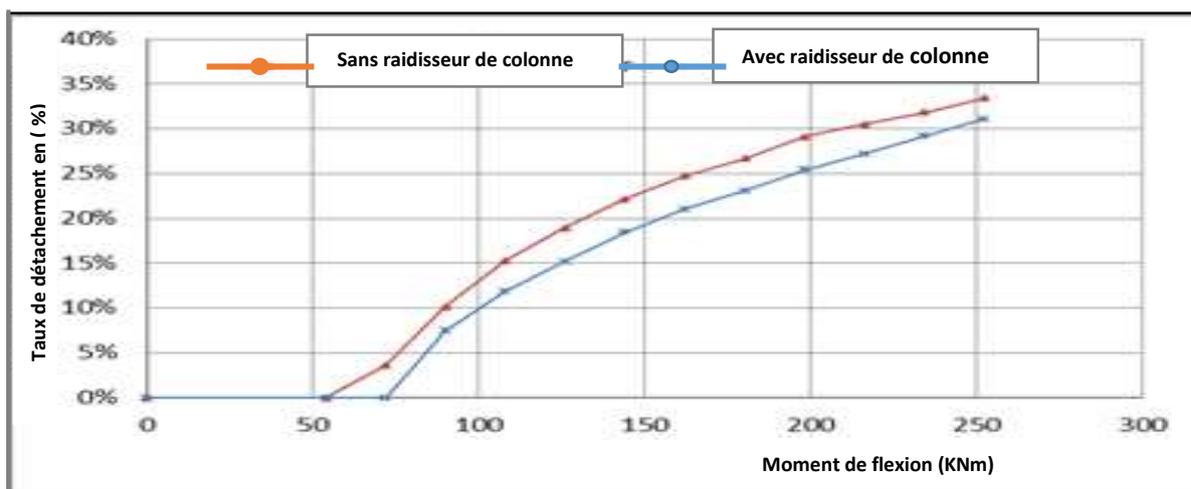
Cependant, pour des moments de flexion supérieurs à 200 kNm, la plaque de 30 mm connaît un taux de décollement légèrement plus élevé (jusqu'à 1,3 % à 252 kNm) que la plaque de 20 mm. Cela peut être attribué au comportement à proximité de la première rangée de boulons dans la zone d'extension. Pour la plaque de 30 mm, la zone de décollement autour de cette rangée de boulons est plus étendue, entourant entièrement le boulon. Par conséquent, la totalité de la charge est transférée au boulon, ce qui induit des allongements plus importants (1,25 % pour la première rangée de boulons) par rapport à la plaque de 20 mm (0,74 %).



**Figure VI.7** évolution des taux de détachement pour un seuil adopté de 50µm.

**VI.4.2 Influence de la présence de raidisseur de colonne**

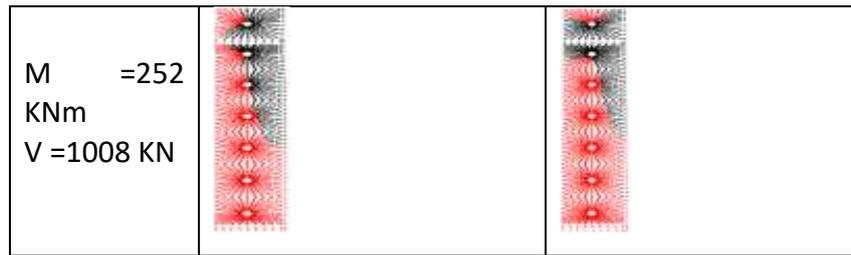
L'impact des raidisseurs de colonne sur la distribution des zones de contact est clairement visible dans le **tableau VI.2**. Les figures démontrent clairement une réduction de la propagation des zones de décollement lorsque des raidisseurs sont présents par rapport aux scénarios sans eux.



**Figure VI.8** Courbes d'évolution des taux de décollement en fonction de la présence ou non de raidisseurs de poteaux.

De plus, la présence de raidisseurs semble influencer la direction de propagation, favorisant une orientation horizontale. Cet effet est quantifié dans la Fig. 9, qui révèle une réduction notable des taux de détachement d'environ 3,33 %.

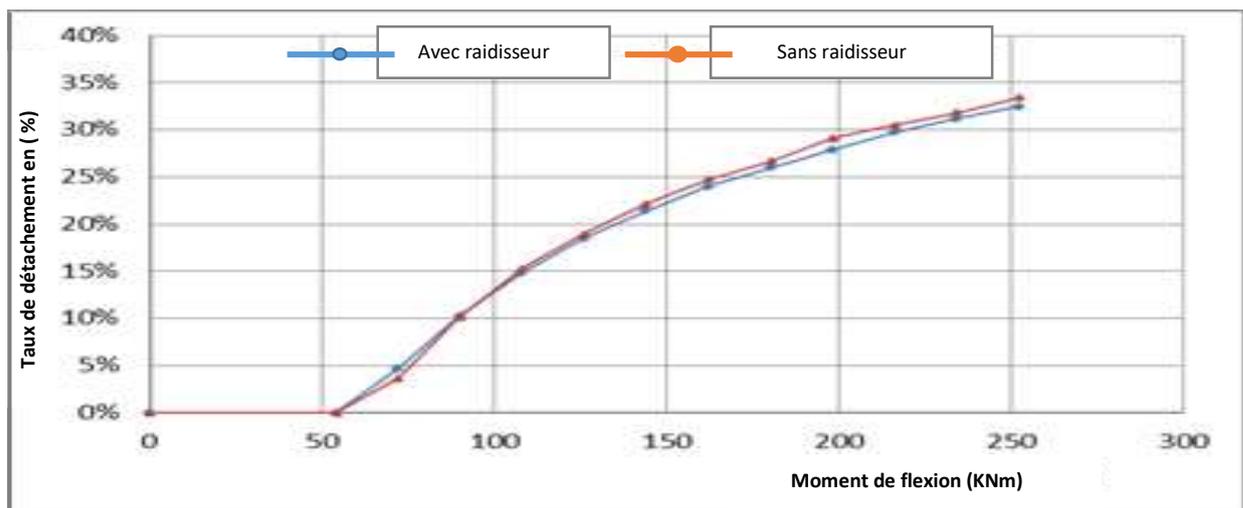
| Efforts appliqués         | Sans raidisseurs | Avec des raidisseurs |
|---------------------------|------------------|----------------------|
| M = 36 KNm<br>V = 144 KN  |                  |                      |
| M = 72 KNm<br>V = 288 KN  |                  |                      |
| M = 144 KNm<br>V = 576 KN |                  |                      |



**Tableau VI.2** Représentation des zones de contact : adhésion (vert), glissement (rouge) et détachement (noir) en fonction de la présence ou non des raidisseurs de colonne.

**VI.4.3 Influence du raidisseur de nervure dans la zone étendue de la plaque d'extrémité**

Le dernier paramètre étudié dans cette étude concerne l'influence du raidisseur de nervure situé dans la zone étendue de la plaque d'extrémité (voir Figure VI.8). Les courbes des taux de décollement, présentées à la Figure VI.8, montrent des variations minimales entre les cas avec et sans raidisseur, avec une différence moyenne d'environ 0,7 %. Il est intéressant de noter que la présence du raidisseur de nervure conduit initialement à des taux de décollement légèrement plus élevés au début du chargement. Cependant, ces taux diminuent progressivement au-delà d'une intensité de moment de flexion de 90 kNm et convergent finalement avec le cas sans raidisseur. Cette tendance se reflète dans la distribution des zones de contact. Bien qu'il existe une légère différence dans la distribution des zones au début du chargement, les deux cas présentent des formes de plus en plus similaires à mesure que l'intensité du chargement augmente.



**Figure VI.9** Courbes d'évolution des taux de détachement en fonction de la présence ou non de raidisseurs nerveux.

### VI.5 Conclusion

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance des différents paramètres influençant le comportement de détachement dans les assemblages boulonnés, en particulier sous l'effet des moments de flexion et des forces de cisaillement. L'analyse a montré que l'épaisseur de la plaque d'extrémité joue un rôle crucial dans la propagation des zones de détachement, avec des plaques plus fines présentant des taux de détachement plus élevés. De plus, la présence de raidisseurs de colonne réduit efficacement la propagation des zones de décollement et influence la direction de cette propagation, favorisant une orientation horizontale. Enfin, bien que le raidisseur de nervure dans la plaque d'extrémité ait initialement entraîné une augmentation du taux de décollement, ces derniers ont convergé vers les mêmes valeurs que les cas.

# Conclusion Générale

A l'issue de cette étude, nous avons utilisé un modèle numérique tridimensionnel pour l'assemblage poteau-poutre, comprenant une platine d'extrémité débordante. Nous avons utilisé des éléments finis de type volumique CUB8 dans le logiciel CAST3M et défini les conditions de contact pour notre assemblage. Les calculs ont été suivis d'une analyse et d'une interprétation des résultats.

Cette étude a abordé plusieurs aspects, notamment les calculs et la conception mécanique des assemblages métalliques, ainsi que les aspects réglementaires fournis par les Eurocodes, la théorie du contact sans frottement et la simulation numérique tridimensionnelle utilisant la méthode des éléments finis. La mise en place de modèles numériques de calcul et leur résolution avec le logiciel CAST3M ont permis d'obtenir des résultats très proches de la réalité et en accord avec l'Eurocode 03.

- [1] Jean Morel/calcul des structures métalliques selon l'eurocode 3/61,bd saint-germain 75240 paris CEDEX 05, 2005/vol.331 p.65.
- [2] JEAN-PIERRE MUSEAU/ 10-11-2005/ constructions métallique – Assemblage par soudage, Technique de l'ingénieur/
- [3] APK (Association pour la promotion de l'enseignement de la construction acier) /développement bâtiment et travaux public/construction métallique et mixte acier-béton/jouve,18, rue saint-denis,75001 paris, septembre 1996/vol.553 p.291.
- [4] **Owens Graham Wynford et Cheal Brian** Structural steelwork connections [Livre] / éd. Butterworths. - London, Boston : [s.n.], 1989.
- [5] **Trahair Nicholas Snowden [et al.]** The behaviour and design of steel structures to EC3 [Livre] / éd. PressCRC. - 2007. - 4 : p. 512. - <https://doi.org/10.1201/9781315273518>.
- [6] **Gomes FCT [et al.]** Recent developments on classification of joints [Conférence] // COST C1 Control of the semi-rigid behaviour of civil engineering structural connections - Proceedings of the international conference / éd. European Commission. - Liege : [s.n.], 1998. - pp. 187-198.
- [7] **Jaspart Jean Pierre** Integration of the joint actual behaviour into the frame analysis and design process [Section du livre] // Semi-Rigid Joints in Structural Steelwork. - [s.l.] : Vienna Springer, 2000. - 10.1007/978-3-7091-2478-9\_2.
- [8] **Da Silva L Simões, Santiago Aldina et Real Paulo Vila** Post-limit stiffness and ductility of end-plate beam-to-column steel joints [Revue] // Computers & Structures / éd. Pergamon. - 2002. - 5-6 : Vol. 80. - pp. 515-531. - [https://doi.org/10.1016/S0045-7949\(02\)00014-7](https://doi.org/10.1016/S0045-7949(02)00014-7).
- [9] Batoz J. L. et Dha H. G Modélisation des structures par éléments finis. Vol13 ; (1994).