

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA
FACULTÉ DE TECHNOLOGIE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : **CONSTRUCTIONS MÉCANIQUES**

Par :

MR. HAMA OMAR

MR. BARKAT IDIR

Thème

**MODÉLISATION TRIDIMENSIONNELLE PAR ÉLÉMENTS FINIS DU
COMPORTEMENT ÉLASTO-PLASTIQUE DE L'ASSEMBLAGE DE DEUX
PROFILÉS MÉTALLIQUES AVEC PLATINE D'EXTRÉMITÉ DÉBORDANTE ET
RAIDISSEUR D'ANGLE.**

SOUTENU LE 06/10/2021 DEVANT LE JURY COMPOSÉ DE :

DR. BELAMRI ABDELATIF PRÉSIDENT

DR. MEBARKI YOUCEF EXAMINATEUR

DR. BECHEUR ABDELHAMID. ENCADREUR

Année Universitaire 2020-2021

Remerciements

Nos vifs remerciements seront adressés à :

BECHEUR Abdelhamid, notre encadreur, pour sa disponibilité et son soutien actif, pour l'attention qu'il nous a accordé et pour nous avoir orientés dans leBon sens quant à l'élaboration de ce mémoire.

Aux membres de jury qui ont accepté de juger notre travail.

Tous les enseignants du département de génie mécanique pour leur contribution en termes de transmission du savoir

Tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, ont participé à notre formation et à la réalisation de ce travail

Dédicaces

Je dédie ce travail :

A mes chers parents qui m'ont soutenu durant mes études et pour tout le mal qu'ils se sont donnés afin de me faciliter la vie, pour leur bienveillance, leur affectation et leur éternel amour

A mes frères bien-aimés pour leur soutien et leur disponibilité. A mes amis.

Idir barkat

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à

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

Mon frère.

Mes sœurs.

Ma fiancée.

Toute ma famille.

Tous mes amis(es).

Tous mes collègues des promotions de master.

Touts ceux qui m'ont aidée à réaliser ce mémoire de près ou de loin.

Omar Hama

Table des matières

Remerciements	i
Dédicaces	ii
Table des matières.....	iv
Listes des figures.....	ix
Listes des tableaux	xii
Nomenclature.....	xiii
Chapitre I. Généralités sur les assemblages	3
I.1. Introduction	3
I.2. Modes et rôle des assemblages.....	3
I.3. Les assemblages boulonnés.....	3
I.4. Les assemblages soudés.....	3
I.5. Modes de transmission des efforts.....	4
I.5.1. Transmission des efforts par cisaillement	5
I.5.2. Transmission des efforts par traction.....	5
I.5.3. Transmission des efforts par traction–cisaillement.....	6
I.6. Différents types d’assemblages boulonnés par platine d’extrémité	6
I.6.1. Assemblage poutre –poteau par platine d’extrémité boulonnée	7
I.7. Comportement des assemblages	7
I.8. Classification des assemblages.....	8
I.8.1. Classification par rigidité	8
I.8.1.1. Assemblages articulés	8
I.8.1.2. Assemblages rigides.....	9
I.8.1.3. Assemblages semi–rigides	9

I.8.2. Classification par résistance	9
I.8.2.1. Assemblages à résistance complète (pleine résistance)	9
I.8.2.2. Assemblage a résistance partielle	9
I.8.2.3. Assemblage articulé	9
I.9. Dimensionnements des boulons ordinaires.....	10
I.9.1. Assemblages sollicités au cisaillement.....	10
I.9.2. Assemblages sollicités à la traction	10
I.9.3. Assemblages sollicités simultanément à la traction et au cisaillement	11
I.10. Dimensionnement des boulons précontraints (à haute résistance)	11
I.10.1. Assemblages résistant au glissement	11
I.11. Conclusion	12
Chapitre II. Mécanique de contact	13
II.1. Introduction	13
II.1.1. L'aire de contact.....	13
II.1.2. Les pressions de contact	13
II.1.3. Les types de contacts.....	13
II.1.4. Les non linéarité dues au contact :	14
II.2. Les frottements :.....	15
II.2.1. Les lois de frottement	16
II.2.2. Loi de tresca.....	16
II.2.2.1. Loi de coulomb	17
II.2.2.2. Loi de coulomb régularisée.....	18
II.2.2.3. Loi de coulomb en quasi statique :	19
II.3. Formulation mathématique du problème de contact :	19
II.3.1. Cas du contact unilatéral avec frottement.....	20
II.3.2. Cas de contact unilatéral sans frottement.....	21
II.4. Le cas particulier du problème de signorini	22

II.4.1. Conclusion.....	23
Chapitre III. Introduction à la méthode des éléments finis.....	25
III.1. Introduction	25
III.2. Définition	25
III.3. Avantages et inconvénient de la méthode des éléments finis.....	25
III.3.1. Les Avantages	25
III.3.2. Les inconvénients.....	25
III.4. Application.....	26
III.5. Procédure de base de la MEF	26
III.5.1. Choix du type d'élément finis	26
III.5.2. Qualité d'un élément finis	26
III.5.3. Type d'élément finis :	27
III.5.3.1. Les éléments à une dimension :	27
III.5.3.2. Les éléments à deux dimensions :	27
III.5.3.3. Les éléments à trois dimensions :	27
III.5.4. Démarche de la construction d'un éléments finis	28
III.5.5. Taille des élément finis.....	28
III.5.6. Formulation des éléments finis :	28
III.5.7. Procédure d'analyse par éléments finis	29
III.6. Le maillage	30
III.6.1. Règles de maillage	30
III.6.2. Utilité du maillage :	30
III.7. Étapes du calcul par éléments finis	31
III.8. Conclusion :	32
Chapitre IV. Bref aperçu sur CAST3M	33
IV.1. Introduction.....	33
IV.2. Présentation de CAST3M	33

IV.3. Le langage de cast3m	33
IV.4. Règles syntaxiques générales :	34
IV.5. Système d'unités	35
IV.6. Généralités sur le maillage	35
IV.7. Problèmes pouvant être résolus par cast3M.....	35
IV.8. Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M	36
IV.9. Les avantages et les inconvénients	36
IV.9.1. Avantages :	36
IV.9.2. Inconvénients :	36
IV.10. Conclusion	37
Chapitre V. Modélisation par éléments finis ; résultats et discussion	38
V.1. Introduction	38
V.2. Description de l'assemblage :	38
V.3. Type d'élément fini utilisé	41
V.4. Modèle de contact utilisé	43
V.5. Méthode adoptée	44
V.6. Analyse des résultats en phase de comportement élastique.....	45
V.6.1. Influence de l'épaisseur de platine.....	45
V.6.1.1. Analyse de la distribution des contraintes	45
V.6.2. Influence de la présence ou non des raidisseurs de poteaux	50
V.6.2.1. Analyse des déformations.....	50
V.6.2.2. Analyse des champs de contrainte.....	51
V.7. Analyse des résultats en phase de comportement plastique	53
V.7.1. Influence de l'épaisseur de la platine sur la plastification des composants de l'assemblage	53
V.7.2. Influence de la présence ou non des raidisseurs sur la plastification des composants de l'assemblage	56

V.8. Analyse des surfaces de contact	59
V.8.1. Influence de l'épaisseur de la platine.....	59
V.8.2. L'influence de la présence ou non de raidisseurs de poteaux.....	61
V.8.1. L'influence de la présence ou non de raidisseur d'angle	63
V.9. Analyse des courbes moments rotations $M-\varphi$	65
V.9.1. Influence de l'épaisseur de la platine	65
V.9.2. Influence des raidisseurs de poteaux	67
V.10. Discussion des résultats et conclusion	67

Liste des figures

Liste des figures de chapitre I

Fig.I.1 : Composants d'un boulon d'assemblage.....	3
Fig.I.2 : Exemples de cas les plus courants de soudures.....	4
Fig.I.3 : Transmission d'un effort normal (assemblage de trois pièces).....	5
Fig.I.4 : Exemple du boulon ordinaire soumis à une traction	6
Fig.I.5 : Assemblages boulonnés par platine d'extrémité dans une structure en acier [2]	7
Fig.I.6 : Assemblage poteau poutre par platine d'extrémité boulonnée.....	7
Fig.I.7 : Comportement des assemblages en acier.	8
Fig.I.8 : Classification des assemblages par rigidité.[2].....	9
Fig.I.9 : Limite de classification des assemblages par résistance [3].....	10
Fig.II.1 : exemple de contact surfacique.	14
Fig.II.2 : exemple de contact linéique.....	14
Fig.II.3 : exemple de contact linéique.....	14
Fig.II.4 : loi de tresca.....	17
Fig.II.5 : loi de coulomb	17
Fig.II.6 : cône de coulomb en 2D.....	18
Fig.II.7 : cône de coulomb en 3D	18
Fig.II.8 : loi de coulomb régularisée.	19
Fig.II.9 : Deux corps élastiques déformable en contact unilatéral.	20
Fig.II.10 : Corps élastique déformable en contact avec un socle rigide indéformable (Problème de Signorini)	23
Fig.III.1 : éléments unidimensionnels [5]	27
Fig.III.2 : éléments bidimensionnels	27
Fig.III.3 : éléments tridimensionnels	28
Fig.III.4 : exemples des structures modélisée par éléments finis.	30

Fig.III.5 : Les étapes du calcul par éléments finis[6]	31
Fig.IV.1 : Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M	36
Fig.V.1 : Assemblage HEA 600 et IPE 400 par platine débordante sans raidisseur.....	38
Fig.V.2 : Assemblage HEA 600 et IPE 400 par platine débordante avec raidisseur.....	39
Fig.V.3 : Caractéristiques géométriques poteau-poutre.....	39
Fig.V.4 : Caractéristiques géométriques de la platine débordants	40
Fig.V.5 : Caractéristique du boulon M18.	41
Fig.V.6 : Modèle élément fini tridimensionnel de l'assemblage avec raidisseurs de poteaux.	42
Fig.V.7 : Modèle élément fini tridimensionnel de la moitié d'assemblage	42
Fig.V.8 : Condition aux limites et chargement	43
Fig.V.9 : Maillage de surface de contact platine et semelle de poteau.....	44
Fig.V.10 : Maillage de boulon.....	44
Fig.V.11 : déformées de l'assemblage avec des platines d'épaisseurs différentes de 10mm (à gauche), de 20mm (au milieu) et de 30 mm (à droite).....	45
Fig.V.12 : Phénomène de l'effet de levier dû à la déformabilité de la platine mince (extrait de Jean Morel) [9].....	46
Fig.V.13 : Distribution élastique des champs de contraintes de VONMISES dans l'assemblage avec une platine d'épaisseur de 10mm sous $M=36$ KNm et $V= 144$ KN.	47
Fig.V.14 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES dans l'assemblage avec une platine d'épaisseur de 20mm sous $M=36$ KNm et $V= 144$ KN.	48
Fig.V.15 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES dans l'assemblage avec une platine d'épaisseur de 30mm sous $M=36$ KNm et $V= 144$ KN.	49
Fig.V.16 : Déformées de l'assemblage sans (à droite) et avec la présence des raidisseurs (à gauche).....	50
Fig.V.17 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des poteaux dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).....	51
Fig.V.18 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des poutres dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).....	51

Fig.V.19 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des platines dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).....	52
Fig.V.20 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des boulons dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).....	52
Fig.V.21 : Déformations inélastiques des composants de l'assemblage Avec une platine d'épaisseur 10mm sous $M=216$ KNm et $V=864$ KN.....	54
Fig.V.22 : Déformations inélastiques des composants de l'assemblage Avec une platine d'épaisseur 20mm sous $M=216$ KNm et $V=864$ KN	55
Fig.V.23 : Déformations inélastiques des composants de l'assemblage Avec une platine d'épaisseur 30mm sous $M=216$ KNm et $V=864$ KN.	56
Fig.V.24 : Déformation inélastique dans la poutre de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216$ KNm et $V= 864$ KN.....	57
Fig.V.25 : Déformation inélastique dans le poteau de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216$ KNm et $V= 864$ KN.....	58
Fig.V.26 : Déformation inélastique dans la platine de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216$ KNm et $V= 864$ KN.....	58
Fig.V.27 : Déformation inélastique dans les boulons de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216$ KNm et $V= 864$ KN.....	59
Fig.V.28 : Influence de l'épaisseur de la platine en l'absence des raidisseurs de poteaux.	66
Fig.V.29 : Influence de l'épaisseur de la platine en présence des raidisseurs.	66
Fig.V.30 : Influences présence des raidisseurs platine épaisseur 20 mm	67

Liste des Tableaux

Liste des Tableaux de chapitre I

Tab.I.1 : valeur de la limite d'élasticité f_{yb} et de la résistance à la traction f_{ub} des boulons	11
Tab.I.2 : Les deux classes de boulons	11
Tab.IV.1 : Description de la quelque directive.....	34
Tab.IV.2 : Description de la quelque description.....	34
Tab.IV.3 : Exemples des systèmes d'unités de mesure cohérents.	35
Tab.V.1 : Caractéristiques géométriques de la poutre et du poteau (en mm).	39
Tab.V.2 : Dimensions de la platine débordants et positions des trous dans la platine (en mm)	40
Tab.V.3 : dimensions de raidisseur d'angle (en mm)	40
Tab.V.4 : Caractéristiques géométriques de boulon en (mm)	41
Tab.V.5 : les champs de contraintes VONMISES des éléments sous différentes épaisseurs.	45
Tab.V.6 : contraintes de VONMISES sans et avec raidisseur du poteau	50
Tab.V.7 : Influence de l'épaisseur de la platine	53
Tab.V.8 : Influence de l'épaisseur de la platine.....	60
Tab.V.9 : L'influence de la présence ou non de raidisseur	62
Tab.V.10 : L'influence de la présence ou non de raidisseur d'angle	64

Nomenclature

Symboles

M : Moment résistant.

Φ : Capacité de rotation.

S_j : Rigidité du ressort

γ_{mb} : Coefficient partiel de sécurité.

A_s : Section résistante de la partie filetée.

F_{vrd} : L'effort tranchant résistant de calcul revenant à un seul boulon.

F_{ub} : Résistance à la traction du boulon.

F_{Trd} : La résistance de calcul en traction par boulon est obtenue par la formule.

F_{yb} : Contrainte limite d'élasticité.

F_{pcd} : Précontrainte de calcul.

μ : coefficient de frottement.

m : nombre d'interface de frottement.

K_s : coefficient fonction des dimensions des trous.

γ_{ms} : coefficient partiel de sécurité.

F = force de frottement.

N = force normal.

\dot{u} : Vitesse relative tangentielle entre deux corps.

n : Nombre d'interface de frottement.

F_n : Composante normale et tangentielle à des forces de contact.

F_d^l : Densité de force volumique.

ε : Tenseur de déformation.

K^L : Opérateur d'élasticité.

R^C : Champ de densités de réaction.

W^C : Champ de déplacement.

$\partial_2\Omega$: forces imposées.

$\partial_c\Omega$: la zone de contact.

\vec{n} : Normale au contact.

\vec{t} : Tangente au contact.

E : module d'élasticité.

T_{fb} : Epaisseur de la semelle de la poutre.

T_{FC} : Epaisseur de la semelle du poteau.

T_{FB} : Epaisseur de l'âme de la poutre.

T_{wc} : Epaisseur de l'âme du poteau.

h_b : Hauteur de la poutre.

l_b : Longueur de la poutre.

b_{fc} : Largeur du poteau.

h_c : Hauteur du poteau.

h_p : Longueur du poteau.

h_{rd} : Hauteur du raidisseur.

b_{rd} : Longueur de base.

t_{rd} : épaisseur du raidisseur.

Abréviations

IPE : Poutrelles européennes en I.

ZAT : zone affectée thermiquement.

HR : haute résistance.

MEF : Méthode des éléments finis

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux Énergies Alternatives.

HEA : Poutrelles européennes en H à larges ailes.

Introduction Générale

Introduction générale

L'analyse des problèmes de contact dans les assemblages poutre-poteau avec platine d'extrémité d'aspects débordant et non débordant, semble être parmi les plus importantes. En effet, lors de la phase de chargement, les surfaces de contact entre la platine d'extrémité de la poutre et la semelle du poteau peuvent être classées en trois catégories : les zones d'adhérence, les zones de glissement et enfin celles de décollement. Afin d'avoir une meilleure compréhension du comportement au contact d'un tel type d'assemblage, des simulations éléments finis en trois dimensions avec approche contact doivent être réalisées. A cet effet, l'étude doit porter sur l'analyse de l'évolution de la distribution de ces zones. Ceci doit contribuer en vue de meilleures identification et quantification des influences de certains paramètres essentiels tels que l'épaisseur de la platine, la présence ou non de raidisseurs dans les poteaux ainsi que la présence des raidisseurs d'angle dans la zone d'extension (ou de débordement) de la platine.

Cela étant dit, le dernier point cité ci-dessus, concernant l'étude de l'influence des raidisseurs d'angle, fait l'objet du présent projet de fin d'études. Par ailleurs, il faut signaler que cette étude s'inscrit en continuité à celles effectuées dans le cadre de deux PFE [10] [11] réalisés durant les années précédentes. Le premier concernait les assemblages sans platine débordante. Quant au second, il traite l'étude au contact des assemblages avec platine débordante mais sans raidisseurs d'angle. Pour réaliser cet objectif, le modèle de calcul adopté sera celui du modèle d'éléments finis tridimensionnels utilisant des éléments de contact surfaciques.

Ce travail est composé de cinq chapitres représentés comme suit :

Le premier est consacré aux généralités sur les assemblages métalliques, avec les différentes configurations utilisées, en donnant quelques définitions sur les modes de transmission d'efforts et les moyens d'assemblage.

Le second est consacré à la mécanique du contact où quelques définitions, des aperçus sur les différents types de contact ainsi que les lois utilisées dans les frottements seront présentées.

Le troisième chapitre est consacré à l'introduction à la méthode des éléments finis, à la procédure d'analyse par éléments finis ainsi que les étapes de calcul.

Introduction générale

Le quatrième chapitre est consacré à une brève présentation du logiciel de calcul CAST3M, son fonctionnement et les procédures de calcul utilisées.

Le cinquième chapitre est consacré à une étude tridimensionnelle d'un assemblage poutre-poteau avec platine d'extrémité débordante (avec la présence ou non de raidisseurs d'angle) à l'aide du logiciel CAST3M et ce, en utilisant diverses conditions de contact notamment ; celles relatives au contact platine-semelle, et celles des boulons avec toutes les autres pièces de l'assemblage. Dans ce cadre (de platine débordante renforcée ou non par des raidisseurs d'angles), l'étude de l'influence de trois paramètres essentiels a été effectuée. Il s'agit en l'occurrence, de l'influence l'épaisseur de la platine, ainsi que celle de la présence ou non de raidisseurs dans les poteaux. Les résultats obtenus seront discutés et comparés à ceux obtenus lors du PFE précédent [11] ; faisant l'objet d'une étude raidisseurs d'angles.

Enfin, nous terminerons ce travail par une conclusion générale.

Chapitre I

Généralités sur les assemblages

Chapitre I. Généralités sur les assemblages

I.1. Introduction

Les assemblages par platine d'extrémité constituent les parties plus importantes dans les structures en acier. Les propriétés géométriques et mécaniques de ces assemblages ont une influence significative sur le comportement et la stabilité globale des structures.

I.2. Modes et rôle des assemblages

L'assemblage est un système qui permet de regrouper ou de réunir deux éléments ou plus soit par boulonnage, soit par soudage. Il assure la transmission et la répartition des diverses sollicitations entre les éléments assemblés

I.3. Les assemblages boulonnés

Les assemblages boulonnés sont les plus couramment utilisés en construction métallique. Les boulons sont souvent montés et serrés soit en atelier soit sur chantier. Le boulon est composé généralement d'une tête hexagonale et d'un corps cylindrique qui contient une partie filetée, d'un écrou, et d'une rondelle. En fonction du diamètre des vis, les jeux dans les trous sont de 1 à 3 mm ; Ils travaillent soit en traction, soit en cisaillement, soit en cisaillement-traction.

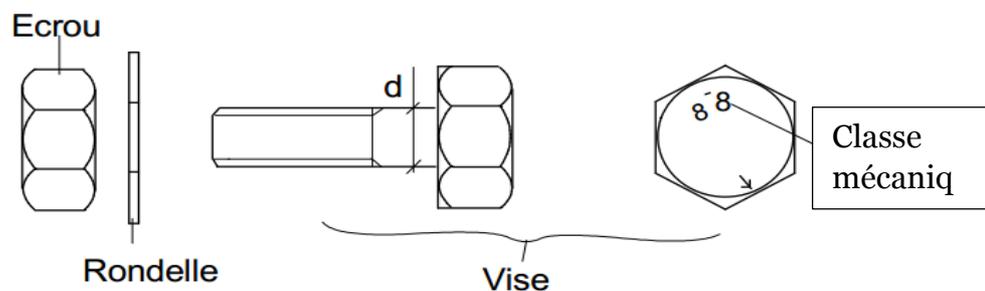


Fig.I.1 : Composants d'un boulon d'assemblage

I.4. Les assemblages soudés

Le soudage est un moyen d'assemblage qui permet de réunir deux éléments ou plus, par fusion localisée des parties des deux pièces à assembler (appelée métal de base) et la fusion d'un métal d'apport (baguette) qui a pour rôles l'apport de chaleur et de matière. Après refroidissement de cette zone, il y aura formation d'un cordon de soudure qui a pour rôle d'assurer la continuité de la matière entre les deux pièces à assembler. Cette zone de continuité (ou bien ce cordon) est souvent désignée comme étant une zone affectée thermiquement ou bien ZAT (figure I.2).

Les conditions de soudage :

- L'existence d'une source de chaleur suffisante pour avoir la fusion du matériau grâce au procédé de soudage à l'arc électrique dont l'intensité minimale est de 500 Ampères ;
- Pendant l'opération du soudage, il est préférable d'éviter la contamination atmosphérique en évitant l'infiltration de l'hydrogène dans le cordon et qui risque de créer des cavités ou des microcavités qui peuvent être sources de concentrations de contraintes et d'amorces de fissures ou de microfissures. Ces dernières risquent de donner lieu à des ruptures fragiles (brutales) ;
- Une aptitude du matériau à être soudé, appelée soudabilité. Par exemple, à cause de sa forte teneur en carbone, certaines catégories de fonte sont difficilement soudables.

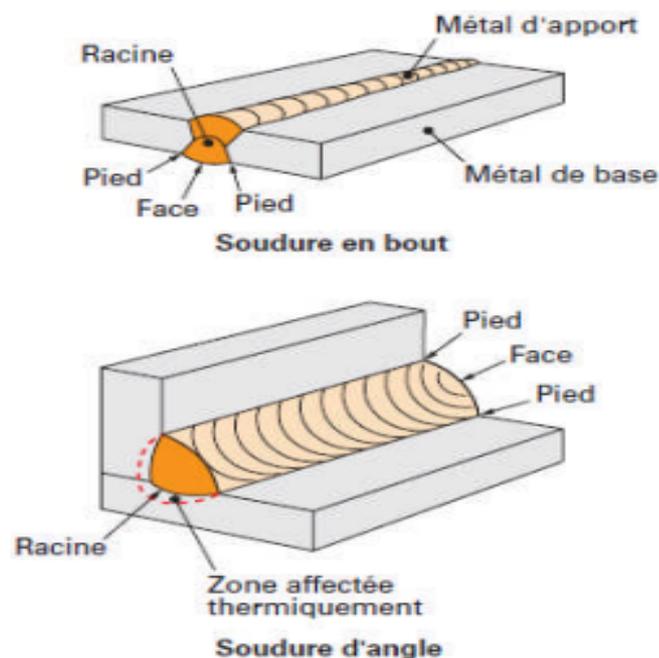


Fig.I.2 : Exemples de cas les plus courants de soudures.

I.5. Modes de transmission des efforts

La transmission des efforts dans les assemblages boulonnés aux seins de la construction métallique se fait généralement par la création des contraintes de cisaillement et/ou des contraintes de traction. Sur le plan réglementaire, la qualité requise pour un boulon est sa résistance au cisaillement, sa résistance à la traction et enfin sa résistance à l'action simultanée des contraintes de cisaillement et de traction [1].

I.5.1. Transmission des efforts par cisaillement

L'équilibre (ou la transmission) du champ de contraintes de cisaillement nécessaires à la transmission des efforts peut être obtenue par deux méthodes différentes :

- Soit Par butée (cas des boulons ordinaires);
- Soit par frottements (cas des boulons précontraints).
- *1^{er} Cas : transmission par butée* : (cas des boulons ordinaires)

La création du champ de cisaillement nécessaire à la transmission de l'effort est obtenue en absence des frottements des pièces, mais par la résistance au cisaillement des boulons. Dans ce cas, le corps du boulon (plus précisément celle de la tige de la vis) joue un rôle de butée (ou bien d'obstacle).

- *2^{eme} Cas : transmission par frottement* : (cas des boulons précontraints à haut résistance HR)

Considérons le cas de la transmission d'un effort N de la pièce C aux deux autres pièces A et B par l'application d'une force F_p perpendiculaire aux plans de contact de forte intensité (figure I.3). L'équilibre de ce système ne peut être réalisé que si les surfaces de contact sont parfaitement lisses. Ainsi, les états de surface de ces plans jouent un rôle primordial dans la transmission de cet effort N . Il s'agit donc d'un mode de transmission par cisaillement mais par frottements.

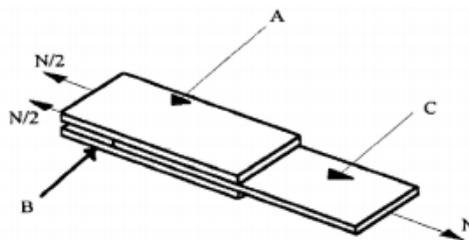


Fig.I.3 : Transmission d'un effort normal (assemblage de trois pièces)

I.5.2. Transmission des efforts par traction

Le fonctionnement mécanique des boulons précontraints et des boulons ordinaires n'étant pas identiques du fait de la présence d'une précontrainte pour les premiers il y a lieu d'étudier séparément la résistance à la traction des deux familles d'assembleurs.

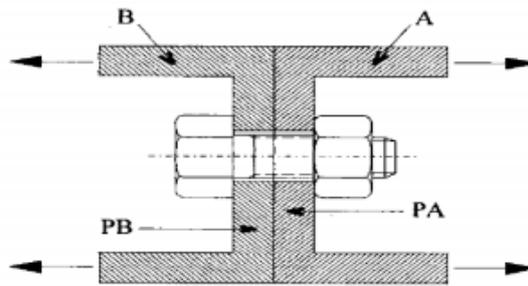


Fig.I.4 : Exemple du boulon ordinaire soumis à une traction

I.5.3. Transmission des efforts par traction–cisaillement

Dans ce cas, le type de sollicitation à transmettre d'un élément à l'autre provoque souvent cisaillement et traction simultanés dans les assemblages (exemple de la liaison poutre-poteau), donc également dans les assembleurs pris seul on parle d'interaction cisaillement-traction ;

Puisque les comportements mécaniques des boulons ordinaires et des boulons précontraints sont différents tant pour la traction que pour le cisaillement.

Cas d'assemblage avec des boulons précontraints :

La traction appliquée à l'assemblage décomprime les plaques en contact (les plaques assemblée). Et en même temps la présence de la transmission du cisaillement a lieu grâce à la pression de contact entre les pièces, réduisant ainsi la pression à l'interface des pièces et donc la capacité de transmission d'un effort de cisaillement ;

Cas d'assemblage avec des boulons ordinaire :

Dans ce cas le boulon (boulon ordinaire) lui-même est soumis à une interaction traction-cisaillement, à la pression diamétrale et au poinçonnement.

I.6. Différents types d'assemblages boulonnés par platine d'extrémité

Les poutres et les poteaux dans une structure en acier peuvent être assemblés par différent types d'assemblages. Dans le cas des assemblages boulonnés par platine d'extrémité, on distingue d'une manière générale les assemblages suivants[9] :

- Les assemblages poutre principale porteuse et poutre secondaire perpendiculaire à la poutre principale.
- Les assemblages poutre-poteau ;
- Les assemblages de continuité (poutre-poutre ou bien poteaux – poteaux);
- Les assemblages dans système en treillis ;
- Les assemblages poteau-fondation.

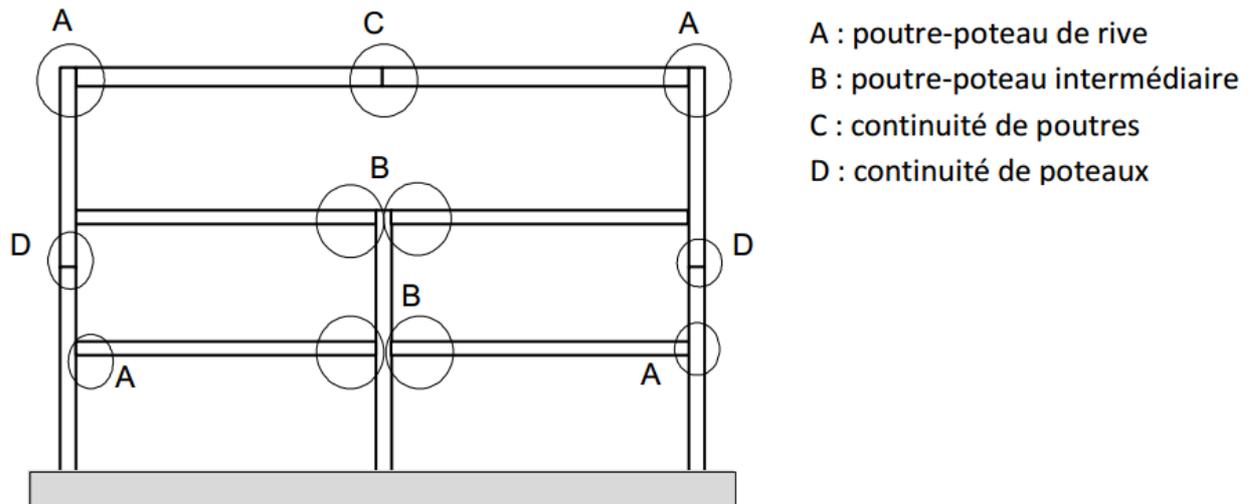


Fig.I.5 : Assemblages boulonnés par platine d'extrémité dans une structure en acier [2]

I.6.1. Assemblage poutre – poteau par platine d'extrémité boulonnée

Ce type d'assemblage est souvent utilisé dans le cas de changement de direction. Les sollicitations sont transmises de la poutre au poteau à l'aide de la platine soudée à l'extrémité de la poutre et attachée au poteau par des boulons. Les assemblages boulonnés par platine d'extrémité peuvent être réalisés par une platine courte non débordante ou débordante (figure I.6).

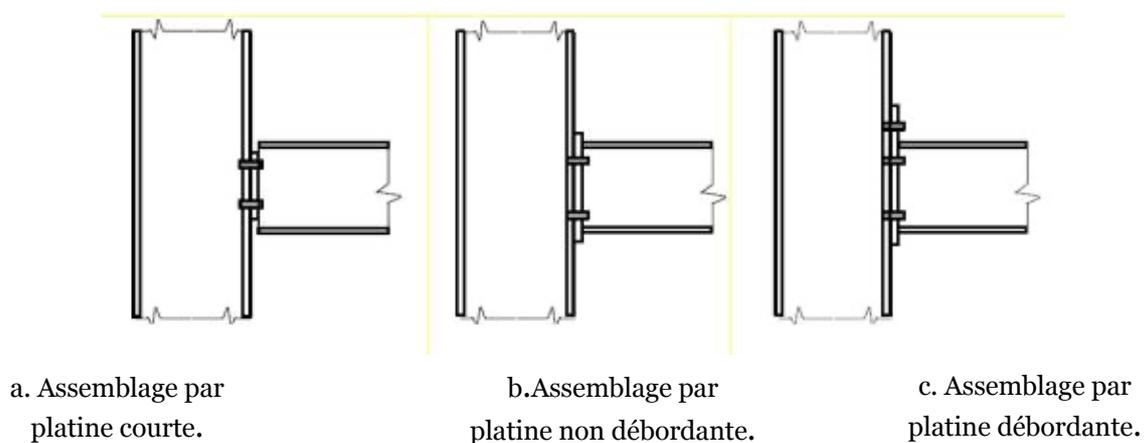


Fig.I.6 : Assemblage poteau poutre par platine d'extrémité boulonnée

La platine courte est soudée à l'âme de la poutre assemblée et boulonnée à la semelle du poteau. La platine non débordante recouvre la poutre sur toute sa hauteur. Enfin la platine débordante dépasse la hauteur de la poutre.

I.7. Comportement des assemblages

Dans l'analyse globale des structures poutres poteaux en acier, l'assemblage boulonné par platine d'extrémité courte, est dimensionné pour ne transmettre aucun

moment de flexion de la poutre vers le poteau. Cet assemblage est modélisé comme un nœud articulé ; ou bien assemblage articulé [2] (rigidité nulle).

Quant à l'assemblage boulonné par platine d'extrémité débordante ou non débordante, celui-ci est dimensionné pour transmettre l'ensemble des sollicitations (le moment, l'effort tranchant et l'effort normal). Il est modélisé comme un nœud rigide.

La figure ci-dessous présente des exemples de comportement d'assemblages poutre-poteau par platine d'extrémité. En effet, la courbe 01 correspond à l'assemblage idéalisé comme un nœud articulé. La courbe 02 correspond à l'assemblage idéalisé comme un nœud rigide. La courbe 3 possède un comportement non-linéaire intermédiaire (semi-rigide) situé entre les deux extrêmes (courbes 1 et 2).

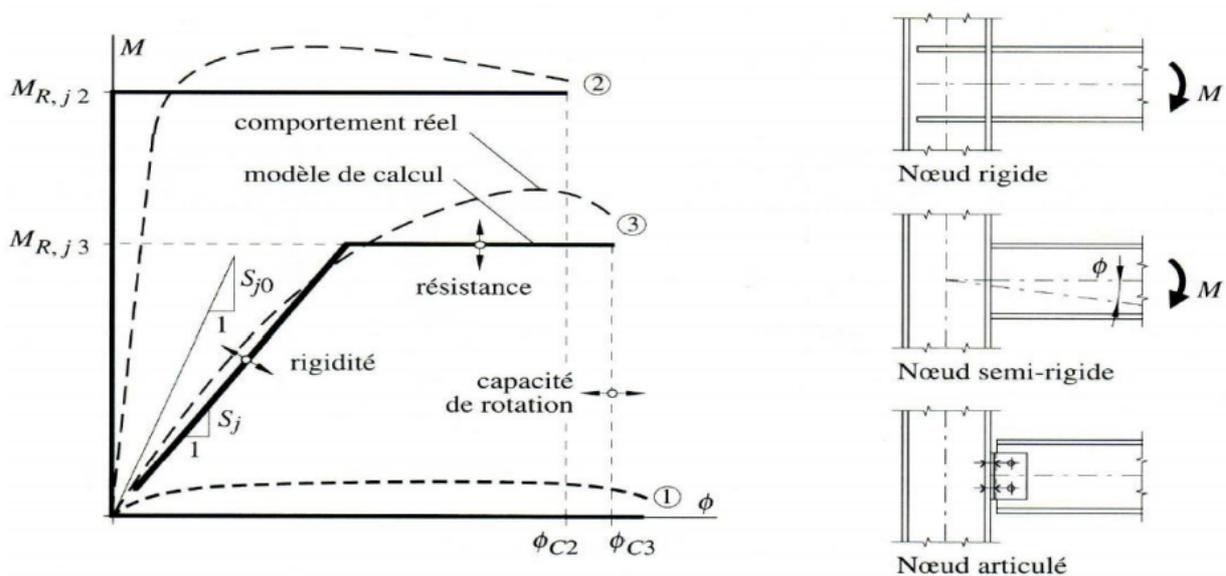


Fig.I.7 : Comportement des assemblages en acier.

I.8. Classification des assemblages

Les assemblages peuvent être classés par rigidité et par résistance [2]

I.8.1. Classification par rigidité

Un assemblage peut être classé comme rigide, nominalement articulé ou semi-rigide en fonction de sa rigidité en rotation.

Un assemblage peut être classé sur la base de résultats expérimentaux ou numériques dont le modèle est validé expérimentalement, d'une expérience significative ou par des calculs fondés sur les résultats d'essais.

I.8.1.1. Assemblages articulés

On dit qu'un assemblage est articulé si

- Il est capable de transmettre les efforts sans développer de moments ;
- Il est capable de développer les rotations résultant de l'effet des charges appliquées

I.8.1.2. Assemblages rigides

Les assemblages classés comme rigides peuvent posséder une rigidité en rotation suffisante à même de justifier une analyse basée sur une liaison totale.

I.8.1.3. Assemblages semi-rigides

C'est un assemblage qui ne satisfait pas les critères donnés pour un assemblage rigide ou pour un assemblage articulé. Il doit être classé comme assemblage semi-rigide.

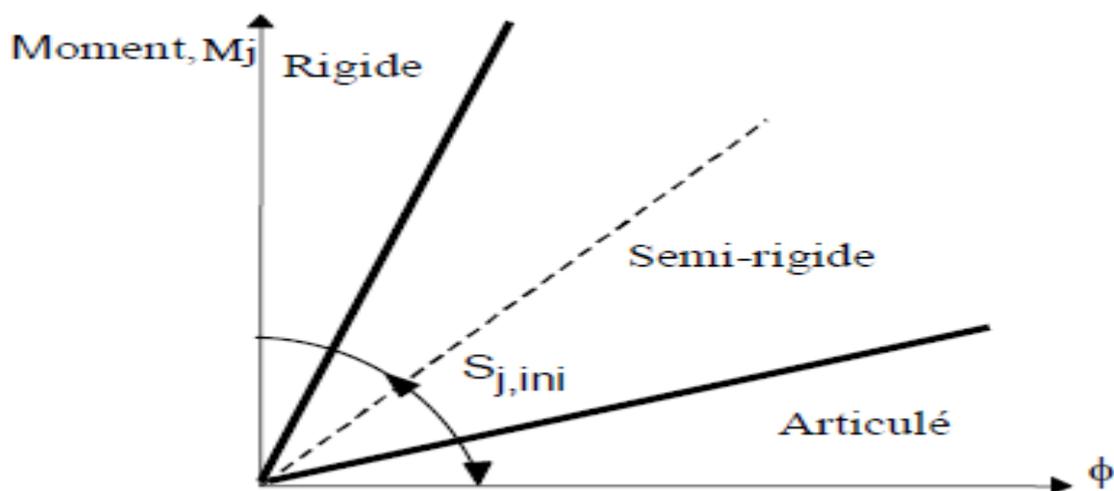


Fig.I.8 : Classification des assemblages par rigidité.[2]

I.8.2. Classification par résistance

Un assemblage peut être classé comme à résistance complète ou à résistance partielle en comparant son moment résistant M avec les moments résistants des barres attachées.

I.8.2.1. Assemblages à résistance complète (pleine résistance)

La résistance de calcul d'un assemblage à résistance complète ne soit pas inférieure à celle des barres attachées.

I.8.2.2. Assemblage à résistance partielle

L'assemblage doit posséder une capacité de rotation suffisante pour assurer la formation de la rotule plastique.

I.8.2.3. Assemblage articulé

Il possède une faible résistance, au maximum 25% de la résistance minimale requise pour avoir un assemblage à résistance complète.

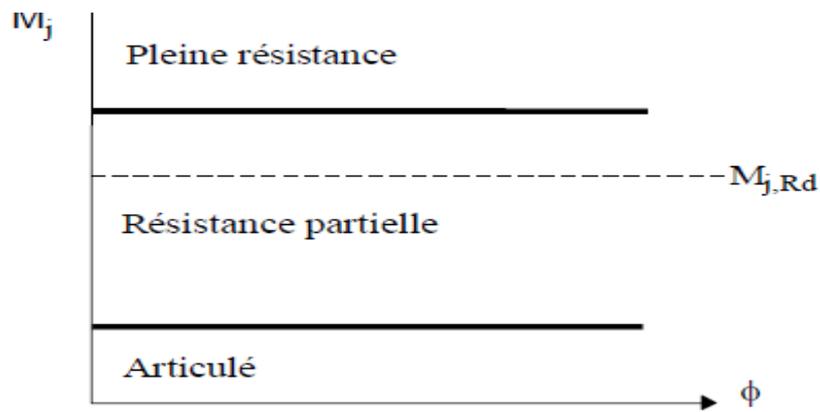


Fig.I.9 : Limite de classification des assemblages par résistance [3]

I.9. Dimensionnements des boulons ordinaires

- Coefficient au Résistance des boulons au cisaillement : $\gamma_{Mb} = 1.25$;
- Coefficient au Résistance des boulons a la traction : $\gamma_{Mb} = 1.50$.

I.9.1. Assemblages sollicités au cisaillement

On doit faire la vérification pour :

$$F_{vsd} \leq F_{vRd} \quad (\text{I.1})$$

F_{vsd} : L'effort tranchant sollicitant de calcul revenant à un seul boulon ;

F_{vRd} : L'effort tranchant résistant de calcul d'un seul boulon.

Pour les classes des boulons de qualité : 4.6, 5.6 et 8.8 :

$$F_{vRd} = 0,6 \cdot A_s \cdot f_{ub} / \gamma_{Mb} \quad (\text{I.2})$$

Pour les classes des boulons de qualité : 4.8, 5.8, 6.8 et 10.9

$$g F_{vRd} = f_{ub} \cdot 0,5 A_s / \gamma_{Mb} \quad (\text{I.3})$$

Avec : A_s = section résistante de la partie fileté ;

f_{ub} = résistance a la traction du boulon.

I.9.2. Assemblages sollicités à la traction

La résistance en traction des boulons vaut :

$$F_t = 0,9 \cdot f_{ub} \cdot A_s / \gamma_{Mb} \quad (\text{I.4})$$

I.9.3. Assemblages sollicités simultanément à la traction et au cisaillement

Les boulons soumis à des efforts combinés des cisaillements V et de traction T. Doivent satisfaire aux conditions suivantes :

$$F_{vSd}/F_{vRd} + F_{tSd}/1,4F_{tRd} \leq 1 \quad (I.5)$$

Tab.I.1 : valeur de la limite d'élasticité f_{yb} et de la résistance à la traction f_{ub} des boulons

Classe	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
$F_{yb}=(N/mm^2)$	240	320	300	400	480	640	900
$F_{ub}=(N/mm^2)$	400	400	500	500	600	800	1000

Les boulons à haute résistance HR sont uniquement les classes 8.8 et 10.9.

I.10. Dimensionnement des boulons précontraints (à haute résistance)

Ils présentent le même aspect que le boulon ordinaire, un boulon HR (à haute résistance) est constitué d'acier à haute limite élastique. Du point de vue des calculs, les boulons précontraints ne travaillent pas au cisaillement, mais transmettent les efforts par frottements [1].

Dans le mode de transmission par frottement, seules les deux classes de boulons HR 8.8 et 10.9 sont autorisées à être utilisées en précontrainte.

Tab.I.2 : Les deux classes de boulons

Repère	Appellation	$F_{ub}=(MPa)$	$F_{yb}=(MPa)$	$\Delta L/L (%)$
HR 1	HR 10.9	1000	900	≥ 8
HR 2	HR 8.8	800	640	≥ 12

I.10.1. Assemblages résistant au glissement

La résistance au glissement F_{SRd} d'un boulon HR précontraint vaut :

$$F_{SRd} = k_s \cdot m \cdot \mu \cdot F_{pcd} / \gamma_{Ms} \quad (I.6)$$

- F_{pcd} : Précontrainte de calcul ;
- μ : Coefficient de frottement ;
- m : Nombre d'interface de frottement ;
- k_s : Coefficient fonction des dimensions des trous ;
- γ_{Ms} : Coefficient partiel de sécurité.

I.11. Conclusion

D'une manière générale, la construction métallique et les avantages qu'elle offre ne sont plus à démontrer. Elle ouvre une large porte vers la modernisation et l'industrialisation de la construction. Elle est appréciée et recherchée dès que des grandes portées ou des grandes hauteurs s'imposent.

Chapitre II

Mécanique de contact

Chapitre II. *Mécanique de contact*

II.1. Introduction

Le problème de contact est très fréquent dans les structures mécaniques en général et métalliques en particulier. En effet les aires de contact constituent des zones de transition et de transmission d'efforts entre les différents éléments de la structure, toutefois le phénomène physique que constitue le frottement et étroitement lié au contact en effet en raison des états de rugosité des surfaces en contact celui-ci ne peut se faire sans frottement.

Du point de vue physique, l'étude des contacts entre les solides qui composent une structure est également délicate à mettre en œuvre car on maîtrise difficilement tous les paramètres :

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

II.1.1. L'aire de contact

Elle correspond à la surface de contact entre deux solides, définie par leur définition géométrique nominal.

II.1.2. Les pressions de contact

Les actions et les réactions de solides en contact les uns contre les autres sont appliqués par l'intermédiaire de pressions de contact. Ces dernières (les pressions) ont des points d'application qui se trouvent uniquement sur l'aire de contact.

II.1.3. Les types de contacts

On distingue deux types de contact

- Le contact bilatéral ou le contact est maintenu quels que soit les directions des efforts appliqués [10] ;
 - Le contact unilatéral ou le contact est maintenu seulement si les efforts appliquent les solides l'un contre l'autre.
-

Du point de vue zone de contact on peut aussi distinguer les autres de types de contact :

- Contact surfacique : la zone de contact est initialement une surface le cas de contact entre deux pièces prismatiques.

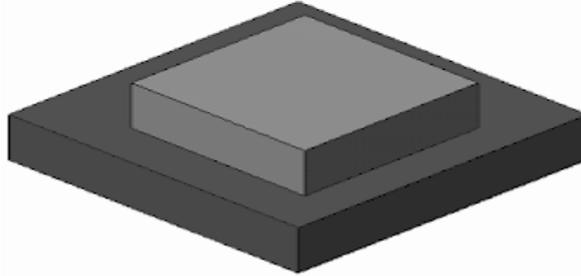


Fig.II.1 : exemple de contact surfacique.

- Contact linéique : la zone de contact est initialement une ligne le cas de contact entre un cylindre et un autre cylindre.

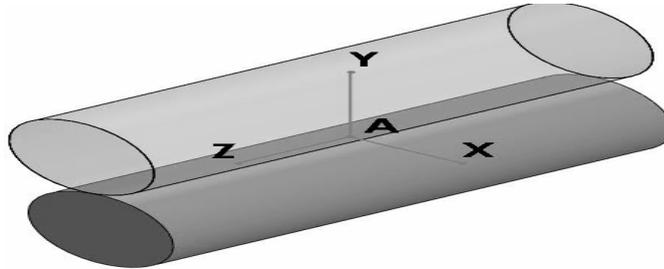


Fig.II.2 : exemple de contact linéique.

- Le contact ponctuel : la zone de contact est initialement un point le cas du contact d'une sphère – une surface plane.

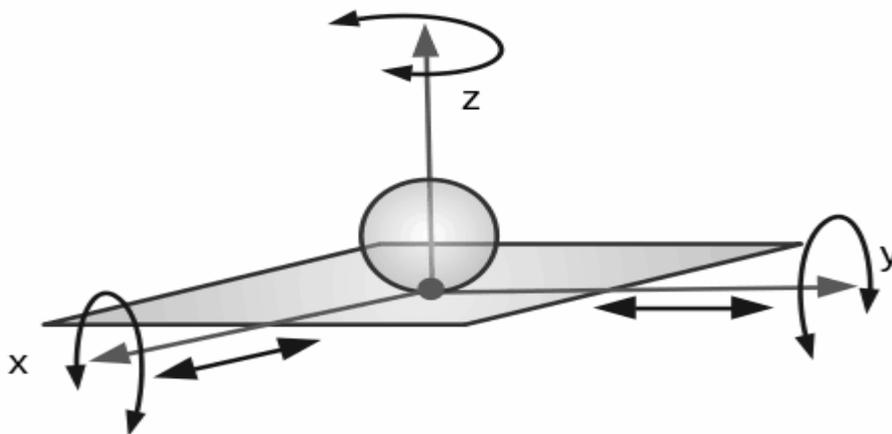


Fig.II.3 : exemple de contact linéique.

II.1.4. Les non linéarité dues au contact :

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

-
- Les non-linéarités de type comportement qui portent sur la loi de Comportement du matériau : plasticité et endommagement, ...
 - Les non-linéarités de type géométrique qui sont prises en compte dans le Cas de grandes déformations ou de grands déplacements (lorsque la configuration déformée ne peut être confondue avec la configuration non déformée).
 - Les non-linéarités de type contact associées au fait que dans le contact parfait entre deux solides du décollement ou du glissement peut apparaître.

Elles se séparent en deux catégories, les non-linéarités de contact unilatéral et celles de frottement.

II.2. Les frottements :

Le frottement est une interaction qui s'oppose au mouvement relatif entre deux systèmes en contact, le frottement peut être étudié au même titre que les autres types de force ou de couple, son action est caractérisée par une norme et une orientation, ce qui en fait un vecteur.

Sa formule est donnée comme suite :

$$F = \mu N \quad (\text{II.1})$$

Avec :

- F = force de frottement ;
- μ = coefficient de frottement ;
- N = force normale.

Le frottement doit essentiellement tenir compte trois phénomènes :

- L'existence d'un seuil d'efforts 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.

II.2.1. Les lois de frottement

Dans une loi de frottement, il existe un *seuil d'effort* en dessous duquel aucun glissement n'est possible et une éventuelle dépendance de ce seuil à l'intensité des efforts normaux. Par ailleurs le déplacement de glissement semble irréversible ce qui pousse à imaginer, pour les lois de frottement, des relations entre les forces de frottement et la vitesse de glissement. Par ailleurs, ces lois ne doivent intervenir que lorsqu'il n'y a pas de décollement sur la zone de contact.

Pour définir les lois de frottement. On définit le glissement et la vitesse de glissement :

$$\vec{u}_t = (\vec{u}_2 - \vec{u}_1) - ((\vec{u}_2 - \vec{u}_1) \cdot \vec{n}) \cdot \vec{n} \quad (\text{II.2})$$

$$\dot{u}_t = \frac{\partial \vec{u}_t}{\partial t} \quad (\text{II.3})$$

II.2.2. 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 [4].

Elle s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{cases} \text{Si } f_t \leq g \text{ alors } \dot{u}_t = 0 & (\text{adhérence}) \\ \text{Si } f_t = g \text{ alors } \exists \lambda > 0 \text{ tel que } \dot{u}_t = -\lambda f_t & (\text{glissement}) \end{cases} \quad (\text{II.4})$$

Où

- f_n Et f_t des composantes normales et tangentielles à des forces de contact respectivement ;
- g : un seuil d'adhérence / glissement fixé a priori et il dépend entre autres de la limite d'élasticité du matériau .

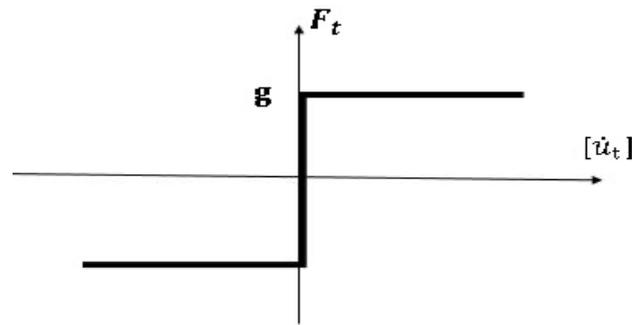


Fig.II.4 : loi de tresca

II.2.2.1. Loi de coulomb

Dans la loi de coulomb (1785), le seuil d'adhérence/ glissement est proportionnel a l'intensité des efforts normaux [4] :

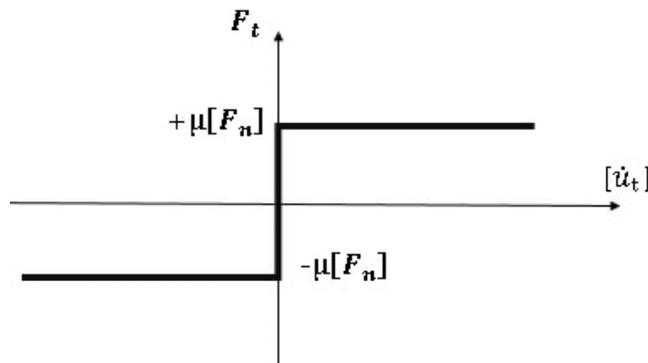


Fig.II.5 : loi de coulomb

Donc :

$$\begin{cases} \text{Si } f_t \leq \mu f_n \text{ alors } \dot{u}_t = 0 \text{ (adhérence)} \\ \text{Si } f_t = \mu f_n \text{ alors } \exists \lambda > 0 \text{ tel que } \dot{u}_t = -\lambda f_t \text{ (glissement)} \end{cases} \quad (\text{II.5})$$

- μ : Le coefficient de frottement qui dépend des états de surface en contact.

Le lieu géométrique de l'extrémité du vecteur force de contact peut être représenté sous forme d'un cône en 2D (Fig.II.6 : cône de coulomb en 2D ou en 3D (

Fig.II.7 : cône de coulomb en 3D on l'appelle le cône de coulomb. L'enveloppe de ce cône est la surface seuil du glissement dont la définition et l'utilisation est a rapproché de la définition de la surface seuil en plasticité.

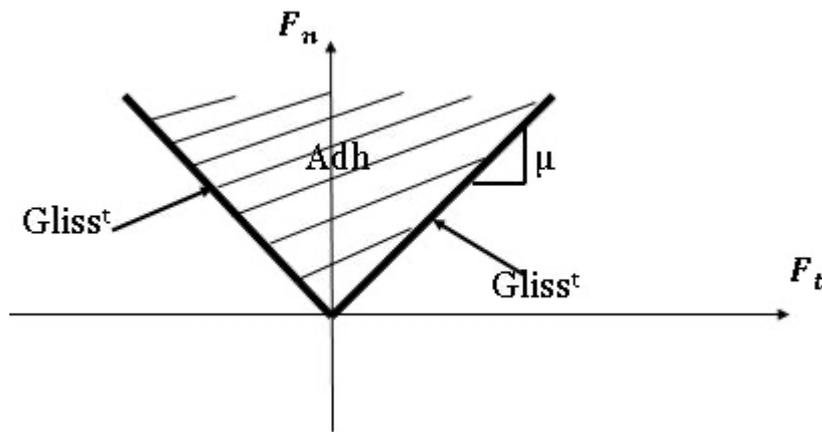


Fig.II.6 : cône de coulomb en 2D

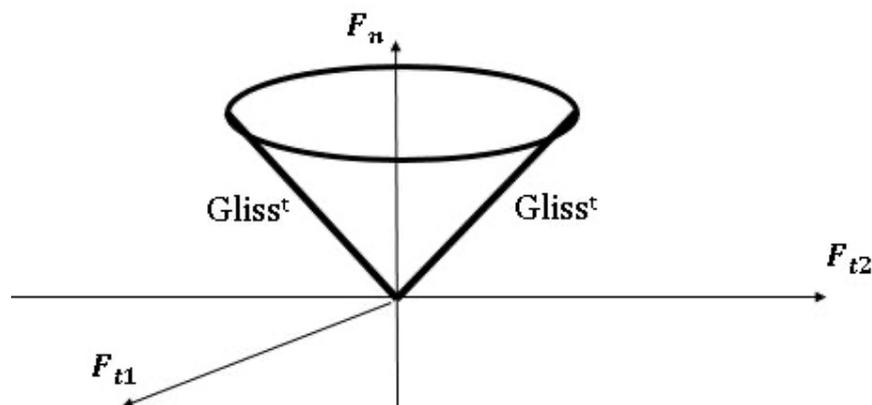


Fig.II.7 : cône de coulomb en 3D

La loi de coulomb présente aussi certain inconvénient :

- Le manque de relation biunivoque entre les forces de frottement et la vitesse de glissement.
- Le caractère non- différentiable de la loi.
- Le changement brutal de comportement au passage adhérence/glissement.

II.2.2.2. Loi de coulomb régularisée

Pour remédier aux inconvénients précédents, on utilise souvent des lois régularisées qui sont plus douces. Une loi autorisant un glissement élastique réversible paramétré par une raideur élastique K_e ; est souvent utilisée. Nous pouvons l'observer sur la (

Fig.II.8). Toutefois, cette raideur est difficile à évaluer car elle dépend essentiellement de l'élasticité des aspérités des zones en contact. Sa valeur étant généralement très grande, de manière à être proche de la loi de Coulomb, ce qui laisse apparaître des problèmes numériques d'instabilités lors de la résolution [4]

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

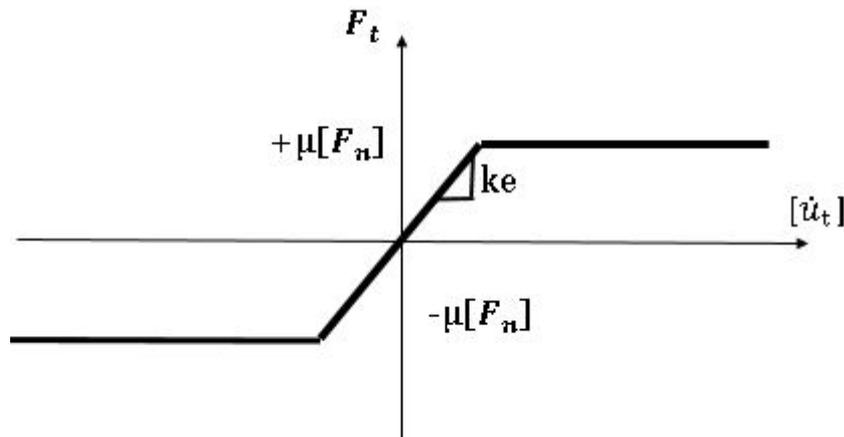


Fig.II.8 : loi de coulomb régularisée.

II.2.2.3. Loi de coulomb en quasi statique :

Au lieu d'une relation entre forces de frottements et vitesse de glissement, la loi de coulomb peut être réduite, dans le cas de problèmes statiques ou monotones quasi statique, à une relation entre les forces de frottement et les déplacements de glissement :

$$\begin{cases} \text{Si } f_t \leq \mu f_n \text{ alors } u_t = 0 & (\text{adhérence}) \\ \text{Si } f_t = \mu f_n \text{ alors } \exists \lambda > 0 \text{ tel que } u_t = -\lambda f_t & (\text{glissement}) \end{cases} \quad (\text{II.6})$$

Toutes fois ; cette formulation ne peut être adoptée et utilisée que sous la condition qu'en tout point de la zone de contact la variation des efforts soit monotone l'une des possibilités de conserver cette monotonie est d'intervenir au niveau des changements extérieurs. Mais cela reste difficile à maîtriser. La raison est due au fait qu'une monotonie du chargement extérieur n'assure pas forcément une monotonie des forces de contact.

Dans le cas des hypothèses de petites déformations et où les déplacements relatifs sont faibles, nous pouvons considérer comme monotones les variations des efforts dans les zones de contact ; et la loi de coulomb en quasi-statique peut être appliquée de manière satisfaisante.

II.3. Formulation mathématique du problème de contact :

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

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

$$U^l_{|\Omega^l} = U^l \quad L=1,2$$

Par souci de simplicité, on supposera que :

$$U^l_d = 0 \quad L=1,2$$

- Sur la seconde partie notée $\partial_2\Omega^l$, une densité surfacique de forces F^l_d est appliquée.
- La dernière partie (complémentaire) notée $\partial_c\Omega^l$ tel 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 Γ_c .

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

Nous supposons que le tenseur des déformations ε est linéaire et nous noterons K^l .

L'opérateur d'élasticité du matériau associé à Ω^l .

n^l : est la normale à la frontière de Ω^l orientée positivement vers l'extérieur.

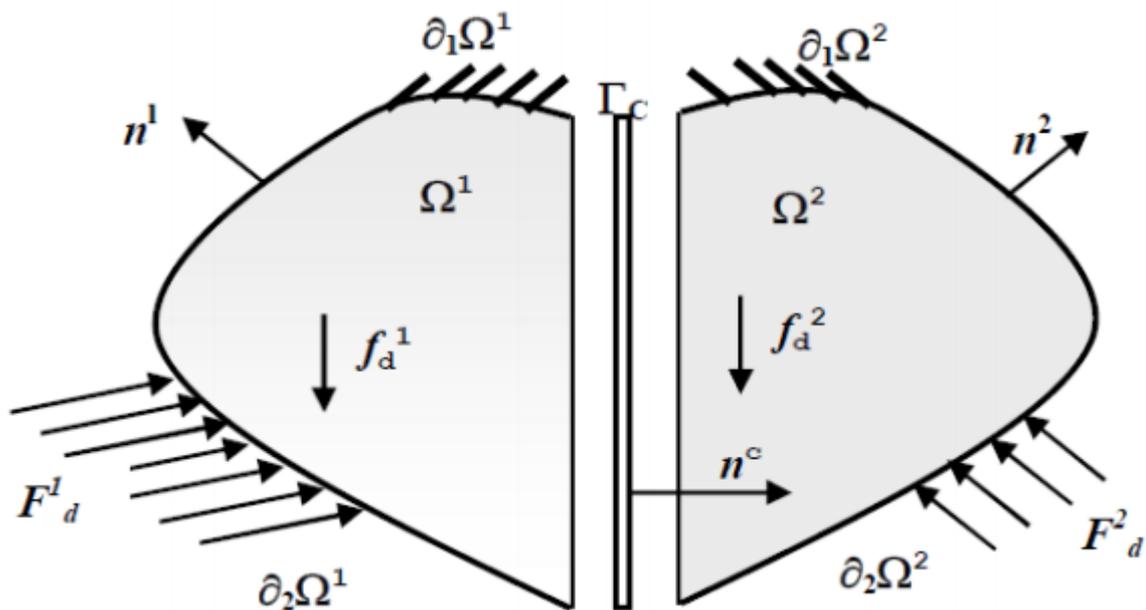


Fig.II.9 : Deux corps élastiques déformable en contact unilatéral.

II.3.1. Cas du contact unilatéral avec frottement

Nous adoptons comme loi de frottement, la loi de coulomb en quasi statique, les conditions de contact avec frottement à l'interface Γ_c peut-être formulé comme suite :

Avec :

w^c : Champ de déplacement

R^c : Champ de densités de réaction

$$w_n^c = w_n^1 - w_n^2 \leq 0 \quad (\text{II.7})$$

$$w_n^c = w_n^1 - w_n^2 \leq 0 \quad (\text{II.8})$$

$$w_n^c = w_n^1 - w_n^2 \leq 0 \quad (\text{II.9})$$

$$R_n^l \leq 0 \quad , l = 1, 2 \quad (\text{II.10})$$

$$R_n^l w_n^c = 0 \quad , l = 1, 2 \quad (\text{II.11})$$

$$|R_t^l| \leq \mu |R_n^l| \quad , l = 1, 2 \quad (\text{II.12})$$

$$|R_t^l| < \mu |R_n^l| \rightarrow w_t^l = 0 \quad , l = 1, 2 \quad (\text{II.13})$$

$$|R_t^l| \leq \mu |R_n^l| \rightarrow \exists \lambda \geq 0 \text{ tel que } w_t^l = -\lambda R_t^l \quad l = 1, 2 \quad (\text{II.14})$$

II.3.2. Cas de contact unilatéral sans frottement

Soit w^c le champ de déplacement et R^c le champ de densité qui vérifient les conditions de contact sans frottement à l'interface Γ_c sont données par les relations suivantes :

$$w^c = w^1 - w^2 \quad (\text{II.15})$$

Pour tout vecteur Z , on écrit :

$$z_n = z^t n^c \quad \text{et} \quad z_t = Z - z_n n^c \quad (\text{II.16})$$

Les champs de déplacement,

$$w^c = w_n^c n + w_t^c t \quad (\text{II.17})$$

Les champs de densité,

$$R^c = R_n^c + R_t^c \quad (\text{II.18})$$

Vérifient les conditions de contact sans frottement à l'interface Γ_c

Ces conditions peuvent être formulées de la manière suivante :

$$w_n^c \leq 0 \quad (\text{II.19})$$

$$R_n^c \leq 0 \quad (\text{II.20})$$

$$w_n^c R_n^c = 0 \quad (\text{II.21})$$

$$R_t^c = 0 \quad (\text{II.22})$$

- L'équation (II.15) indique qu'il ne peut y avoir que décollement et non pénétration.
- L'équation (II.16) indique que les composantes normales des densités de réaction ne peuvent correspondre qu'à de la compression.
- L'équation (II.17) appelée condition de complémentarité elle indique qu'en tout point il y a contact, soit décollement.
- Et enfin l'équation (II.18) statue sur la nullité des composantes tangentielles des vecteurs densités de réaction ce que signifie l'absence du frottement.

II.4. Le cas particulier du problème de signorini

Signorini en 1933 a proposé une formulation de problème tel que le contact sans frottement d'un solide élastique sur un solide considéré indéformable (infiniment rigide), on note par Ω le solide supérieur, élastique déformable, en contact avec le solide inférieur indéformable.

Soit $\partial\Omega$ la frontière de Ω ,

Avec : $\partial\Omega = \partial_1\Omega \cup \partial_2\Omega \cup \partial_c\Omega$ et : $\partial_1\Omega \cap \partial_2\Omega \cap \partial_c\Omega = \emptyset$

Tel-que : $\partial_1\Omega$: Déplacement imposée.

$\partial_2\Omega$: forces imposées.

$\partial_c\Omega$: la zone de contact.

\vec{n} : normale au contact.

\vec{t} : tangente au contact.

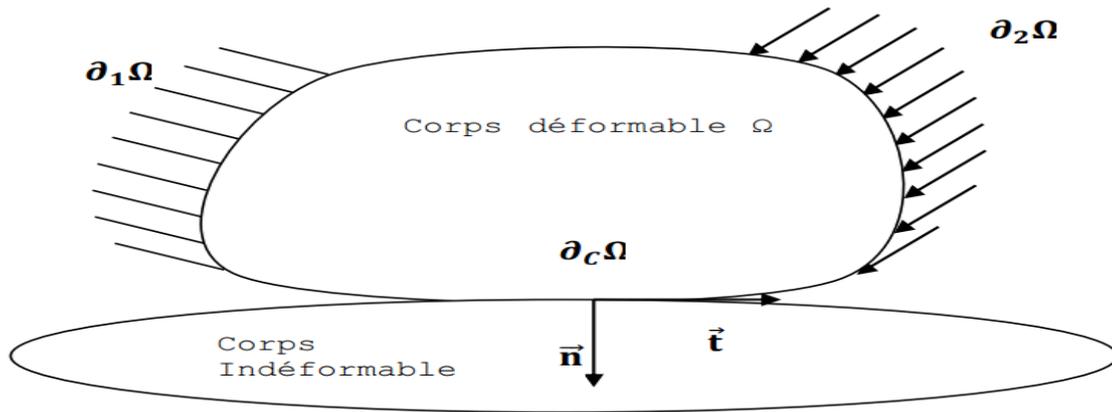


Fig.II.10 : Corps élastique déformable en contact avec un socle rigide indéformable (Problème de Signorini)

On note aussi la zone de contact Γ_c telle que : $\Gamma_c = \partial_c \Omega$.

Et : le champ de déplacement W ;

Aussi que : le champ de densité de réaction R ;

Le condition de contact peuvent écrire de la manière suivante :

$$W_n \leq 0 \quad (\text{II.23})$$

$$R_n \leq 0 \quad (\text{II.24})$$

$$W_n \cdot R_n \leq 0 \quad (\text{II.25})$$

- Pour le cas avec frottement de coulomb :

$$|R_t| \leq \mu |R_n| \quad (\text{II.26})$$

$$|R_t| \leq \mu |R_n| \Rightarrow W_t = 0 \quad (\text{II.27})$$

$$|R_t| \leq \mu |R_n| \Rightarrow \exists \lambda \geq 0 \text{ telle que : } W_t = -\lambda R_t \quad (\text{II.28})$$

- Pour le cas sans frottement :

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

II.4.1. Conclusion

Dans ce chapitre on a parlé sur les problèmes de contact entre deux corps avec frottement, nous avons vu deux principales lois de frottement (coulomb et tresca). Parmi les lois de frottement semblent être plus réalistes, on a cité la loi de coulomb.

Toutefois, cette loi présente quelques difficultés particulièrement en 3D. De convergence vers la solution exacte lorsque le coefficient de frottement prend des valeurs assez élevées.

Chapitre III

Introduction à la
méthode des éléments
finis

Chapitre III. *Introduction à la méthode des éléments finis*

III.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 d'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.

III.2. Définition

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 [8]. 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.

III.3. Avantages et inconvénient de la méthode des éléments finis

III.3.1. 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.

III.3.2. 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 ;
- Elle ne fournit aucune forme de solution susceptible de permettre une étude analytique de l'effet d'un changement de paramètre par exemple.

III.4. Application

On retrouve les premières applications véritables de la méthode des éléments finis en 1956 en mécanique des structures. Un groupe de chercheurs (Turner, Clough, Martin et Topp) de Boeing utilisent cette méthode pour calculer la voilure d'un avion.

La méthode des éléments finis est maintenant reconnue comme l'une des principales méthodes de résolution des équations aux dérivées partielles (EDP) dans les géométries quelconques, que ce soit en dimension un, deux ou trois. On trouve même des méthodes d'éléments finis en dimension quatre.

III.5. Procédure de base de la MEF

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

III.5.1. 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.

III.5.2. Qualité d'un élément finis

Pour obtenir un bon élément fini doit réunir les propriétés suivantes :

- Convergence rapide.
- Aucun défaut de base ;
- Qualité de convergence et précision conservée pour une distorsion raisonnable ;
- Bonne précision ;
- Vecteurs forces consistantes ;
- Conforme possible avec d'autres modèles ;
- Dérivation théorique simple et claire ;

- Programmation efficace et claire.

III.5.3. 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.

III.5.3.1. Les éléments à une dimension :

Ces éléments selon leur degré, sont des morceaux de droite ou de courbe. (Fig.III.1 : éléments unidimensionnels)

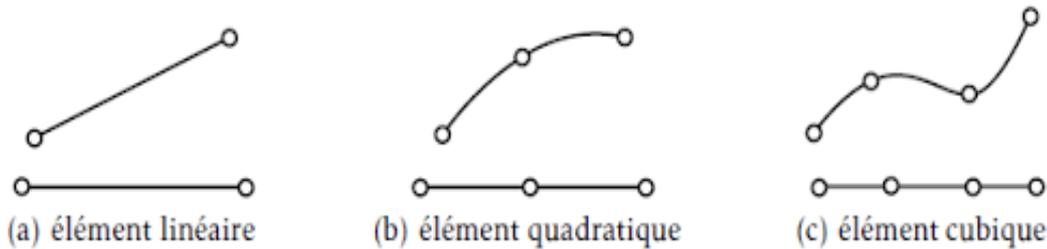


Fig.III.1 : éléments unidimensionnels [5]

III.5.3.2. Les éléments à deux dimensions :

Ces éléments, selon leur degré, sont des morceaux de plan ou de surface. (Fig.III.2)

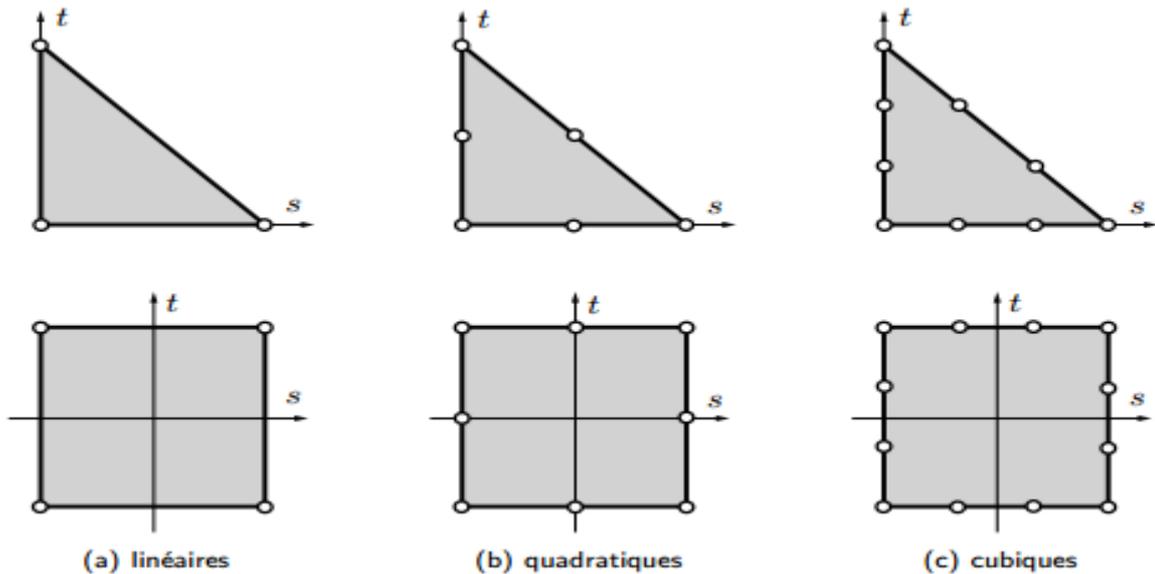


Fig.III.2 : éléments bidimensionnels

III.5.3.3. Les éléments à trois dimensions :

Ces éléments, selon leur degré, des morceaux de volume bornés par des faces planes ou non- planes. (Fig.III.3).

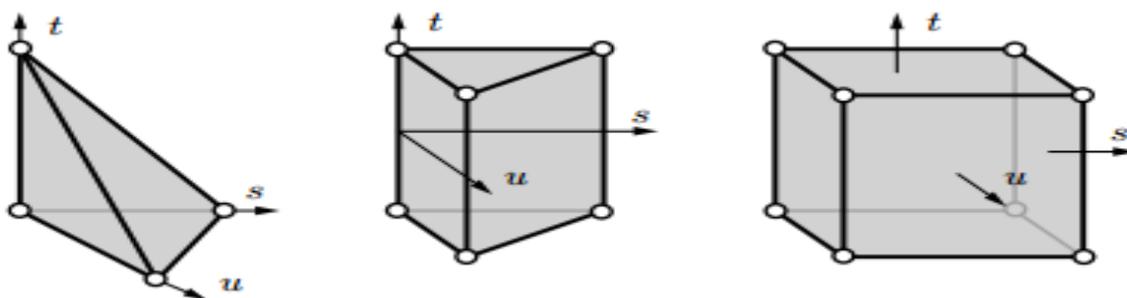


Fig.III.3 : éléments tridimensionnels

III.5.4. Démarche de la construction d'un éléments finis

Les principales étapes de construction d'un modèle finis, sont les suivantes [5] :

- 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

III.5.5. Taille des élément 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.

III.5.6. 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 finis », 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.

III.5.7. 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).

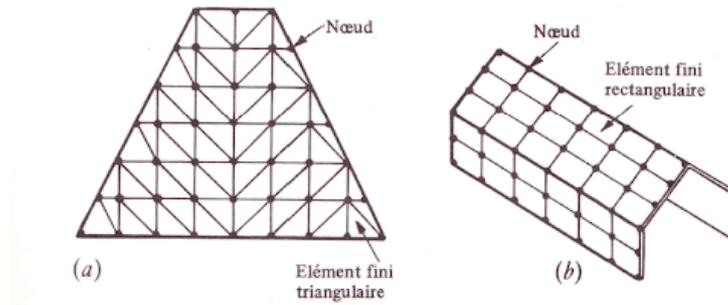


Fig.III.4 : exemples des structures modélisées par éléments finis.

III.6. Le maillage

Cette opération consiste à subdiviser le domaine Ω en un ensemble de formes simples, en 2D le domaine Ω 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.

III.6.1. Règles de maillage

Le domaine Ω 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 Ω ;
- 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.

III.6.2. Utilité du maillage :

L'opération de maillage du domaine Ω permet de :

- Calculer plus facilement les intégrales sur le domaine Ω , 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.

III.7. Étapes du calcul par éléments finis

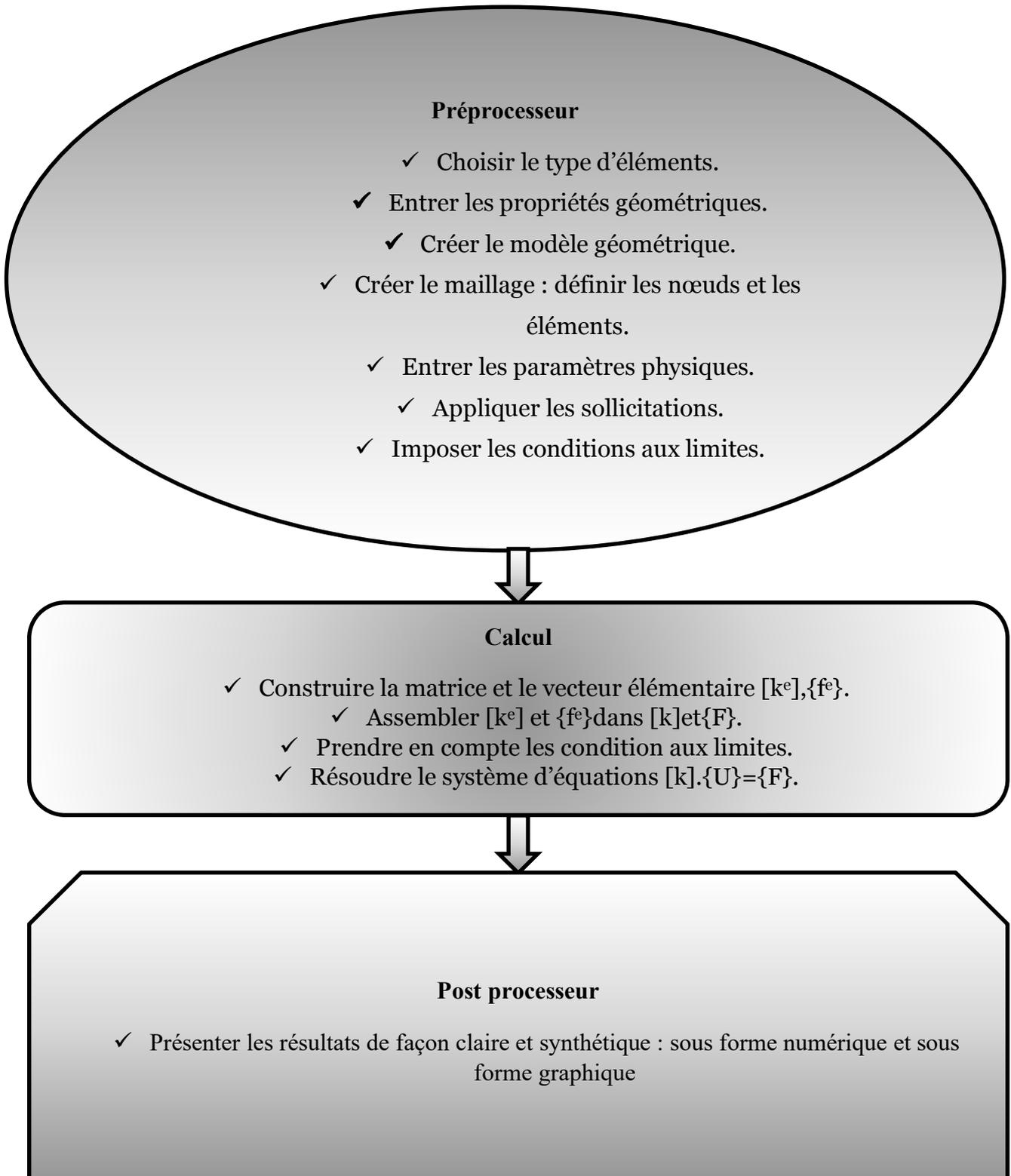


Fig.III.5 : Les étapes du calcul par éléments finis[6]

III.8. Conclusion :

La méthode d'élément finis est extrêmement puissante puisqu'elle permet d'étudier correctement des structures continues ayant des propriétés géométriques et des conditions des charges compliquées.

Elle est programmable et s'adaptent à la résolution par ordinateur, on peut aussi augmenter la précision des calculs par l'introduction des neuds interne.

Chapitre IV
Bref aperçu sur
CAST3M

Chapitre IV. *Bref aperçu sur CAST3M*

IV.1. Introduction

Cast3M est le fruit de plusieurs années de développement des programmes de calcul par la méthode des éléments finis. Ce développement entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de mécanique dont le but est de définir un logiciel de haut niveau pouvant servir de support pour la conception, le dimensionnement et l'analyse de structures et de composants.

Trois programmes constituant le noyau du système CAST3M, il s'agissait d'un programme de maillage, le programme de calcul et programme de visualisations des résultats.

IV.2. Présentation de CAST3M

Cast3m est un logiciel de calcul par la méthode des éléments finis pour la mécanique des structures et des fluides, il est développé au département de modélisation des systèmes et structures de la direction de l'énergie nucléaire du commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives.

Le développement de cast3m entre dans le cadre d'une activité de recherche dans le domaine de la mécanique dont le but est de définir un instrument de haut niveau, pouvant servir de support pour la conception le dimensionnement et l'analyse de structure et de composants [7].

IV.3. Le langage de cast3m

Gribane est un langage interprète qui permet de communiquer avec CAST3M. Ainsi le principe est d'écrire un programme en langage gibiane a l'aide d'un éditeur de texte, puis de lancer l'application CAST3M sur le fichier crée, la syntaxe est basée sur l'utilisation de directives, d'opérateurs et de procédures qui s'appliquent à des opérandes [7].

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

Tab.IV.1 : Description de la quelque directive

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

Tab.IV.2 : Description de la quelque description.

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
SYME	Construit l'objet résultant de la symétrie d'un autre objet par rapport à une droite ou un plan
DALL	Construit une surface
VOLU	Construit des volumes
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

IV.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.

IV.5. 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 exprimés dans ces mêmes unités.

Tab.IV.3 : Exemples des systèmes d'unités de mesure cohérents.

Longueur	Masse	Force	Temps	Masse Volumiques	Pression
<i>m</i>	<i>Kg</i>	<i>N</i>	<i>Sec</i>	<i>Kg/m³</i>	<i>Pa (N/m²)</i>
<i>mm</i>	<i>10³ kg</i>	<i>N</i>	<i>Sec</i>	<i>10⁻¹² /m³</i>	<i>MPa (N/mm²)</i>

IV.6. 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.

IV.7. Problèmes pouvant être résolus par cast3M

Cast3M dispose d'un certain nombre d'exemples reprenant la majorité des problèmes pouvant être traités. Cast3M étant à l'origine un code pour le calcul des structures, on y trouve de l'élasticité linéaire ou non-linéaire, des modèles de plaques de coques ou de

poutre très variés. Mais sa souplesse lui ont permis de s'adapter à d'autres problèmes. Ainsi, on trouve également des problèmes de thermiques et de mécanique des fluides.

IV.8. Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M

Tout problème (mécanique, thermique, chimique ...) résolu avec CAST3M doit être construit de la manière suivante [8] :

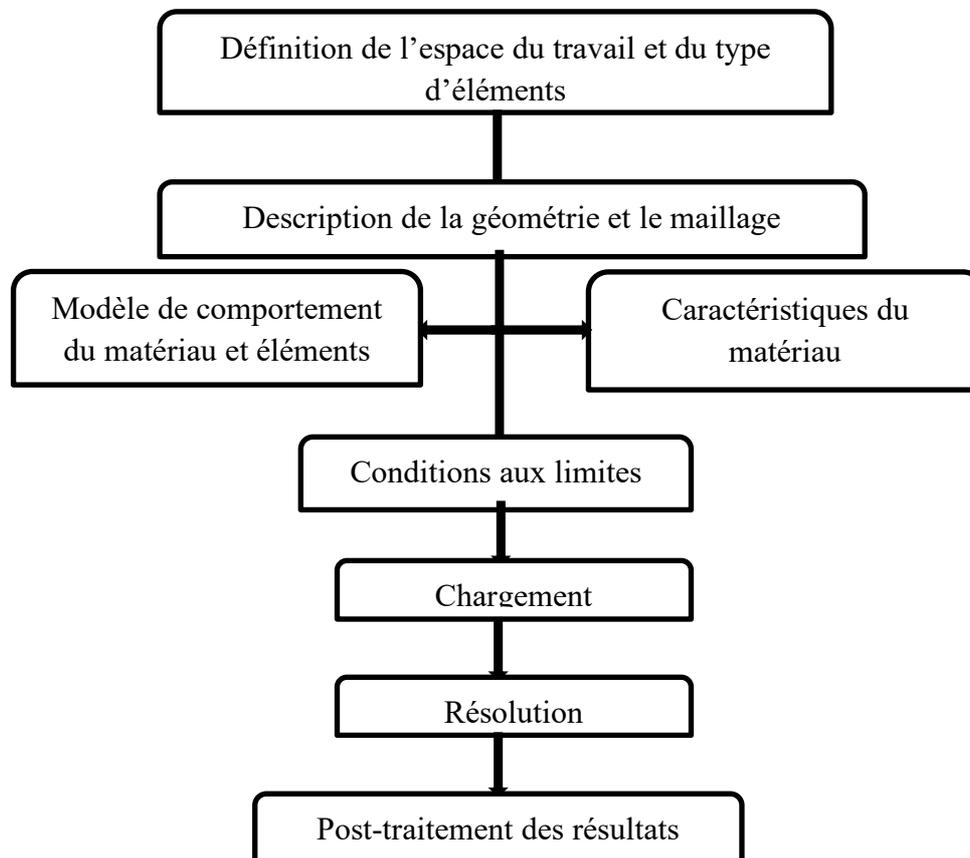


Fig.IV.1 : Procédure de résolution d'un problème sur CAST3M

IV.9. Les avantages et les inconvénients

IV.9.1. Avantages :

- 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 insérées dans les installations CAST3M.
- Tous les opérateurs et les directives sont expliqués dans la notice CAST3M avec des exemples d'application.

IV.9.2. Inconvénients :

- Certains problèmes ou bien erreurs sont difficiles à reconnaître.

- Nécessité d'utilisation un matériel informatique puissant pour certaine modélisation.
- Inconvénient de temps de programmation et des calculs numériques.

IV.10. Conclusion

CAST3M est un outil de programmation et de calcul numériques présents une passerelle parfaite entre la théorie et la pratique, et la meilleure aide pour traite les problèmes mécaniques ou bien l'étude des assemblages métalliques en générale, par la méthode des éléments finis, avec excellents résultats de calcul.

Chapitre V

Modélisation par
éléments finis ;

Résultats et
discussion

Chapitre V. *Modélisation par éléments finis ; résultats et discussion*

V.1. Introduction

L'objectif de ce chapitre consiste à modéliser numériquement par la méthode des éléments finis, en utilisant le logiciel CAST3M, les assemblages métalliques de type poutre-poteau avec platine d'extrémité débordante et raidisseurs d'angles.

A cet effet, des modèles tridimensionnels seront élaborés et sur lesquels l'approche de la mécanique du contact sera également utilisée.

Ce travail consiste en l'étude de l'influence de paramètres suivants :

- Présence et non présence de deux raidisseurs au niveau des poteaux ;
- L'épaisseur de la platine (platine mince 10 mm, épaisse 30 mm ou moyenne 20mm) ;
- Présence et non présence d'un raidisseur d'angle au niveau de la zone de débordement de la platine.

Les résultats obtenus seront analysés et discutés.

V.2. Description de l'assemblage :

Le présent cas d'étude d'assemblage poteau-poutre par platine d'extrémité débordante avec un raidisseur d'angle. est constitué d'un poteau en acier de type HEA 400, et d'une poutre en acier de type IPE 600 dont l'extrémité est soudée à une platine métallique d'épaisseur variable selon le cas d'étude à savoir : 10, 20 et 30mm. Cet assemblage est réalisé par l'intermédiaire de sept (07) rangées de 14 boulons ordinaires et non précontraints (travaillant en butée) de type M18 et espacées de 100mm. Ces boulons sont de classe mécanique 8.8.

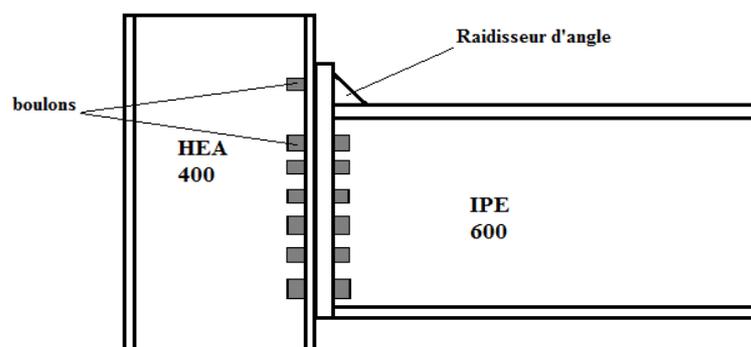


Fig.V.1 : Assemblage HEA 600 et IPE 400 par platine débordante sans raidisseur.

Le premier cas considéré est celui d'un assemblage sans raidisseur (Fig.V.1), et le deuxième cas consiste en un assemblage avec deux raidisseurs soudés sur les deux côtés de l'âme du poteau (Fig.V.2).

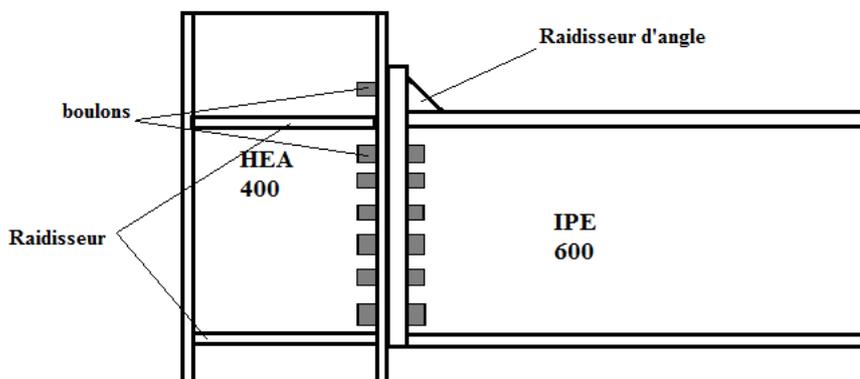


Fig.V.2 : Assemblage HEA 600 et IPE 400 par platine débordante avec raidisseur.

Les caractéristiques géométriques de poteau HEA 400 et de la poutre IPE 600 sont représentées sur le tableau (Tab.V.1), ainsi que sur la (Fig.V.3) .

Tab.V.1 : Caractéristiques géométriques de la poutre et du poteau (en mm).

poutre					Poteau				
t_{fb}	t_{wb}	b_{fb}	h_b	l_b	t_{fc}	t_{wc}	b_{fc}	h_c	h_p
19	12	220	600	800	19	11	300	390	500

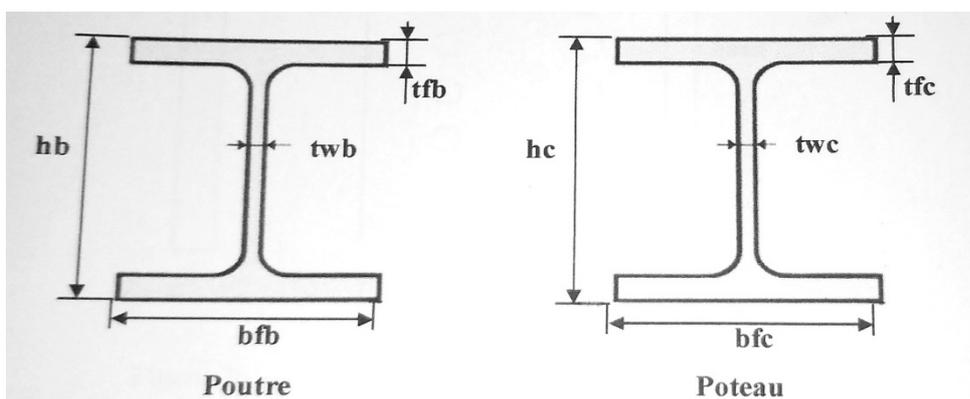


Fig.V.3 : Caractéristiques géométriques poteau-poutre.

Les caractéristiques géométriques de la platine débordante (avec un raidisseur d'angle) sont représentées sur la (Fig.V.4) et définies dans les tableaux V.2 et V.3. Nous avons étudié trois cas d'épaisseurs différentes, à savoir : 10mm, 20mm et 30mm.

Pour les différents éléments constituant l'assemblage étudié, les caractéristiques matérielles adoptées sont celles de l'acier S235 avec une contrainte limite d'élasticité de 235 MPa, une contrainte limite de rupture de 360 MPa, un module d'élasticité longitudinale de 210000 N/mm² et un coefficient de Poisson égale 0.3. Les boulons utilisés sont de classe mécanique 8.8 avec une contrainte limite d'élasticité de 640 MPa et une contrainte limite de rupture de 800 MPa.

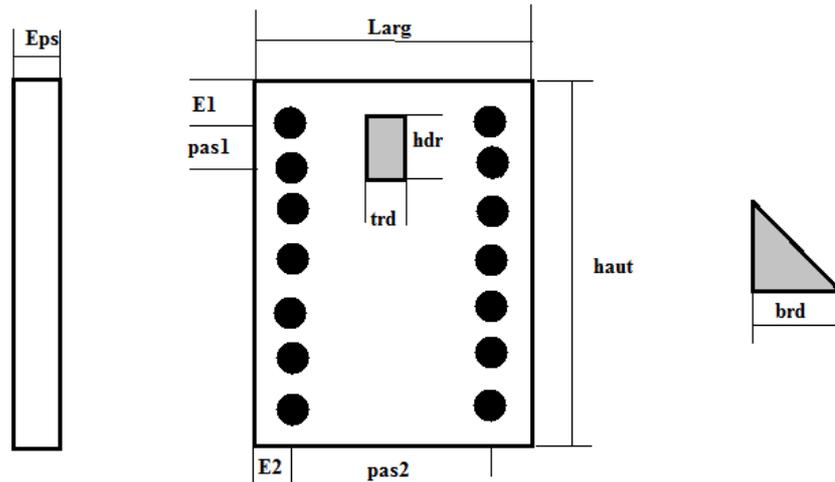


Fig.V.4 : Caractéristiques géométriques de la platine débordants

Tab.V.2 : Dimensions de la platine débordants et positions des trous dans la platine (en mm)

largeur	hauteur	Pince Longitudinale E_1	Pas Longitudinale P_1	Pince Transversale E_2	Pas Transversale P_2	Epaisseurs E_{ps}
220	700	50	100	50	120	10
220	700	50	100	50	120	20
220	700	50	100	50	120	30

Tab.V.3 : dimensions de raidisseur d'angle (en mm)

hauteur (hrd)	60
longueur à la base (brd)	60
épaisseur (trd)	12

Les boulons utilisés sont en acier de type M18 avec une tête hexagonale H et partiellement filetés. Les caractéristiques géométriques sont représentées sur la (Fig.V.5), et définies dans le tableau (Tab.V.4).

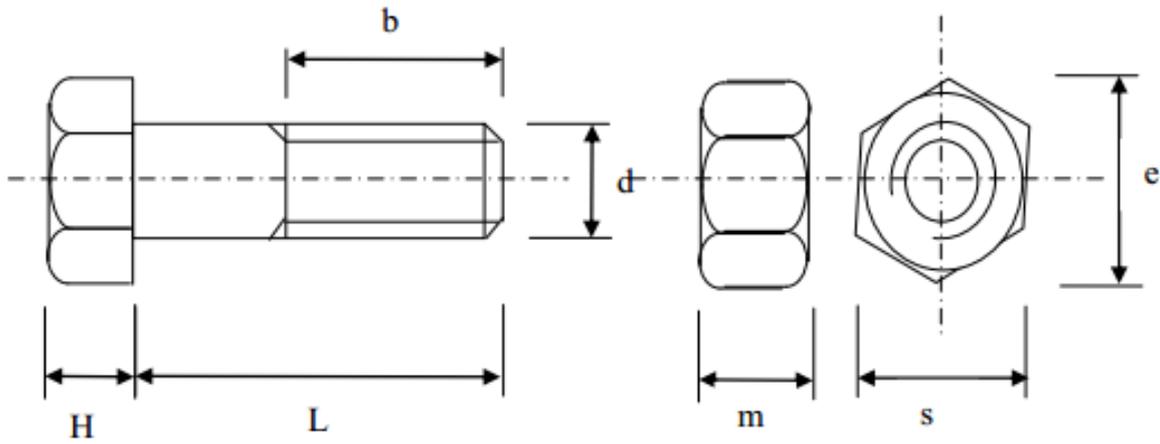


Fig.V.5 : Caractéristique du boulon M18.

Tab.V.4 : Caractéristiques géométriques de boulon en (mm)

H	L	B	d	m	s	e	d _o
10	39	42	20	10	29	30.1	20
10	49	42	20	10	29	30.1	20
10	59	42	20	10	29	30.1	20

V.3. Type d'élément fini utilisé

Les éléments finis utilisés pour les deux cas (avec et sans raidisseurs), sont de type tridimensionnel, formulé en déplacements, iso paramétriques, linéaire, de forme hexaédrique à 8 nœuds nommés CUB8. Chaque nœud possède trois degrés de liberté en translation selon les axes du repère global X, Y et Z.

Deux cas de modèles de comportement ont été considérés pour tous les composants de cet assemblage à savoir.

- La phase de comportement élastique.
- La phase de comportement élastoplastique parfait.

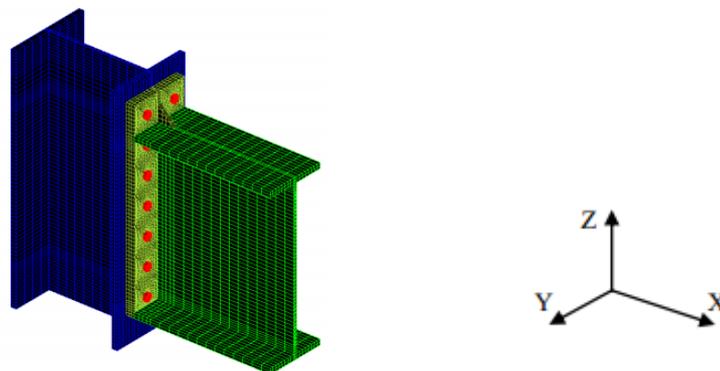


Fig.V.6 : Modèle élément fini tridimensionnel de l'assemblage sans raidisseurs de poteaux.

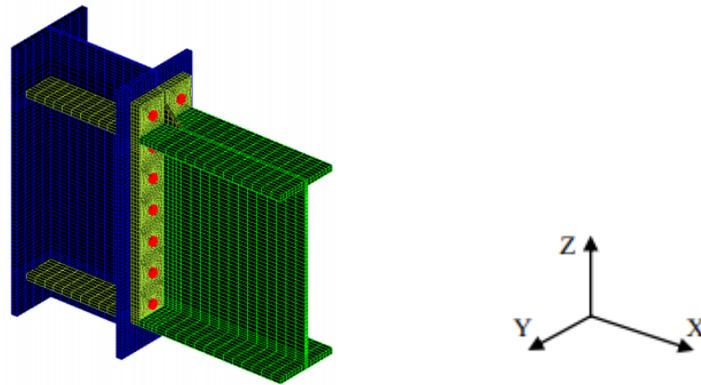


Fig.V.6 : Modèle élément fini tridimensionnel de l'assemblage avec raidisseurs de poteaux.

Par ailleurs, en raison de la présence d'un plan de symétrie OXZ présent dans les plans moyens des deux âmes de la poutre et du poteau, et afin de réduire les couts des calculs aussi bien en temps de calcul qu'en espace mémoire, seule la moitié de l'assemblage a été considérée (Fig.V.7). Toutefois, des conditions aux limites de symétries doivent être imposées. Ces conditions consistent à bloquer tous les déplacements dans la direction perpendiculaire (OY) de tous les nœuds appartenant à ces plans de symétrie OXZ.

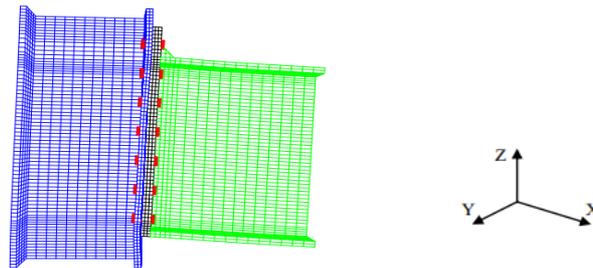


Fig.V.7 : Modèle élément fini tridimensionnel de la moitié d'assemblage

En plus des conditions aux limites de symétrie citées précédemment, d'autres conditions aux limites du problème sont prescrites par un blocage des déplacements des nœuds de la section inférieure du poteau dans les trois directions X, Y et Z. De plus, un chargement surfacique est directement appliqué sur la face supérieure de la semelle de la poutre. Toutefois, afin d'éviter les flexions locales des ailes de ces semelles, ce chargement surfaciques est limité uniquement à l'âme de la poutre. Autrement dit, seuls les éléments volumiques contenus dans le plan de l'âme de la poutre sont chargés.

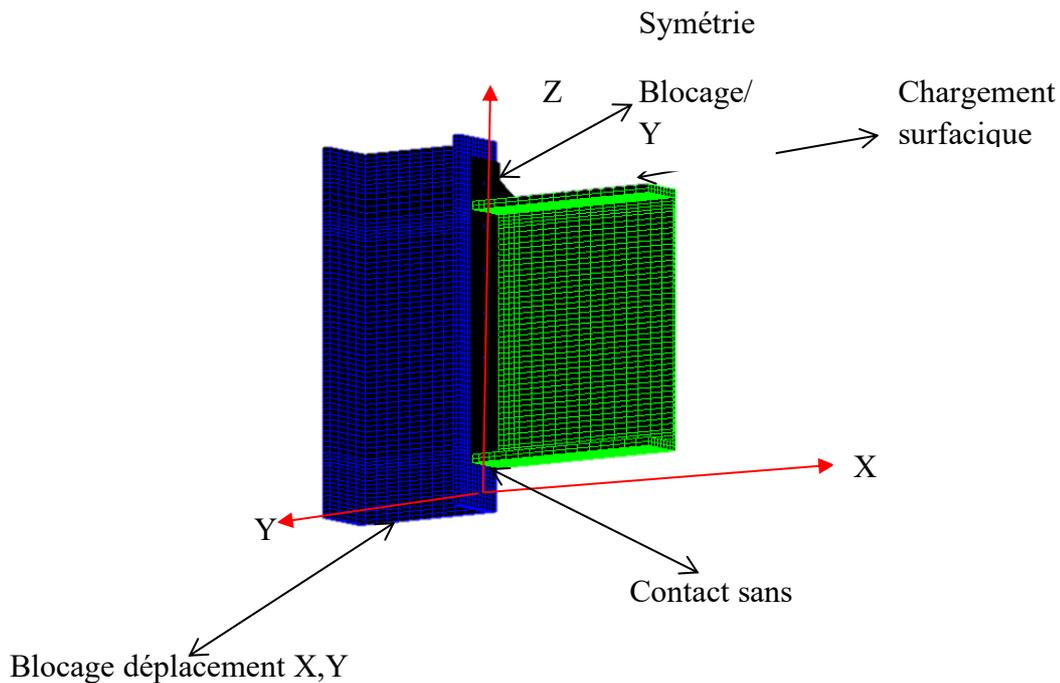


Fig.V.8 : Condition aux limites et chargement

V.4. Modèle de contact utilisé

S'agissant de boulons ordinaires, des relations de contact sans frottements entre la platine d'extrémité et la semelle du poteau ont été utilisées. Plus précisément, ces relations consistent en l'écriture des conditions de non pénétration.

A cet effet des éléments de contact surfaciques doivent être utilisés de part et d'autre du contact platine-semelle de poteau. Afin de faciliter d'avantage la résolution de ce problème, des maillages de contact de type compatibles (nœuds à nœuds) ont été utilisés. Autrement dit, il s'agit de deux maillages identiques situés de part et d'autre et où les nœuds sont en vis-à-vis et ont les mêmes coordonnées. Ainsi, l'écriture et la programmation des conditions de non pénétration devient plus facile à mettre en œuvre avec l'opérateur RELATION (ou bien RELA) défini dans CAST3M.

Pour cela, le type d'élément utilisé est linéaire de forme quadrangulaire à quatre nœuds et nommé QUA4 dans CAST3M (Fig.V.9).

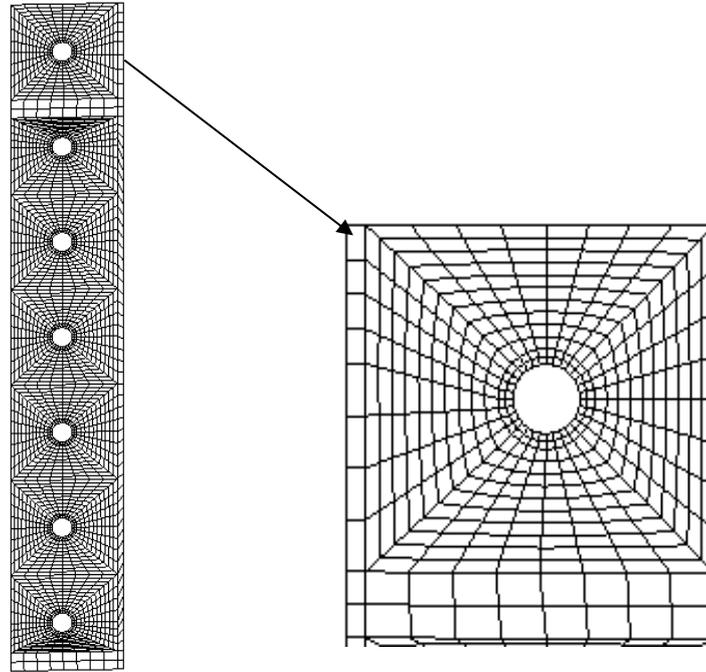


Fig.V.9 : Maillage de surface de contact platine et semelle de poteau

Pour le maillage des boulons, des éléments volumiques de type CUB8 ont également été utilisés. Les deux surfaces de contact considérées sont celles de la tête de vis avec la face de la semelle, et celle du contact de l'écrou avec la face de la platine (Fig.V.10).

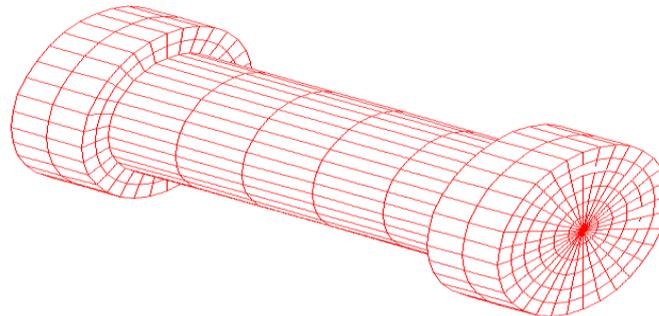


Fig.V.10 : Maillage de boulon

V.5. Méthode adoptée

L'objectif principal de la présente étude consiste à étudier les différentes distributions des champs de contraintes et de déformations entre les différents éléments composants notre assemblage ; puis d'effectuer l'analyse des surfaces de contact entre la platine et la semelle du poteau et ce, aussi bien en phase de comportement élastique qu'en phase de comportement plastique. Il s'en suivra alors l'étude de l'influence de certains paramètres sur ces distributions. Il s'agit en l'occurrence de l'influence de l'épaisseur de la platine ainsi que celle concernant la présence ou non des raidisseurs de poteaux et d'angle dans l'assemblage.

A cet effet, la démarche suivie lors de la présente étude, consiste à étudier en premier lieu les influences de ces paramètres en phase de comportement élastique, par la même méthode la phase de comportement plastique sera analysée en second lieu.

V.6. Analyse des résultats en phase de comportement élastique

V.6.1. Influence de l'épaisseur de platine

La (Fig.V.11) représente trois déformées de l'assemblage avec des platines d'épaisseurs différentes : 10mm (à gauche), 20mm (au milieu) et enfin 30mm (à droite). Il est clair que la déformation est importante dans l'assemblage qui a une platine d'épaisseur mince. Ce qui résulte que la platine a une faible rigidité, d'où une grande déformabilité de cet assemblage.

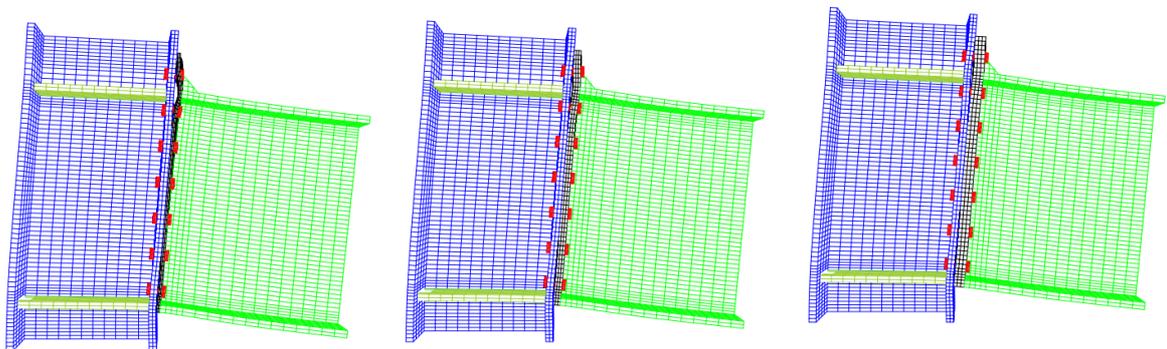


Fig.V.11 : déformées de l'assemblage avec des platines d'épaisseurs différentes de 10mm (à gauche), de 20mm (au milieu) et de 30 mm (à droite)

V.6.1.1. Analyse de la distribution des contraintes

Tab.V.5 : les champs de contraintes VONMISES des éléments sous différentes épaisseurs.

platine épaisseur (mm)	Poteau	Poutre	Platine	Boulon
10	184	76	287	152
20	219	55	266	119
30	242	44	230	128

Dans la phase élastique, pour un moment M et un effort tranchant V faibles ($M=36\text{KNm}$ et $V=144\text{KN}$) ; la distribution des champs de contraintes de VONMISES dans le poteau, la poutre, la platine, et les boulons pour les trois cas d'épaisseurs (10mm, 20mm, 30mm) ; sont représentées sur les figures (Fig.V.13 ; Fig.V.14 et Fig.V.15)

On peut constater à partir de ces figures qu'en augmentant l'épaisseur, les contraintes maximales dans les boulons ont diminué de 152 MPA pour 10mm vers 119 MPA pour 20mm et 128 MPA pour 30mm, l'interprétation de cette diminution peut être attribuée au phénomène de l'effet de levier (Fig.V.12) dont l'effet sur les efforts internes dans les boulons n'est significatif que lorsque la platine est mince (10mm), ce phénomène connu est dû à la déformabilité de la platine mince dont la surface de contact avec la semelle du poteau devient excentrée tout en créant une force supplémentaire Q dite force de levier et qui s'ajoute aux efforts internes déjà existant dans le boulon.

Et pour la distribution des contraintes dans les autres éléments de l'assemblage, on peut dire que les contraintes maximales augmentent de l'ordre de 55MPa dans les poteaux.

Par contre, il y a une diminution des contraintes au niveau de la platine de l'ordre 20 MPA (en augmentant de 10 à 20mm) et de 35 MPA (en augmentant de 20 à 30mm) et enfin les contraintes maximales des poutres ont également diminué de 76 MPA (épaisseur 10mm) vers 55MPa (épaisseur 20mm) et 44mmMPa (l'épaisseur 30mm).

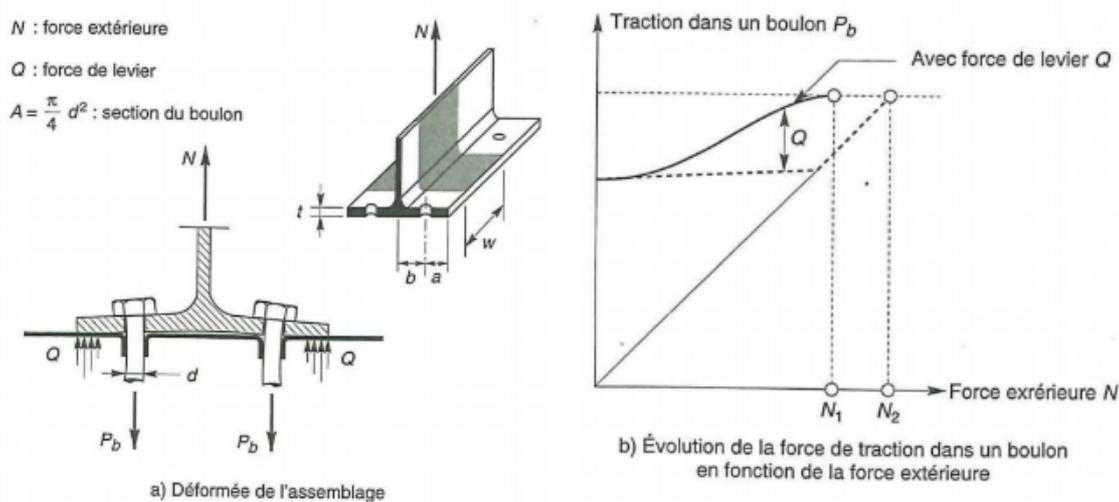


Fig.V.12 : Phénomène de l'effet de levier dû à la déformabilité de la platine mince (extrait de Jean Morel) [9]

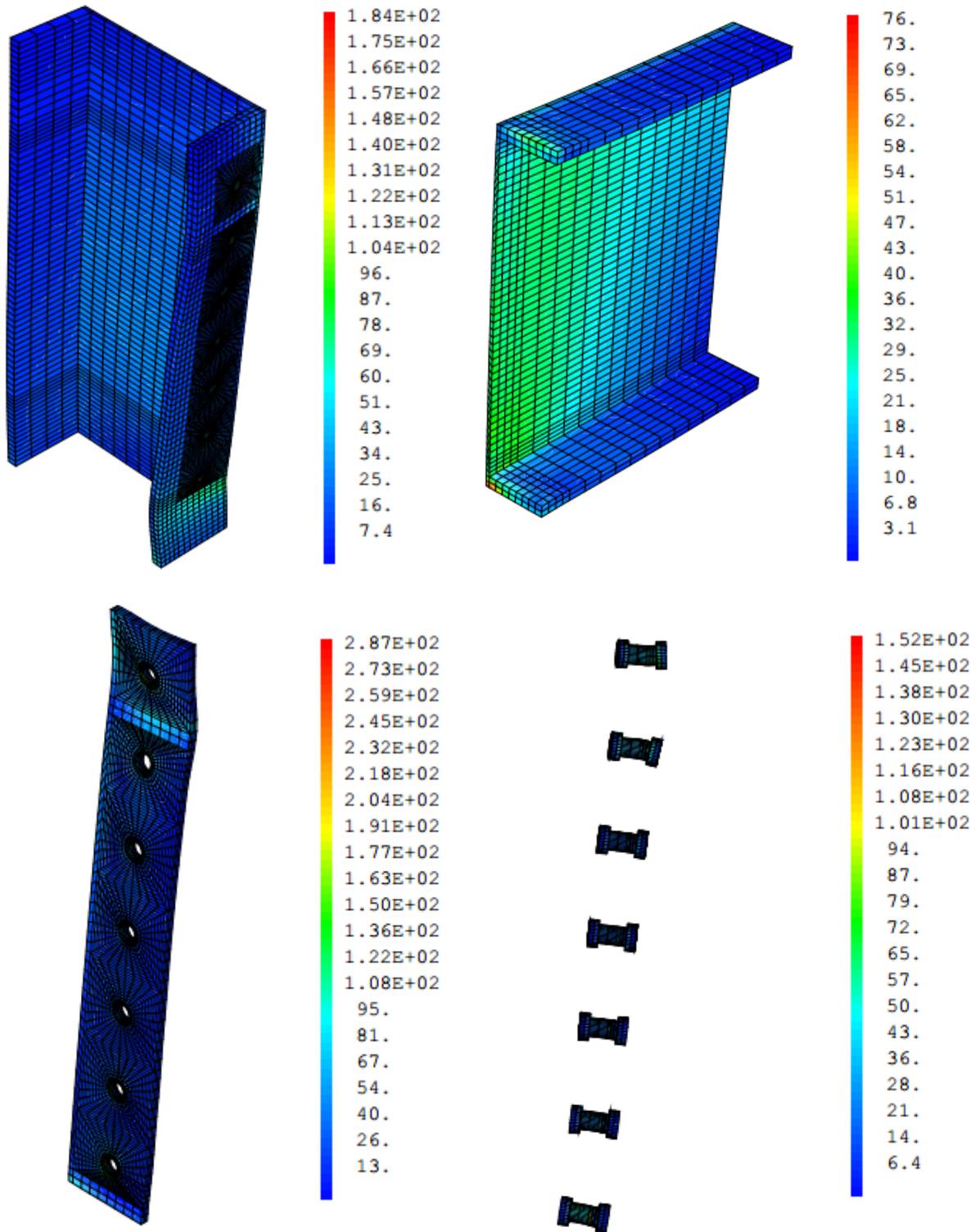


Fig.V.13 : Distribution élastique des champs de contraintes de VONMISES dans l'assemblage avec une platine d'épaisseur de 10mm sous $M=36 \text{ KNm}$ et $V= 144 \text{ KN}$.

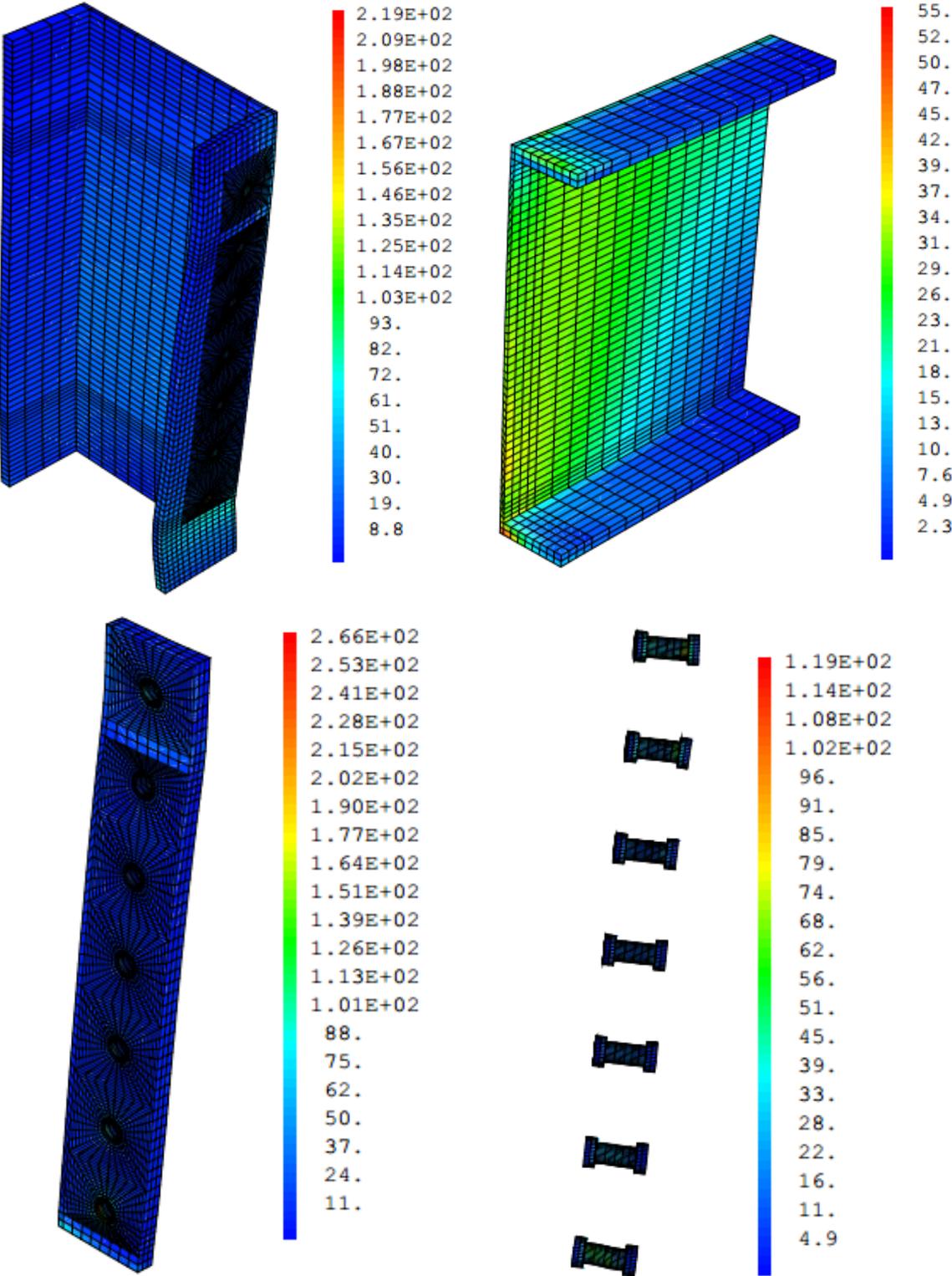


Fig.V.14 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES dans l'assemblage avec une platine d'épaisseur de 20mm sous $M=36 \text{ KNm}$ et $V= 144 \text{ KN}$.

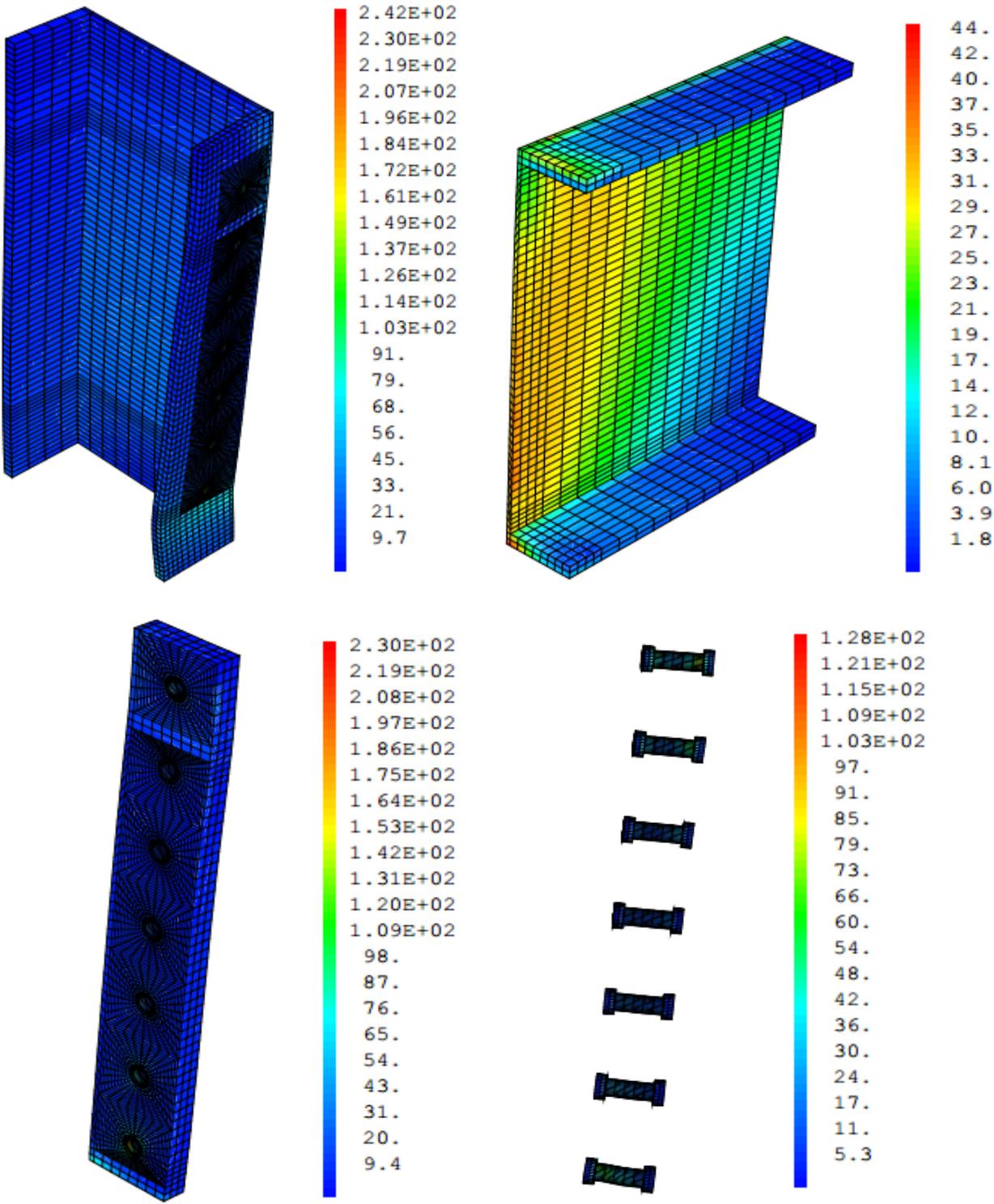


Fig.V.15 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES dans l'assemblage avec une platine d'épaisseur de 30mm sous M=36 KNm et V= 144 KN.

V.6.2. Influence de la présence ou non des raidisseurs de poteaux

V.6.2.1. Analyse des déformations

Tab.V.6 : contraintes de VONMISES sans et avec raidisseur du poteau

	Poteau	Poutre	Platine	Boulons
Sans raidisseur	219	55	266	119
Avec raidisseur	224	47	276	102

Afin d'étudier l'influence de ce paramètre à une épaisseur fixe de la platine (20mm). La figure ci-dessous représente la déformée de l'assemblage en présence et en absence du raidisseur, on peut déduire que lorsque le raidisseur est présent la déformabilité de la semelle du poteau ce diminue d'où la réduction de la rotation de l'assemblage ; autrement dit les raidisseurs font augmenter la rigidité en rotation de l'assemblage.

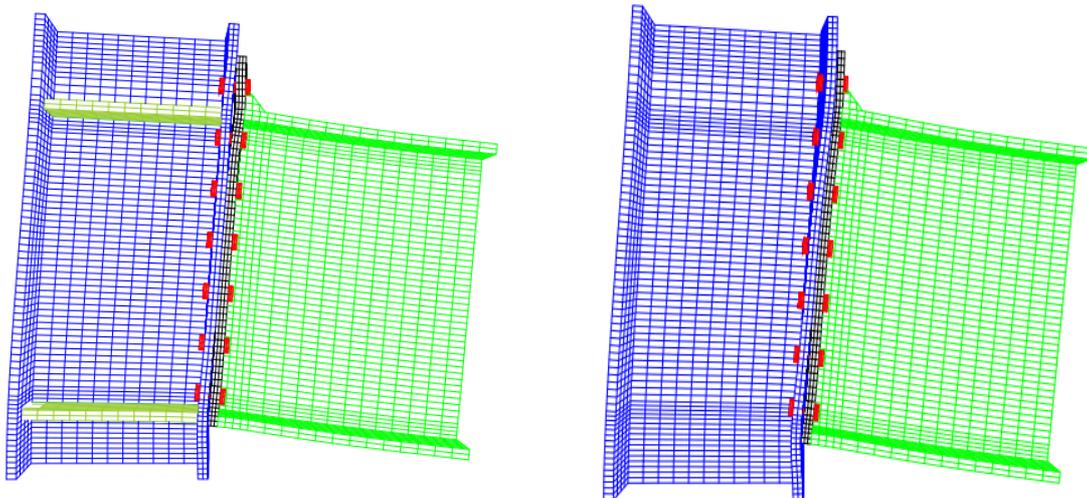


Fig.V.16 : Déformées de l'assemblage sans (à droite) et avec la présence des raidisseurs (à gauche).

V.6.2.2. Analyse des champs de contrainte

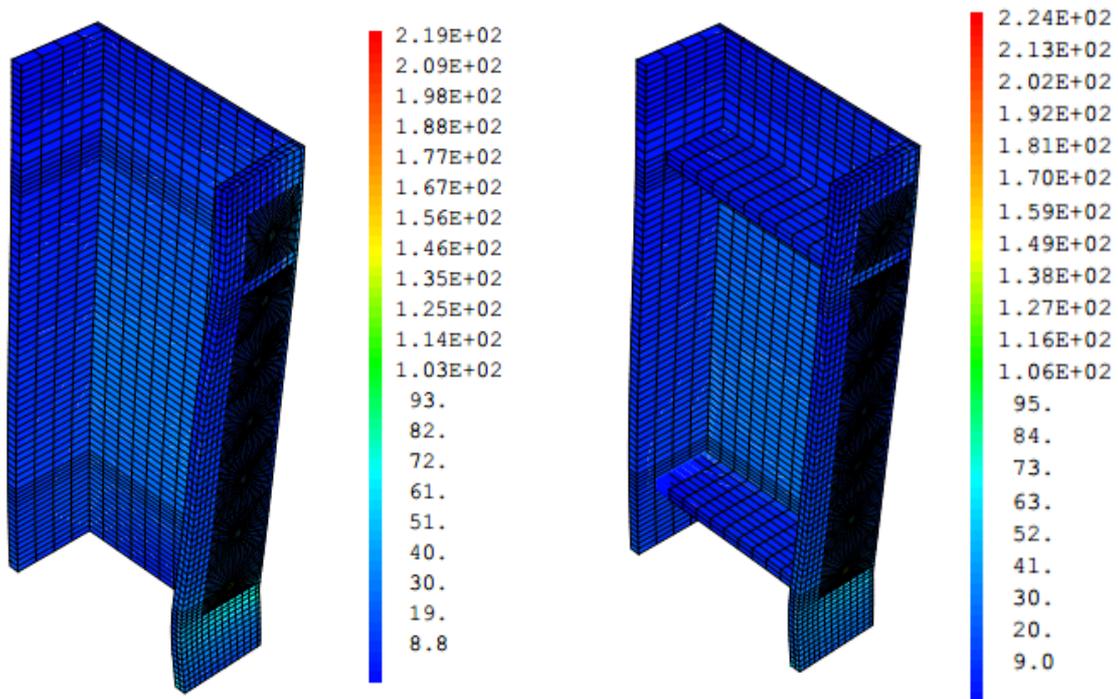


Fig.V.17 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des poteaux dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).

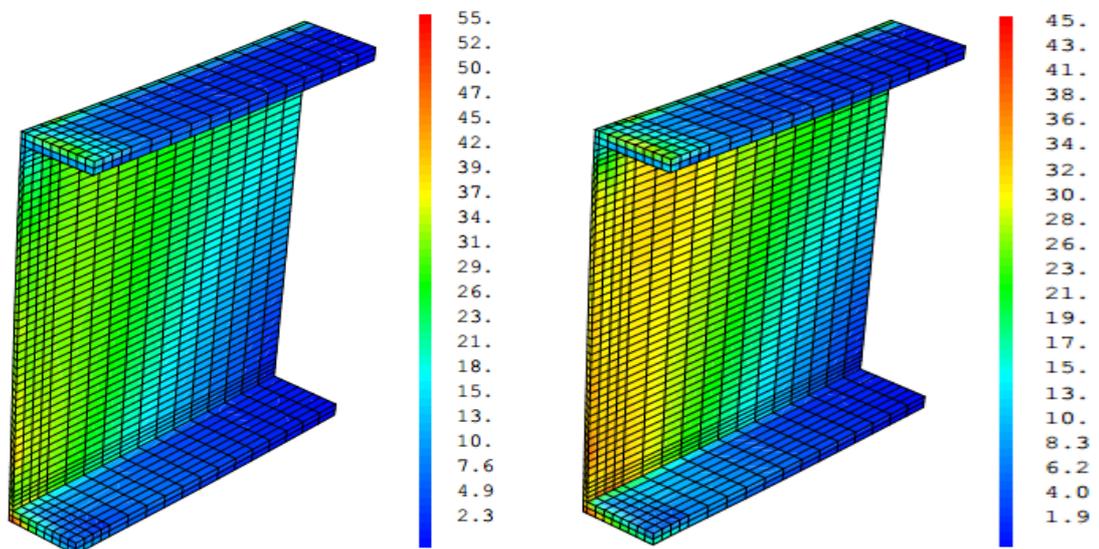


Fig.V.18 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des poutres dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).

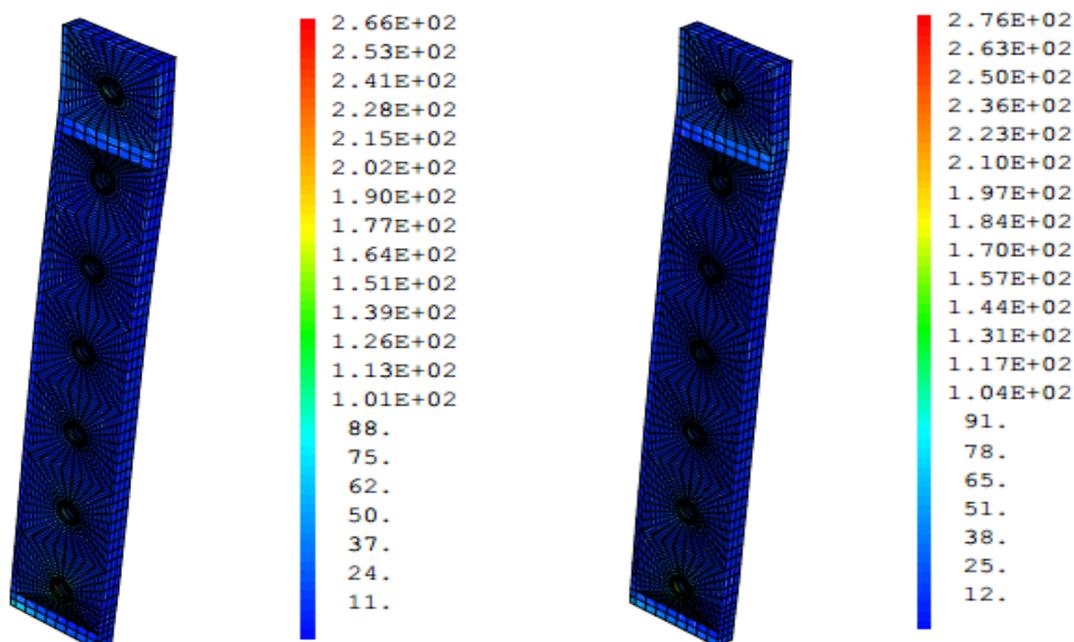


Fig.V.19 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des platines dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite).

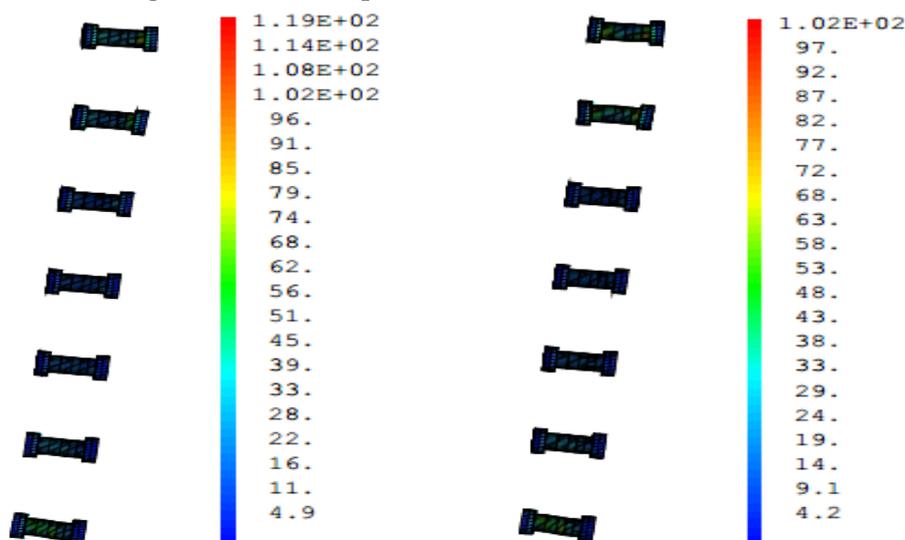


Fig.V.20 : Distribution des champs de contraintes de VONMISES des boulons dans l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite)

Pour déterminer la distribution des champs de contraintes de VONMISES de tous les éléments de l'assemblage (poteau, poutre, platine, boulon); les figures (Fig.V.17 ;Fig.V.18 ;Fig.V.19 ; et Fig.V.20) représente les résultats obtenues en présence et en absence des raidisseurs.

On déduit ; en plaçant les raidisseurs, une légère diminution des contraintes maximales dans la poutre et les boulons par contre une légère augmentation dans la

platine et le poteau, ce qui résulte une faible influence de la présence des raidisseurs sur les valeurs des contraintes maximales.

V.7. Analyse des résultats en phase de comportement plastique

V.7.1. Influence de l'épaisseur de la platine sur la plastification des composants de l'assemblage

Tab.V.7 : Influence de l'épaisseur de la platine

Taux de plastification	Poteau	Poutre	Platine	Boulons
Platine mince (10) %	1,3	0,13	2,87	0,18
Platine épaisseur (20) %	1,68	0,02	1,54	0,016
Platine épaisseur (30) %	1,9	0	1,4	0,06

Les figures ci-dessous (Fig.V.21 ;Fig.V.22 ; et Fig.V.23) représentent les champs de déformation inélastique pour tous les éléments de l'assemblage (poutre poteau platine et boulon) pour des épaisseurs différentes 10, 20,30mm pour un moment d'intensité $M=216\text{KNm}$ et un effort tranchant $V=864\text{KN}$.

Pour la plastification de la poutre, se plastifie faiblement jusqu'à 0.13 % au niveau de la partie inférieure pour une platine mince (10mm) tandis qu'elle se plastifie de manière plus faible (0.02 %) lorsque la platine est épaisse (20mm) ceci peut être expliqué par l'état de décollement de la platine mince par rapport à la semelle du poteau où se trouve la zone de contact.

Pour le poteau, la plastification se trouve au niveau de la zone de contact avec la semelle inférieure de la poutre, ce qui a provoqué une flexion localisée de la semelle du poteau suivie d'une déformation plastique dont l'ordre est compris entre 1.4 % et 1.9%.

Pour la platine mince d'épaisseur (10mm) subit une très forte plastification au niveau de sa partie supérieure au voisinage des trous des boulons dans la même zone, ceci peut être expliqué par l'effet de poinçonnement, et pour les autres cas des épaisseurs on constate une diminution considérable du phénomène de plastification passant de 10mm à 20mm et plus.

Enfin pour les boulons, vu leurs classe mécanique (8.8) et leurs limites élastiques élevées (640mpa), les boulons présentent une déformation plastique maximales assez

faible de l'ordre de (0.18 %) lorsque la platine est mince (10mm) cette valeur sera réduite lorsque la platine devient épaisse (0.015 % pour 20mm et 0.066 % pour 30mm).

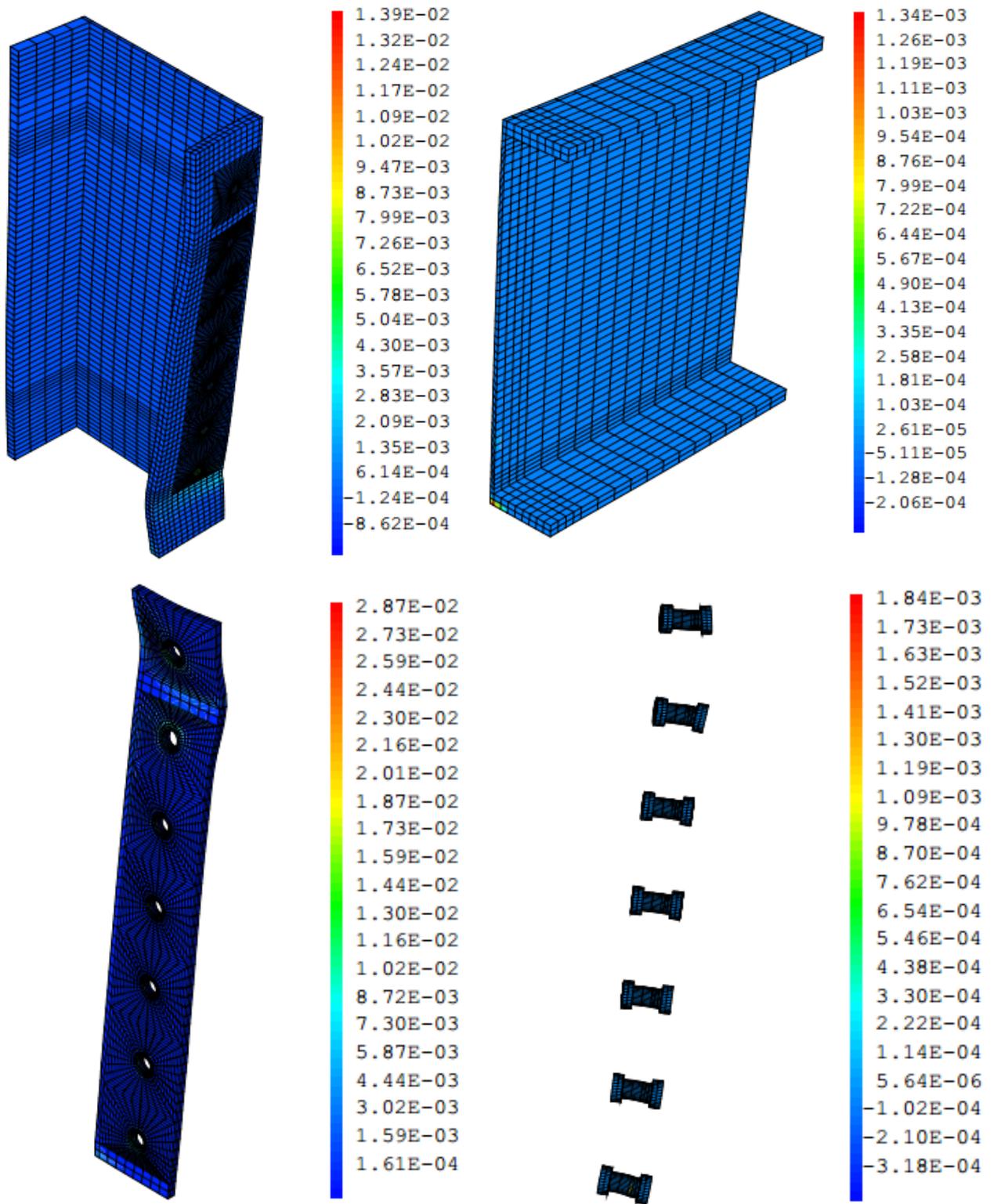


Fig.V.21 : Déformations inélastiques des composants de l'assemblage Avec une platine d'épaisseur 10mm sous M=216 KNm et V=864 KN

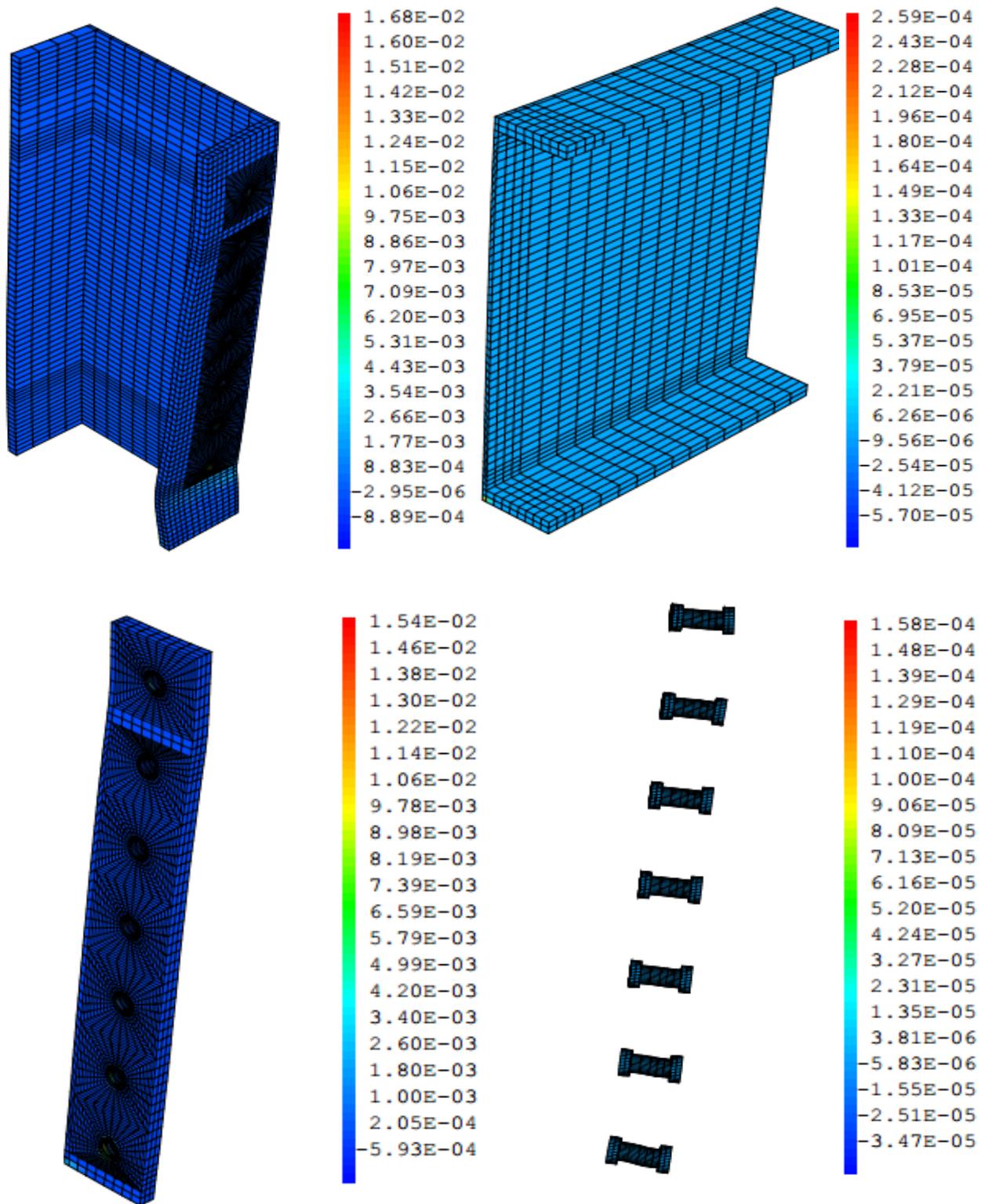


Fig.V.22 : Déformations inélastiques des composants de l'assemblage Avec une platine d'épaisseur 20mm sous $M=216$ KNm et $V=864$ KN

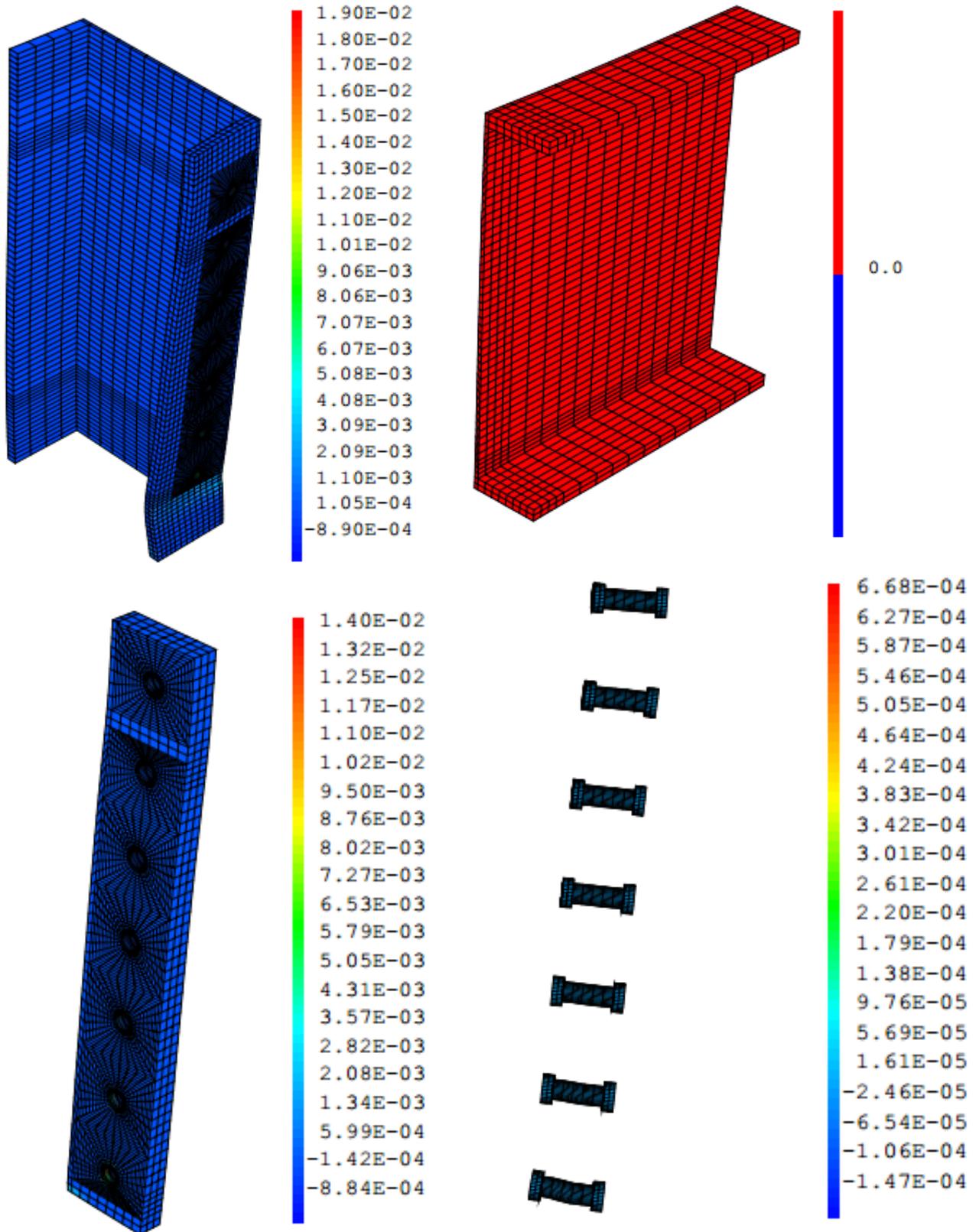


Fig.V.23 : Déformations inélastiques des composants de l'assemblage Avec une platine d'épaisseur 30mm sous $M=216$ KNm et $V=864$ KN.

V.7.2. Influence de la présence ou non des raidisseurs sur la plastification des composants de l'assemblage

Pour une platine d'épaisseur 20mm, les figures (Fig.V.24 ;Fig.V.25 ;Fig.V.26 ; et

Fig.V.27) représentent les champs de déformation inélastique avec et sans raidisseur, à partir de ces résultats on peut constater que la présence des raidisseurs fait diminuer significativement la déformabilité inélastique des boulons et de la poutre. Par contre une faible influence est relevée au niveau des allongements plastique des platines, et enfin aucune influence des raidisseurs n'est relevée au niveau des champs de déformation plastique des poteaux.

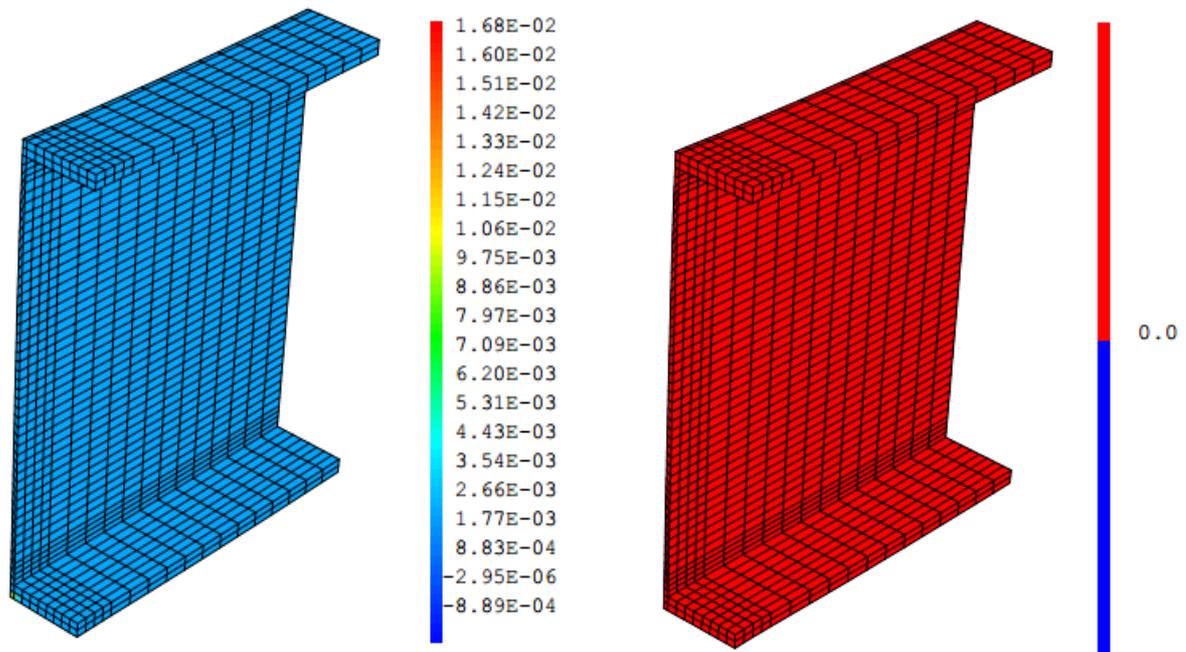


Fig.V.24 : Déformation inélastique dans la poutre de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216\text{KNm}$ et $V= 864 \text{ KN}$.

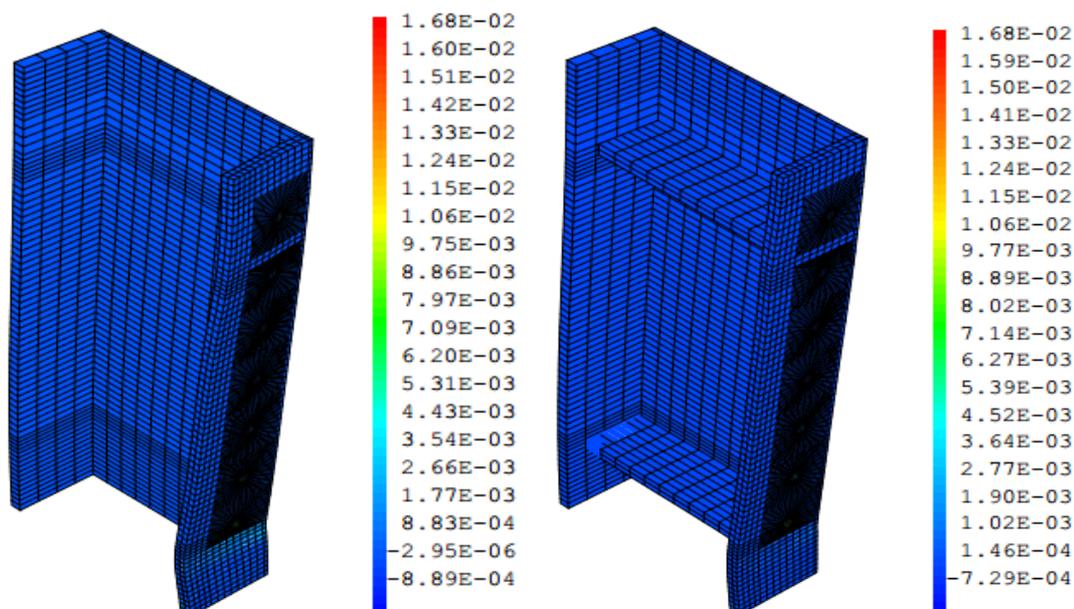


Fig.V.25 : Déformation inélastique dans le poteau de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216\text{kNm}$ et $V= 864 \text{ kN}$.

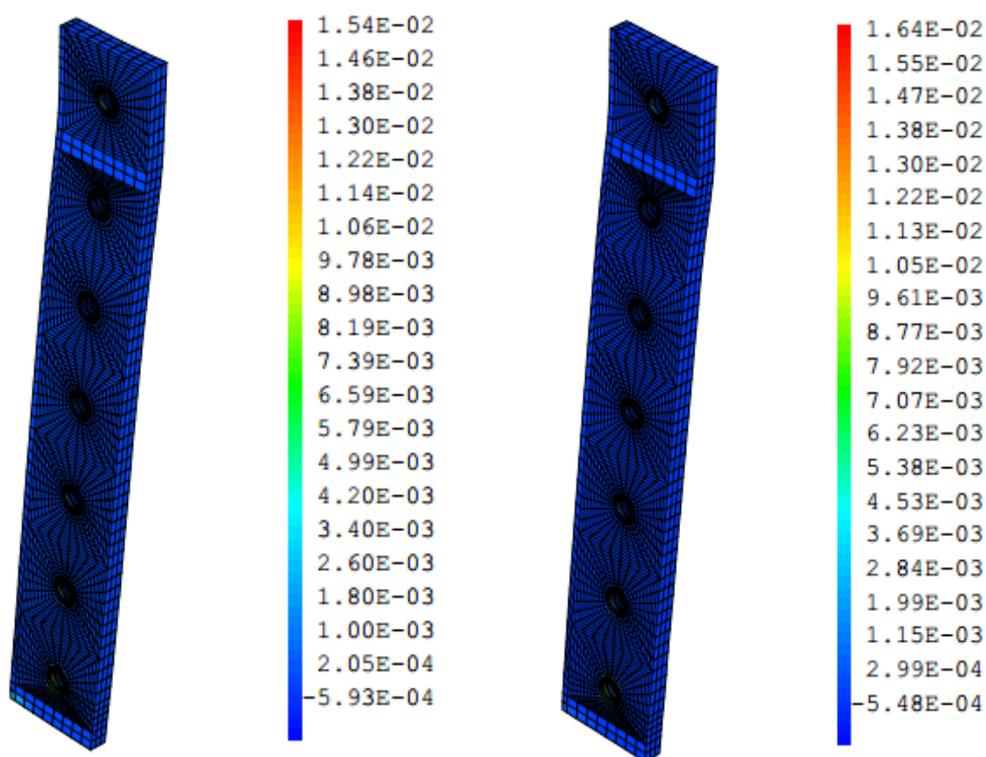


Fig.V.26 : Déformation inélastique dans la platine de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216\text{kNm}$ et $V= 864 \text{ kN}$.

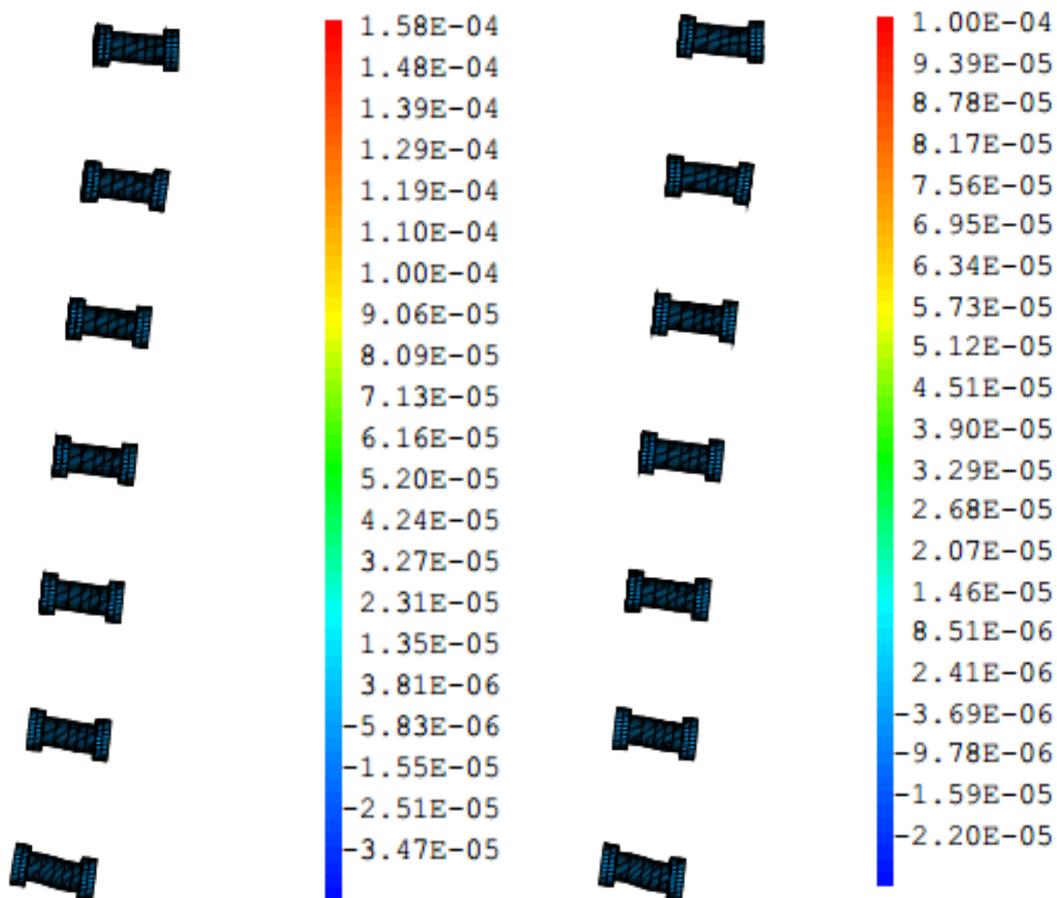


Fig.V.27 : Déformation inélastique dans les boulons de l'assemblage sans (à gauche) et avec la présence des raidisseurs (à droite) sous $M= 216\text{KNm}$ et $V= 864\text{ KN}$.

V.8. Analyse des surfaces de contact

V.8.1. Influence de l'épaisseur de la platine

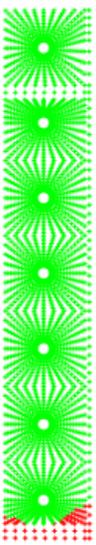
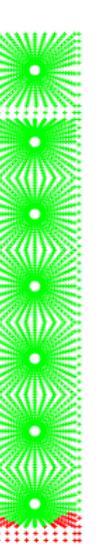
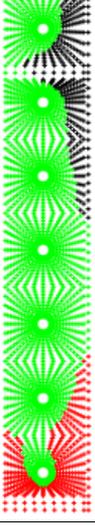
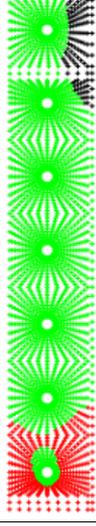
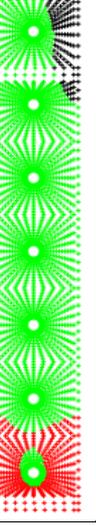
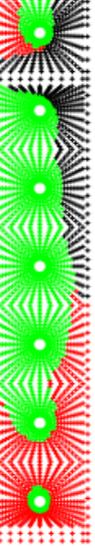
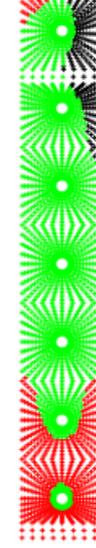
En faisant varier les épaisseurs de la platine, les moments, les efforts tranchants sous les différentes valeurs.

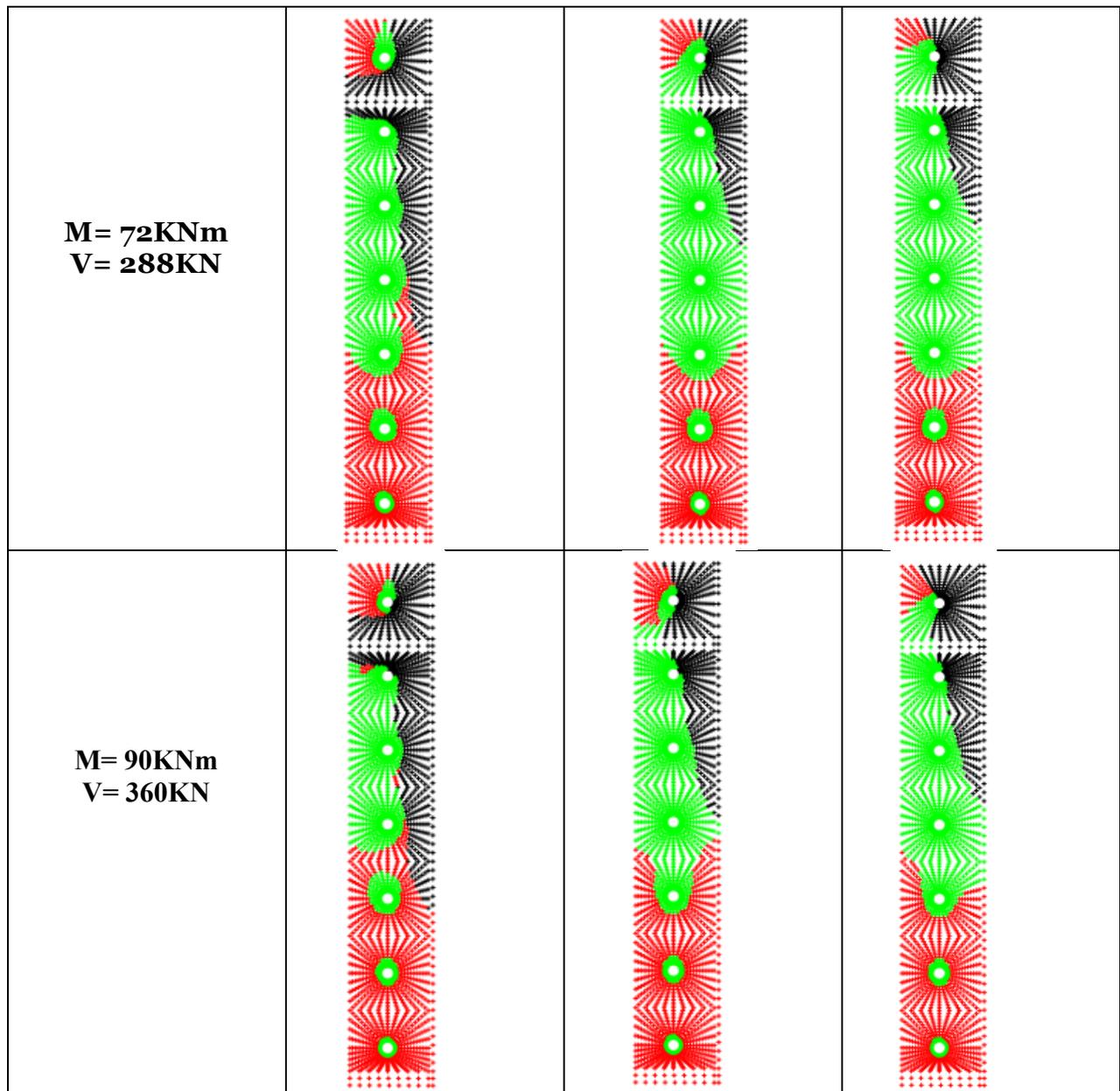
Le tableau (Tab.V.8) ci-dessous démontre les résultats obtenus ; trois zones de contact remarquables et représentées comme suites.

- La zone de contact des nœuds adhérents (vert) ;
- La zone de contact des nœuds glissants (rouge) ;
- La zone de contact des nœuds décollant (noir).

Ces figures montrent que la zone le décollement se diminuent lorsque on augmente les épaisseurs des platines.

Tab.V.8 : Influence de l'épaisseur de la platine

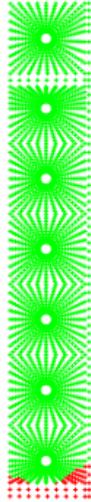
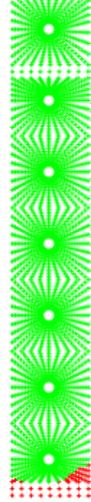
Efforts appliqué	Épaisseur 10mm	Épaisseur 20mm	Épaisseur 30mm
M= 18KNm V= 72KN			
M= 36KNm V= 144KN			
M= 54KNm V= 216KN			

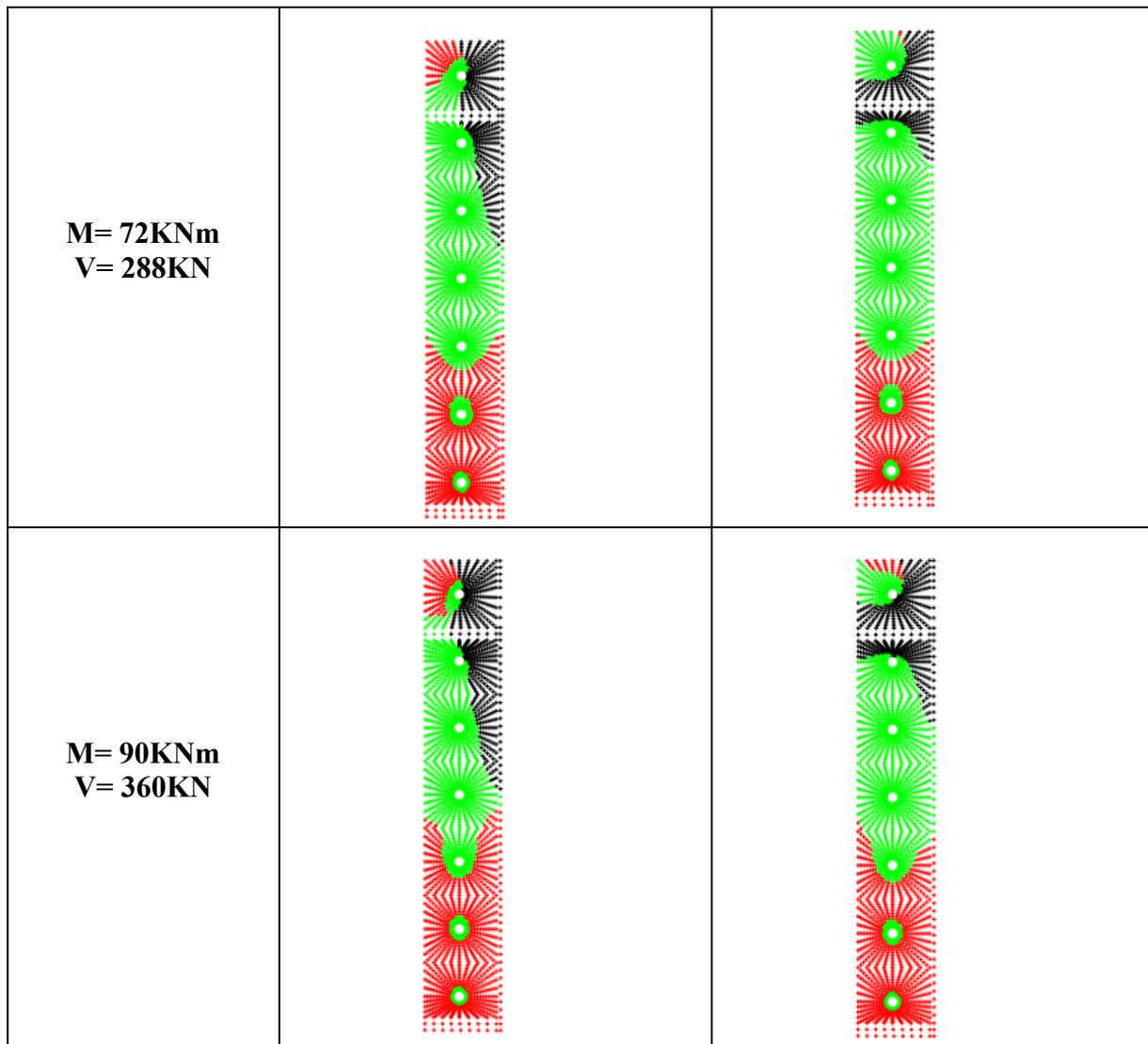


V.8.2. L'influence de la présence ou non de raidisseurs de poteaux

Le tableau (Tab.V.9) montre les configurations des nœuds décollant, glissants, adhérents sur les deux surfaces de contact avec une même épaisseur de la platine 20mm, pour deux cas avec et sans raidisseur du poteau, il est clair qu'on présence du raidisseur le décollement se réduit, ceci est dû à la diminution de la déformabilité de l'assemblage causée par les raidisseurs.

Tab.V.9 : L'influence de la présence ou non de raidisseur

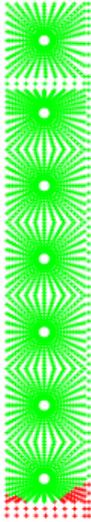
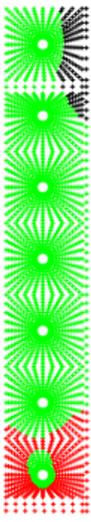
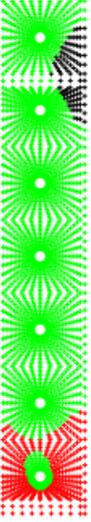
Efforts appliqué	Cas d'absence des raidisseurs	Cas de présence des raidisseurs
<p>M= 18KNm V= 74KN</p>		
<p>M= 36KNm V= 144KN</p>		
<p>M= 54KNm V= 216KN</p>		

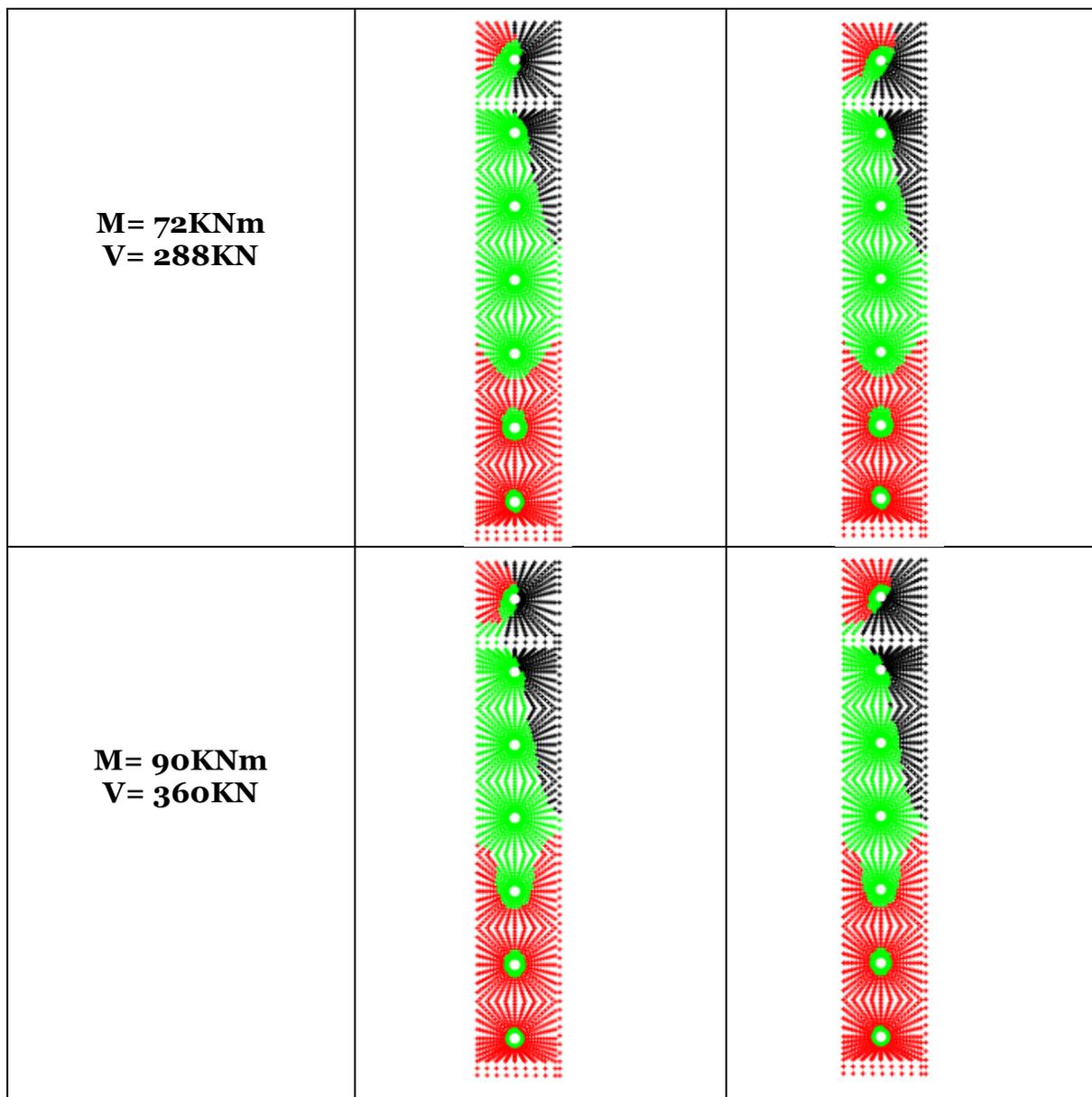


V.8.1. L'influence de la présence ou non de raidisseur d'angle

Une autre comparaison entre l'absence du raidisseur d'angle [11] ; et la présence pour une platine d'épaisseur 20mm, il est clair qu'on présence du raidisseur le décollement (noir) se réduit par rapport à l'absence, il est peut-être dû à la diminution de la déformabilité de l'assemblage.

Tab.V.10 : L'influence de la présence ou non de raidisseur d'angle

Efforts appliqué	Cas d'absence des raidisseurs d'angle	Cas de présence des raidisseurs d'angle
<p>M= 18KNm V= 72KN</p>		
<p>M= 36KNm V= 144KN</p>		
<p>M= 54KNm V= 144KN</p>		



V.9. Analyse des courbes moments rotations $M-\phi$

V.9.1. Influence de l'épaisseur de la platine

La figure ci-dessous montre les courbes reliant le moment M transmis par l'assemblage on fonction de la rotation ϕ en radians, et ce pour les trois cas d'épaisseurs de la platine (10,20,30mm), on peut remarquer que plus l'épaisseur de la platine augmente plus la pente de la courbe moment rotation augmente, cette pente correspond à la rigidité en rotation de l'assemblage.

Ce résultat confirme les résultats théoriques de la méthode de calcul de l'Euro code 03 montrant l'influence de l'épaisseur de cette platine sur la rigidité en rotation.

On remarque aussi que les deux courbes relatives aux épaisseurs 20 et 30 mm sont quasiment très proches. Ceci permet de conclure qu'au-delà d'une certaine valeur (proche à 20 mm), l'influence de l'épaisseur de la platine sur la courbe moment rotation de l'assemblage devient faible.

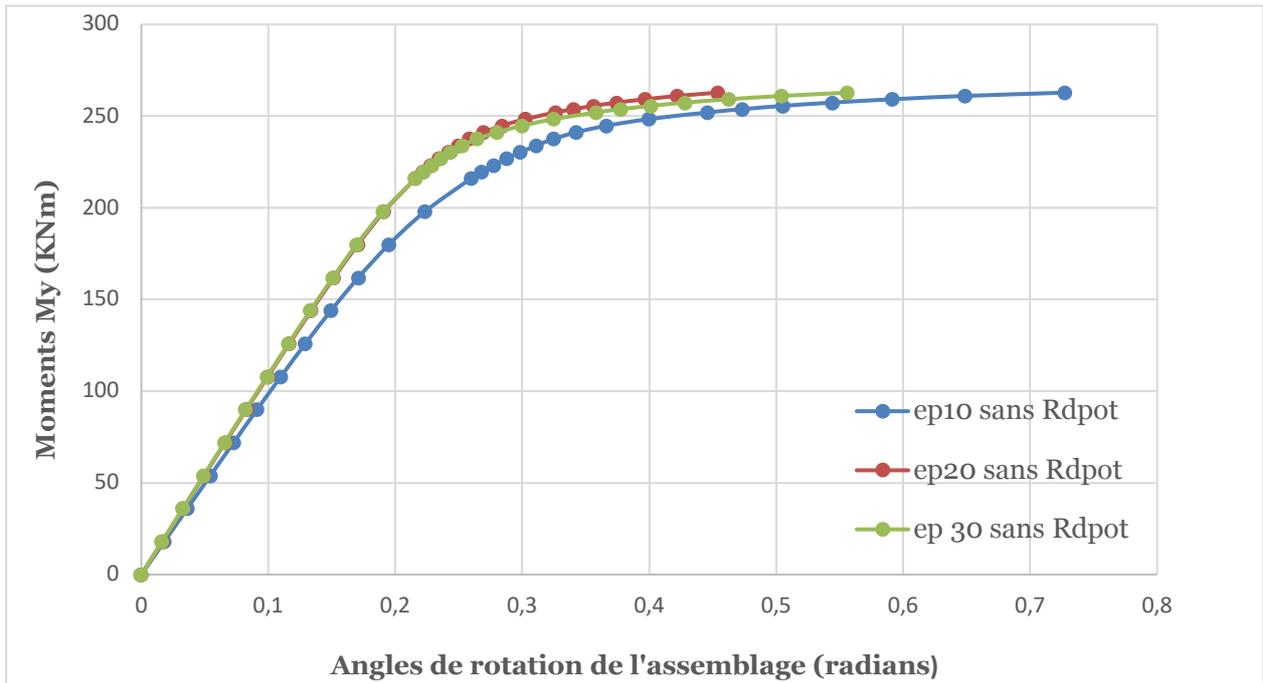


Fig.V.28 : Influence de l'épaisseur de la platine en l'absence des raidisseurs de poteaux.

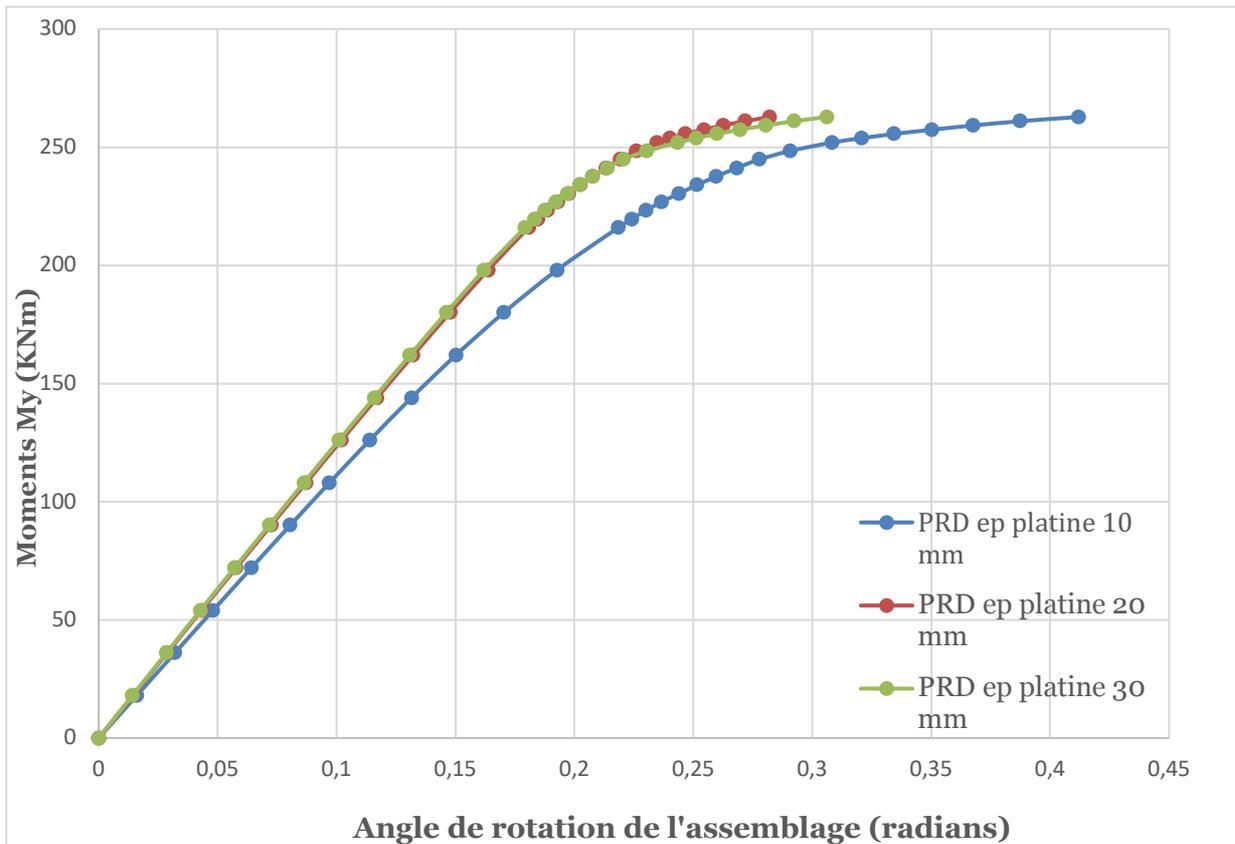


Fig.V.29 : Influence de l'épaisseur de la platine en présence des raidisseurs.

V.9.2. Influence des raidisseurs de poteaux

La figure (Fig.V.30) présente les deux courbes reliant le moment M appliqué à l'assemblage à sa rotation ϕ en radians et ce pour les deux cas considérés ; avec et sans la présence des deux raidisseurs pour une épaisseur 20mm ; on peut remarquer que l'influence est minime au début de chargement et l'écart entre ces courbes tend à augmenter lorsque la charge augmente, ceci permet également de conclure sur la déformabilité de l'assemblage en absence de raidisseur transversaux du poteau.

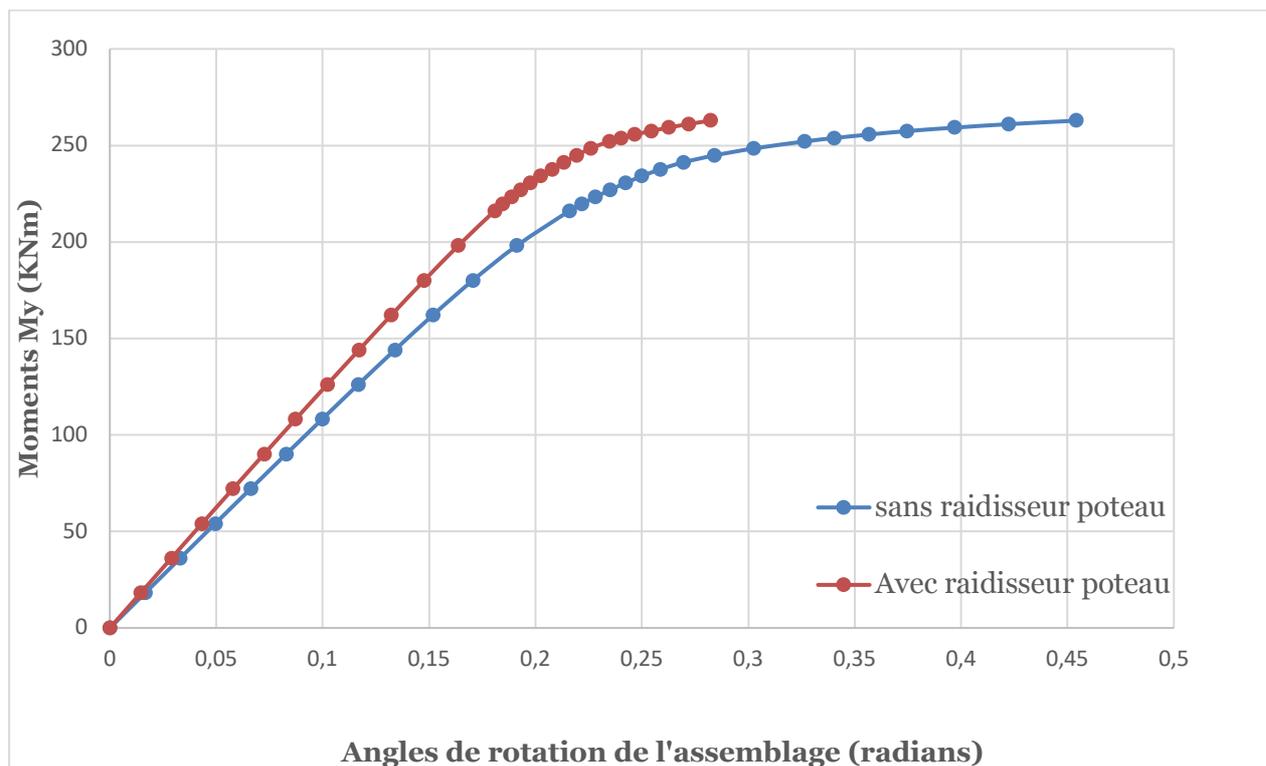


Fig.V.30 : Influences présence des raidisseurs platine épaisseur 20 mm

V.10. Discussion des résultats et conclusion

La modélisation par la méthode des éléments finis de l'assemblage boulonné poteau-poutre avec platine d'extrémité débordante et raidisseur d'angle traité dans ce chapitre à l'aide du logiciel CAST3M VERSION 2018, avait comme objectif principal d'analyser l'influence des trois paramètres importants sur, la réponse de cet assemblage (déformée), la distribution des champs de contraintes, la configuration de la zone de contact platine-semelle (zone d'adhérence, zone de décollement, zone de glissement). Ces paramètres consistent en l'influence des raidisseurs ainsi que l'épaisseur de la platine.

Le modèle élément fini utilisé pour les deux cas (avec et sans raidisseurs), est un modèle tridimensionnel formulé en déplacements et utilisant des éléments volumiques iso paramétriques hexaédriques à 8 nœuds nommés CUB8 à trois degrés de liberté de translation par nœud.

A partir des résultats obtenus on peut retenir les points suivants :

- En ce qui concerne les boulons, ceux-ci subissent l'effet de levier lorsque les platines sont particulièrement minces (épaisseur égale à 10mm).
- En ce qui concerne la platine, elle est considérée comme élément le plus sollicité lorsqu'elle est mince à cause des moments et efforts tranchants.
- En ce qui concerne le poteau, en présence des raidisseurs les contraintes diminuent, donc moins de sollicitations en présence des raidisseurs.
- En ce qui concerne les zones de contact on présence du raidisseur les zones de décollement sont réduites relativement au cas sans raidisseurs.

Concernant les courbes moments rotations et en présence des raidisseurs la tangente de la courbe est moins inclinée par rapport à l'absence du raidisseur. En effet, la présence des raidisseurs provoque une augmentation de la rigidité de l'assemblage de l'ordre de 15%.

.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Conclusion Générale

A l'issue de cette étude, on a utilisé un modèle numérique tridimensionnel de l'assemblage poteau poutre avec une platine d'extrémité débordante. Des éléments finis de type volumiques CUB8 ont été utilisés dans logiciel CAST3M. Les conditions de contacts de notre assemblage ont également été définies. Ces calculs ont été suivis par l'analyse et l'interprétation des résultats.

En effet, plusieurs aspects ont été abordés à savoir : les aspects de modélisation numérique liés aux assemblages métalliques ainsi que les aspects théoriques liés à la mécanique du contact supposé dans notre cas sans frottements.

Cela étant dit, afin d'enrichir d'avantage le présent travail à l'avenir, l'idée consiste à enrichir d'avantage les lois de comportement en tenant compte par exemple, de l'érouissage de l'acier ou bien de son endommagement ou du phénomène de fluage. Ceci pourrait faire l'objet de futurs thèmes de fin d'études.

Trois paramètres ont une influence sur notre assemblage à savoir :

a/ La présence et l'absence du raidisseur de poteau : il est clair qu'on présence de raidisseur les champs de contraintes augmentent pour le poteau ($2,19 \cdot 10^2$ vers $2,24 \cdot 10^2$) et la platine ($2,66 \cdot 10^2$ vers $2,76 \cdot 10^2$) comme pour la platine et les boulons se diminuent (55 vers 45) pour la poutre ; ($1,19 \cdot 10^2$ vers $1,02 \cdot 10^2$) pour les boulons.

b/ la présence et l'absence du raidisseur d'angle : a partir des résultats qu'on a on peut remarqué qu'on présence des raidisseurs la déformabilité des boulons et de la poutre se diminuent ; par contre une faible influence sur les platines ; enfin aucune influence au niveau des poteaux.

c/ influence de l'épaisseur de la platine : pour les efforts tranchants appliqués (72,144,216,288,360) KN ; et les différentes épaisseurs de la platine a savoir (10,20,30)mm il est clair que le décollement se diminue lorsque on augmente l'épaisseur.

Références

- [1] Pierre BOURRIER et Jaque BROZZETI, Construction métallique et mixte acier béton. Edition Eyrolles ;(1996).
- [2] Anis ABEIDELAH ; Analyse numérique du comportement métallique. Approche numérique et validation expérimentale. G.M [physics. Classe-PH]. Université Blaise pascale Clermont-Ferrmond,(2009)
- [3] Amira HADHOUD Bibliographie sur les assemblages. Université de Tebesa ; (2016).
- [4] L. CHAMPANY Contact unilatéral, (2005).
- [5] Batoz J. L. et Dha H. G Modélisation des structures par éléments finis. Vol1 ; (1994).
- [6] Codes de calcul, Zhi-Qiang FENG IUP. Université d'Evry-Val d'Essone DEESS/CS41 ; (2005).
- [7] Cast3m 2020. En ligne disponible ([//www.cast3m.cea.fr/HTML/documentation](http://www.cast3m.cea.fr/HTML/documentation)). Consulté le (18 /09 /2021).
- [8] Nacera KACIMI, Analyse numérique d'une structure auto stable et d'une structure mixte, mémoire magister, université mouloud mammeri de tizi ouzou, (2013).
- [9] Jean MOREL, Calcul des structures selon l'euro code 3, livre (1994).
- [10] SLIMANI Abdelmumen ; modélisation par éléments finis du comportement élastique de l'assemblage de deux profilés métalliques par platine d'extrémité ; thèse de doctorat ; université de Bejaia ;2019.
- [11] HADDAD Loucif ; IDIRI Yanis ; Modélisation tridimensionnelle par élément finis du problème de contact dans les assemblages métalliques poteaux-poutres avec platines d'extrémités débordantes ; mémoire master ; université de Bejaia ;2020.

Résumé

Dans les assemblages boulonnés la transmission des moments fléchissant, efforts normaux et les efforts tranchants sont faites par cisaillement –traction ; cependant les rangés de boulon tendu se trouve dans les zones de contact.

Dans notre travail on a étudié l'influence des différentes épaisseurs de la platine ; ainsi que la présence et l'absence du raidisseur de poteau, et l'influence des raidisseurs d'angle sur les zones de contact, une comparaison a été faite par rapport aux études précédentes.

Abstract

Bolted assemblies have three forces: the transmission of the bending moments, the normal forces, and the sharp forces are made by shear –traction; however, the rows of tensioned bolts are in the contact areas.

In this work, the study of the influence of the different thicknesses of the plate is carried out taking into account the presence and absence of the pole stiffener, and the influence of the corner stiffeners.