

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Technologie

Département : Génie Civil

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Civil

Spécialité : Constructions Métalliques et Mixtes

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Étude numérique des colonnes
métalliques renforcées sous compression axiale.

Présenté par : BAGHIL Mohamed Lamine

CHABOUR Mohamed Mehdi

Encadrante : KOUIDER Nadia MCA Université Badji Mokhtar Annaba

Jury de Soutenance:

HADIDANE Yazid	MCA	Université Badji Mokhtar Annaba	President
KOUIDER Nadia	MCA	Université Badji Mokhtar Annaba	Encadrante
LOUETRI Latifa	MCB	Université Badji Mokhtar Annaba	Examinatrice

Année Universitaire: 2021/2022

Remerciement

Remerciement

Mes remerciements d'abord à dieu le tout puissant pour la volonté, la santé et la patience qu'il m'a donné toujours.

Je tiens à remercier chaleureusement notre encadrante :

Dr. KOUIDER Nadia d'avoir accepté de diriger ce travail et de m'avoir prodigué des conseils scientifiques, ont été précieux et des orientations pour la réalisation de ce travail.

Des remerciements aux membres du jury, pour l'intérêt et d'avoir accepté de juger ce travail **Dr. HADIDANE Yazid** et **Dr. LOUETRI Latifa**.

A l'ensemble des enseignants et surtout qui ont contribué à ma formation surtout la **doctorante HARRAT Oulfa** ainsi que tout le personnel administratif qui, a participé le déroulement de ce travail, les enseignants du département de génie civil pour leur disponibilité, leur patience et les conseils qu'ils ont prodigués.

Mes remerciements vont aussi à tous mes parents, mes enseignants, mes amis et mes collègues de la promotion 2021/2022.

A tous ceux qui, par leur encouragement ou leur amitié, ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce modeste travail.

Résumé

Résumé

Les futures industries pour les structures métalliques seront de plus en plus intéressées par les aspects de renforcement. Or les techniques et méthodes de construction classiques sont employées en réparation. Les procédés d'élaboration des matériaux métalliques et les techniques d'assemblages ont évolué au fur et à mesure du développement industriel. Il convient donc de procéder à des travaux de réparation en bonne connaissance des propriétés des matériaux, des modes d'assemblages et des règles de dimensionnement de la construction.

Ce travail de recherche englobe une étude numérique sous ABAQUS 6.17 qui vise à la prédiction de domaine de réparation et de renforcement des poteaux métalliques laminés à chaud du type HEA120 de 4m de hauteur, la technique adoptée pour le renforcement est par soudage des plaques métalliques selon deux positions. Une autre technique de réparation a été validée qui est le renforcement par l'intégration de béton.

Les résultats ont été validés avec ceux trouvés analytiquement on en se basant sur la norme Eurocode 3. La capacité de charge et les modes de défaillance par une instabilité globale (flambement) ont été discutés.

Mots clés : Renforcement, laminés à chaud, ABAQUS, instabilité globale.

Abstract

Abstract

Future industries for metal structures will be increasingly interested in reinforcement aspects. However, conventional construction techniques and methods are used in repairs. The processes for producing metallic materials and the assembly techniques have evolved with industrial development. It is therefore necessary to carry out repair work with a good knowledge of the properties of the materials, the methods of assembly and the rules for the dimensioning of the construction.

This research work includes a numerical study under ABAQUS 6.17, which aims at the prediction of the field of repair, and reinforcement of hot rolled metal poles of the HEA120 type of 4m in height, the technique adopted for the reinforcement is by welding of the metal plates according to two positions. Another repair technique has been validated, which is reinforcement by integrating concrete. The results were validated with those found analytically or based on the Eurocode 3 standard. Load capacity and failure modes by global instability (buckling) were discussed.

Keywords: Reinforcement, hot rolled, ABAQUS, Global instability.

الملخص

الملخص

سوف تهتم الصناعات المستقبلية للهياكل المعدنية بشكل متزايد بجوانب التعزيز. ومع ذلك، يتم استخدام تقنيات وطرق البناء التقليدية في الإصلاحات. تطورت عمليات إنتاج المواد المعدنية وتقنيات التجميع مع التطور الصناعي. لذلك من الضروري إجراء أعمال الإصلاح بمعرفة جيدة بخصائص المواد وطرق التجميع وقواعد تحديد أبعاد البناء.

يتضمن هذا العمل البحثي دراسة عددية تحت ABAQUS 6.17 والتي تهدف إلى التنبؤ بمجال إصلاح وتقوية الأعمدة المعدنية المدرفلة على الساخن من نوع HEA120 بارتفاع 4 أمتار، والتقنية المعتمدة في التسليح هي عن طريق لحام الصفائح المعدنية وفقاً لذلك. إلى وظيفتين. تم التحقق من صحة تقنية إصلاح أخرى، وهي التعزيز من خلال دمج الخرسانة.

تم التحقق من صحة النتائج مع تلك التي تم العثور عليها تحليلياً أو بناءً على معيار Eurocode 3. تمت مناقشة سعة التحميل وأنماط الفشل من خلال عدم الاستقرار العالمي (الانثناء).

الكلمات المفتاحية: التعزيز، المدرفلة على الساخن، الأباكس، عدم الاستقرار العالمي

Sommaire

Sommaire

Remerciement	2
Résumé.....	3
Abstract.....	4
المخلص.....	5
Sommaire	6
Liste des tableaux.....	9
Liste des figures	10
Introduction générale	13

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 INTRODUCTION	15
L.2 L'ACIER	15
I.2.1 Procédés d'élaboration de l'acier	16
I.2.2 Trajectoires des produits.....	17
I.3 ACIER ET ESSAIS NORMALISES	19
I.3.1 Les essais destructifs	19
I.3.2 Les essais non destructifs	22
I.4 plasticité de l'acier: réserve de sécurité.....	22
Types de poteaux métalliques :.....	24
Les Poteaux à section transversale uniforme :	24
Les Poteaux à sections transversales non uniforme :.....	25
Les poteaux en fuseau :.....	25
Les poteaux à baïonnette.....	25
Les Poteaux composés :	26
Le flambement	27
I.5 Termes relatifs à l'intervention intégrée dans le code du patrimoine.....	32
I.5.1 La conservation.....	32

Sommaire

I.5.2 La réhabilitation.....	32
I.5.3 l'entretien et la maintenance.....	32
I.5.4 Réparation et renforcement	33
I.5.4.a La réparation.....	33
I.5.4.b Le renforcement.....	33
I.6 Causes de dégradation des ouvrages	34
I.7 Elaboration d'un programme d'étude de réhabilitation	34
I.7.1 Les avantages de l'acier en réhabilitation.....	35
I.8. Conclusion.....	36

Chapitre II : Aspects réglementaire

II. INTRODUCTION.....	38
II.1 LES COLONNES A PAROIS PLEINES	38
II.2 PIECES COURTES	38
II.3 POTEAUX ELANCES	39
II.3. A Elancement λ	39
II.3. B Longueur de flambement.....	39
II.5.2 Aspect théorique de flambement.....	40
II.6.INSTABILITE DES POTEAUX REELS	43
II.7 LES COURBES DE FLAMBEMENT	44
II.8 Fondements des courbes de flambement de la CECM (Cabinet d'Études de la Construction Métallique).....	45
II.9 IMPERFECTION INITIALE EQUIVALENTE EN ARC	49
II.10 RESISTANCE A LA COMPRESSION AVEC FLAMBEMENT	49
DETERMINATION DE LA CHARGE CRITIQUE DES MODELES TRAITES SELON EUROCODE.....	51
2-Poteau en HEA120 renforcé avec soudage des plaques au niveau // à l'âme :	53
CONCLUSION.....	54

Chapitre III : Etude numérique des poteaux métalliques renforcés sous Abaques

Sommaire

I. INTRODUCTION	55
III. 1. DEFINITION DU LOGICIEL DE CALCUL PAR ELEMENTS FINIS ABAQUS 6.14 :.....	55
III.1. Description du logiciel :.....	56
III.1.1. Différents critères caractérisant un élément:.....	56
III.1.2. Domaines physiques :.....	56
III.1.3. Problèmes :.....	57
III.1.4. Catégories d'éléments :.....	57
III.2. MODELE DE CONCEPTION DE L'ELEMENT :	58
III.2.1. Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS 6.14 :.....	58
III.2.2. PRINCIPE DE CALCUL SOUS LE LOGICIEL ABAQUS 6.14.	59
III.3. DEFINITION DES MODELES :	60
III.4 RESULTATS ET ANALYSES	65
III.5. CONCLUSION.....	73
Conclusion générale.....	75
Recommandations.....	75
Références bibliographiques.....	76

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Différents types d'aciers et utilisations.	15
Tableau I.2 : Principaux produits sidérurgiques disponibles	17
Tableau II.1 : Facteurs d'imperfection	46
Tableau II.2 : Coefficients de réduction	47
Tableau II.3 : Choix de la courbe de flambement correspondant à une section (voir Eurocode 3 – Tableau 5.5.3)	48
Tableau II.4 : Imperfections initiales équivalentes en arc	49
Tableau III.1 : Présentation des propriétés dimensionnelles et géométriques de la section transversale HEA120	60
Tableau III.2 : Présentation des propriétés mécaniques des éléments appartenant au poteau en H	62

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1: Formation des demi-produits.	16
Figure I.2: Laminage des demi-produits.	17
Figure I.4: Exemple de produits laminés marchands.	18
Figure I.5: Exemple de produits plats.	18
Figure I.6: Exemple de produits façonnés à froid.	18
Figure I.7: Exemple de profilés tubulaires.	19
Figure I.8: Exemple de produits composés.	19
Figure I.9: Allure générale de la relation contrainte –déformation spécifique de l’acier.	20
Figure I.10: Essai de dureté de Brinell.	20
Figure I.11: Essai de dureté : (a) Essai de Vickers , (b) Essai de Rockwell.	21
Figure I.12: Essai de résilience.	21
Figure I.13: Essai de pliage.	21
Figure I.14: Essai de fatigue en sollicitation purement alternée.	22
Figure I.15: Adaptation plastique pour les différents types d’acier [2].	23
Figure I.16 Les différents types de poteaux métalliques [13].	24
Figure I.17 Poteau en fuseau.	25
Figure I.18 Poteaux à baïonnette.	26
Figure I.19 Sections composées.	26
Figure I.20 Stabilité de forme d’une barre comprimée.	27
Figure I.21 Flambement par bifurcation et par divergence.	28
Figure I.22 Cas fondamental d’Euler.	29
Figure I.23 Longueurs de flambement l_k de barres soumises à la compression sous différentes conditions aux appuis.	30
Figure I.24 Courbe de flambement d’Euler.	31
Figure I.25 Organigramme d’un programme de réhabilitation.	35
Figure I.26 Techniques de renforcement des éléments métalliques.	36
Figure I.27 Techniques de renforcement des poteaux.	37
Figure II.1: Présentation des colonnes métalliques.	38
Figure II.2: Différent mode de flambement.	40
Figure II.3: Différents modes de flambement.	40
Figure II.4: Mode de déformation d’une pièce comprimée.	41
Figure II.5: Différent mode de flambement.	42

Liste des figures

Figure II.6 : Plastification et ruine par flambement.	43
Figure II.7: Un diagramme adimensionnel.	43
Figure II.8: Courbe de flambement d'Euler et courbe réelle.	44
Figure II.9: Les courbes de flambement.	46
Figure II.9: Présentation de la section transversale de poteau HEA120	51
Figure II.10: Présentation de la section transversale de poteau HEA120 renforcé (position 1).	53
Figure II.10: Présentation de la section transversale de poteau HEA120 renforcé (position 2).	54
Figure III.1 Les catégories d'éléments dans le logiciel ABAQUS.	57
Figure III.2 Organigramme de calcul du logiciel ABAQUS.	59
Figure III.3 Présentation de la section transversale de poteau HEA 120.	60
Figure III.4 Renforcement de poteau HEA 120 par soudage des plats aux niveaux des semelles (Position 1).	61
Figure III.5 Renforcement de poteau HEA 120 par soudage des plats parallèlement à l'âme (Position 2).	61
Figure III.6 Poteau en H partiellement enrobé avec le béton.	62
Figure III.7 Interaction poteau-plaque (largueur renforcé).	62
Figure III.8 Intéraction poteau-plaque (hauteur renforcé).	63
Figure III.9 Conditions aux limites des poteaux renforcés et déplacement imposé.	63
Figure III.10 Maillage des poteaux renforcés.	64
Figure III.11 Etat contrainte-déformation de poteau non renforcé.	65
Figure III.12 Etat charge –déplacement de poteau non renforcé.	66
Figure III.13 Etat de ruine d'un poteau HEA seul.	66
Figure III.14 Courbes contrainte-déformation latérale des poteaux en H avec des semelles renforcés.	67
Figure III.15 Courbes charge-déplacement des poteaux en H avec des semelles renforcés.	67
Figure III.16 Modes de rupture des poteaux en H avec largueur renforcé par des plaques d'épaisseur 4mm et 8mm.	68
Figure III.17 Modes de rupture des poteaux en H avec largueur renforcé par des plaques d'épaisseur 10mm et 12mm.	68
Figure III.18 Courbes contrainte-déformation latérale des poteaux en H renforcés avec des plaques // à l'âme.	69
Figure III.19 Courbes charge-déplacement des poteaux en H renforcés avec des plaques // à l'âme.	69
Figure III.20 Modes de rupture des poteaux en H avec hauteur renforcé par des plaques d'épaisseur 4mm et 8mm.	70

Liste des figures

Figure III.21 Modes de rupture des poteaux en H avec hauteur renforcé par des plaques d'épaisseur 10mm et 12mm.	70
Figure III.22 Etat comparatif contrainte – déformation des poteaux renforcés.	71
Figure III.23 Etat comparatif charge – déplacement des poteaux renforcés.	71
Figure III.24 Variation de déplacement latéral selon la hauteur de poteau.	72
Figure III.25 Validation des résultats théorique et numériques des poteaux renforcés.	72
Figure III.26 : Modes de ruine de poteau partiellement enrobé avec de béton.	73

Introduction générale

Introduction générale

Introduction générale

Les désordres apparents rencontrés sur certains ouvrages sont très souvent dus au vieillissement des matériaux. La durée de service dépend largement de la durabilité des matériaux utilisés. Les matériaux réagissent en permanence avec le milieu environnant (température, humidité, gaz, sels agressifs). Les ouvrages sont donc soumis à un vieillissement sous l'effet du temps, qui résulte de l'endommagement mécanique, chimique et thermique. Cet endommagement peut avoir des conséquences importantes, et conduire à la ruine de la structure

La raison qui suit, qui nécessite le besoin de renforcer les constructions métalliques, est leur usage en raison du fonctionnement intensif ou incorrect prolongé. D'abord l'attaque des métaux par la corrosion, diminue brusquement la capacité portante des éléments, des nœuds ou des constructions en général. Les problèmes d'instabilités élastiques peuvent causer des dégâts dans les constructions.

Les théories sur la stabilité ont été élaborées afin de déterminer les conditions par lesquelles une structure en équilibre, cesse d'être stable. Il est fondamental d'être sûr qu'une structure, légèrement écartée de sa position d'équilibre par des forces, des chocs, des vibrations, des imperfections, des contraintes résiduelles, etc. aura tendance à revenir à sa position initiale dès la suppression de la perturbation, nous avons trois phénomènes d'instabilité :

Le voilement, le déversement et le flambement.

Le renforcement par augmentation de section nécessite généralement des liaisons de type soudage, plusieurs techniques ont été développées concernant le mode de liaison par soudage. Les constructeurs de structures mécano-soudées sont régulièrement confrontés au problème du développement de contraintes internes dites résiduelles et de distorsions introduites par les opérations de soudage, particulièrement délicat à résoudre empiriquement.

L'organisation du mémoire est subdivisée en 3 chapitres et se présente comme suit :

Le premier chapitre :

Nous présentons dans ce chapitre, une recherche bibliographique concernant les différents modes de fabrication des poteaux métalliques laminés à chaud, avec les différents modes d'instabilités élastiques pour les poteaux (le flambement). En plus, on trouve les différentes techniques de réparation par l'augmentation de sections pour les colonnes métalliques afin de garantir une durée d'exploitation prolongée en service de la construction renforcée dans le futur comportement.

Introduction générale

Le deuxième chapitre :

Traite la détermination des caractéristiques géométriques et mécaniques de la section d'étude (les poteaux) on se basant sur le code de calcul Eurocode 3 partie 1-3. Pour résoudre les problèmes d'instabilités, les règlements de la construction métallique offrent des méthodes réglementaires pour la vérification d'un élément métallique sous compression axiale. Une application sur les modèles traités tels que le poteau en H vide, les poteaux en H renforcé par l'augmentation de section.

Le troisième chapitre :

Une modélisation numérique sous le logiciel ABAQUS 6.17 par une validation tridimensionnelle non linéaire sur un poteau métallique laminé à chaud HEA120 en acier S235 de 4m de hauteur avec les conditions aux limites suivantes : encastres à la base et à l'extrémité supérieure (bi-encastree). Ce poteau est sollicité par un déplacement imposé de compression qui a provoqué un flambement. D'autres modèles sont traités telles que le poteau renforcé par soudage des plats métalliques et le renforcement par remplissage de béton.

Une conclusion générale clôture ce manuscrit en synthétisant les principaux résultats et l'influence des différents paramètres sur l'analyse non linéaire des colonnes vides et renforcés en acier chargées axialement (Renforcés par soudage des plaques métalliques et par remplissage de béton)

Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes pour les travaux futurs et qu'il serait judicieux d'explorer.

Des perspectives de recherche sont aussi présentées pour continuer à apporter de nouvelles informations pertinentes pour les travaux futurs et qu'il serait judicieux d'explorer.

Chapitre I :

Etude bibliographique

Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 INTRODUCTION

Après son industrialisation au 18^{ème} siècle, l'acier a été employé dans tous les domaines (maritimes,....., aéronautiques,). Il est actuellement le matériau le plus utilisé devant le béton et les matériaux qui dérivent du pétrole. C'est un matériau qui est obtenue du recyclage de la fonte contenant 96 % de fer et de 2% à 6% de carbone (obtenu du coke), dans des hauts fourneaux (1500°C) en leur insufflant de l'oxygène (2^{ème} phase).le taux de carbone dans l'acier est réduit à (0,5% ÷ 1,2%).

Deux procédés sont possibles pour la fabrication de l'acier à savoir :

- Filière fonte et aciérie à l'oxygène
- Filière " Ferrailles " et four électrique

I.2 L'ACIER

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un peu de carbone, qui sont extraits de matières premières naturelles des mines de fer et de charbon. Le carbone intervient dans la composition avec un très faible taux (0,5% ÷ 1,2%). L'acier peut comporter d'autres éléments associés autant qu'impuretés qui allèrent les propriétés mécaniques des aciers: résistance à la rupture, dureté, limite d'élasticité, ductilité, résilience, soudabilité ...etc. Ces impuretés sont : le phosphore K, soufre S, silicium Si, manganèse Mg, nickel Ni, chrome Cr, tungstène W, vanadium V, qui interviennent volontairement dans les aciers alliés. (Tableau I.1) [1]

Tableau I.1 : Différents types d'aciers et utilisations.

N°	Types d'acier	Teneur en carbone %	Usage
1	Doux	$0,05 < C < 0,30$	Charpente, boulon
2	Mi-dur	$0,30 < C < 0,60$	Rail, pièce forgée
3	Dur	$0,60 < C < 0,75$	Outils
4	Extra-dur	$0,75 < C < 1,20$	outils, poinçons
5	Sauvage	$1,20 < C < 1,70$	Pièces spéciales
6	fonte hypo-eutectique	$1,70 < C < 4,50$	Pièces coulées, culasses moteurs
7	fonte hyper-eutectique	$4,50 < C < 6,30$	Bâlis machines.

Chapitre I : Etude bibliographique

L'acier est généralement obtenu par une opération qui se produit en deux 02 phases :

La première phase concerne l'introduction et la combustion de minerai de fer, de coke et de castine dans un haut-fourneau, qui permet l'obtention de la fonte (> 1,7 % de carbone).

La seconde phase est destinée à la conversion de la fonte liquide en acier sous insufflation d'oxygène, à une température de 1500°C environ. Cette opération s'effectue dans un convertisseur et a pour objet de décarburer la fonte (faible pourcentage de carbone).

I.2.1 Procédés d'élaboration de l'acier

Deux procédés sont possibles pour la fabrication de l'acier à savoir

- a- Filière fonte et aciérie à l'oxygène
- b- Filière " Ferrailles " et four électrique

A la fin de l'opération d'élaboration (à l'oxygène ou électrique) l'acier est recueilli à l'état liquide dans une poche métallique garnie de briques réfractaires et transporté jusqu'au lieu de coulée (continue ou en lingots). Les installations de coulée font partie de l'aciérie. Cette étape assure la solidification de l'acier et l'ébauche des formes. On produit des blooms des billettes et des brames (Figure I.1). [1]

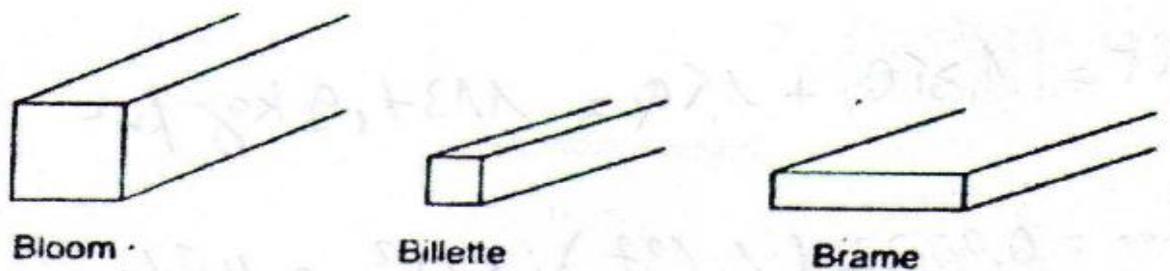


Figure I.1: Formation des demi-produits.

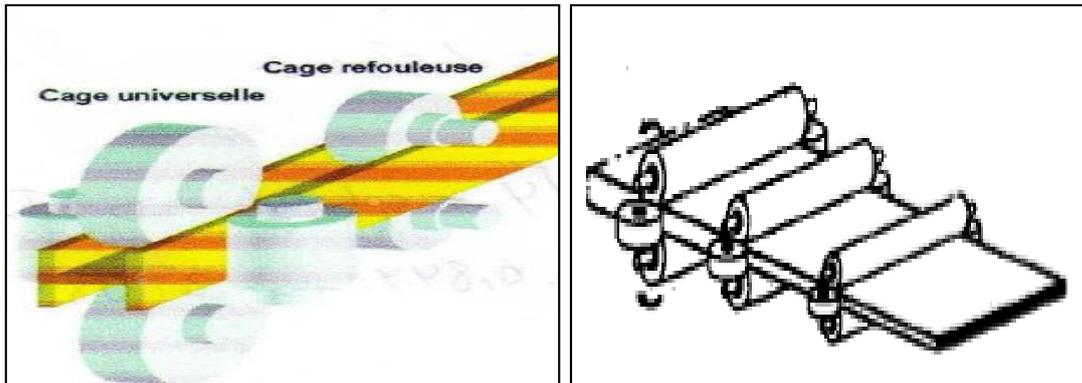
A la fin, une dernière étape consiste à laminier les demi-produits (Blooms, billettes et brames), c'est-à-dire à étirer et à écraser le métal pour lui donner les dimensions et les formes souhaitées. On fabrique ainsi des produits plats (plaques et tôles) à partir de brames et des produits longs poutrelles, rails, barres, fils ...) à partir de blooms et de billettes (Figure I.2.a). Le laminage s'effectue à chaud (environ 1000 degrés).

L'opération consiste à entraîner et écraser le métal chaud entre deux cylindres tournant en sens inverse l'un de l'autre. Les cylindres sont lisses pour les produits plats et à cannelures pour les produits longs (profilés).

En répétant plusieurs fois l'opération, on obtient un produit de plus en plus mince et de plus en plus long, à la forme souhaitée.

Chapitre I : Etude bibliographique

Par exemple, à partir d'une brame de 10m de longueur, 2m de largeur et 25cm d'épaisseur, on obtient une bobine de tôle de, plus d' 1 km de long et de 2 mm d'épaisseur (Figure I.2.b).



(a)

(b)

Figure I.2: Laminage des demi-produits.

(a) Train de laminage à profilés, (b) Train de laminage continu à larges bandes

I.2.2 Trajectoires des produits

Les produits sidérurgiques employés en construction métallique sont obtenus par laminage à chaud et à froid comme présenté dans le tableau I.2. [2]

Tableau I.2 : Principaux produits sidérurgiques disponibles

Principaux produits		
1. Produit laminé à chaud		
Demi-produit (Btooms, Billette, Brames)		
↓ Produits Finis ↓		
Produit long		Produit plats (Figure I.5)
Poutrelle (IPE, IPN, HE, UAP, UPN)(Figure I.3)		Large plat
Laminé marchand (Rond, Carré, plat, Petit U, Cornière, Té T) (Figure I.4).		Tôle Bande et feuillard.
2. Produit formé à froid (PAF) (Figure I.6)		
Pliage successif à froid		
Tôle ($t < 3$) mm		
Produits de base (Cornière, Profile en C, Oméga, Sigma et Zed)		

Chapitre I : Etude bibliographique

Produits finis : Bardage, Bac d'acier et Bac d'acier nervuré	
3. Produit tubulaire (Figure I.7)	
Produit laminé à chaud	Produit formé à froid
Soudée ou non : Cylindre de génératrice circulaire, elliptique, carré, rectangulaire ...	
4. Produit composé (Figure I.8)	
Produits finis (symétriques ou dissymétriques)	
Poutre reconstituée soudée PRS, Poutre en treillis, Poutre cellulaire, Poutre dissymétrique.	

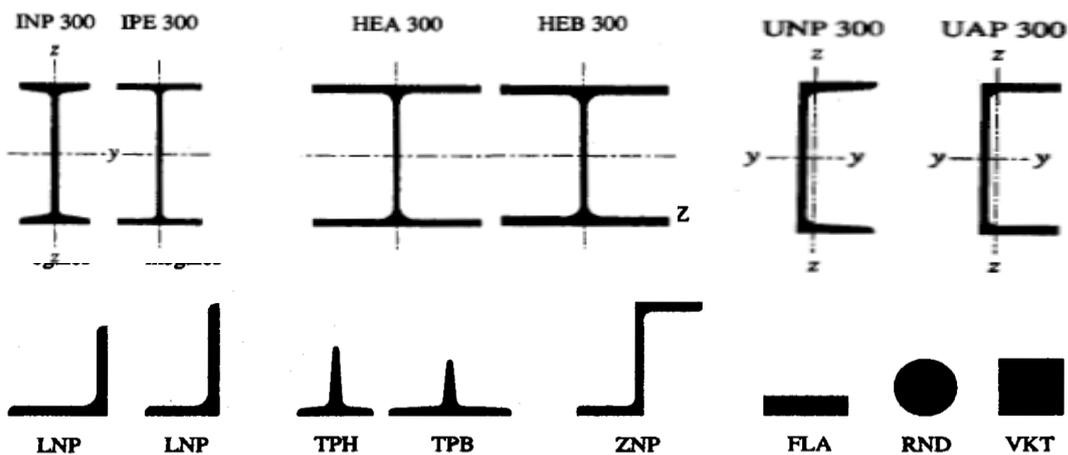


Figure I.3:

Exemple de produits laminés à chaud

Figure I.4: Exemple de produits laminés marchands.

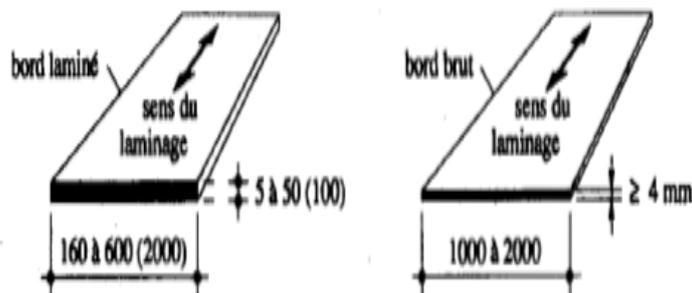


Figure I.5: Exemple de produits plats.

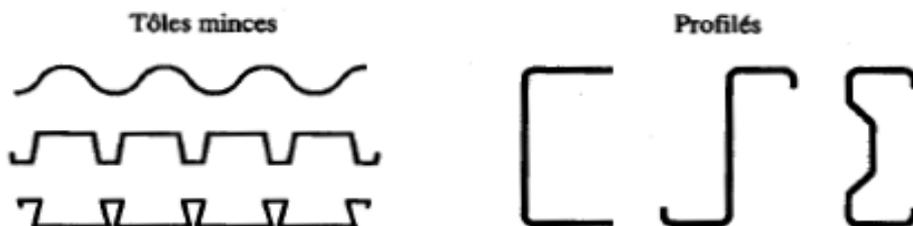


Figure I.6: Exemple de produits façonnés à froid.

Chapitre I : Etude bibliographique

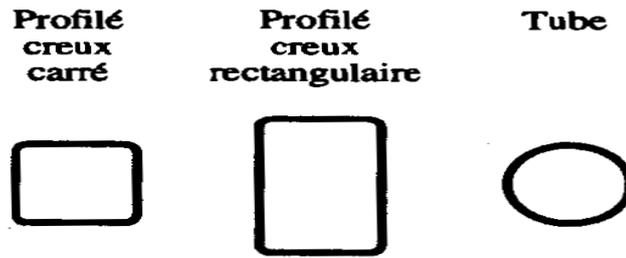


Figure I.7: Exemple de profils tubulaires.



(a)

(b)

(c)

Figure I.8: Exemple de produits composés.

(a) Poutres reconstituées soudées PRS, (b) Poutres cellulaires, (c) Poutres en treillis.

I.3 ACIER ET ESSAIS NORMALISES

I.3.1 Les essais destructifs

Ils informent sur les qualités des propriétés mécaniques des aciers, tels que: l'essai de traction qui constitue l'essai mécanique le plus classique dont les procédures sont totalement normalisées (NF EN ISO 6892, révisé 09-B10). Il permet de connaître plusieurs paramètres tels que la limite d'élasticité f_y , la limite de rupture f_u , les modules d'élasticité longitudinale et transversale (E , G), l'allongement à la rupture ϵ_u , l'allongement à la limite d'élasticité ϵ_y , et le coefficient de poisson ν .

La figure I.9 montre quatre zones très intéressantes, la première zone rectiligne (1) dont les allongements sont proportionnels aux efforts appliqués, c'est le domaine élastique. La deuxième zone (2) qui est un palier horizontal, il traduit un allongement sous charge constante, il s'agit d'un écoulement du matériau (la plasticité). Pour la troisième zone (3) la charge continue à croître avec les

Chapitre I : Etude bibliographique

allongements jusqu'à atteindre le point B. La quatrième zone (4) l'allongement continue bien que la charge soit décroissante jusqu'au point, se qui correspond à la rupture.

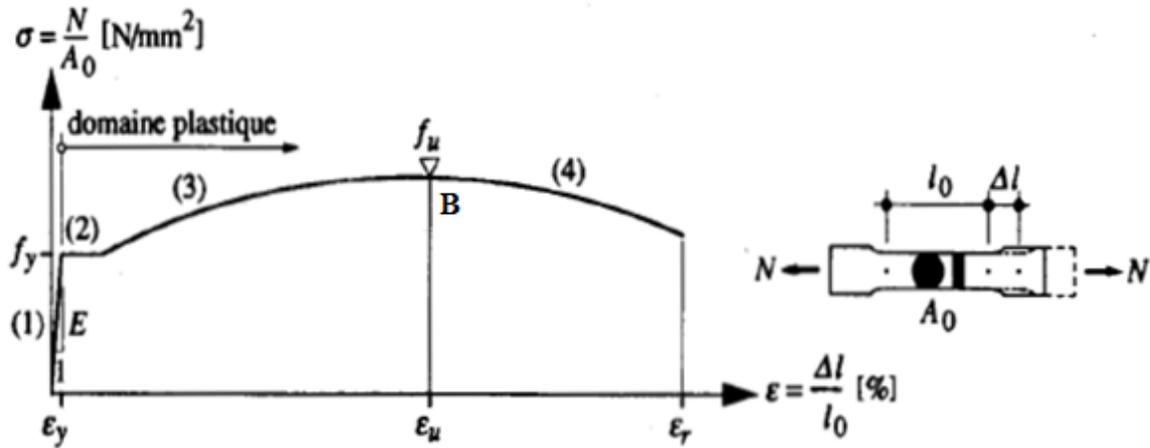


Figure I.9: Allure générale de la relation contrainte –déformation spécifique de l'acier.

- L'essai de dureté, qui étudie la pénétration d'une bille ou d'une pointe dans l'acier, et qui définit des degrés de dureté [duretés Brinell (figure I.10), Rockwell et Vickers (Figure I.11)].
- L'essai de résilience, qui permet de mesurer l'aptitude d'un acier à se rompre par choc (figure I.12).
- L'essai de pliage est spécifique aux assemblages soudés (Figure I.13). Ils permettent de mettre en évidence la présence de défauts de surface ou proches de la surface et, dans certains cas, d'apprécier des modifications de ductilité dans la zone fondue ou dans la zone affectée par la température suite à l'opération de soudage.
- L'essai de fatigue est définie par un élément soumis à des efforts répétés alternés, tout matériau peut se fissurer et se rompre, alors que l'effort appliqué n'entraîne pas de contrainte supérieure à la limite de rupture (Figure I.14). [2]

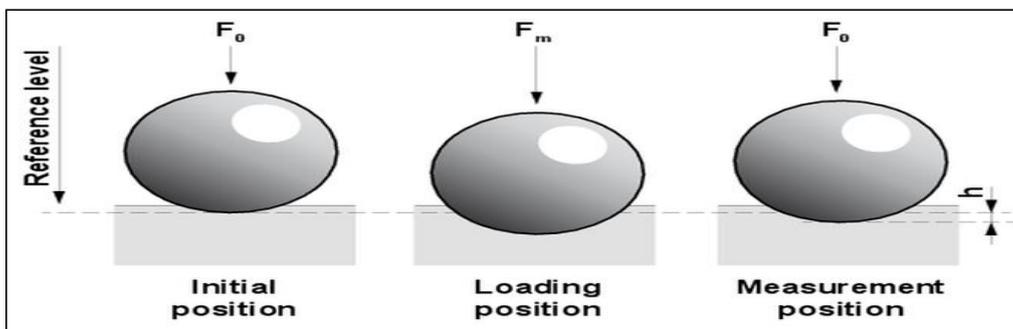
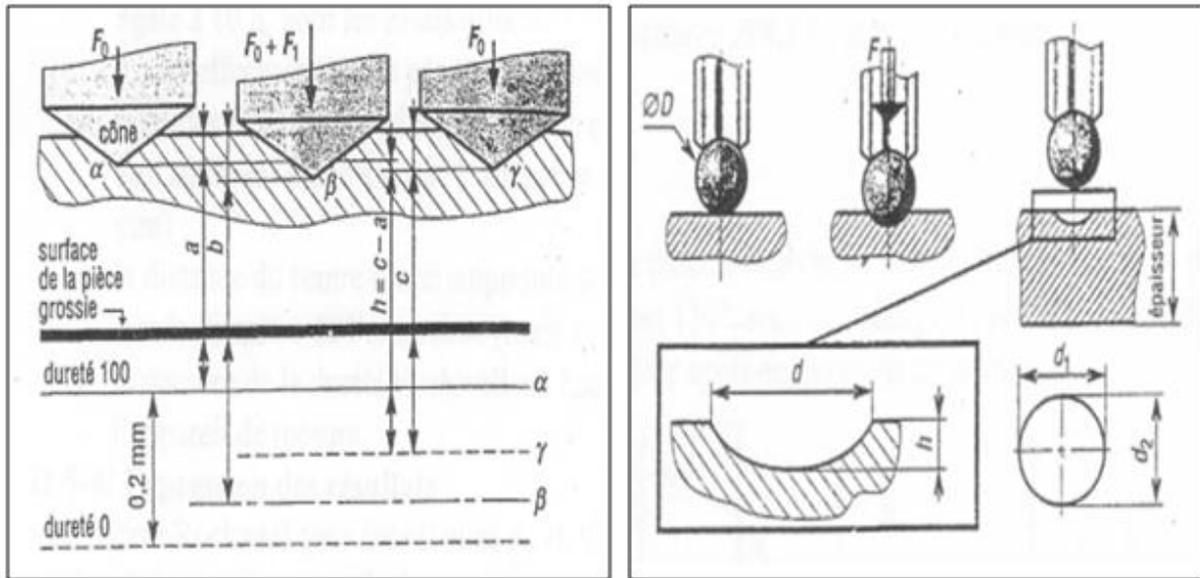


Figure I.10: Essai de dureté de Brinell.

Chapitre I : Etude bibliographique



(a)

(b)

Figure I.11: Essai de dureté : (a) Essai de Vickers , (b) Essai de Rockwell.

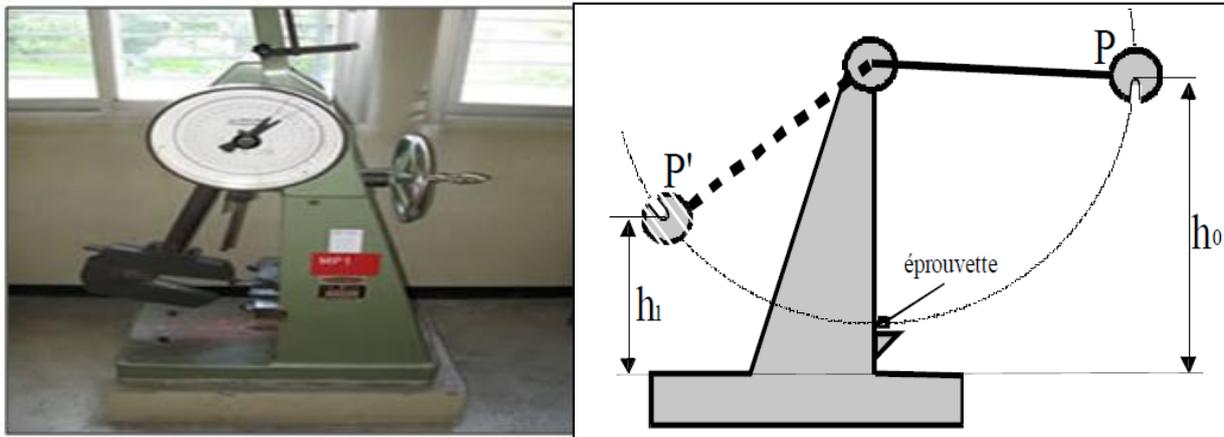


Figure I.12: Essai de résilience.



Figure I.13: Essai de pliage.

Chapitre I : Etude bibliographique

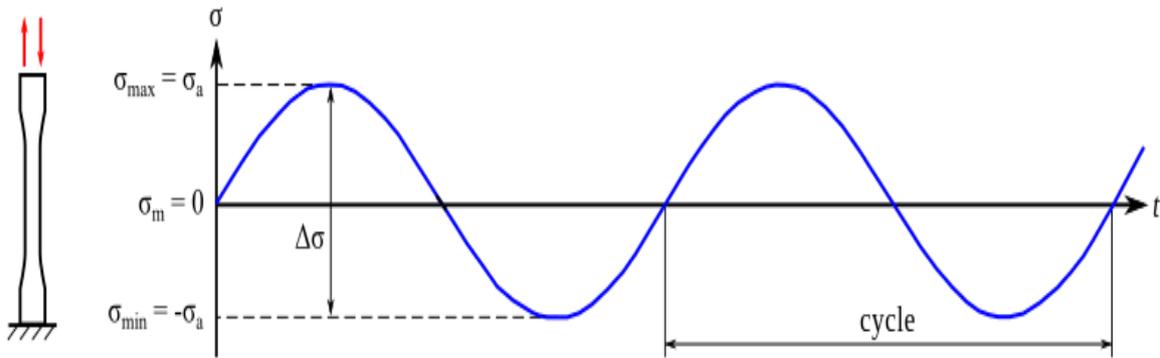


Figure I.14: Essai de fatigue en sollicitation purement alternée.

I.3.2 Les essais non destructifs

Ils renseignent sur la composition et la structure des aciers qui sont:

- la macrographie est un examen visuel d'une surface bien traitée et polie à l'acide. Or, la micrographie est une visualisation des cristaux micro-structurellement, pour déterminer la teneur en carbone.
- La radiographie est comme pour les applications médicales, mais avec des intensités de rayonnement ; en béton armé, il permet de connaître le diamètre et la position de barres d'armature ainsi que d'éventuels défauts et corrosion ; en construction métallique, elle permet de détecter la présence de défauts de soudage, inclusions etc....,
- La radiographie, par rayons X (en laboratoire) ou rayons gamma (sur chantier), permet de déceler les défauts, des cavités ou fissures internes des pièces, notamment dues à l'opération de soudage.
- Les ultra-sons, c'est l'introduction d'une onde ultrasonore émise au départ d'une source qui rebondit sur toute discontinuité matérielle, en particulier sur l'autre face d'une plaque (acier, béton). Cet essai est particulièrement efficace pour l'acier, dont le module d'élasticité et la vitesse de propagation de l'onde qui en dépend directement sont des constantes connues. Cette technique permet de connaître l'épaisseur de l'élément et de détecter des défauts internes.[3]

I.4 plasticité de l'acier: réserve de sécurité

Le palier de ductilité (la plasticité) est particulièrement important en construction métallique, car il représente une réserve de sécurité. En effet, il peut arriver que localement, dans une structure, des pièces soient sollicitées au-delà de celle limite élastique. Elles disposent dans ce cas, du palier AA' pour se décharger dans des zones avoisinantes. On dit qu'il y a une adaptation plastique.

Chapitre I : Etude bibliographique

Plus la teneur en carbone des aciers augmente, plus f_y augmente, plus le palier de ductilité se raccourcit et plus l'allongement de rupture diminue.

La sécurité est donc inversement proportionnelle au taux de carbone. C'est pourquoi seuls les aciers doux (à faible taux de carbone) sont autorisés en construction métallique. Le taux moyen de carbone étant de 0,2%.

Cette notion de plasticité/sécurité est très importante. En effet, lorsqu'une pièce est excessivement sollicitée, au-delà de la limite d'élasticité f_y si elle est constituée en acier dur ou en fonte, elle va périr par rupture brutale, sans présenter au préalable de signe ou de déformation prémonitoire. En revanche, une pièce en acier doux va présenter de grandes déformations, qui vont prévenir du danger latent.

En outre, la zone sur contrainte va, en se plastifiant, se déformer et se dérober, ce qui va provoquer le report des contraintes excessives sur des zones ou des pièces voisines non saturées (figure I.15).

Les structures métalliques ont donc, grâce à la ductilité de l'acier, la possibilité d'équilibrer les zones de contraintes, par ce qu'il est convenu d'appeler l'adaptation plastique.

Alors que les règles CM 66 ne tenaient que sommairement compte de cette possibilité pour les pièces fléchies (par l'introduction d'un coefficient d'adaptation plastique ψ), l'Eurocode, au contraire est établi sur la base de comportement élasto-plastique de l'acier.

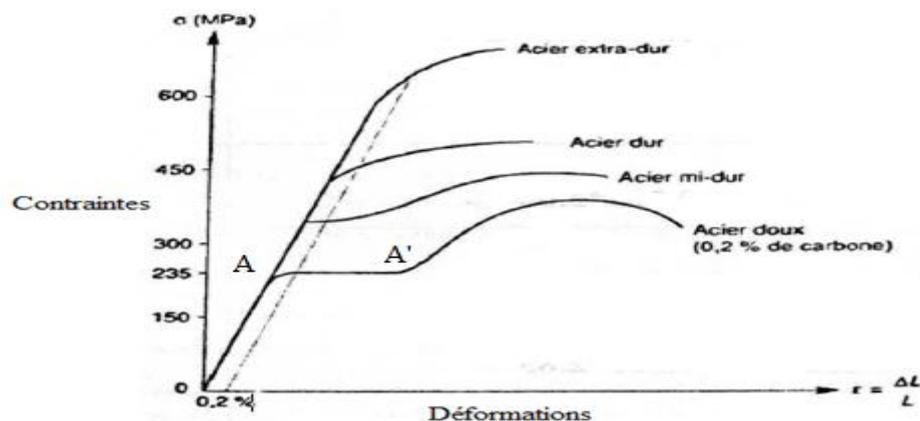


Figure I.15: Adaptation plastique pour les différents types d'acier [2].

Chapitre I : Etude bibliographique

Types de poteaux métalliques :

Les Poteaux à section transversale uniforme :

La capacité des éléments comprimés à transmettre des efforts de compression importants est liée à la valeur élevée du rayon de giration i de leur section transversale dans la direction de flambement considérée. Les tubes circulaires représentent donc une solution optimale dans la mesure où ils permettent de maximiser ce paramètre quel que soit la direction de flambement. En revanche, leurs assemblages sont coûteux et difficiles à dimensionner. Une autre solution consiste en l'utilisation de sections tubulaires carrées ou rectangulaires. (**Construction métallique et mixte acier-béton, EC3 et EC4**). [4]

Dans la pratique les profils les plus courants sont les profilés laminés à chaud en I ou en H. Pour résister à des efforts de compression simple, les sections de type HE sont préférées ; leur allure sensiblement carrée leur confère un rayon de giration transversal i élevé et l'épaisseur de leurs ailes prévient souvent l'instabilité par voilement local.

Il est à noter que :

- La nature des assemblages conditionne le dimensionnement de barres comprimées car elle détermine la valeur de la longueur de flambement à prendre en compte.
- En cas de besoin les sections en **I** ou en **H** ou en caisson peuvent être renforcées à l'aide de plat de renfort soudé.
- En plus du chargement axial, les poteaux sont fréquemment soumis à des moments de flexion significatifs, le plus souvent dans une direction donnée.

Les sections en **I** peuvent alors être préférées aux sections en H.

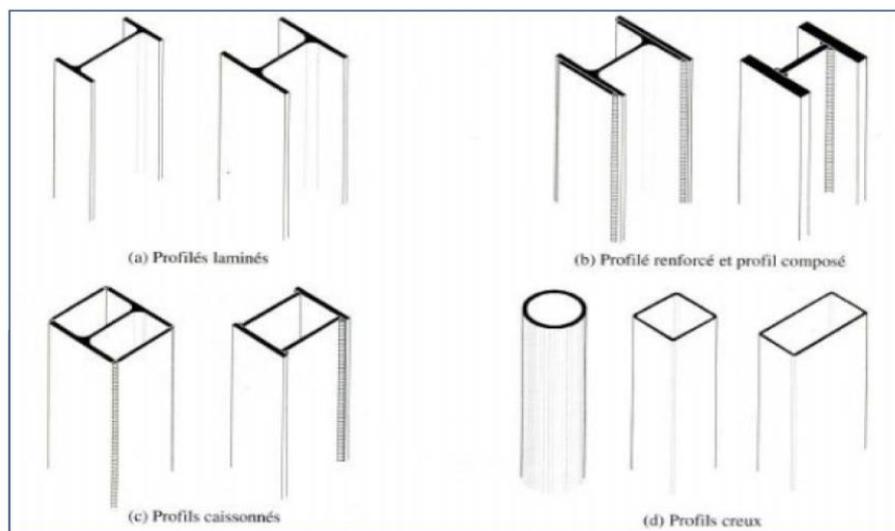


Figure I.16 Les différents types de poteaux métalliques [13].

Chapitre I : Etude bibliographique

Les Poteaux à sections transversales non uniforme :

Ce sont des éléments dont la section transversale varie selon leur longueur.

Dans ce genre de section on site les poteaux en fuseau (continument variables) et les poteaux baïonnettes (variables par tronçons).

Les poteaux en fuseau :

La géométrie de la section transversale évolue de façon continue le long de l'élément. Il peut s'agir d'une section en I ou en H ou en caisson réalise par soudage de plusieurs plats. Les âmes et les semelles peuvent être d'épaisseurs différentes par tronçons mais, pour des raisons pratiques de fabrication seule l'âme présente, une hauteur variable alors que les semelles restent de largeur constante. (Figure I.17)

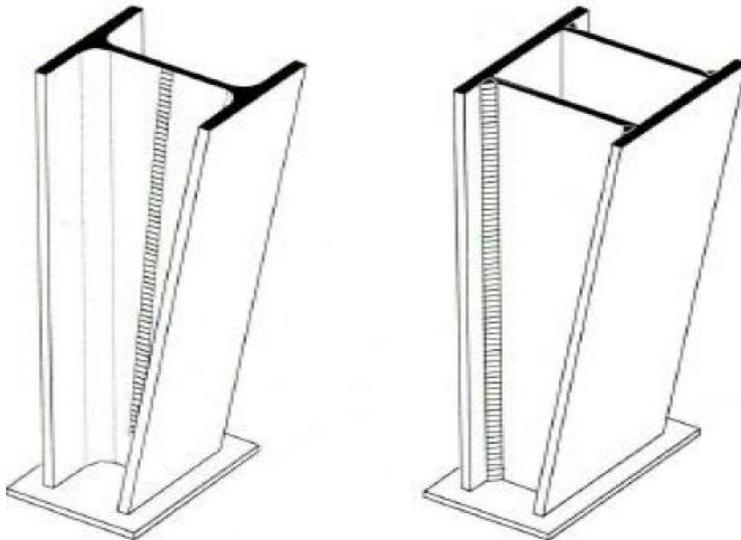


Figure I.17 Poteau en fuseau.

Les poteaux à baïonnette

Sont caractérisés par une section transversale dont la géométrie évolue par tronçons. Un exemple classique est celui des bâtiments industriels comportant un pont roulant. La section réduite dans la partie supérieure est suffisante pour reprendre les charges de toiture mais elle doit être augmentée au niveau du pont roulant pour supporter les charges additionnelles les sections variables par tronçon peuvent également être utilisées dans les structures de bâtiments multi-étagés pour résister aux charges croissant, étage par étage, au fur et a mesure qu'on se rapproche des fondations. (Figure I.9)[5].

Chapitre I : Etude bibliographique

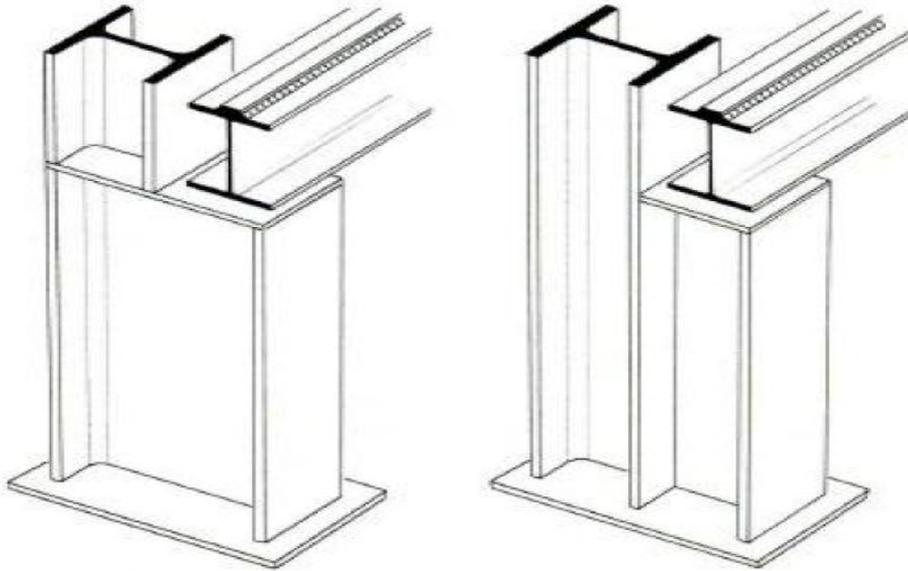


Figure I.18 Poteaux à baïonnette.

Les Poteaux composés :

Les poteaux composés peuvent être réalisés à partir d'un grand nombre d'éléments différents. Ils sont constitués de deux ou plusieurs composants principaux (membres) connectés à intervalles réguliers par des barres intérieures (montant, diagonal, étrésillons) afin de reconstituer une nouvelle section transversale de plus grande capacité [6].

Des sections en U et des cornières sont souvent utilisées comme membres, mais il est également possible d'avoir recours à des profils en I ou en H. (Figure I.19)

Les poteaux métalliques peuvent subir un problème d'instabilité qui est le flambement.

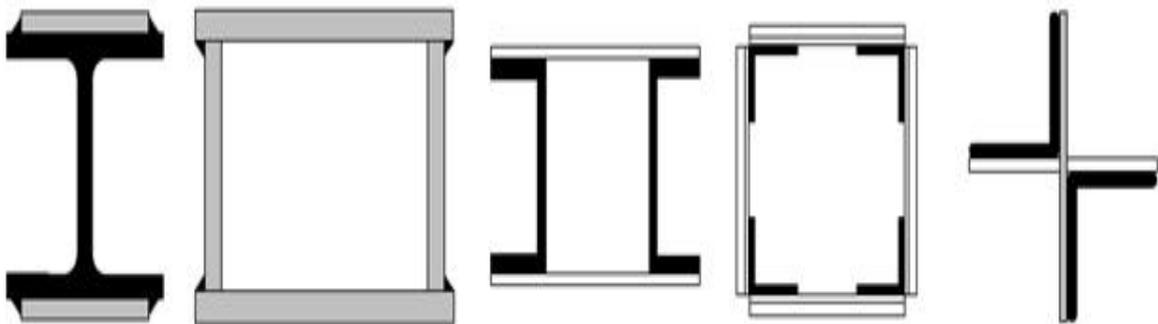


Figure I.19 Sections composées.

Chapitre I : Etude bibliographique

Le flambement

Le flambement est un phénomène mécanique d'instabilité qui affecte des éléments de structures soumises à la compression. Lorsque l'élément sollicité à une charge N de compression atteint une certaine valeur de compression, l'élément sollicité subit une flexion dans la direction perpendiculaire à la direction de la charge. La déformation de l'élément se produit dans le sens de faible inertie pour les sections qui procèdent une inertie plus faible vis-à-vis l'autre. Cette charge provocatrice d'éventuelle déformation est appelée charge critique de flambement N_{cr} qui peut avoir une nature mécanique ou bien thermique. Autrement dit, le système d'équilibre d'un élément sollicité en compression est stable si la valeur de la charge N est inférieure à N_{cr} , le système est métastable si N atteint la valeur critique N_{cr} , par la suite il sera instable si la charge N dépasse la valeur critique et ainsi l'élément sollicité se ruine et ne répond plus aux services souhaité. (Figure I.20) [7]

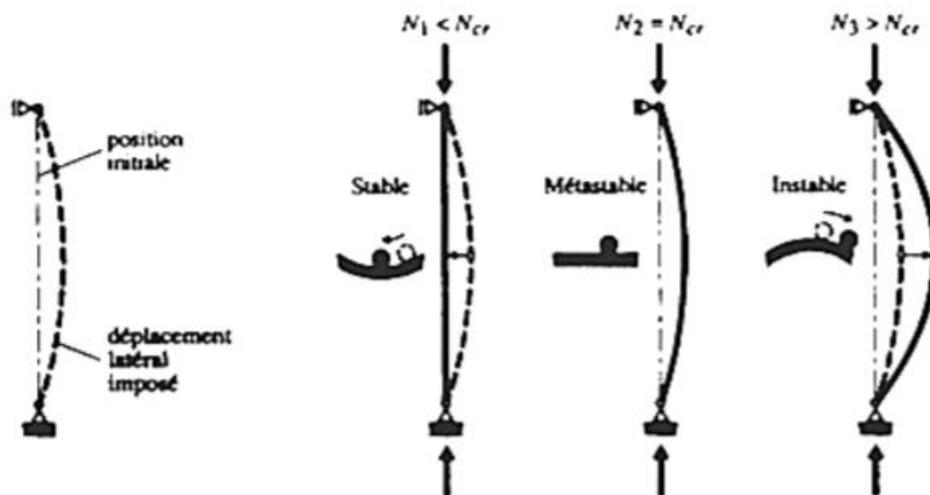


Figure I.20 Stabilité de forme d'une barre comprimée.

Chapitre I : Etude bibliographique

Dans les problèmes classiques de flambement, le système est dit stable si la charge N est assez petite, autrement dit après déchargement la barre revient à sa position initiale. Si la charge N est égale à la charge critique N_{cr} qu'on l'appelle aussi charge de flambement, la barre garde sa position déformée après déchargement, la barre se trouve à un nouvel état d'équilibre dit métastable ou indifférent. Pour le dernier cas si la charge N est supérieure à la charge critique N_{cr} le système cesse d'être stable et il est appelé instable, ainsi la barre se dérobe, la déformation s'accroît et devient inacceptable.

- **Théorie de flambement plan élastique par bifurcation :**

En 1744, Euler a été le premier à définir la valeur de la charge critique de flambement qu'on appelle également charge critique d'Euler. Pour établir les équations d'équilibre, il considère un élément parfaitement rectiligne sans aucune imperfection de forme initiale, bi articulé aux extrémités et soumis uniquement à une charge de compression centrée. Par conséquent, selon ces hypothèses adoptées par Euler, la charge critique déduite est appelée charge critique de bifurcation et qu'on appellera par la suite le système dans son état instable par flambement par bifurcation. En revanche, si un élément comprimé ne tient plus compte des hypothèses adoptées par Euler, par exemple l'apparition d'une flexion supplémentaire provoquée par une imperfection initiale de l'élément ou bien l'excentrement de la force de compression, l'existence de forces transversales, le phénomène d'instabilité se nomme ainsi le flambement par divergence. Naturellement la valeur de la charge critique déduite d'un tel système imparfait sera inférieure à la charge critique d'Euler dite de bifurcation. (Figure I.21)

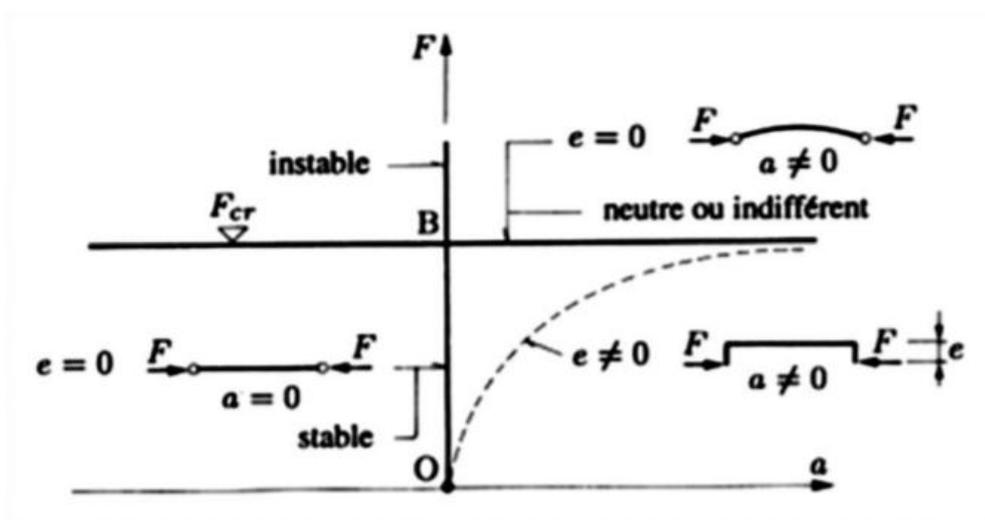


Figure I.21 Flambement par bifurcation et par divergence.

Chapitre I : Etude bibliographique

Le cas de poutre étudié par Euler pour illustrer le phénomène mécanique de flambement est considéré comme un cas fondamental pour établir les équations d'équilibres. Ainsi on

$$v'' + \frac{N}{EI_z} v = 0 \quad \text{Suivant l'axe Z} \quad (1.1)$$

$$w'' + \frac{N}{EI_y} w = 0 \quad \text{Suivant l'axe Y} \quad (1.2)$$

On considère que la section transversale possède une inertie suivant l'axe Y qui est plus forte que celle suivant l'axe Z.

Avec v la flèche suivant l'axe Y et w la flèche suivant l'axe Z, la vérification au flambement est toujours faite selon la zone faible, et dans notre cas on considère toujours une vérification selon l'axe de faible inertie qui est l'axe Z. (Figure I.22)

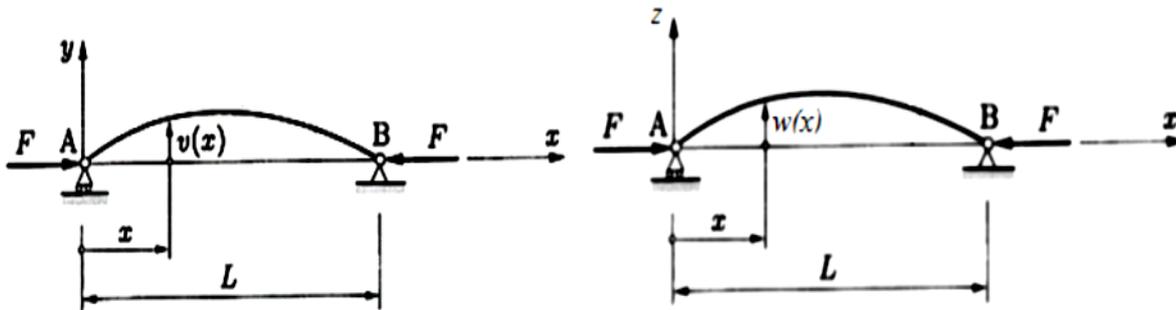


Figure I.22 Cas fondamental d'Euler.

La solution de l'équation différentielle est de la forme :

$$v = C_1 \sin kx + C_2 \cos kx \quad (1.3)$$

Les constantes C_1 et C_2 sont définies à partir des conditions aux limites aux droit des appuis $v(0)=0$ et $v(L)=0$. Ainsi la charge critique de flambement devient :

$$N = \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (1.4)$$

Avec :

n : Nombre entier.

E : Module d'élasticité du matériau.

I : moment d'inertie de l'axe perpendiculaire à celui de la flèche.

L : longueur de la barre.

Chapitre I : Etude bibliographique

Si on prend $n=0$, cela veut dire que l'effort dans chaque section est nul, ce qui ne reflète pas du tout le cas de l'état de notre poutre étant donné qu'elle est fléchée sous un effort existant. Cependant, pour déterminer la petite valeur de la charge critique de bifurcation dite aussi charge critique d'Euler, on prend la plus petite valeur de n et qui est égale à 1, et la valeur devient :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \quad (1.5)$$

L'expression finale de F définit tout simplement une résistance au flambement d'un élément parfait bi-articulé de section constante soumis à une charge de compression centrée. A cet effet, l'expression F change de valeur en fonction des conditions aux appuis autre que celles du cas fondamental d'Euler, et par la suite la longueur de la barre L change de valeur et à laquelle on attribue le nom de longueur de flambement l_k . Cette dernière est définie comme une distance mesurée entre deux points d'inflexion de la barre étudiée. L'expression de la résistance critique au flambement d'une barre devient :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l_k^2} \quad (1.6)$$

Les longueurs de flambement sont illustrées sur (Figure I.25) suivante :

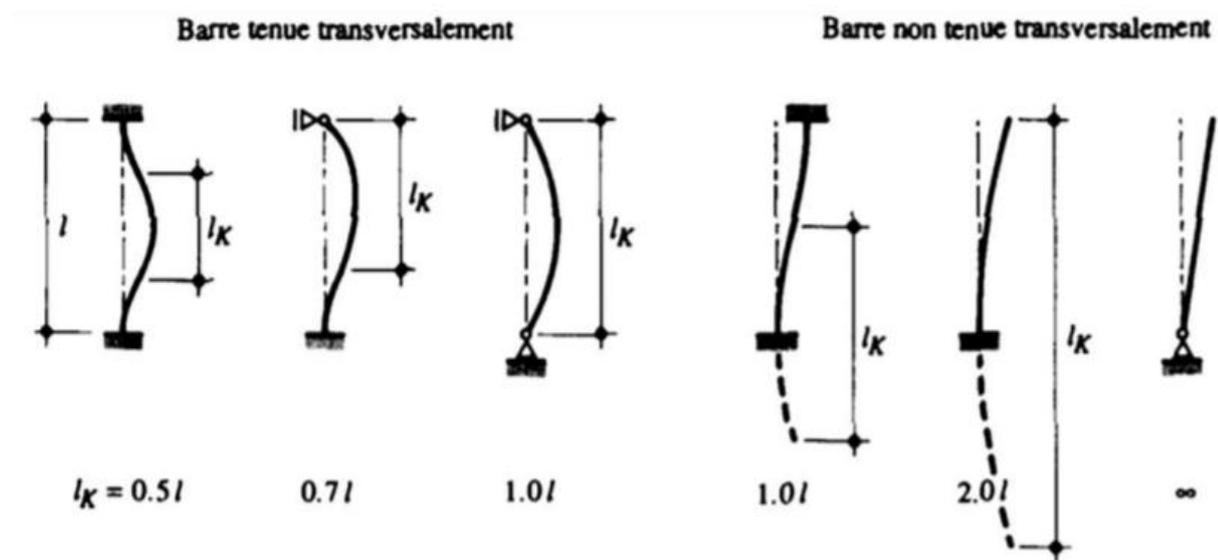


Figure I.23 Longueurs de flambement l_k de barres soumises à la compression sous différentes conditions aux appuis.

A partir de l'expression (1.11), on peut déduire l'expression de la contrainte critique de bifurcation qui vaut :

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 EI}{A l_k^2} = \pi^2 E \left(\frac{i}{l_k} \right)^2 = \frac{\pi^2 E}{\lambda_k^2} \quad (1.7)$$

Chapitre I : Etude bibliographique

Avec :

A : Aire de la section.

i : Rayon de giration de la section de la barre par rapport au plan de déformation considéré ($i = \sqrt{I/A}$)

λ : Elancement de la pièce.

- **Courbes de flambement et élancement limite :**

On obtient une vue d'ensemble de la sensibilité au flambement par bifurcation en traçant le graphe de la fonction $\{\sigma_{cr} = \pi^2 E / \lambda_k^2\}$, dénommé courbe d'Euler et asymptotique aux axes

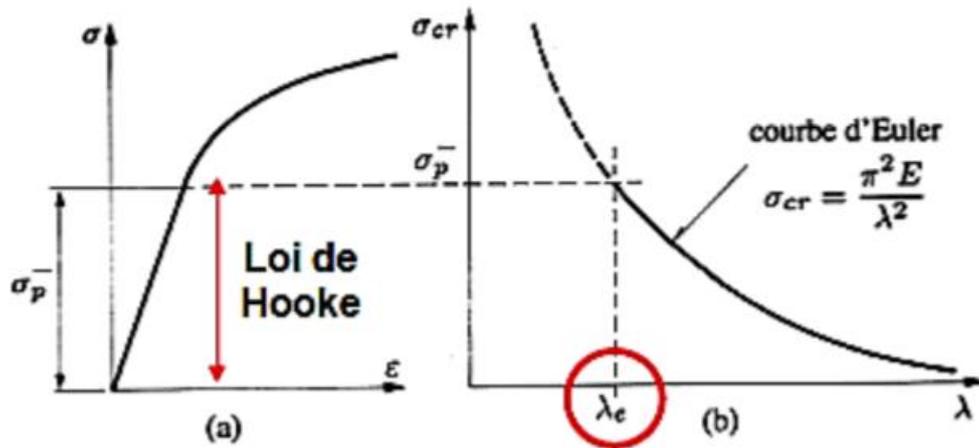


Figure I.24 Courbe de flambement d'Euler.

La (Figure I.26) présente la courbe de flambement des barres qui font partie du cas fondamental d'Euler établi par la contrainte critique d'Euler σ_{cr} en fonction de l'élancement λ_k . Cette courbe dite également hyperbole d'Euler n'est valable que dans le domaine élastique selon les hypothèses d'Euler. A cet effet, la valeur de la contrainte critique de bifurcation doit être inférieure à celle de la contrainte limite de compression du matériau σ_p . On détermine par la suite la valeur de l'abscisse correspondante à σ_p et qu'on appelle élancement limite λ_e par l'expression suivante :

$$\lambda_e = \pi \sqrt{\frac{E}{\sigma_p}} \quad (1.8)$$

Pour les aciers $\sigma_p = f_y \Rightarrow \lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} \quad (1.9)$

Chapitre I : Etude bibliographique

I.5 Termes relatifs à l'intervention intégrée dans le code du patrimoine

Dans le secteur du bâtiment, il existe plusieurs interventions de réhabilitation, de maintenance, de réparation et de renforcement, correspondant à des métiers différents. Mais dans tous les cas, il est indispensable de bien connaître l'existant, d'être « réactif » aux gens et aux choses et de mesurer l'enjeu véritable de chaque opération envisagée. Toutefois, il faut noter que les domaines d'action auxquels correspondent ces interventions, bien que comportant une partie commune qui est le diagnostic, doit être distingué l'une de l'autre.

I.5.1 La conservation

Selon la norme européenne EN 15898 : 2011 (F) Terme 3.3.6, la conservation englobe l'ensemble des actions entreprises directement sur un bien pour arrêter une détérioration ou limiter une dégradation afin de prolonger la durabilité d'un bâtiment.]

I.5.2 La réhabilitation

Selon la norme européenne EN 15898 : 2011 (F) Terme 3.5.8, la réhabilitation est une opération qui consiste à récupérer et améliorer un patrimoine architectural (habitations et anciens immeubles, quartiers...). En l'adaptant à un usage de confort moderne, en vue de leur réutilisation tout en conservant les principales caractéristiques patrimoniales, contrairement à la restauration qui implique un retour à l'état initial.

La réhabilitation des structures est nécessaire à chaque fois qu'il y a des erreurs de conception, des défauts d'exécution ou bien des conditions de chargements inattendus. Elle consiste à améliorer le niveau de performance d'un système structural ou de quelques éléments de celui-ci selon l'état de l'endommagement de la structure.

Elle assure l'avantage de préserver la continuité dans l'évolution du tissu urbain et l'implication d'une pluralité d'acteurs, notamment les acteurs privés. En particulier, elle comporte l'installation d'un ascenseur, la réparation des toitures et la consolidation des façades etc. [8]

I.5.3 L'entretien et la maintenance

Un entretien régulier avec une réparation immédiate des éventuels accidents, prolonge considérablement la durée de vie des éléments et évite simultanément les grandes dégradations. Alors

Chapitre I : Etude bibliographique

cette opération ne conserve pas seulement la valeur de la construction, elle influe aussi sur le côté financier par la réduction de cout de l'entretien. Des travaux ayant pour but de maintenir dans leur état initial le bon fonctionnement des ouvrages existant, en luttant contre leur vieillissement et leur usure naturelle, sans changer leur usage ni la nature de prestations qu'ils peuvent offrir.

I.5.4 Réparation et renforcement

Parmi les problèmes les plus délicats qu'on rencontre actuellement dans le domaine de la construction, et afin d'offrir de nouvelles fonctionnalités ou prolonger la durée de vie de celle-ci, on fait appel à la réparation ou le renforcement vis-à-vis des constructions métalliques en particulier.

I.5.4.a La réparation

La réparation d'une structure ou d'un édifice endommagé est une action entreprise qui consiste à lui restituer son fonctionnement selon la norme européenne (EN 15898 : 2011. F Terme 3.5.10). Par des travaux appropriés et faire disparaître les causes de dégâts matériels ou moraux, qui sont : les agressions atmosphériques, modification des propriétés des matériaux, l'utilisation intensive par l'effet d'utilisation au-delà des charges prévues, changement des conditions d'exploitation des constructions, les accidents et sinistres (incendies, choc, séisme, ...).

Les travaux de réparation représentent le second niveau de consolidation de bâtiments qui permettent d'intervenir sur les parties détériorées de l'ouvrage. Ils ont pour objet de rétablir l'aspect et la fonction d'origine et de stopper les altérations ou de traiter leurs conséquences donc on se limite alors au cadre des travaux d'entretien ou de maintenance. Si la réparation prend en considération l'intérêt patrimonial, elle peut être aussi une action de restauration [9].

I.5.4.b Le renforcement

Le renforcement est une opération qui consiste à améliorer les performances structurelles d'un ouvrage afin qu'il soit conforme aux nouvelles exigences fonctionnelles, en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance). Des nouveaux éléments de renforcement sont intégrés aux éléments existants (éléments de base) sans altérer la distribution de rigidité et de masse du bâtiment. Le renforcement peut être exécuté à différents niveaux ; tout dépend de l'augmentation de résistance requise, et selon l'étendue des dégâts existants. Plusieurs travaux de recherche ont été consacrés à ce domaine de renforcement, des éléments métalliques de divers types d'ouvrages [10].

Chapitre I : Etude bibliographique

I.6 Causes de dégradation des ouvrages

Les causes de dégradation diffèrent d'un ouvrage à un autre ; elles peuvent être des causes naturelles dues à l'environnement tels que la température, l'humidité, le vent, et l'agressivité du milieu, corrosion etc..., ou bien des causes structurelles provenant d'une erreur d'utilisation ou de fonctionnement mécanique au niveau des appuis, de continuité, fluage et retrait ...etc. Les dégradations peuvent être la résultante d'un vieillissement d'une structure au cours du temps, en plus des détériorations accidentelles telles que les chocs, le séisme, le feu et les conditions d'exploitation. Un domaine très vaste de la mécanique de l'endommagement qui est une théorie décrivant la réduction progressive des propriétés mécaniques des matériaux en raison de l'initiation, la croissance et la coalescence des fissures microscopiques. Ces changements et transformations internes conduisent à la dégradation, l'affaiblissement des propriétés mécaniques du matériau.

I.7 Elaboration d'un programme d'étude de réhabilitation

L'opération d'améliorer une construction nécessite donc des idées sur les étapes aussi précises sur ce que sera le bâtiment après les travaux que sur ce qu'il est avant sa réhabilitation. La figure I.4 représente un programme d'étude de réhabilitation sur un plan préétabli, qui est le premier acte de diagnostic (Prés-diagnostic). Cela consiste à établir un relevé dimensionnel du bâtiment existant qui permettra non seulement de disposer des éléments, mais aussi de repérer toutes les observations effectuées lors de la visite de l'état de lieu (l'investigation). Cette étape de recherche des indices d'appréciation nécessite une personne ayant de bonnes connaissances, ainsi qu'une bonne expérience pratique. Un constat méthodique et individuel des divers éléments du bâti affecté, en plus au niveau général pour les structures.

En ce qui concerne les structures, il s'agit de déterminer les emplacements et les caractéristiques des éléments principaux porteurs et de contreventement (mur, poteaux, poutres, chaînages...), les détériorations apparentes ou cachées (fissurations de murs et de cloisons, décollement d'enduit, affaissement de plancher, déversement de mur de façade...) de repérer les ouvrages spéciaux ayant une incidence sur la stabilité du bâtiment (cheminées, conduits divers, chevêtres...).

Pour le second œuvre et les équipements, il est nécessaire de recueillir toutes les informations sur leur constitution, leur état, leur aptitude à assurer le service ou la fonction pour laquelle ils sont conçus, compte tenu des exigences actuelles dans ce domaine. Toutes ces recherches sont effectuées par l'observation visuelle de toutes les parties visibles, et faire des essais d'auscultation pour les éléments non destructifs, les points délicats, et les zones sensibles. Les résultats des diagnostics préalables et de la collaboration avec les différentes subdivisions doivent permettre de définir les objectifs et les

Chapitre I : Etude bibliographique

opérations du programme et de fixer certaines exigences. Une entreprise qualifiée est réquisitionnée pour la réalisation et l'élimination de toutes les difficultés qu'ils risquent de susciter [11].

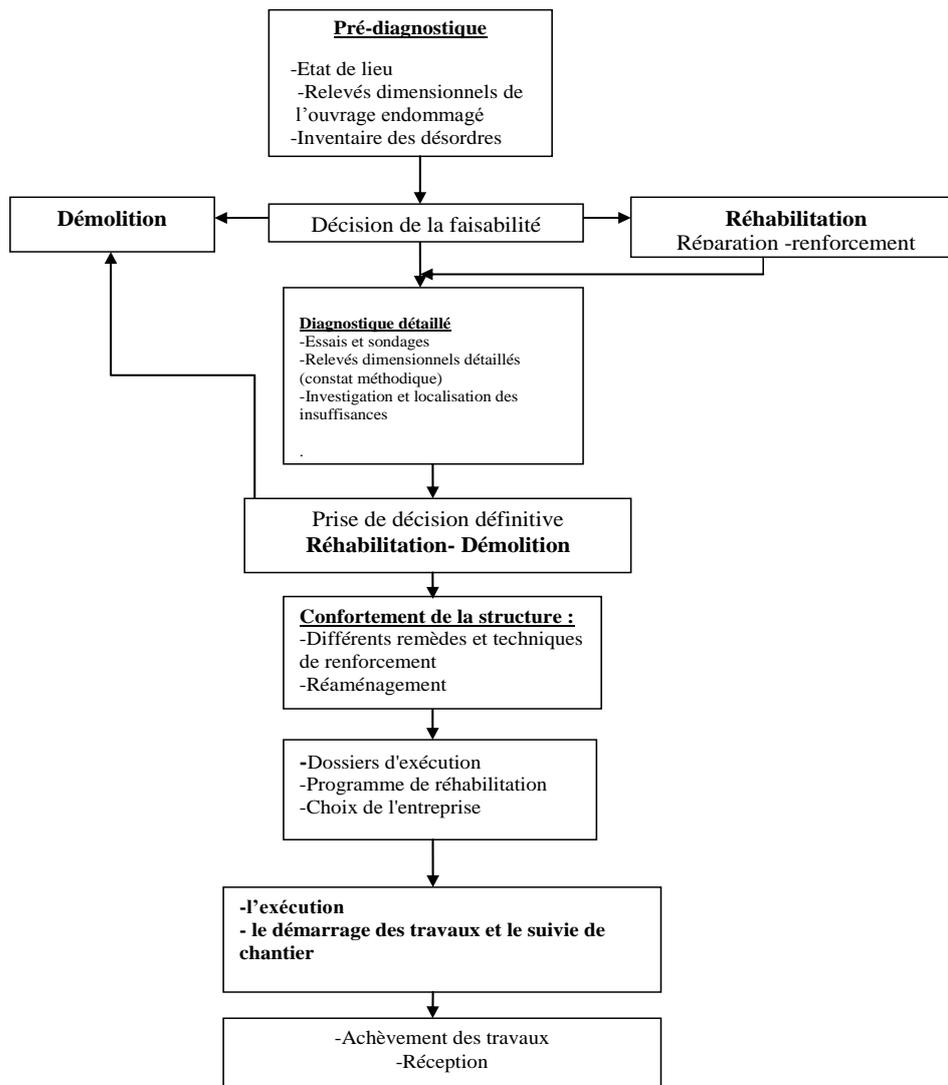


Figure I.25 Organigramme d'un programme de réhabilitation.

I.7.1 Les avantages de l'acier en réhabilitation

L'acier propose plusieurs avantages par rapport aux autres matériaux pour la réhabilitation des bâtiments, on cite [7] :

- **Facilité de mise en œuvre et rapidité d'exécution** : le montage rapide des ossatures métalliques, grâce à l'assemblage en atelier, permet de réhabiliter des structures dans des délais courts (par rapport au béton). Les structures métalliques sont aussi économes en matériel et en main d'œuvre.

Chapitre I : Etude bibliographique

- **Variété et liberté architecturales** : L'utilisation de l'acier offre une souplesse architecturale (grandes portées) au bâtiment, mais aussi des possibilités d'adaptation et de transformation selon les besoins et les usages du bâtiment.
- **Pérennité des structures en acier** : Les structures en acier sont faciles à entretenir, sans interrompre la mise en service de l'ouvrage. De plus, les protections de l'acier contre la corrosion et l'incendie passent par des procédés normalisés, connus et sûrs.
- **Respect de l'environnement** : Les réhabilitations en acier provoquent peu de perturbations pour l'entourage, les délais sont courts et les nuisances sont réduites. L'acier est aussi recyclable à l'infini, ce qui permet un recyclage effectif des bâtiments acier en fin de vie.
- **Légèreté** : Les structures acier sont plus légères que les structures en béton, ce qui permet de limiter les charges sur les structures existantes (comme les fondations). Mais aussi de réduire le nombre de poteaux ou des planchers de grande portée, ce qui offre un gain d'espace.

La réhabilitation en acier ou mixte est possible sur tout les types de structure, contrairement à la réhabilitation pour le béton.

1.8 Les techniques de réparation des poteaux métalliques [11]

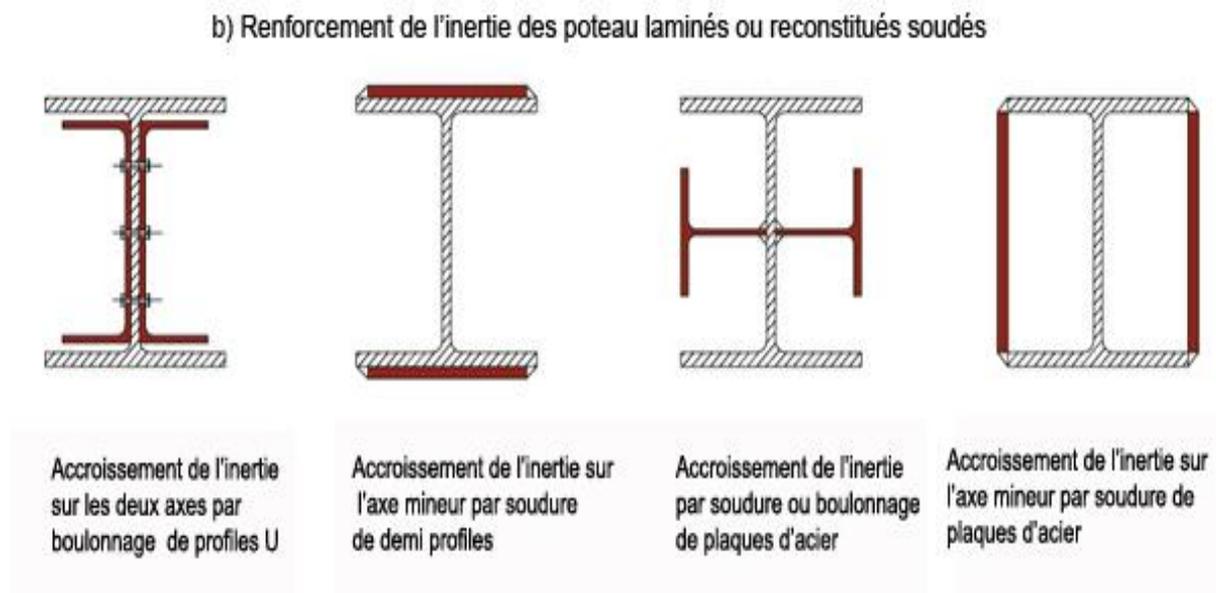


Figure I.26 Techniques de renforcement des éléments métalliques.

Chapitre I : Etude bibliographique

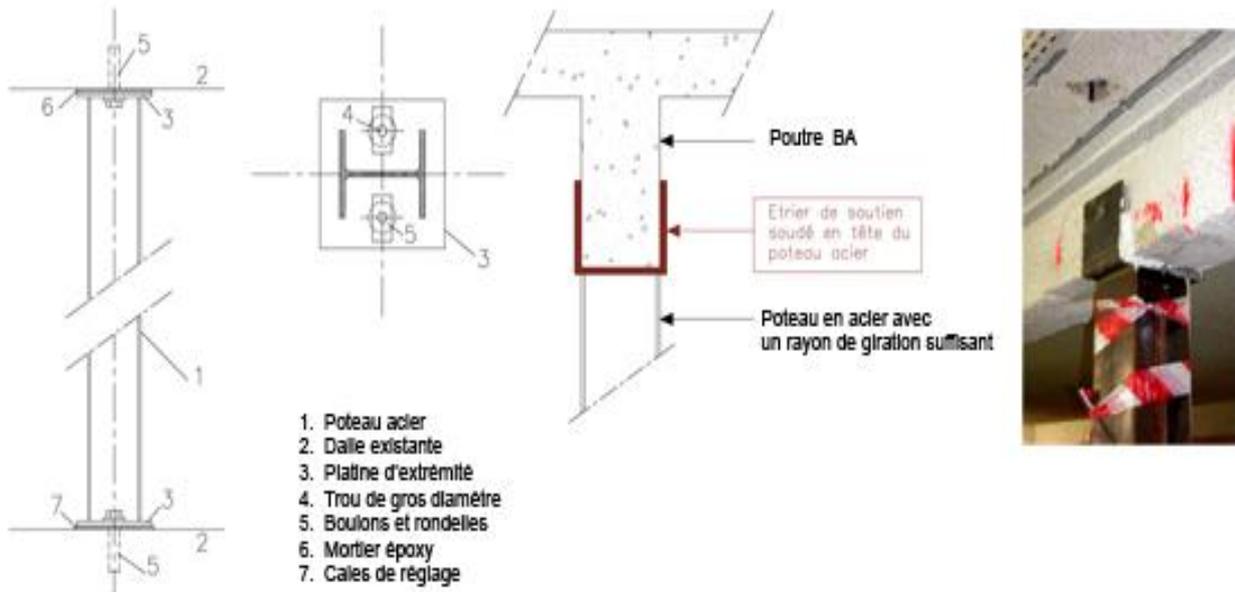


Figure I.27 Techniques de renforcement des poteaux.

I.8. Conclusion

Il est possible de renforcer une structure métallique par plusieurs techniques en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Cette possibilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement. Plus le choix d'une méthode de réparation n'est pas facile ; il s'agit de choisir le procédé le moins coûteux qui atteigne efficacement le but poursuivi.

Le renforcement des constructions métalliques comprend les différentes mesures, assurant leur fiabilité en futur comportement et de satisfaire les nécessités d'exploitation, et assurer une durée d'exploitation prolongée en service de la construction renforcée.

Chapitre II :

Aspect réglementaire

Chapitre II : Aspects réglementaire

II. INTRODUCTION

Les déformations dues à la compression ne jouent pas toujours un rôle déterminant sur les éléments de structure verticaux. En revanche, un phénomène d'instabilité appelé « flambement » apparaît à partir d'une certaine charge et en fonction du rapport existant entre la section et la hauteur de l'élément considéré. Le flambement est une forme d'instabilité propre aux éléments comprimés élancés tels que les poteaux, colonnes, barres comprimées.

II.1 LES COLONNES A PAROIS PLEINES

Les poteaux à parois pleines sont des éléments constituées d'une seule section simple telle que IPE, HE UAP ,CORNIERE,TUBE D'ACIER....Il existe d'autres types des poteaux composées de plusieurs profilés qu'on appelle : les pièces composées à treillis et les pièces composées à traverses de liaisons. Les poteaux doivent reprendre des efforts de compression, de flexion due au vent et résister au flambement. Leur section doit présenter une bonne rigidité à la compression dans toutes les directions et en particulier suivant leurs axes principaux.



Figure II.1: Présentation des colonnes métalliques.

II.2 PIECES COURTES

Les poteaux courts ont un élancement très faible ($\bar{\lambda} \leq 0,2$), de telle sorte qu'ils ne sont pas affectés par un flambement global. Dans ce cas, la résistance à la compression de l'élément est dictée par la résistance à la compression de la section transversale, qui est fonction de la classification de la section. Les sections transversales de Classes 1, 2, 3 sont toutes insensibles au voilement local à ce niveau de la charge axiale et donc la résistance à la compression de calcul est prise égale à la résistance plastique de calcul de la section:

$$N_{c,Rd} = N_{p\phi,Rd} = Af_y / \gamma_{M0} \quad (\text{II.1})$$

Chapitre II : Aspects réglementaire

Pour les sections transversales de Classe 4, le voilement local dans une ou plusieurs parois de la section transversale empêche d'atteindre la charge d'écoulement plastique, et donc la résistance à la compression de calcul est limitée à la résistance au voilement local.

$$N_{c,Rd} = N_{o,Rd} = A_{eff} \cdot f_y / \gamma_{M1} \quad (II.2)$$

Avec : A_{eff} aire efficace de section
 $N_{c,Rd}$ sollicitation de calcul

II.3 POTEAUX ELANCES

Les poteaux présentent, selon leur élancement, deux types différents de comportement : ceux dont l'élancement est élevé flambent quasiment dans le domaine élastique de comportement tandis que les autres, d'élancement intermédiaire, sont très sensibles aux imperfections.

II.3. a Elancement λ

$$\lambda = \frac{l_f}{i} = \frac{\text{longueur de flambement}}{\text{rayon de giration}} ; i = \sqrt{\frac{I}{A}} \quad (II.4)$$

$$\text{D'où on aura : } \lambda_z = \frac{l_{fz}}{i_z} \text{ et } \lambda_y = \frac{l_{fy}}{i_y} \quad (II.5)$$

Pour les profilés laminés à parois pleines (IPE, HE, UAP,.....) on tire généralement les rayons de giration (i) et les inerties (I) du catalogue des profilés.

II.3. b Longueur de flambement

C'est la grande distance entre deux points d'articulations ou d'inflexions successifs de la ligne moyenne de l'élément déformé par flambement.

Pour les pièces comprimées isolées (Cas qui n'existe pas en pratique sauf pour les éléments soumis aux essais dans des laboratoires), on a (Voir les figures II.2 et II.3)

Chapitre II : Aspects réglementaire

Les figures II.2 et II.3 montrent les quatre modes de flambement avec la présentation des longueurs de flambement.

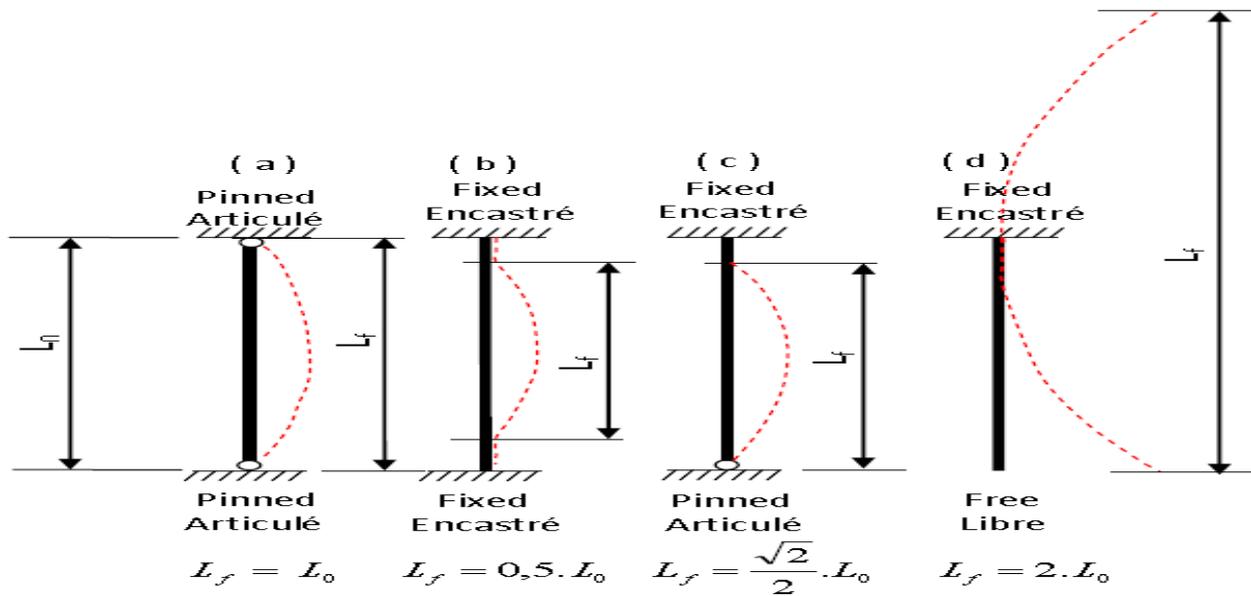


Figure II.2: Différent mode de flambement.

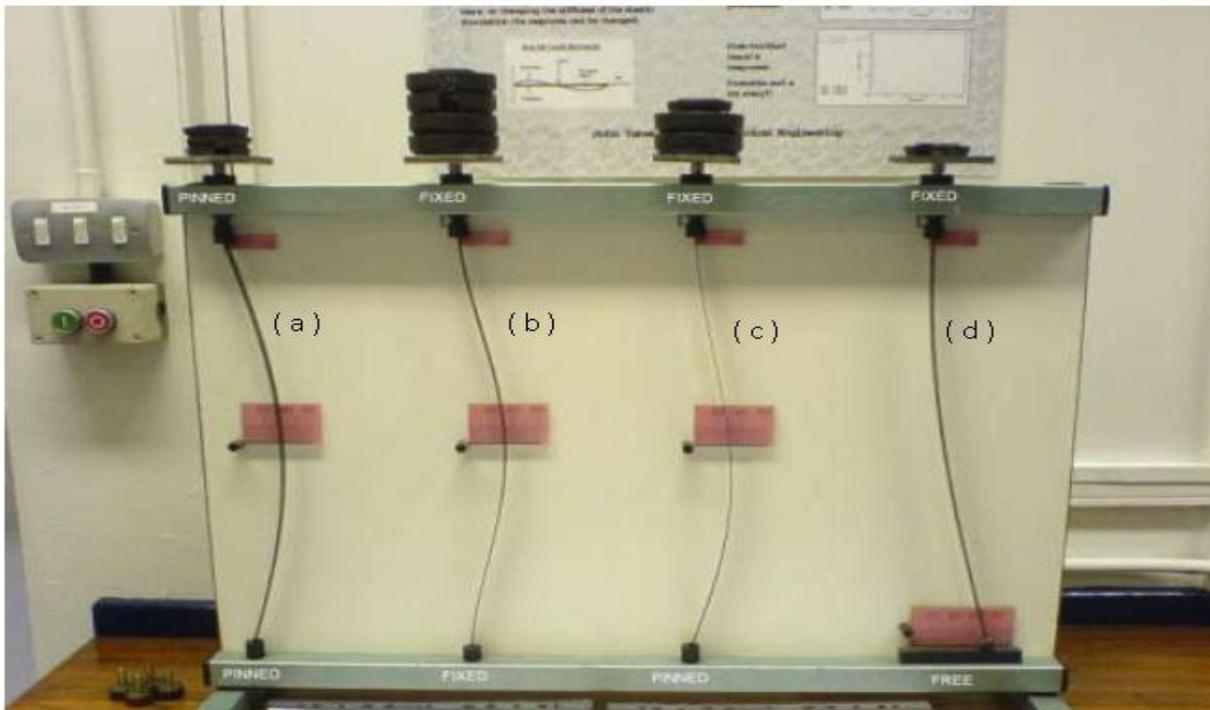


Figure II.3: Différents modes de flambement.

II.5.2 Aspect théorique de flambement

A la charge critique, l'équilibre stable du poteau rectiligne se trouve à sa limite et il existe une configuration légèrement déformée du poteau qui peut aussi satisfaire l'équilibre figure II.4.

Chapitre II : Aspects réglementaire

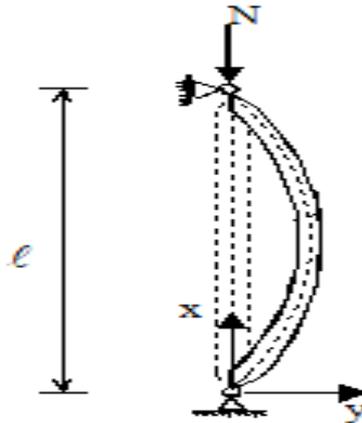


Figure II.4: Mode de déformation d'une pièce comprimée.

Pour cette configuration, le moment de flexion, à chaque position de la section droite et pour une barre bi-articulée, est donné par :

$$M = N \cdot y \quad (\text{II.6})$$

Si l'on utilise l'équation différentielle donnée par la théorie de la flexion simple:

$$\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{M}{EI} \quad (\text{II.7})$$

où : $E I$ représente la rigidité de flexion du poteau dans le plan de flambement

E : module d'élasticité longitudinale $E = 21\,000\,000 \text{ N/mm}^2$

I : moment d'inertie par rapport à l'axe de flambement

La solution générale de cette équation est :

$$y = A \sin kx + B \cos kx \quad (\text{II.8})$$

On pose :

$$k^2 = \frac{N}{EI_z} \quad (\text{II.9})$$

A et B sont des constantes d'intégration qui sont déterminées de manière à satisfaire les conditions aux limites :

$$y = 0 \text{ pour } x = 0 \rightarrow B = 0$$

$$\text{et } y = 0 \text{ pour } x = l \rightarrow A \sin kl = 0$$

$A \neq 0$ (pas de déplacement dans ce cas) on aura $\sin kl = 0$

La racine de cette équation kl peut prendre un nombre infini de valeurs : $0, \pi, 2\pi, \dots ; n\pi$ c'est-à-dire

$kl = n\pi$ avec n entier quelconque.

Chapitre II : Aspects réglementaire

$$k^2 l^2 = n^2 \pi^2$$

La figure II.5 montre les trois premiers modes de flambement ($n = 1, 2$ et 3 respectivement $n=0$ exclu)

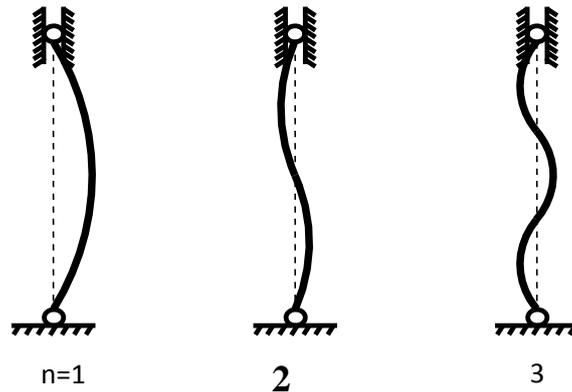


Figure II.5: Différent mode de flambement.

Finalement, la charge critique s'obtient de la manière suivante :

$$N_{cr,n} = \frac{n^2 \pi^2 E I}{\ell_{cr}^2} \quad (\text{II.10})$$

Si ℓ_{cr} désigne la longueur critique (longueur de flambement) , la charge critique d'Euler N_{cr} pour le mode 1 est égale à :

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I}{\ell_{cr}^2} \quad (\text{II.11})$$

Et on peut alors définir la contrainte critique d'Euler σ_{cr} comme suit :

$$\sigma_{cr} = \frac{N_{cr}}{A} = \frac{\pi^2 E I}{\ell_{cr}^2 A} \quad (\text{II.12})$$

En introduisant le rayon de giration, $i = \sqrt{I/A}$ et l'élancement, $\lambda = \ell_{cr} / i$ correspondant au mode de flambement considéré et σ_{cr} devient :

$$\sigma_{cr} = \frac{\pi^2 E}{\lambda^2} \quad (\text{II.13})$$

Si l'on représente sur un graphe l'évolution de σ_{cr} en fonction de λ figure II.6, ainsi que la droite traduisant le comportement parfaitement plastique, $\sigma = f_y$, il est intéressant de noter les zones idéalisées correspondant à la ruine par flambement et par plastification ainsi que celle correspondant à la sécurité. Le point d'intersection P entre les deux courbes représente la valeur théorique maximale

Chapitre II : Aspects réglementaire

d'élanement pour laquelle un poteau périt par plastification. Cet élanement maximum (parfois dit élanement eulérien), noté λ_1 dans l'Eurocode 3, est égal à :

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,9 \varepsilon \quad (\text{II.14})$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} \quad (\text{II.15})$$

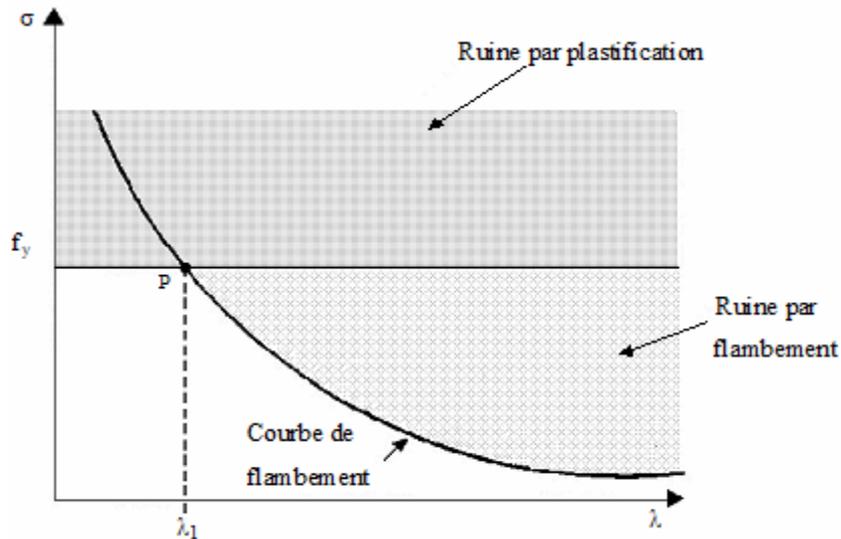


Figure II.6 : Plastification et ruine par flambement.

Un diagramme adimensionnel peut être obtenu en reportant les valeurs de σ/f_y en fonction de λ/λ_1 (Figure II.7). Les coordonnées du point P vaut par conséquent P (1,1).

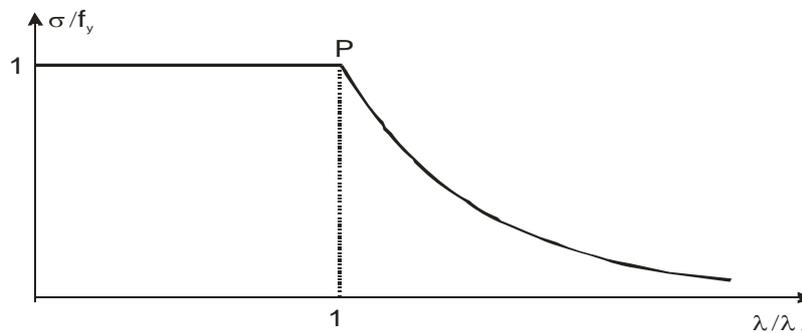


Figure II.7: Un diagramme adimensionnel.

II.6.INSTABILITE DES POTEAUX REELS

Le comportement réel des poteaux en acier diffère sensiblement de celui décrit dans la partie précédente de l'exposé dans la mesure où les poteaux périssent généralement par instabilité dans le domaine plastique avant d'atteindre la charge de flambement eulérienne.

Chapitre II : Aspects réglementaire

La différence entre les comportements réel et théorique est due aux diverses imperfections dont le poteau "réel" est le siège : défaut de rectitude, contraintes résiduelles, excentricité des charges appliquées et écrouissage. Les imperfections affectent toutes le flambement et influencent par conséquent la capacité portante du poteau. Les études expérimentales effectuées sur des poteaux réels fournissent des résultats similaires à ceux reportés à la figure II.8.

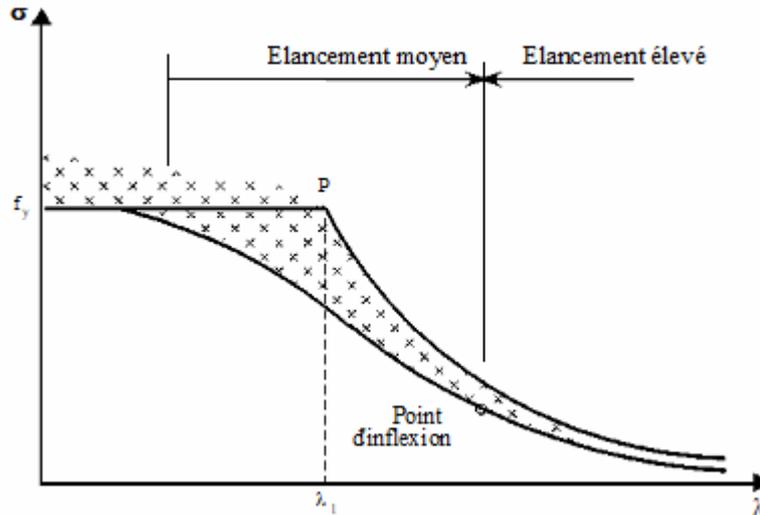


Figure II.8: Courbe de flambement d'Euler et courbe réelle.

Le comportement réel s'écarte nettement plus des courbes théoriques dans le domaine des élancements intermédiaires que dans celui des grands élancements. Dans la zone des valeurs intermédiaires de λ (ce qui couvre la plupart des poteaux utilisés en pratique), l'effet des imperfections structurales est significatif et doit être pris soigneusement en considération. La réduction la plus importante de la valeur théorique apparaît aux alentours de l'élancement eulérien λ_1 . La courbe limite inférieure résulte d'une analyse statistique ; elle représente la limite de chargement sécuritaire à ne pas dépasser.

II.7 LES COURBES DE FLAMBEMENT

- **Elancement réduit**

L'élancement réduit $\bar{\lambda}$ est un paramètre adimensionnel défini de la manière suivante pour les sections transversales de classe 1, 2 ou 3 :

$$\bar{\lambda} = \frac{\lambda}{\lambda_1} \quad (\text{II.16})$$

λ : Elancement

λ_1 : Elancement Eulérien

$\bar{\lambda}$ peut également s'exprimer sous la forme suivante :

Chapitre II : Aspects réglementaire

$$\bar{\lambda}^{-2} = \frac{\lambda^2}{\pi^2} \frac{f_y}{E} = \frac{f_y}{\sigma_{cr}} \quad (\text{II.17})$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{A \cdot \sigma_{cr}}} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad (\text{II.18})$$

II.8 Fondements des courbes de flambement de la CECM (Cabinet d'Études de la Construction Métallique)

A partir de 1960, un programme expérimental a été mené au niveau international par la CECM en vue d'étudier le comportement des poteaux courants. Plus de 1000 essais de flambement ont été effectués sur une variété de membrures (I, H, T, U, sections tubulaires de forme circulaire et carrée), pour différentes valeurs d'élanement (comprises entre 55 et 160). Une approche probabiliste, sur la base des valeurs expérimentales de résistance, combinée à une analyse théorique, a montré qu'il était possible de dessiner des courbes décrivant la résistance d'un poteau en fonction de son élanement réduit. Les imperfections qui ont été considérées lors de cette étude sont les suivantes : une imperfection géométrique dont l'allure est celle d'une demi-sinusoïde et dont l'amplitude est fixée à 1/1000 de la longueur du poteau et des contraintes résiduelles spécifiques pour chaque type de profilé.

Les courbes européennes de flambement (a, b, c ou d) sont représentées à la figure II.9. Elles fournissent la valeur du coefficient de réduction de la résistance χ du poteau en fonction de l'élanement réduit pour différents types de sections transversales (auxquelles correspondent différentes valeurs de facteur d'imperfection α donné par le tableau II.1). L'expression mathématique de χ est la suivante :

$$\chi = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^{-2}}} \leq 1 \quad (\text{II.19})$$

$$\text{où} \quad \phi = 0,5 \left[1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2 \right] \quad (\text{II.20})$$

Le tableau II.2 donne aussi les valeurs du coefficient de réduction χ en fonction de l'élanement réduit $\bar{\lambda}$ et le facteur d'imperfection α dépend de la forme de la section transversale du poteau considéré, de la direction dans laquelle le flambement se produit (axe y ou axe z) et du processus de fabrication utilisé (laminage à chaud, soudage ou formage à froid) ; les valeurs de α qui augmentent avec le niveau d'imperfection, sont fournies au tableau II.1 :

La **courbe a** correspond aux profilés quasiment parfaits : sections en I laminées ($h/b > 1,2$) à ailes peu épaisses ($t_f \leq 40\text{mm}$) pour le flambement autour de l'axe fort ; elle s'applique également aux profils laminés de forme tubulaire ;

Chapitre II : Aspects réglementaire

La **courbe b** couvre les profilés possédant un degré moyen d'imperfection : elle détermine le comportement de la plupart des caissons soudés mais aussi le comportement des profilés laminés à section en I lorsqu'ils sont en danger de flambement autour de l'axe faible, des profilés soudés en I à ailes peu épaisses ($t_f \leq 40$ mm) et des profilés laminés en I à épaisseur d'ailes moyenne ($40 < t_f \leq 100$ mm) lorsqu'ils flambent autour de l'axe fort ; elle concerne également les profils tubulaires formés à froid lorsque la limite d'élasticité de la tôle mère est prise en considération ;

La **courbe c** est relative aux profilés qui possèdent de nombreuses imperfections : les profilés en U, L et T ainsi que les sections soudées en caisson à soudures épaisses appartiennent à cette catégorie. Se réfèrent également à la courbe c, les sections tubulaires formées à froid dimensionnées sur la base de la limite d'élasticité moyenne de l'élément après formage, les sections laminées en H ($h/b \leq 1,2$ et $t_f \leq 100$ mm) en danger de flambement autour de l'axe faible ainsi que certaines sections soudées en I ($t_f \leq 40$ mm, flambement autour de l'axe faible et $t_f > 40$ mm, flambement autour de l'axe fort) ;

La **courbe d** s'applique aux profilés dont les imperfections sont extrêmement importantes : elle doit être utilisée pour les profilés laminés en I à ailes très épaisses ($t_f > 100$ mm) et pour les profilés soudés en I à ailes épaisses ($t_f > 40$ mm), lorsque le flambement se produit autour de l'axe faible.

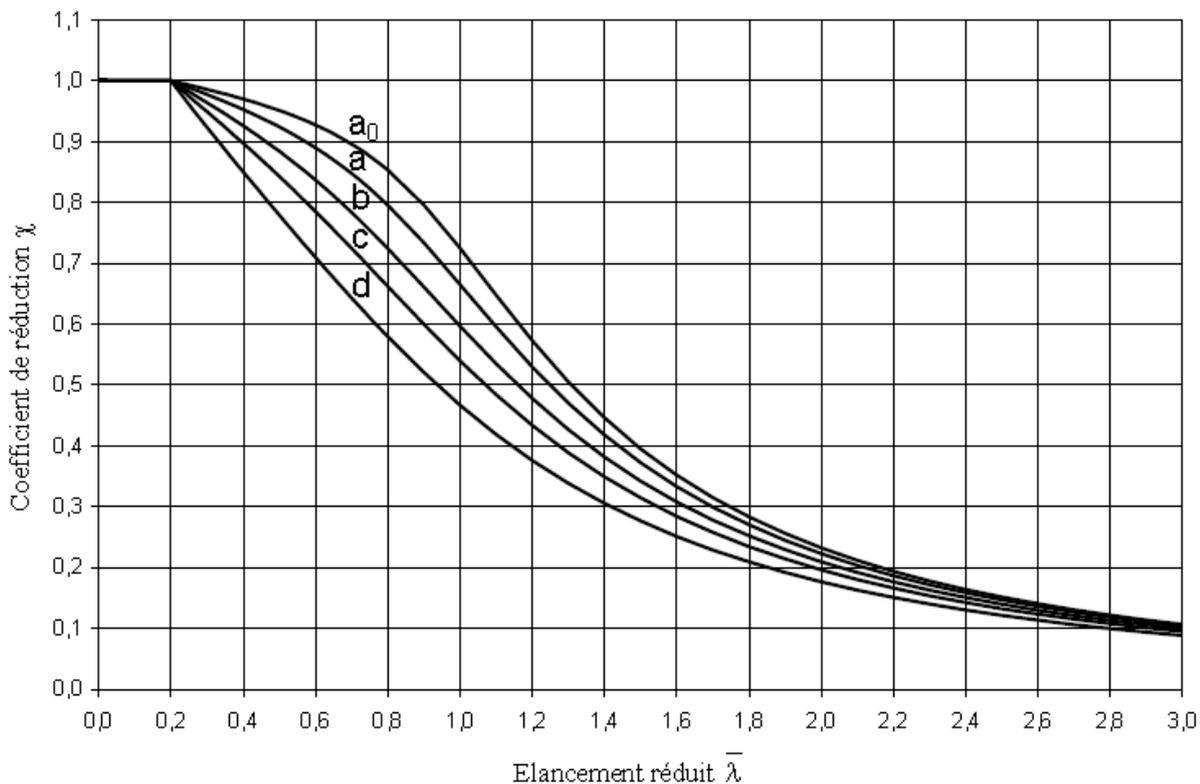


Figure II.9: Les courbes de flambement.

Tableau II.1 : Facteurs d'imperfection

Chapitre II : Aspects réglementaire

Courbe de flambement	A	b	c	d
Facteur d'imperfection α	0,21	0,34	0,49	0,76

Le tableau II.3 aide à sélectionner la courbe de flambement appropriée en fonction du type de section transversale, de ses dimensions et de l'axe autour duquel le flambement se produit. Pour les sections tubulaires formées à froid, f_{yb} désigne la limite d'élasticité de la tôle mère et f_{ya} la limite d'élasticité moyenne après formage.

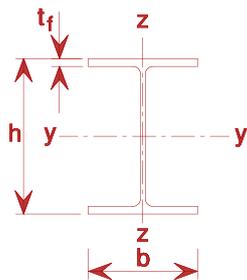
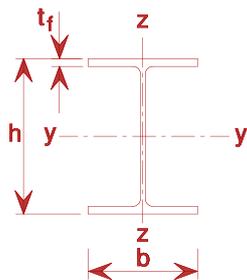
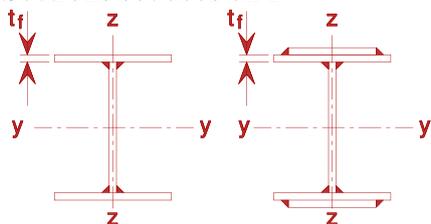
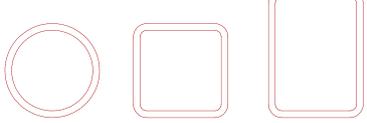
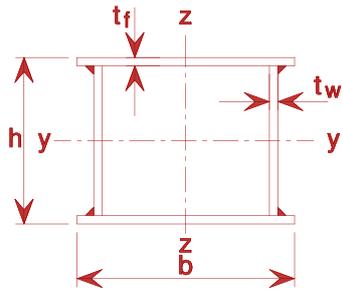
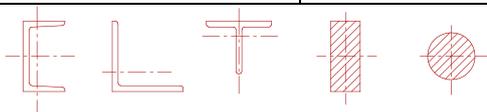
Il est important de préciser que les courbes de flambement sont établies pour des membrures bi-articulées et chargées à leurs extrémités ; il est nécessaire d'évaluer de manière précise les longueurs de flambement lorsque ces conditions ne sont pas remplies.

Tableau II.2 : Coefficients de réduction

$\bar{\lambda}$	Coefficient de réduction χ			
	Courbe a	Courbe b	Courbe c	Courbe d
0,2	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000
0,3	0,9775	0,9641	0,9491	0,9235
0,4	0,9528	0,9261	0,8973	0,8504
0,5	0,9243	0,8842	0,8430	0,7793
0,6	0,8900	0,8371	0,7854	0,7100
0,7	0,8477	0,7837	0,7247	0,6431
0,8	0,7957	0,7245	0,6622	0,5797
0,9	0,7339	0,6612	0,5998	0,5208
1,0	0,6656	0,5970	0,5399	0,4671
1,1	0,5960	0,5352	0,4842	0,4189
1,2	0,5300	0,4781	0,4338	0,3762
1,3	0,4703	0,4269	0,3888	0,3385
1,4	0,4179	0,3817	0,3492	0,3055
1,5	0,3724	0,3422	0,3145	0,2766
1,6	0,3332	0,3079	0,2842	0,2512
1,7	0,2994	0,2781	0,2577	0,2289
1,8	0,2702	0,2521	0,2345	0,2093
1,9	0,2449	0,2294	0,2141	0,1920
2,0	0,2229	0,2095	0,1962	0,1766
2,1	0,2036	0,1920	0,1803	0,1630
2,2	0,1867	0,1765	0,1662	0,1508
2,3	0,1717	0,1628	0,1537	0,1399
2,4	0,1585	0,1506	0,1425	0,1302
2,5	0,1467	0,1397	0,1325	0,1214
2,6	0,1362	0,1299	0,1234	0,1134
2,7	0,1267	0,1211	0,1153	0,1062
2,8	0,1182	0,1132	0,1079	0,0997
2,9	0,1105	0,1060	0,1012	0,0937
3,0	0,1036	0,0994	0,0951	0,0882

Chapitre II : Aspects réglementaire

Tableau II.3 : Choix de la courbe de flambement correspondant à une section (voir Eurocode 3 – Tableau 5.5.3)

Section transversale	Limites	Axe de flambement	Courbe de flambement
Sections laminées en I 	$h/b > 1,2$: $t_f \leq 40$ mm	y - y z - z	a b
	$40 \text{ mm} < t_f \leq 100$ mm	y - y z - z	b c
Sections laminées en I 	$h/b \leq 1,2$: $t_f \leq 40$ mm	y - y z - z	b c
	$t_f > 100$ mm	y - y z - z	d d
Sections soudées en I 	$t_f < 40$ mm	y - y z - z	b c
	$t_f > 40$ mm	y - y z - z	c d
Sections tubulaires 	laminées à chaud	quel qu'il soit	a
	formées à froid - en utilisant f_{yb}	quel qu'il soit	b
	formées à froid - en utilisant f_{ya}	quel qu'il soit	c
Sections soudées en caisson 	d'une manière générale (sauf ci-dessous)	quel qu'il soit	b
	Sauf soudures épaisses et : $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$	y - y z - z	c c
		quel qu'il soit	c

Chapitre II : Aspects réglementaire

II.9 IMPERFECTION INITIALE EQUIVALENTE EN ARC

Pour étudier un poteau par la théorie du second ordre, il convient de choisir des imperfections géométriques (défaut de rectitude et excentricité des charges) et des imperfections mécaniques (contraintes résiduelles et variations de la limite d'élasticité). L'Eurocode 3 suggère des valeurs à donner à l'amplitude e_0 d'une imperfection en arc dont l'effet sur le flambement du poteau est équivalent à la combinaison des deux types d'imperfections précitées.

Si le poteau est dimensionné sur la base d'une analyse élastique, e_0 vaut :

$$e_0 = \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) W_{pl} / A \text{ dans le cas d'un dimensionnement plastique}$$

$$e_0 = \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) W_{el} / A \text{ dans le cas d'un dimensionnement élastique}$$

Si le dimensionnement du poteau est par contre fondé sur une analyse élastique-plastique (élasto-plastique ou élastique-parfaitement plastique), les valeurs de e_0 , définies en fonction de la longueur de flambement L , sont fournies au tableau II.4.

Tableau II.4 : Imperfections initiales équivalentes en arc

Courbe de flambement	Elastoplastique	Élastique-parfaitement plastique
a	L/600	L/400
b	L/380	L/250
c	L/270	L/200
d	L/180	L/150

II.10 RESISTANCE A LA COMPRESSION AVEC FLAMBEMENT

Pour dimensionner une pièce comprimée, il convient, en premier lieu, d'évaluer ses deux longueurs de flambement, une pour chacun des deux axes principaux, en fonction des assemblages qui existent à ses extrémités. En second lieu, le calcul du moment d'inertie minimum nécessaire à la reprise des charges critiques d'Euler peut permettre de prédimensionner l'élément. La procédure suivante de vérification doit alors être suivie :

- Les caractéristiques géométriques de la section et sa limite d'élasticité permettent d'évaluer l'élançement réduit $\bar{\lambda}$.
- χ est calculé, en fonction du processus de fabrication du profilé et des épaisseurs de ses parois, à l'aide de l'une des courbes de flambement et de l'élançement $\bar{\lambda}$.
- Dans un élément sollicité en compression, la valeur de calcul de l'effort de compression doit satisfaire à la condition :

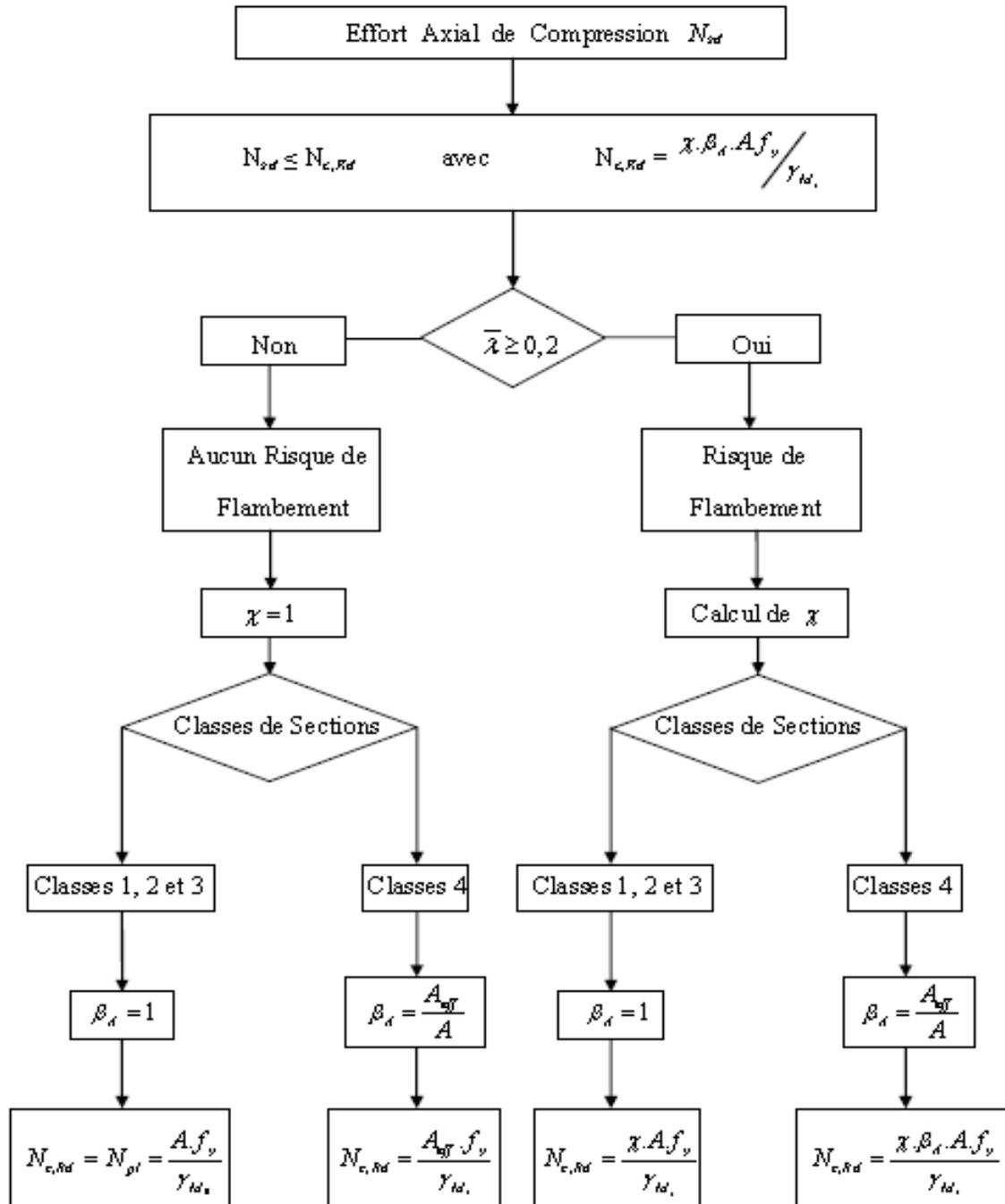
$$N_{sd} \leq N_{b,Rd} = \chi \cdot \frac{\beta_A \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad (II.21)$$

$\beta_A = 1$ pour les sections transversales de classe 1, 2 ou 3

$\beta_A = A_{eff} / A$ pour les sections transversales de classe 4

Chapitre II : Aspects réglementaire

ORGANIGRAMME de CALCUL à la COMPRESSION



Chapitre II : Aspects réglementaire

DETERMINATION DE LA CHARGE CRITIQUE DES MODELES TRAITES SELON EUROCODE

1- Poteau en HEA120 non renforcé :

Soit un poteau métallique HEA en acier laminé à chaud qui résume les caractéristiques suivantes : $A=25.34\text{cm}^2$, $f_y=235\text{MPa}$, $\gamma_{m1}=1.1$, $B_a=1 \rightarrow$ classe 1

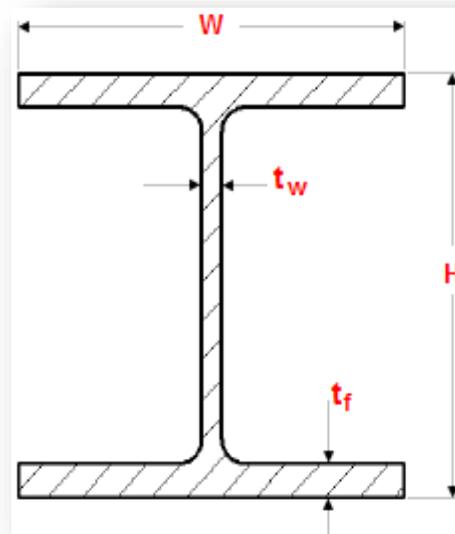
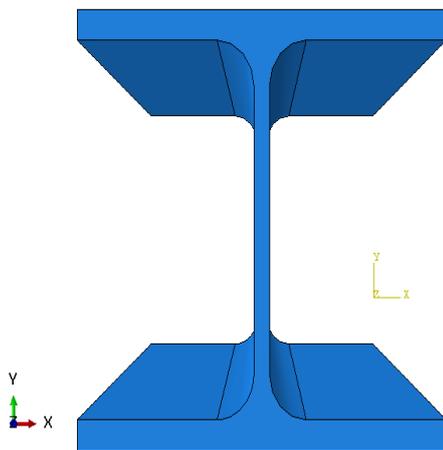


Figure II.9: Présentation de la section transversale de poteau HEA120

✓ Vérification de la stabilité vis-à-vis le flambement selon E3

$$N_{sd} = X \cdot B_A \frac{A f_y}{\gamma_{m1}}$$

$$X = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \lambda^2}} \quad \text{avec : } \phi = \frac{1}{2} [1 + \alpha(\lambda - 0.2) + \lambda^2]$$

$$\lambda = \frac{\lambda}{\lambda_r} \sqrt{B_a}, \quad \lambda_r = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}}, \quad \lambda = \frac{\ell_f}{i}$$

$$\lambda_r = \pi \sqrt{\frac{2.1 \times 10^5}{235}} = 93.91$$

$\ell_f = 0.5 \ell_0$ le poteau est bi-encasté

$$\ell_f = 0.5 \times 4 = 2 \text{ m} \rightarrow \ell_f = 2000 \text{ mm}$$

Chapitre II : Aspects réglementaire

$$\lambda_y = \frac{\ell}{i_y} = \frac{2000}{48.9} = 40.90$$

$$\lambda_z = \frac{\ell}{i_z} = \frac{2000}{30.2} = 66.22$$

$$\lambda_y = \frac{\lambda_y}{\lambda_r} \sqrt{Ba} = \frac{40.90}{93.91} \sqrt{1} = 0.43 > 0.2$$

si : $\lambda > 0.2$ il y a un risque de flambement

$$\lambda_z = \frac{\lambda_z}{\lambda_r} \sqrt{Ba} = \frac{66.22}{93.91} \sqrt{1} = 0.70 > 0.2 \rightarrow \text{il y a un risque de flambement}$$

Calcul de x_y :

$$\phi_y = \frac{1}{2} [1 + \alpha_y(\lambda_y - 0.2) + \lambda_y^2]$$

D'après le tableau $= \frac{h}{b} = \frac{114}{120} = 0.95 < 1.2$, $t_f = 8 \text{ mm} < 40 \text{ mm}$

Donc : l'axe y-y \rightarrow courbe "b" $\rightarrow \alpha_y = 0.34$

L'axe z-z \rightarrow courbe "c" $\rightarrow \alpha_z = 0.49$

$$\phi_y = \frac{1}{2} [1 + 0.34(0.43 - 0.2) + 0.43^2] = 0.63$$

$$X_y = \frac{1}{0.63 + \sqrt{0.63^2 - 0.43^2}} = \frac{1}{1.090434577} = 0.9171$$

$$X_y = 0.9171$$

Calcul de x_z :

$$\phi_z = \frac{1}{2} [1 + \alpha_z(\lambda_z - 0.2) + \lambda_z^2]$$

$$\phi_z = \frac{1}{2} [1 + 0.49(0.70 - 0.2) + 0.70^2] = 0.87$$

$$X_z = \frac{1}{0.87 + \sqrt{0.87^2 - 0.7^2}} = \frac{1}{1.386623654} = 0.7212$$

$$X_z = 0.7212$$

$$X = \min(x_y, x_z) = \min(0.9171 ; 0.7212)$$

$$X = 0.7212$$

$$N = \frac{0.7212 \times 1 \times 2534 \times 235}{1.1} = 390424.90 \text{ N} = \mathbf{390.42 \text{ kN}}$$

Chapitre II : Aspects réglementaire

2-Poteau en HEA120 renforcé avec soudage des plaques au niveau des semelles :

Le poteau en HEA à été renforcé par des plaques métalliques de 140 et de différents épaisseurs telles que :4mm, 8mm, 10mmet 12mm selon la position nommée 2.

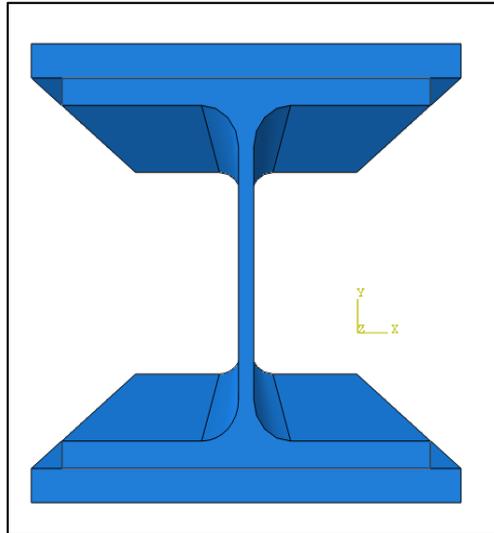


Figure II.10: Présentation de la section transversale de poteau HEA120 renforcé (position 1).

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 4mm on a trouvé une charge critique de 444.84 kN selon E3

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 8mm on a trouvé une charge critique de 746 kN selon E3

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 10mm on a trouvé une charge critique de 897kN selon E3

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 12mm on a trouvé une charge critique de 1048 kN selon E3

2-Poteau en HEA120 renforcé avec soudage des plaques au niveau // à l'âme :

Le poteau en HEA à été renforcé par des plaques métalliques de 140 et de différents épaisseurs telles que : 4mm, 8mm, 10mmet 12mm soudées au niveau // à l'âme selon la position nommée 2.

Chapitre II : Aspects réglementaire

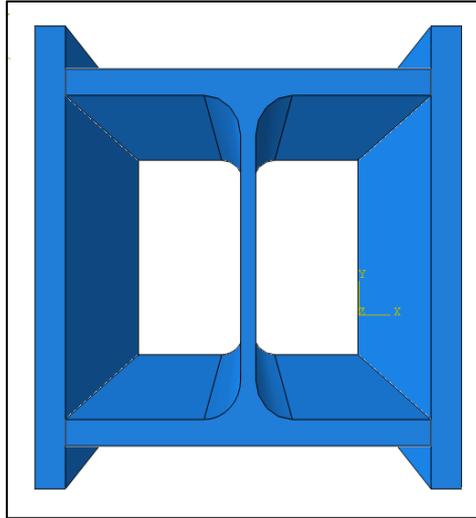


Figure II.10: Présentation de la section transversale de poteau HEA120 renforcé (position 2).

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 4mm on a trouvé une charge critique de 585.63 kN selon E3

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 8mm on a trouvé une charge critique de 852.23 kN selon E3

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 10mm on a trouvé une charge critique de 985.65kN selon E3

-Pour une épaisseur de la plaque de renfort de 12mm on a trouvé une charge critique de 1119kN selon E3.

CONCLUSION

Pour la validation de ces résultats une étude numérique basée sur la méthode des éléments finis s'avère nécessaire.

Chapitre III :

Etude numérique sous Abaqus

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

I. INTRODUCTION

La méthode des éléments finis est une technique d'analyse numérique permettant d'obtenir des solutions approximatives à une grande variété de problèmes d'ingénierie. Le concept de base de l'analyse par éléments finis est lorsqu'une structure est divisée en un nombre fini d'éléments ayant des dimensions finies et en réduisant la structure ayant des degrés de liberté infinis à des degrés de liberté finis.

Pour l'analyse par éléments finis, le logiciel avancé ABAQUS a été utilisé pour notre simulation numérique.

Ce chapitre présente une étude numérique tridimensionnelles non linéaire en utilisant le logiciel ABAQUS.6.14, qui nous permettra de simuler par éléments finis les modèles suivants :

- a. Poteau en acier de forme H non renforcé
- b. Poteau en acier de forme H renforcés par des plats métalliques au niveau des semelles.
- c. Poteau en acier de forme H renforcés par des plats métalliques soudées parallèlement à l'âme.
- d. Poteau en acier de forme H partiellement enrobé avec de béton.

III. 1. DEFINITION DU LOGICIEL DE CALCUL PAR ELEMENTS FINIS ABAQUS 6.14 :

ABAQUS est un code de calcul basant sur la méthode des éléments finis créé en 1978, ABAQUS traite avec performance des problèmes non - linéaires, il se compose de trois produits sont :

- i. **ABAQUS/Standard** : résolution par un algorithme statique implicite.
- ii. **ABAQUS/Explicit**: résolution par un algorithme dynamique explicite.
- iii. **ABAQUS/CAE** constitue une interface intégrée de visualisation et de modélisation pour les dits solveurs.

Le cœur du logiciel Abaqus est donc ce qu'on pourrait appeler son "*moteur de calcul*". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp). Il y a deux méthodes pour générer un fichier d'entrée (.inp): à la main (fichier texte), avec ABAQUS/CAE (graphique), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue des simulations demandées, et fournit les résultats dans un fichier .odb.

La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc., suivant une syntaxe précise. Abaqus propose le module Abaqus CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation comme suit :

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

- la génération du fichier de données ;
- le lancement du calcul proprement dit ;
- l'exploitation des résultats.

III.1. Description du logiciel :

Le logiciel est divisé en dix modules indépendants les uns des autres : Part, property; Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job, Visualisation, Sketch.

Parmi les méthodes d'analyse dynamique on trouve notamment ABAQUS standard et explicite. Chacun de ces produits est complété par des modules additionnels et/ou optionnels, spécifiques à certaines applications. Les produits ABAQUS, ABAQUS/CAE notamment, sont écrits intégralement avec les langages C++, Fortran pour les parties calcul et Python pour les scripts et les paramétrisations. La grande variété d'éléments dans la librairie d'éléments d'ABAQUS (495 éléments pour la V6.3) offre une importante flexibilité de modélisation géométrique et de comportement structural.

III.1.1. Différents critères caractérisant un élément:

- Famille
- Nombre de Nœuds
- Degrés de liberté
- Formulation
- Intégration numérique

III.1.2. Domaines physiques :

- Mécanique
- Thermique
- Électrique
- Problèmes couplés

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

III.1.3. Problèmes :

- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires

III.1.4. Catégories d'éléments :

On différencie dans ABAQUS diverses familles :

- Éléments continus
- Éléments structuraux
- Éléments dits spéciaux dans une même famille, il existe différentes formes d'éléments.

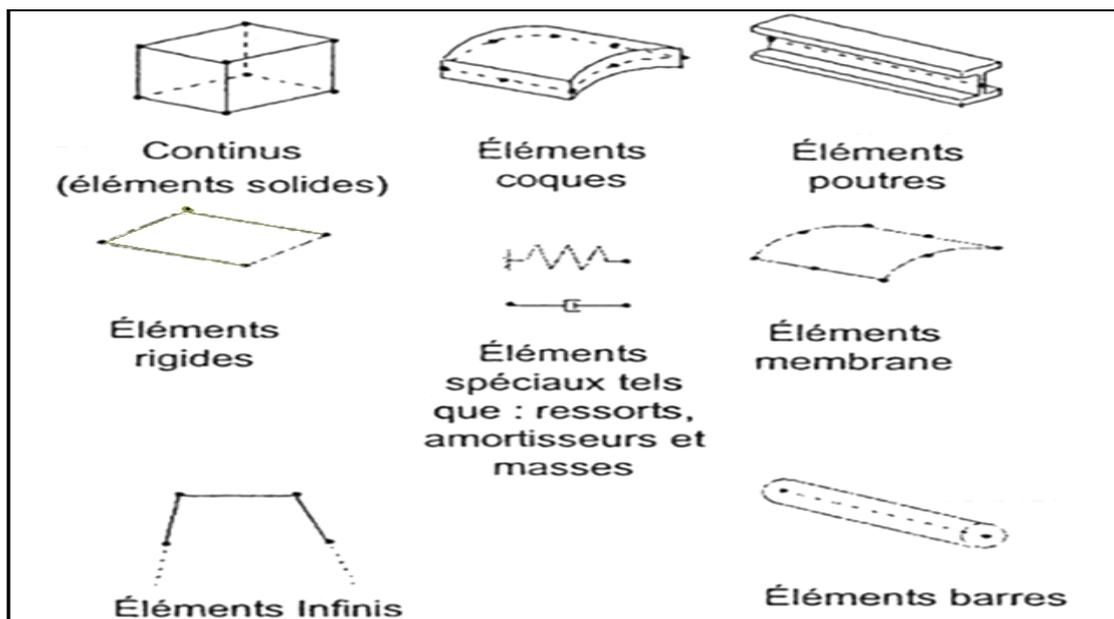


Figure III.1 Les catégories d'éléments dans le logiciel ABAQUS.

Le principal avantage du code de calcul ABAQUS réside dans le fait qu'il soit «généraliste». Il permet notamment de résoudre, de façon efficiente et robuste, une large gamme de problèmes en statique ou en dynamique, allant de simples problèmes linéaires jusqu'à des problèmes beaucoup plus complexes et fortement non-linéaires. Les phénomènes physiques pouvant être simulés sont nombreux et il est possible de prendre en compte certaines de leurs interactions, pour cela, ABAQUS met à disposition de l'utilisateur une importante gamme de modèles de matériaux et d'éléments pouvant être combinés de façon adéquate, ainsi que diverses méthodes pour modéliser les conditions initiales et aux limites du problème.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

III.2. MODELE DE CONCEPTION DE L'ELEMENT :

III.2.1. Les étapes de modélisation des éléments sous ABAQUS 6.14 :

- **Géométrie :**

Les modélisations de poutres dans ABAQUS/CAE doivent s'appuyer sur des géométries adaptées, c'est-à-dire qu'au moment de créer les pièces supports.

- **Définition des propriétés du modèle :**

Le modèle appliqué est défini au niveau du module Property . Du fait qu'on a réduit une ou deux dimensions du modèle, on doit définir les caractéristiques de la structure dans les dimensions éliminées : épaisseur pour une coque, profil de la section pour une poutre.

Pour les **coques** : on se contentera de donner l'épaisseur de la coque au moment de la création de la Section à assigner à la pièce.

Pour les **poutres** : on doit au préalable déterminer les caractéristiques de la section (essentiellement son aire et ses moments d'inertie).

- **Maillage :**

Le choix de l'élément fini de coque ou de poutre est fait dans le module Mesh. Ce choix d'élément s'opère à partir de l'icône , dans la colonne de gauche. En sélectionnant ou non les options proposées, on retrouve dans la boîte de dialogue le nom de l'élément ainsi choisi dans la bibliothèque des éléments ABAQUS, ainsi qu'un bref descriptif de celui-ci. On se reportera à la documentation sur ces éléments pour approfondir la formulation quand cela sera nécessaire.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

III.2.2. PRINCIPE DE CALCUL SOUS LE LOGICIEL ABAQUS 6.14.

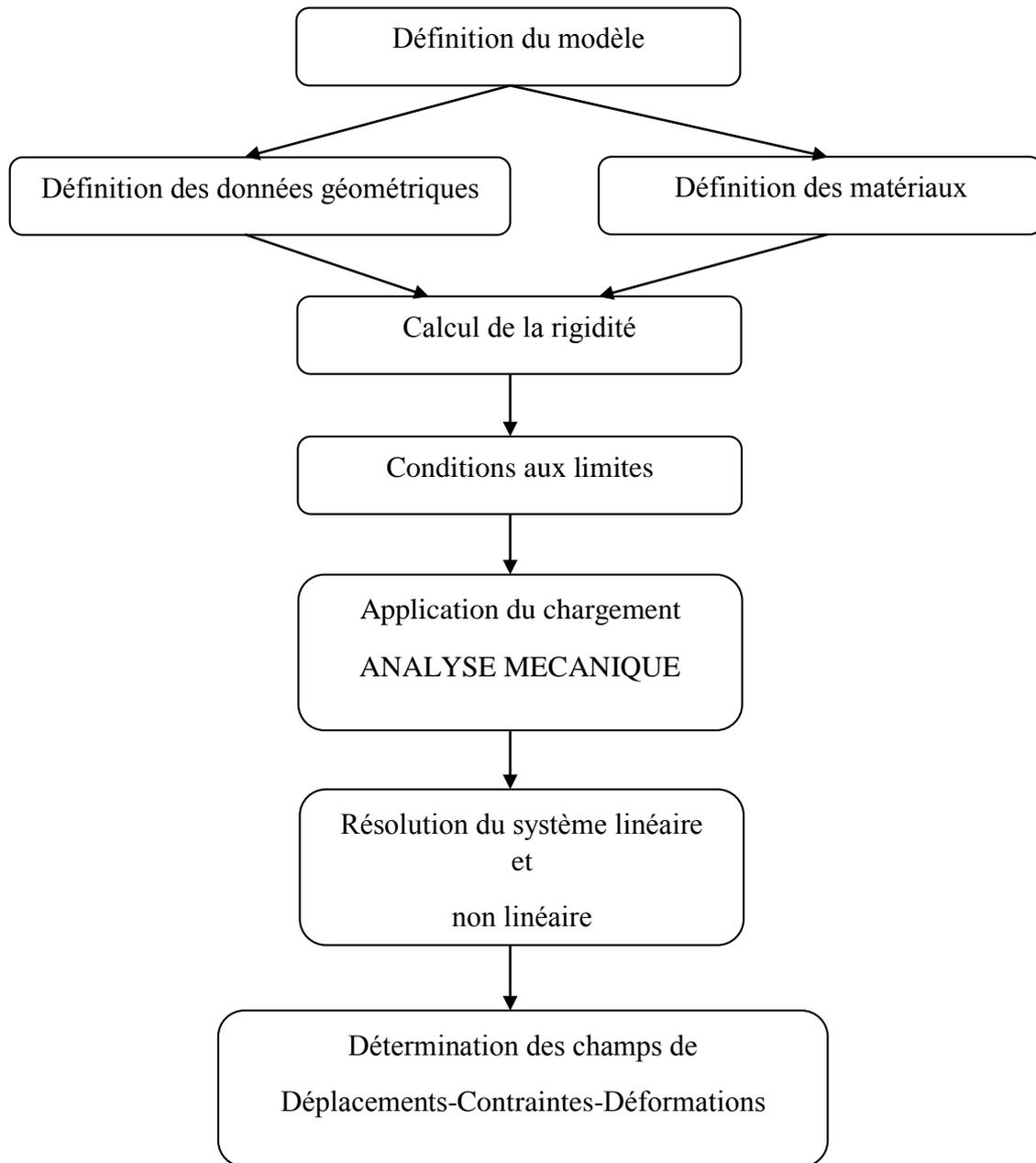


Figure III.2 Organigramme de calcul du logiciel ABAQUS.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

III.3. DEFINITION DES MODELES :

Dans cette partie du travail concerne un poteau métallique laminé à chaud HEA120 en acier S235 4m de hauteur appartenant à un bâtiment industrielle avec les conditions aux limites suivantes : encastrés à la base et à l'extrémité supérieure (bi-encastré). Le poteau est sollicité par une axial de compression. La modélisation numérique est effectuée en utilisant un logiciel très performant qui l'ABAQUS 6.17 qui nous a permis d'exécuter des opérations de procédure très compliquée d'une façon très précise ainsi minimiser les risques d'erreurs, et à l'aide des résultats fournis en tableaux nous tracerons des courbes à l'aide du programme Excel, que nous discuterons après.

Tableau III.1 : Présentation des propriétés dimensionnelles et géométriques de la section transversale HEA120

Désignation		Dimensions					Dimensions de construction		
HEA 120	G	h	b	t _w	t _f	r	A	h _i	d
	kg/m	mm	mm	mm	mm	mm	cm ²	mm	mm
	19,9	114	120	5	8	12	25,34	98	74
	Axe fort y-y					Axe faible z-z			
	I _y	W _y	W _{pl,y}	i _y	A _{vz}	I _z	W _z	W _{pl,z}	i _z
	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm	cm ²	cm ⁴	cm ³	cm ³	cm
606,2	106,3	119,5	4,89	8,46	230,9	38,48	58,85	3,02	

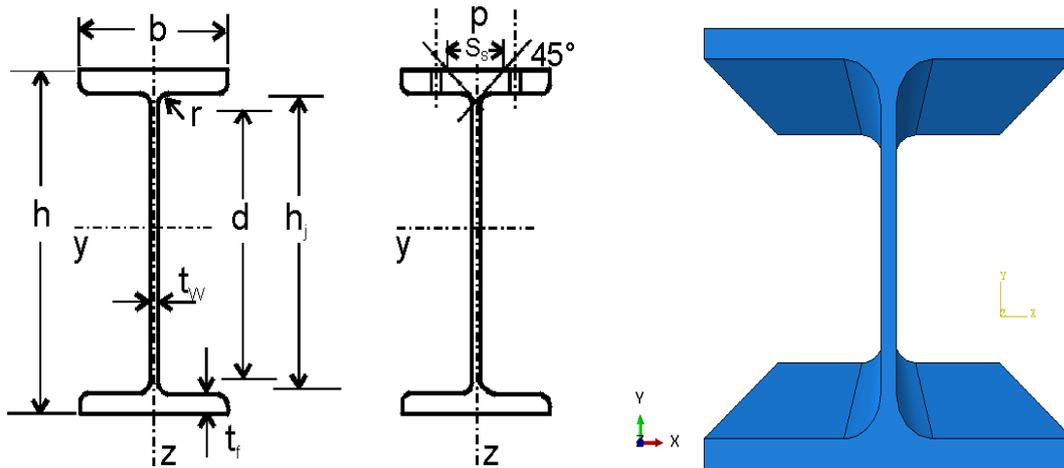


Figure III.3 Présentation de la section transversale de poteau HEA 120.

Le renforcement de poteau HEA120 est effectué par l'augmentation de section c.à.d. Par soudage des plats dans deux positions. La première position les plats de renforcement sont soudés au niveau des semelles et la deuxième position c'est parallèle à l'âme. Les plats de renforcement sont en acier S235

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

de largeur 140mm et avec différents épaisseurs tel que 4mm, 8mm, 10mm et 12mm (figure III.4 et 5).

Une autre technique de renforcement par remplissage de béton (figure III.6).

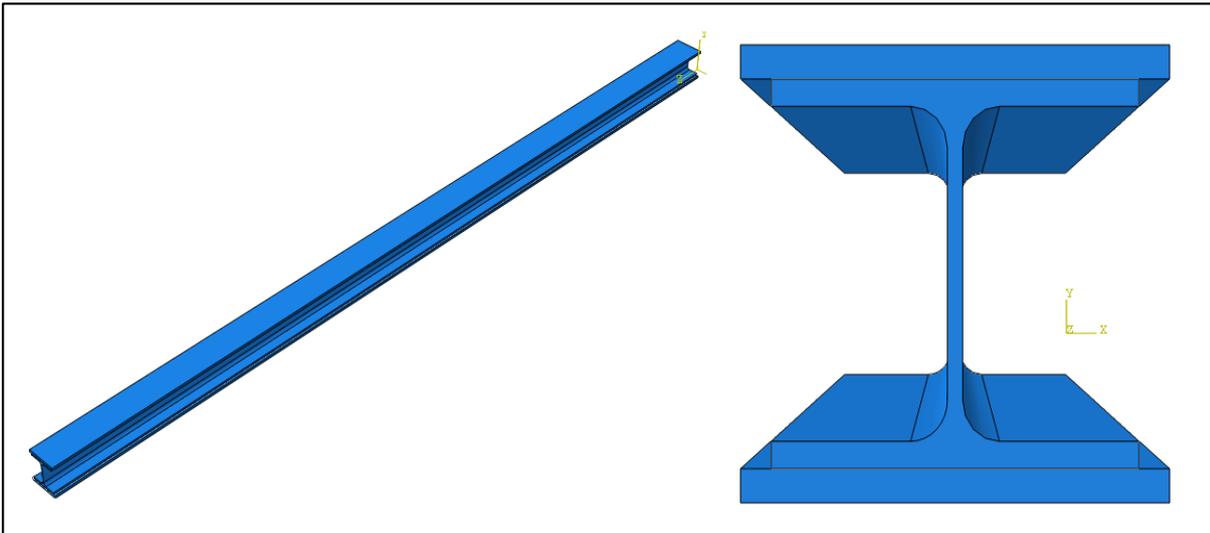


Figure III.4 Renforcement de poteau HEA 120 par soudage des plats aux niveaux des semelles (Position 1).

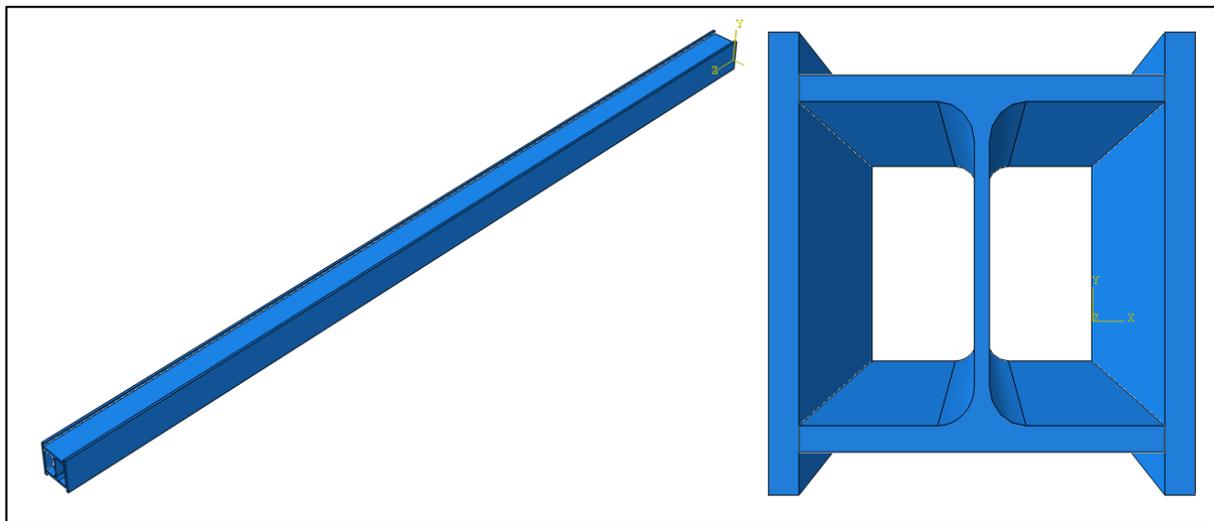


Figure III.5 Renforcement de poteau HEA 120 par soudage des plats parallèlement à l'âme (Position 2).

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

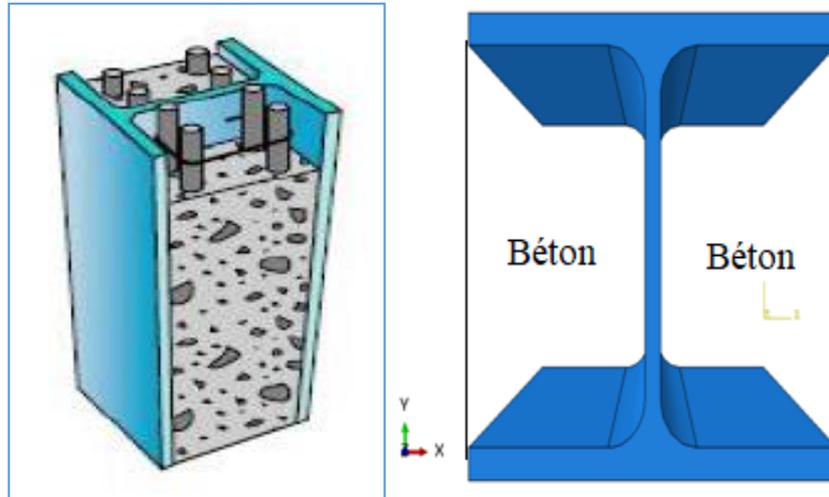


Figure III.6 Poteau en H partiellement enrobé avec le béton.

Tableau III.2 : Présentation des propriétés mécaniques des éléments appartenant au poteau en H

Eléments	Limite d'élasticité	Module d'élasticités
Profil : HEA120	$f_y = 235 \text{ MPa}$	$E_a = 210\,000 \text{ MPa}$
Béton: C20/25	$f_{ck} = 25 \text{ MPa}$	$E_{cm} = 23\,500 \text{ MPa}$

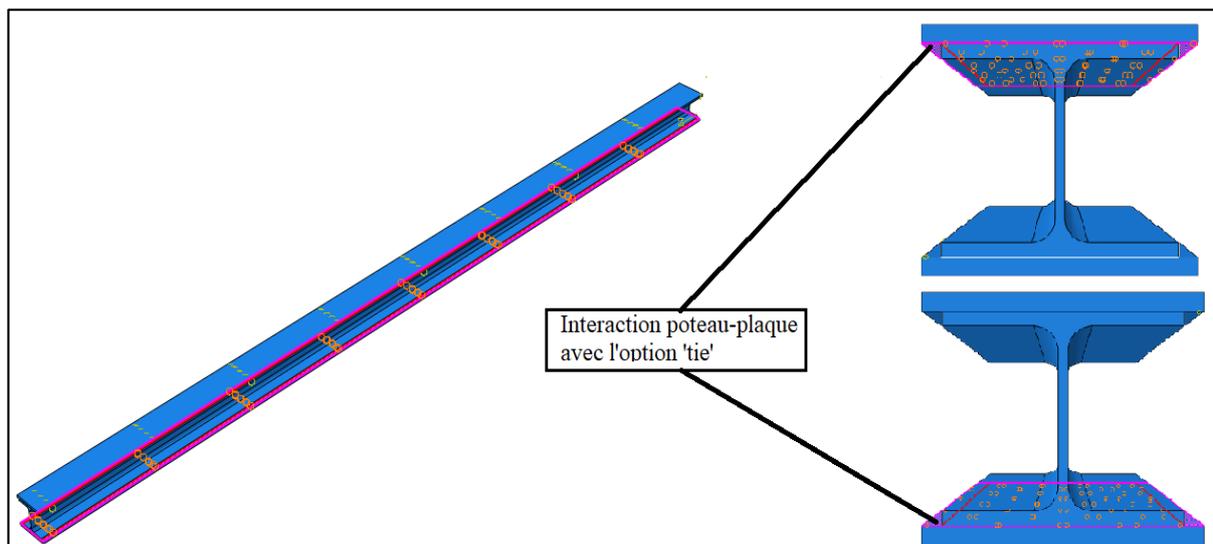


Figure III.7 Interaction poteau-plaque (largueur renforcé).

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

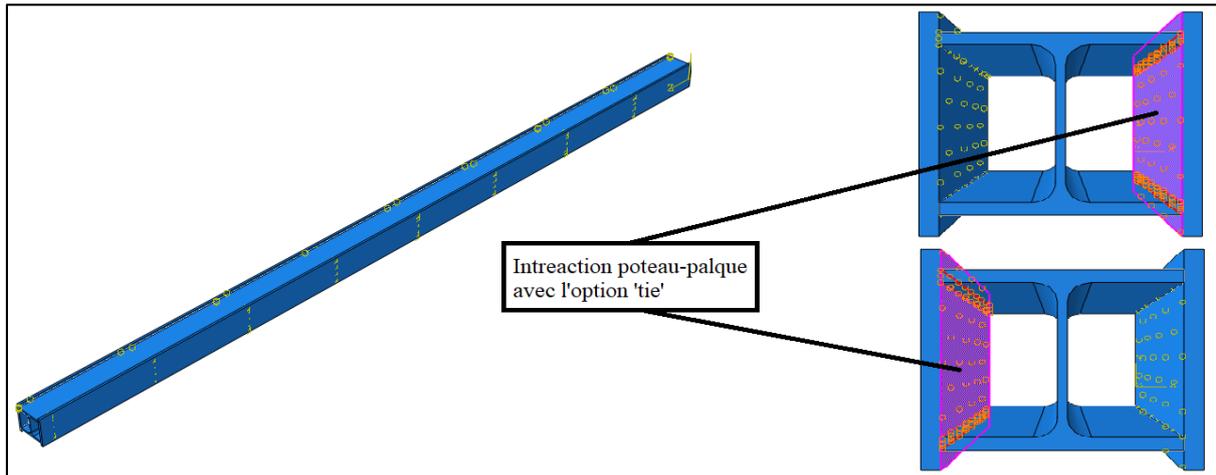


Figure III.8 Intéraction poteau-palque (hauteur renforcé).

➤ Conditions aux limites et chargement

Pour le modèle Elément Fini , le bas du colonne en acier, est fixée dans les six directions ($U_x=U_y=U_z=0, \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$) et l'extrémité supérieure est fixée dans les cinq directions hormis la direction du déplacement vertical ($U_x=U_y= 0, \theta_x = \theta_y = \theta_z = 0$). Les modèles sont sollicités par un chargement axial centre de compression représenté par un déplacement imposé appliqué sur le coté supérieure (un déplacement imposé U_z). (figure III.9).

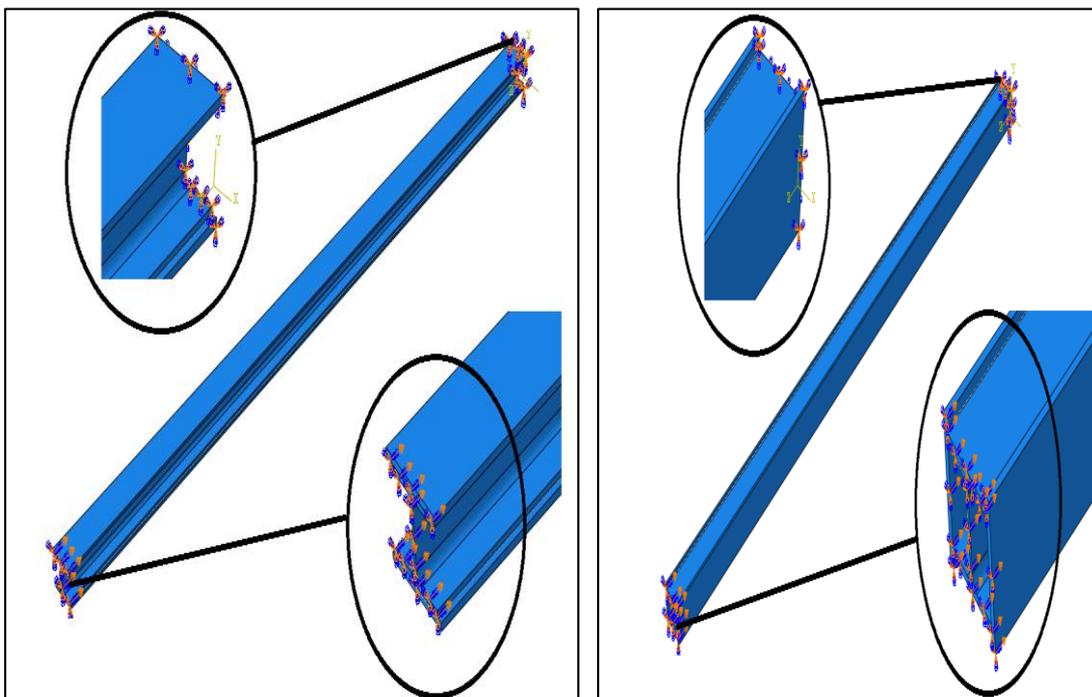


Figure III.9 Conditions aux limites des poteaux renforcés et déplacement imposé.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

➤ Le maillage sous Abaqus

Les poteaux sont soumis à un chargement axial en compression ce qui conduit à une déformation dominante de compression. De ce fait un élément solide tridimensionnel à 8 nœuds serait le type d'élément le plus adéquat à utiliser pour refléter les caractéristiques de déformation des plaques de renforcement. Chaque composant a été modélisé comme une pièce indépendante, le poteau HEA en acier par des éléments de types C3D6 et les plaques de renforcement ont été modélisés à l'aide de l'élément linéaire en briques à 8 nœuds et intégration réduite "C3D8R" disponible dans la bibliothèque ABAQUS. Cet élément de brique serait, peut-être, utilisé efficacement dans l'analyse non linéaire, y compris la plasticité, le contact, les grands déplacements et la ruine, de plus, l'utilisation de petits éléments solides tridimensionnels à huit nœuds pour la section en acier permet, non seulement de suivre raisonnablement la surface de contact, mais également, de refléter les déformations réels de la section renforcée. Enfin, on trouve avec un maillage de 10400 éléments (figure III.10)..

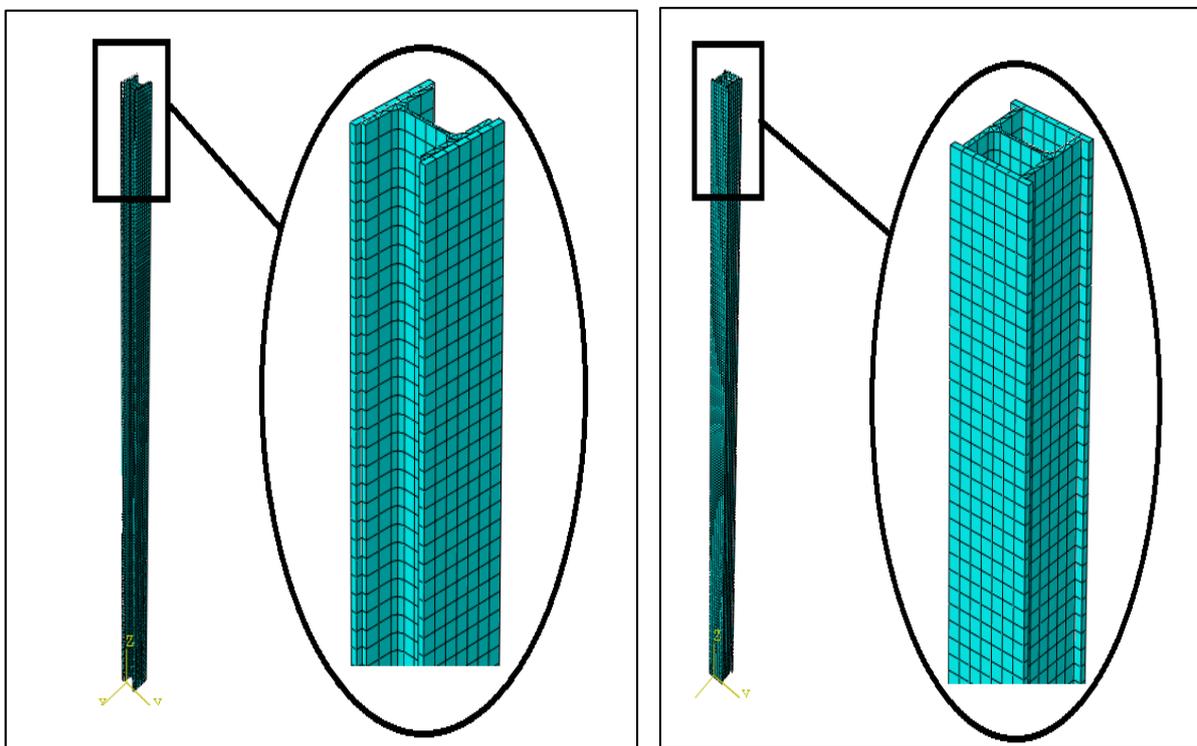


Figure III.10 Maillage des poteaux renforcés.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

III.4 RESULTATS ET ANALYSES

➤ Poteau non renforcé

Les résultats numériques de l'état charge-déformation mesuré au niveau de la section médiane du poteau renforcé et en augmentant l'épaisseur des plaques de renforcement, on remarque que les courbes ont suivi un comportement élasto-plastique (non-linéarité matérielle) avec une déformation maximale au milieu de $\epsilon_p=14.10^{-3}$ (figure III.11), caractérisé par une instabilité globale par un flambement presque au milieu. La plasticité se traduit par la dissipation de l'énergie au cours de la déformation: l'énergie mécanique est transformée en énergie thermique, conduisant à l'irréversibilité du comportement du matériau ; ce mécanisme traduit également la ductilité du matériau qui permet aux métaux de subir des allongements significatifs avant de rompre.

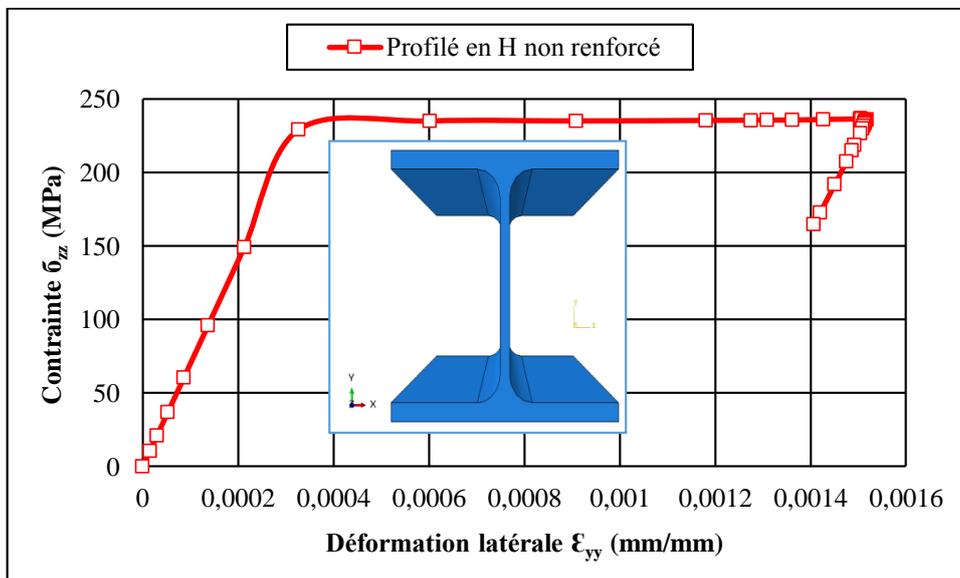


Figure III.11 Etat contrainte-déformation de poteau non renforcé.

La courbe III.12 montre l'état charge –déplacement au milieu du poteau non renforcé, on remarque une charge de ruine de 386 kN. A partir de cette charge le matériau continu à se déformé jusqu'à un déplacement de 20mm (figure III.12).

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

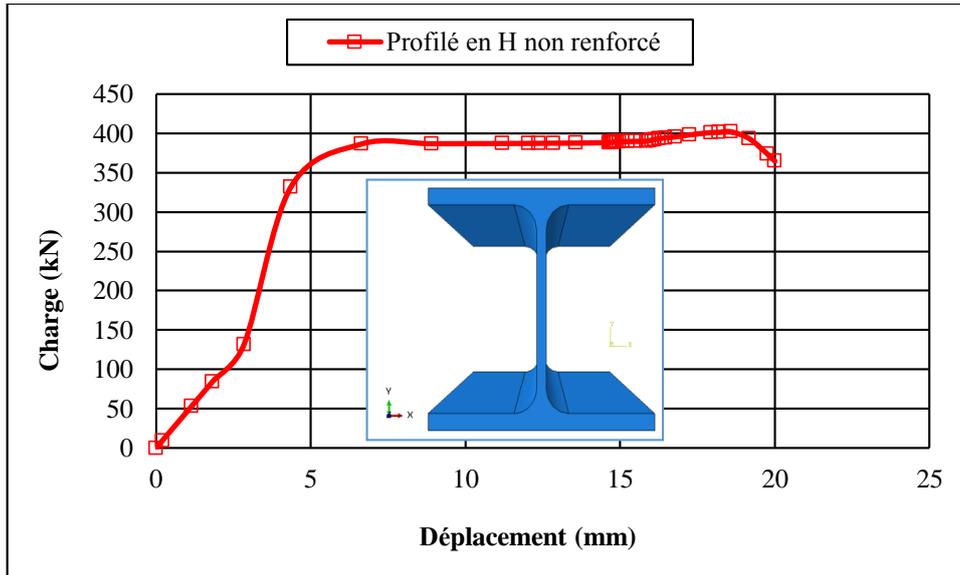


Figure III.12 Etat charge –déplacement de poteau non renforcé.

Le poteau montre une instabilité élastique représenté par un flambement au milieu de poteau.

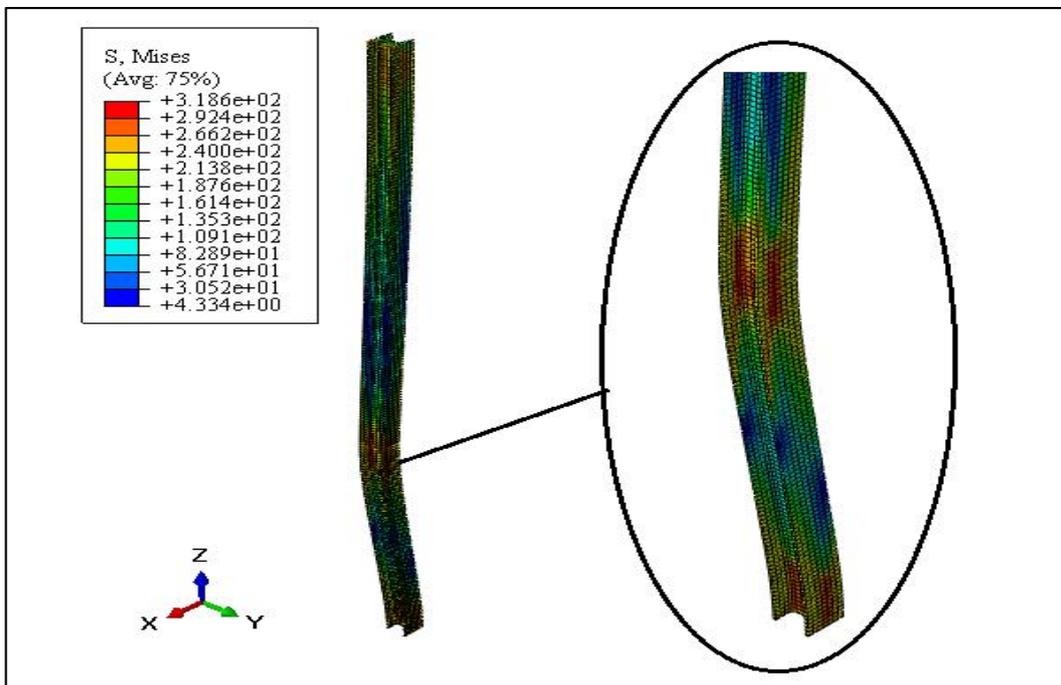


Figure III.13 Etat de ruine d'un poteau HEA seul.

➤ Poteau renforcé aux niveaux des semelles

On augmentant l'épaisseur des plaques de renforcement, l'état de déformation pour les épaisseurs 10mm et 12mm se diminue (petites déformations) en restant dans le domaine élastique. Pour les épaisseurs 4mm et 8mm, le poteau renforcé montre un comportement élasto-plastique avec un palier important de plasticité. (figure III.14).

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

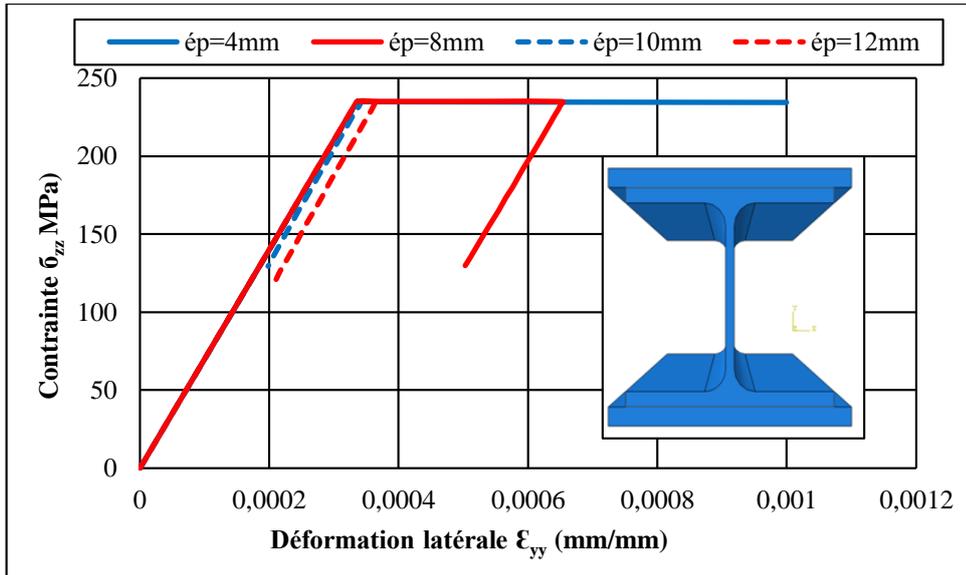


Figure III.14 Courbes contrainte-déformation latérale des poteaux en H avec des semelles renforcés.

De point de vue l'état charge – déplacement montre une augmentation de la résistance avec : Pour une épaisseur de 4mm de plaque de renforcement une augmentation de 15 %.

Pour une épaisseur de 8mm de plaque de renforcement une augmentation de 91% (figure III.15).

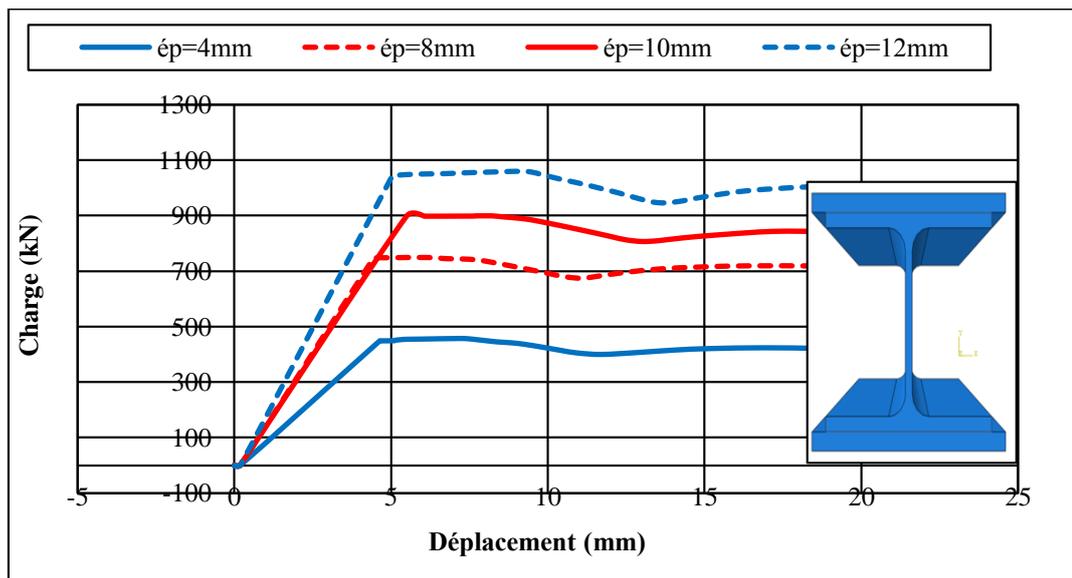


Figure III.15 Courbes charge-déplacement des poteaux en H avec des semelles renforcés.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

Le mode de ruine est caractérisé par un flambement qui se situe au un quart de la hauteur de poteau (Figure III.16 ET 17)

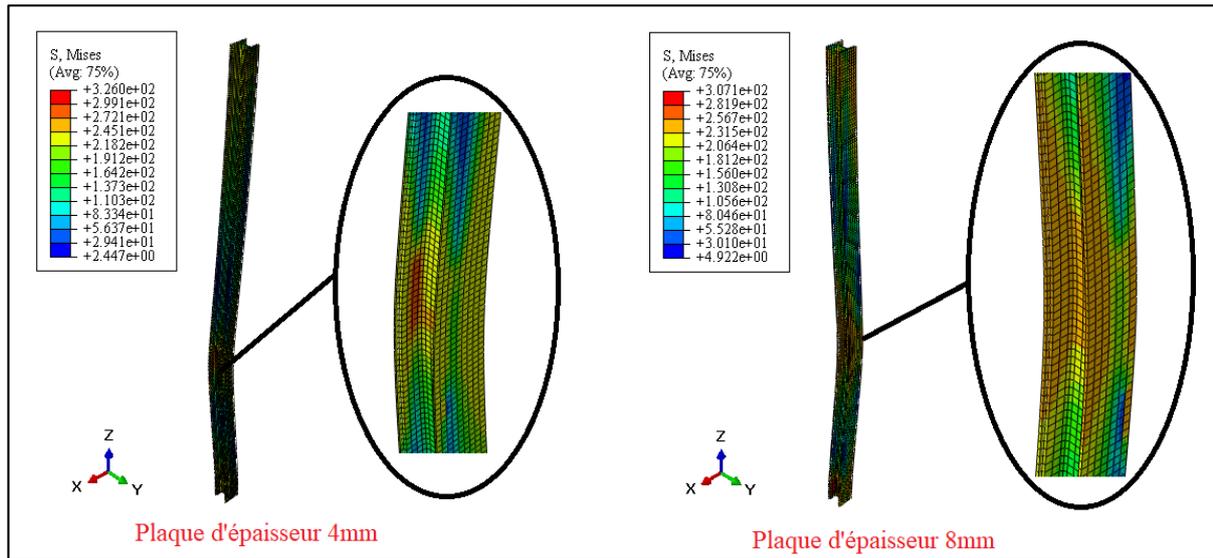


Figure III.16 Modes de rupture des poteaux en H avec largeur renforcé par des plaques d'épaisseur 4mm et 8mm.

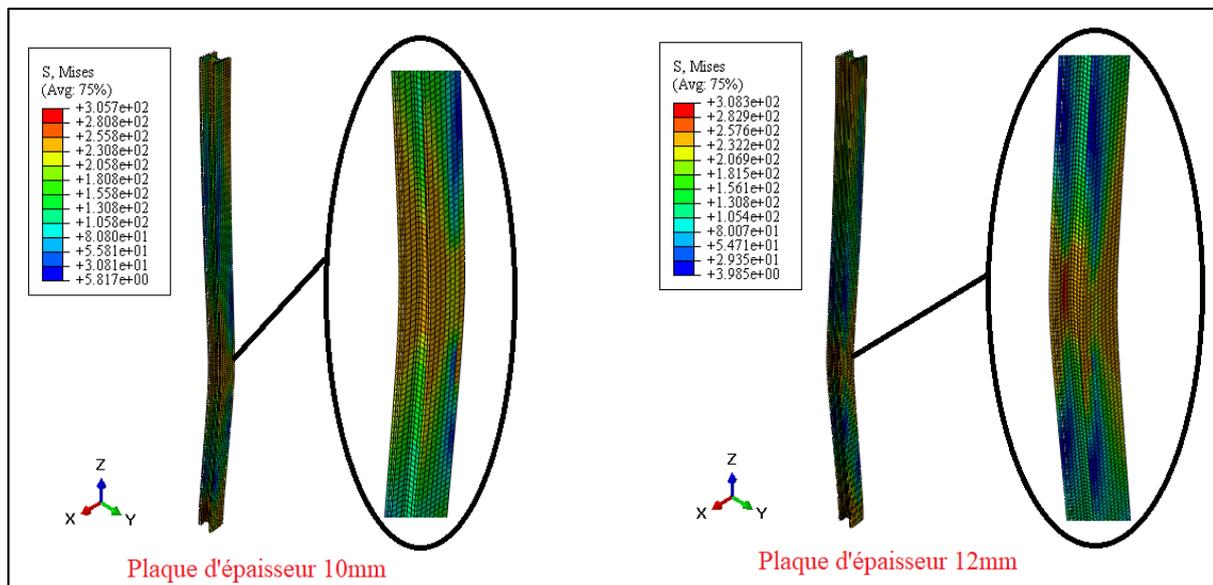


Figure III.17 Modes de rupture des poteaux en H avec largeur renforcé par des plaques d'épaisseur 10mm et 12mm.

➤ Poteau renforcé parallèlement à l'âme

D'après la figure III.18 , on remarque que l'augmentation de l'épaisseur à un effet positif, les courbes sont presque confondues les épaisseurs 4 ,8 et 10 montrent un comportement non linéaire avec des

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

déformations plastiques ; une déformation plastique de 75.10^{-3} ‘une réduction 53% de déformation par rapport au modèle non renforcé.

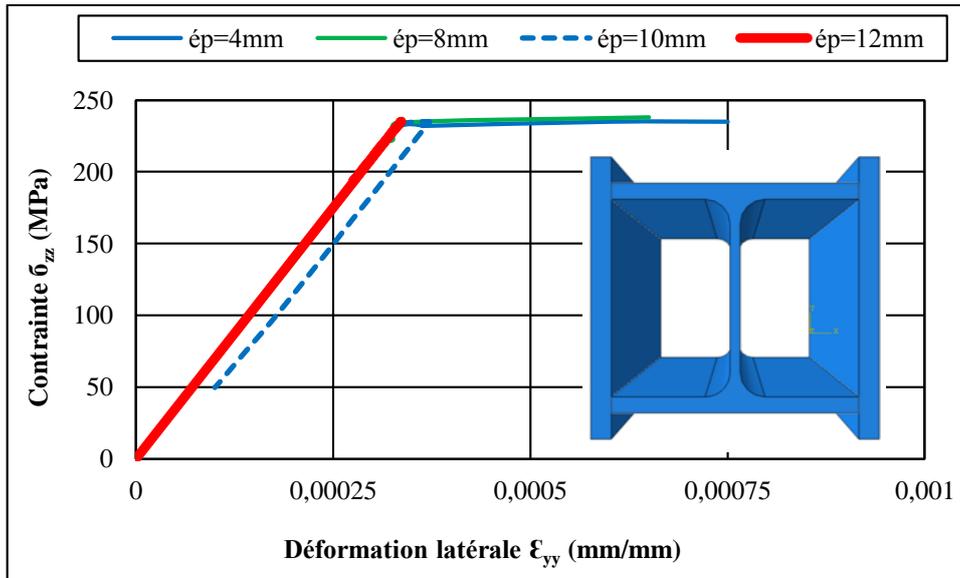


Figure III.18 Courbes contrainte-déformation latérale des poteaux en H renforcés avec des plaques // à l'âme.

La position des plaques de renforts parallèles à l'âme présente un état charge déplacement moins important surtout avec l'augmentation des épaisseurs. les poteaux renforcés présentent une augmentation des charges critiques telle que $p=1130\text{kN}$ pour un épaisseur de plaque de 12mm.

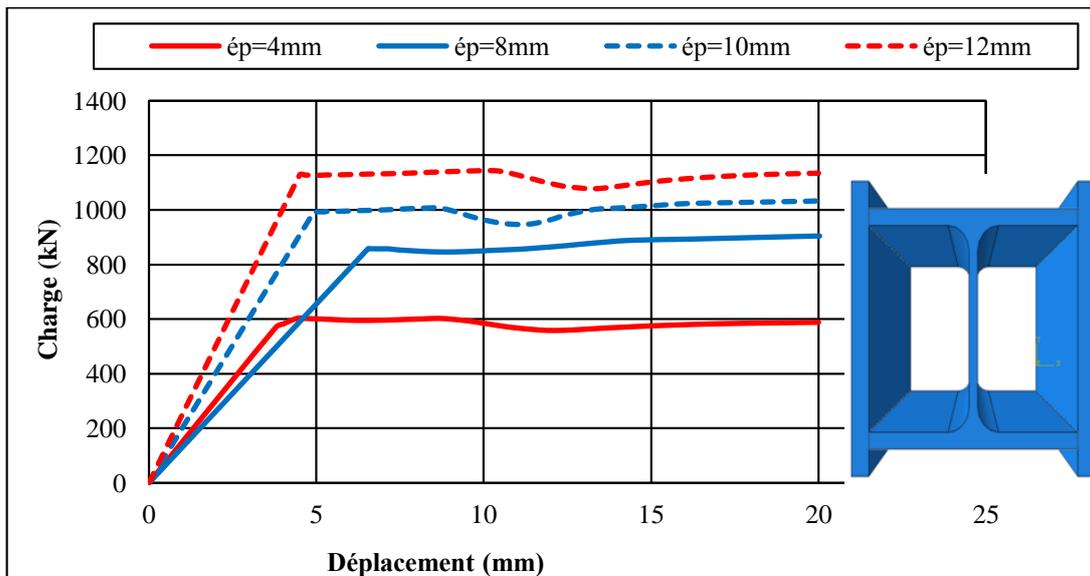


Figure III.19 Courbes charge-déplacement des poteaux en H renforcés avec des plaques // à l'âme.

Une amélioration de mode de ruine par rapport au premier modèle.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

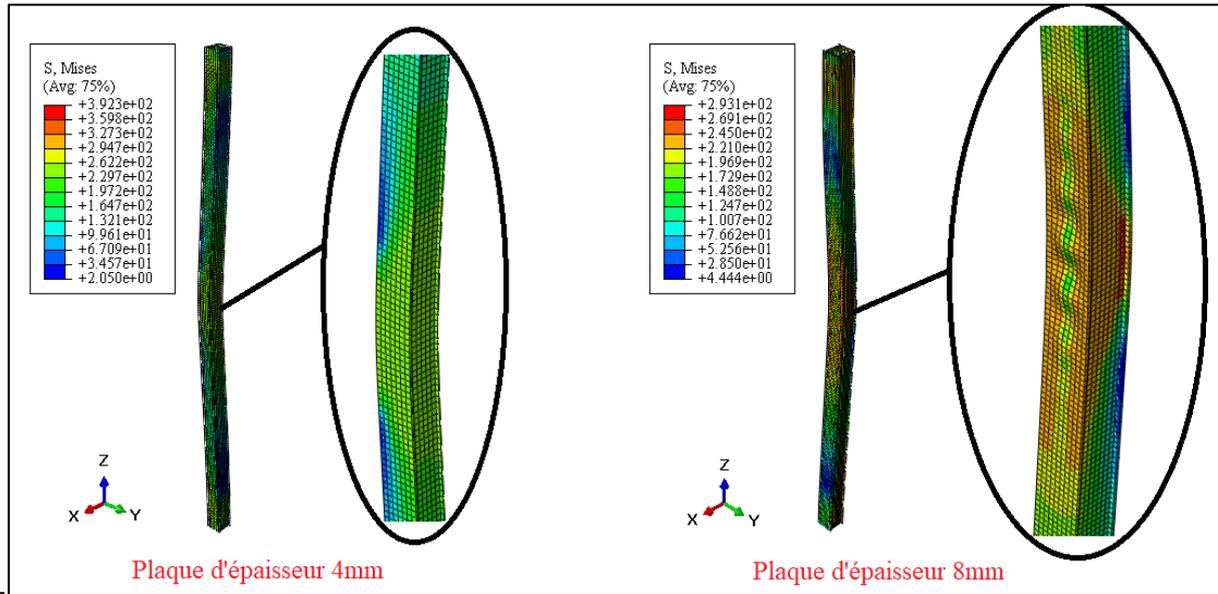


Figure III.20 Modes de rupture des poteaux en H avec hauteur renforcé par des plaques d'épaisseur 4mm et 8mm.

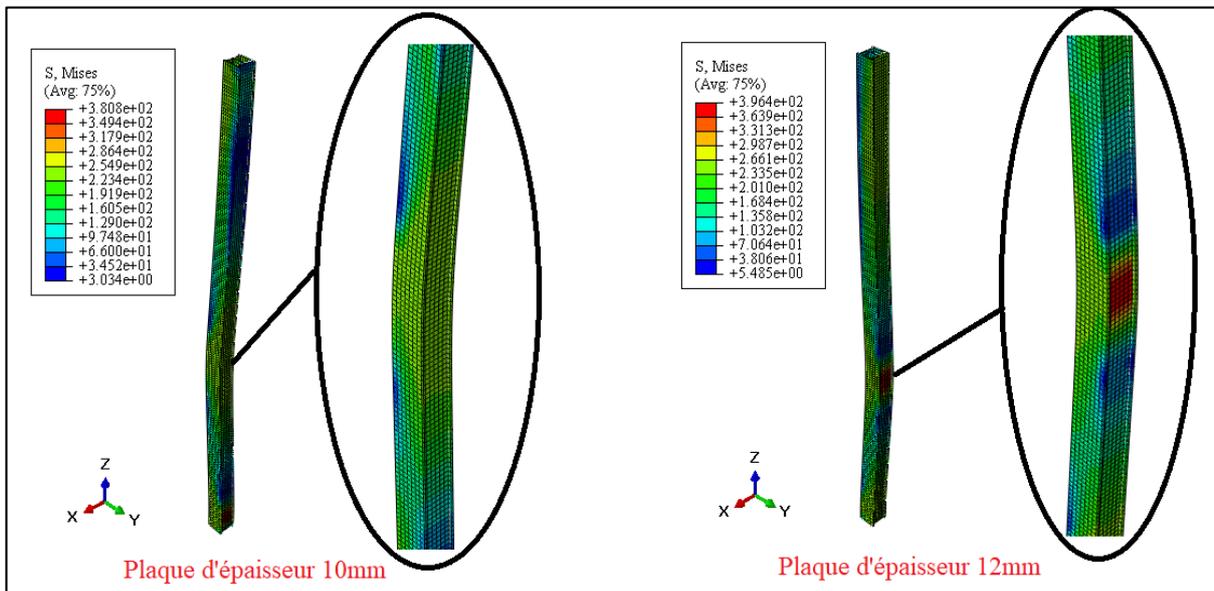


Figure III.21 Modes de rupture des poteaux en H avec hauteur renforcé par des plaques d'épaisseur 10mm et 12mm.

➤ COMPARAISON

L'utilisation de la technique de renforcement par la création d'un élément mixte(acier – béton) est une technique efficace , c'est l'association mécanique des deux matériaux, acier et béton, par l'intermédiaire d'une connexion située à l'interface des matériaux, qui va accroître la fois la rigidité et la résistance de poteau partiellement enrobé de béton, avec un profilé de grande hauteur, la résistance au flambement va s'en trouver améliorée,(un palier important de plasticité puis une rupture brutale).

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

Le poteau renforcé par l'augmentation de section avec la position 2 (plaques soudées parallèlement à l'âme $\epsilon_p=4\text{mm}$) a donné de bon résultat par rapport à la position 1 (figure III.22).

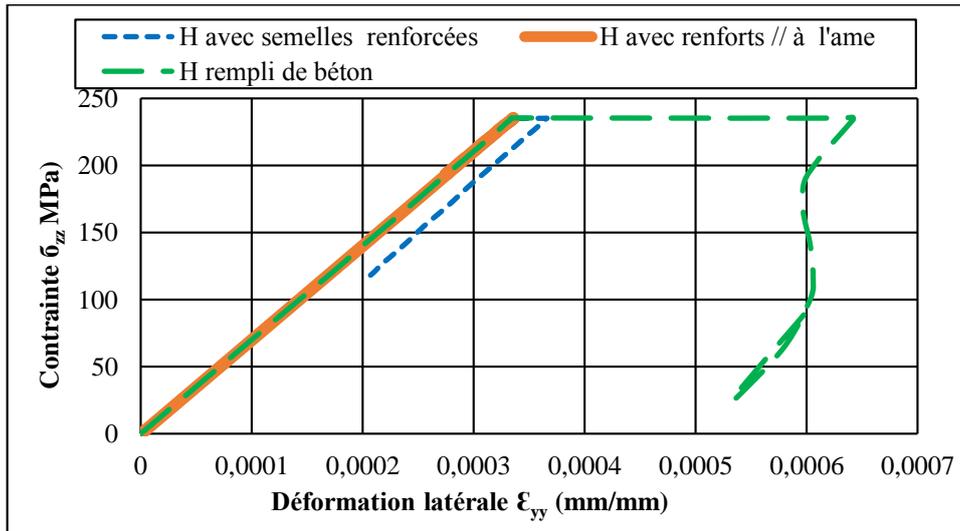


Figure III.22 Etat comparatif contrainte – déformation des poteaux renforcés.

De point de vue charge- déplacement vertical, on remarque une concordance des résultats entre le modèle renforcé par des plaques en acier // à l'âme et le modèle partiellement enrobé avec du béton par rapport au modèle renforcé au niveau des semelles. Une amélioration de la résistance au flambement d'ordre 34% et ,38% des modèles poteaux renforcés avec la position 2 et le modèle renforcée par le béton respectivement par rapport au modèle renforcé par la position 1(soudage des plats aux semelles) (figure III.23).

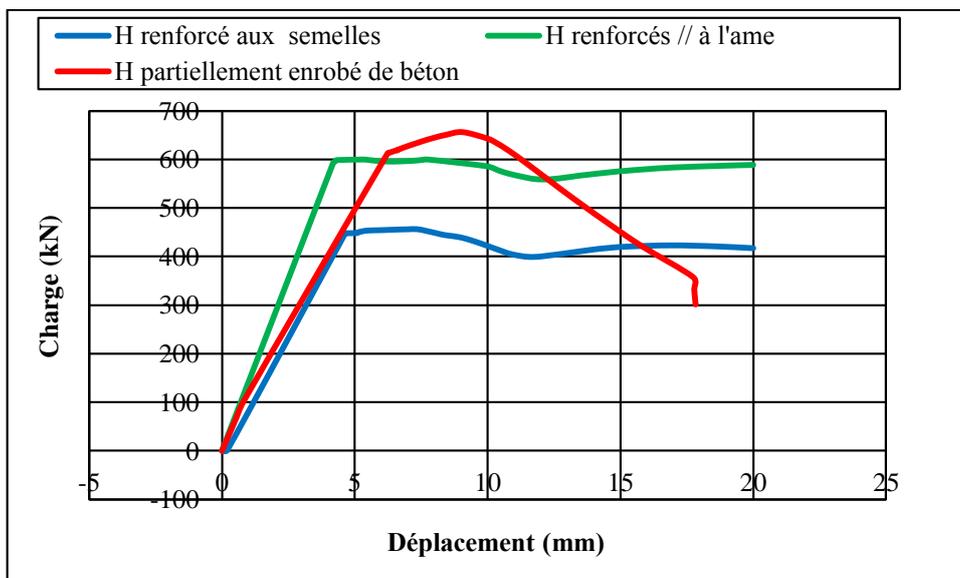


Figure III.23 Etat comparatif charge – déplacement des poteaux renforcés.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

De point de vue charge déplacement latéral, on remarque le modèle renforcé par des plaques soudées au niveau des semelles et le modèle partiellement enrobé avec du béton montrent une instabilité latérale importante. L'instabilité se trouve presque au milieu et au un quart de la hauteur de poteau. le modèle renforcé par des plaques en acier // à l'âme à une très bonne résistance par rapport à l'instabilité latérale (figure III.24).

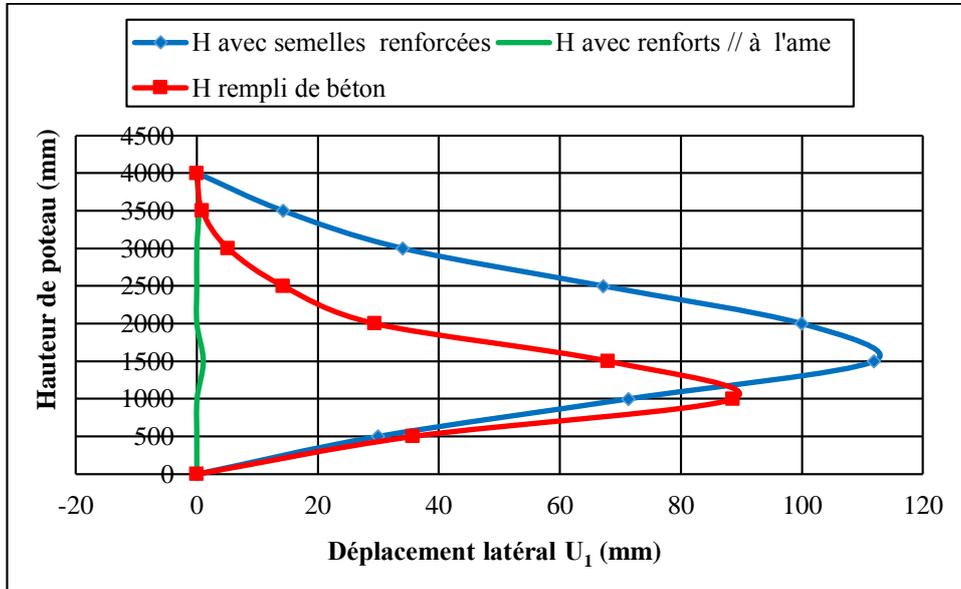


Figure III.24 Variation de déplacement latéral selon la hauteur de poteau.

D'après l'histogramme présenté dans la figure III.25, on remarque une amélioration de la résistance vis à vis au flambement avec une très bonne corrélation entre les résultats numérique présenté par Abaqus et les résultats théorique montré par l'EUROCODE avec une différence qui ne dépasse pas les 5% (figure III.25).

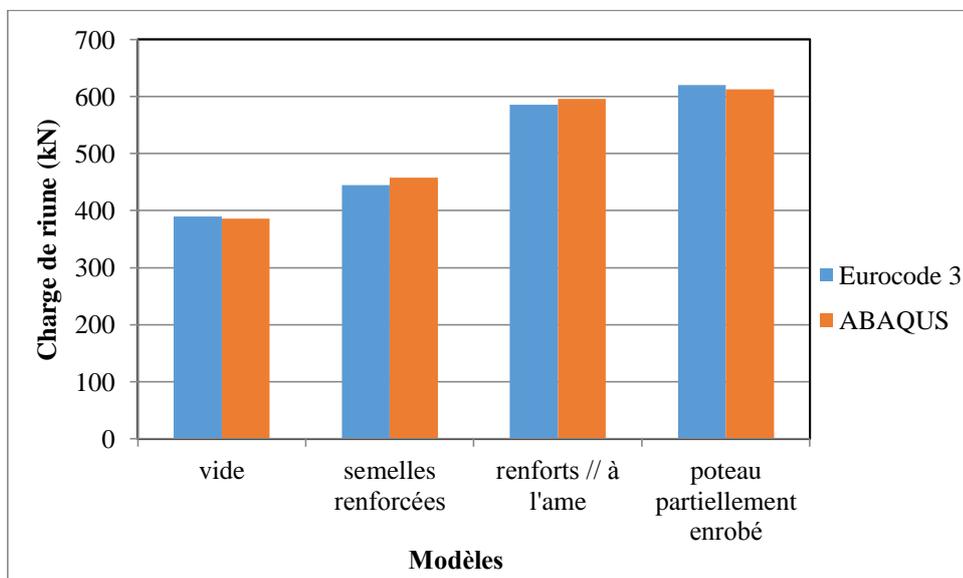


Figure III.25 Validation des résultats théorique et numériques des poteaux renforcés.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

Le poteau partiellement enrobé avec de béton montre une instabilité par flambement qui se situe au un quart de la hauteur de poteau (figure III.26).

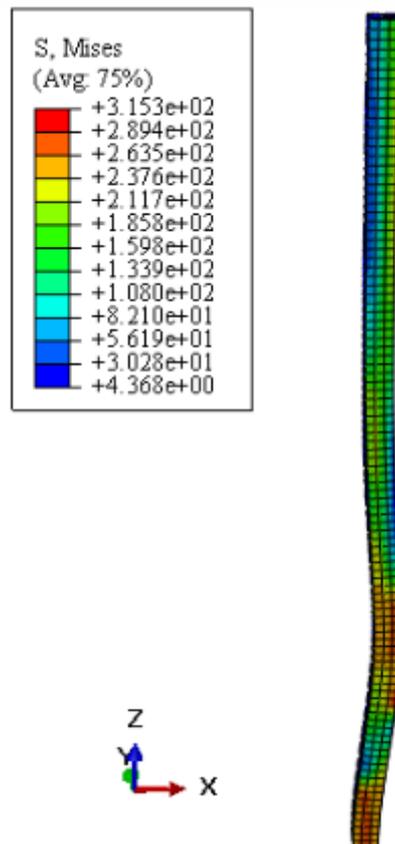


Figure III.26 : Modes de ruine de poteau partiellement enrobé avec de béton.

III.5. CONCLUSION

L'utilisation d'acier pour le renforcement de structures métalliques est le cas le plus simple. Les principales pathologies sur ouvrages métalliques peuvent être regroupées sous les rubriques suivantes : la corrosion, la fragilité, la fatigue, la dégradation des assemblages, et le comportement au feu....

Tout projet de réparation doit faire l'objet d'une étude qui débute par la connaissance du matériau métallique employé et de son comportement.

Il est possible de renforcer une structure métallique par plusieurs techniques en augmentant la section de ses éléments les plus faibles par ajout d'un profilé ou d'une tôle. Cette possibilité ne doit pas faire oublier les précautions à prendre pour réaliser un tel renforcement. Plus le choix d'une méthode de réparation n'est pas facile ; il s'agit de choisir le procédé le moins coûteux qui atteigne efficacement le but poursuivi.

Chapitre III : Etude numérique sous Abaqus

Le renforcement des constructions métalliques comprend les différentes mesures, assurant leur fiabilité en futur comportement et de satisfaire les nécessités d'exploitation, et assurer une durée d'exploitation prolongée en service de la construction renforcée.

Conclusion générales

Conclusion générale

Conclusion générale

- Le renforcement par augmentation de section consiste à améliorer les performances structurelles d'un ouvrage, par l'intégration des nouveaux éléments de renforcement aux éléments existant afin qu'il soit conforme aux nouvelles exigences fonctionnelles, en particulier (augmentation de la ductilité, de la résistance).
- Le modèle renforcé par des plaques soudées au niveau des semelles et le modèle partiellement enrobé avec du béton montrent une instabilité latérale importante.
- Le modèle renforcé par des plaques en acier // à l'âme a une très bonne résistance par rapport à l'instabilité latérale
- on augmentant l'épaisseur des plaques de renforcements l'état charge – déplacement montre une augmentation de la résistance avec :
Pour une épaisseur de 4mm de plaque de renforcement une augmentation de 15 %.
Pour une épaisseur de 8mm de plaque de renforcement une augmentation de 91%
- L'utilisation de la technique de renforcement par la création d'un élément mixte (acier – béton) est une technique efficace, c'est l'association mécanique des deux matériaux, acier et béton, par l'intermédiaire d'une connexion située à l'interface des matériaux, qui va accroître la fois la rigidité et la résistance de poteau partiellement enrobé de béton.
- Le modèle renforcé par des plaques soudées // à l'âme est une technique efficace car c'est une homogénéisation des inerties I_y et I_z , cette augmentation des inerties aide le poteau à supporter l'effort de compression.

Recommandations

Suite à ce travail quelques recommandations peuvent être faites :

- Une étude expérimentale s'avère nécessaire pour la validation des résultats numériques et théoriques
- Élaboration d'un programme de calcul qui tient compte des effets de soudure se basant sur la théorie de transfert de chaleurs.
- Étudier l'influence d'autres modes d'assemblage tel le laser introduisant l'effet de la température dans l'estimation des contraintes résiduelles.
- Étudier le renforcement des éléments en service et sous d'autres types de sollicitations (flexion composée, flexion....) avec d'autres types de sections.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] A. Baraka « cour en charpente métallique 1 selon le règlement algérien C.C.M.97 et Eurocode 3 », office des publications universitaires (université de BECHAR 2010).
- [2] Jean-Pierre MUSEAU « La construction métallique avec les Eurocodes », Editions Eyrolles 2013.
- [3] K. Ouzaa, Réhabilitation des structures, Université des sciences et de la technologie. Mohamed Boudiaf U.S.T.O, Oran, Algérie, 2015, 63p.
- [4] KERNOU Nassim« La Construction Mixte (Acier -Béton) "Cours et Exercices Corrigés"». Université Dr. Tahar moulay de saida ,2016.
- [5] M.A. HIRT, & R. BEZ « Construction métallique, presses polytechnique », Universitaire romandes, Suisse, 1992.
- [6] A. Baraka « cour en charpente métallique 1 selon le règlement algérien C.C.M.97 et Eurocode 3 », office des publications universitaires (université de BECHAR 2010).
- [7] Association APK « Construction métallique et mixte acier-béton» : conception et mise en œuvre Tomes 1 et 2 " Editions Eyrolles 1996.
- [8] K. Benazzouz, Sauvegarde du patrimoine culturel dans le contexte du développement durable : cas d'étude de la ville de Bejaia, Mémoire de Magistère en Architecture. Université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, Algérie, 2009, 327p.
- [9] M. Naboussi, réparation et /ou renforcement des ouvrages, centre nationale de recherché appliquée en génie parasismique (C.G.S), 1989, pp. 14-18.
- [10] [Louetri, 2016] L. Louetri, Etude numérique du renforcement et de la réparation des silos par les matériaux composites, Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2016, 103p.
- [11] sites internet
- [12] XP ENV 1993-1-3« Eurocode 3 .Calcul des structures en acier»et document d'application nationale. Règle générale –Règles supplémentaires pour les profilés et plaques à parois mince formés à froid. AFNOR, Décembre 1999.