

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE CONSTANTINE 1
Faculté des sciences de la technologie
Département de Génie civil



N° D'ORDRE:

SERIE :

Mémoire de magister en génie civil

Option : Mécanique des structures

Présenté par : **BELDJAZIA AISSAM**

Intitulé

**ANALYSE SECTIONS DE POTEAUX MIXTES
ACIER BETON SOUMIS A LA COMPRESSION
EXCENTREE. CAS DES POTEAUX FORMES
PAR DES SECTIONS IPE ENROBES DE BETON**

Soutenue publiquement le :/...../2014

Devant le Jury composé de :

Président : Mr BELOUAR A. Professeur UConstantine 1

Rapporteur : Mr BOULFOUL A. Maître de conférence UConstantine 1

Examineurs : Mr DJEBBAR N. Professeur UConstantine 1

Mr TEKKOUK A. Maître de conférence UConstantine 1

Remerciement

Au terme de ce modeste travail, je tiens à exprimer mes profonde et mes vifs remerciements:

Avant tout, je remercie DIEU pour m'avoir donné la force et la patience pour mener à terme ce travail.

A mes parents qui m'ont toujours encouragé et soutenu durant toutes mes études.

A mon promoteur Mr BOULFOUL AZDINE, qui m'a proposé ce sujet ayant suscité mon intérêt, et m'a encadré et dirigé avec rigueur mon travail de recherche en me consacrant beaucoup de temps et d'attention jusqu'à la réalisation de mon présent mémoire.

Ma sincère reconnaissance va au Professeur BELOUAR A, pour m'avoir fait L'honneur d'être le président de mon jury de soutenance.

J'adresse mes sincères remerciements à messieurs les membres de jury :

- Mr DJEBBAR N Professeur Université Constantine 1*
- Mr TEKKOUK A Maître de conférence Université Constantine 1*

A tous les enseignants du département du génie civil.

Je ne saurais oublier mon ami BELAMRI MOHAMMED EL AMINE. Par leur encouragement et le temps qu'il m'a consacré et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce projet.

RESUME

L'objet du présent travail de recherche est de proposer des abaques et des modèles d'équations approchées des courbes d'interactions pour des poteaux mixte en profils métalliques totalement enrobés de béton soumise à la flexion composée biaxiale avec un effort normal de compression, par la méthode de calcul de l'Eurocode 4 en élaborant un programme de calcul permettant d'effectuer une étude paramétrique rapide et automatisable afin de vérifier la résistance d'une section mixte.

Mots-clés: construction mixte – poteaux mixtes –la flexion composée–bi axiale–section mixte totalement enrobée –programme de calcul –Eurocode 4 –élancement.

المخلص

الغرض من هذا البحث هو تقديم الرسوم البيانية والمعادلات التقريبية لمنحنيات التفاعل لأعمدة معدنية مركبة مغطاة تماماً بالخرسانة المتعرضة للانحناء المركب الثنائي الاتجاه مع قوة ضغط بواسطة طريقة حساب الكود الأوروبي 4 وهذا من خلال تطوير برنامج كمبيوتر للحساب لأداء دراسة نوعية و آلية للتحقق من مقاومة المقطع المركب

الكلمات الرئيسية: البناء المركب- الأعمدة المركبة- الانحناء المركب- الثنائي الاتجاه- مقطع مركب مغطى كلياً بالخرسانة- برنامج الكمبيوتر للحساب- الكود الأوروبي 4- النحول

Abstract

The purpose of this research is to provide graphs and equations to approximate the interaction curves for mixed metal poles profiles completely encased in concrete subjected to combined bending united with a normal bi axial compressive stress models by the method of calculation of the Eurocode 4 by developing a computer program for performing a fast and automated parametric study to test the strength of a composite section.

Keywords: composite construction – composite columns – bending composed – biaxial – fully coated composite section calculation routine – Eurocode 4 – slenderness.

NOTATIONS ET SYMBOLES

f_{ck} : La résistance caractéristique à la compression sur cylindre mesurée à 28 jours.

$f_{ck,cube}$: Résistance à la compression caractéristique sur cube.

f_{ctm} : Valeur moyenne de la résistance à la traction.

$f_{ctk0,05}$: Valeur inférieure de la résistance caractéristique à la traction (fractile 5 %).

$f_{ctk0,95}$: Valeur inférieure de la résistance caractéristique à la traction (fractile 95 %).

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

ρ : La masse volumique d'un béton.

C° : La température ambiante.

$f_s^{(u)}$: Résistance ultime caractéristique de l'acier.

$\varepsilon_{sk}^{(u)}$: L'allongement unitaire correspondant à l'atteinte de la résistance $f_s^{(u)}$.

σ_c : La contrainte de compression.

Oz : Représente l'axe qui contient les centres de gravités de la section considérée.

G : Etant le point d'application de la force.

S : Représente l'aire de la section.

σ_{xy} : Contrainte se trouvant au point de coordonnées (x,y) dépendant de la loi de comportement du matériau.

N_p : Effort limite ultime centré (l'effort normal plastique).

M_p : Moment limite ultime en flexion simple (moment plastique).

δ : Le coefficient représente la contribution de l'acier de construction à la résistance à l'effort normal.

$\bar{\lambda}$: L'élancement réduit.

N_{cr} : La charge de flambement élastique du poteau.

Cz : La valeur minimale de l'épaisseur de l'enrobage.

$N_{pl,Rd}$: La résistance plastique à la compression d'une section

A_a : Représente l'aire de la section transversale de l'acier construction.

A_c : Représente l'aire de la section transversale du béton.

A_s : Représente l'aire de la section transversale de l'armature.

f_{yd} : Représente la résistance caractéristique de l'acier construction.

e : L'excentrement de l'effort normal.

M_{sd} : Le moment fléchissant maximal dû aux charges axiales sans tenir compte des effets du second ordre.

N_{sd} : L'effort normal de calcul.

t : Représente l'épaisseur de paroi du tube circulaire.

EI_e : Rigidité élastique de flexion.

l_e : Longueur de flambement du poteau.

I_a : Représente le moment d'inertie de flexion de l'acier de construction.

I_c : Représente le moment d'inertie de flexion du béton (supposé non fissuré).

I_s : Représente le moment d'inertie de flexion des armatures.

E_a : Le module d'élasticité de l'acier de construction.

E_s : Le module d'élasticité des armatures.

$0,8E_{cd}I_c$: Représente la rigidité réelle en flexion de la partie en béton.

E_{cm} : Module sécant du béton.

γ_c : Le coefficient partiel de sécurité relatif aux matériaux.

N_{Gsd} : L'effort normal dû aux charges permanentes.

χ : Coefficient de minoration pour la courbe de flambement adéquate.

α : Facteur d'imperfection dépendant de la courbe de flambement appropriée.

r : Rapport entre le plus petit et le plus grand des moments d'extrémité.

β : Le coefficient du moment équivalent.

W_{pa} : Le moment de résistance plastique de l'acier de construction.

W_{pc} : Le moment de résistance plastique du béton.

W_{ps} : Le moment de résistance plastique des armatures.

μ_y, μ_z : Les valeurs relatives du moment résistant selon yy et selon zz.

IPE: Profil aux ailes à épaisseur constante.

h : Hauteur du profilé.

b : Largeur du profilé.

t_f : Epaisseur du la semelle.

t_w : Epaisseur du lame.

r_1 : Cordon laser.

r_2 : Angle vif.

I_y : Moment d'inertie principale autour de l'axe fort inertieyy.

I_z : Moment d'inertie principale autour de l'axe faible inertiezz.

W_{ply} : Module plastique de flexion autour de l'axe fort inertieyy.

W_{plz} : Module plastique de flexion autour de l'axe faible inertiezz.

H : La hauteur de la section.

B : La largeur de la section.

d_H : L'enrobage de l'acier de construction selon la hauteur H.

d_B : L'enrobage de l'acier de construction selon la largeur B.

d₁ : Enrobage des armatures.

h_n : La position de l'axe neutre.

M_a : Le moment de l'acier de construction.

M_c : Le moment du béton.

M_s : Le moment des armatures.

C₁, C₂ : Pourcentage minimale des armatures.

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1-1 : Exemples de poteaux mixtes	5
Figure 1-2 : Exemples des poteaux mixtes sur chantier	5
Figure 1-3 : Flambement des poteaux mixtes	7
Figure 1-4 : Essai de compression.....	9
Figure 1-5 : Essai de traction par flexion	9
Figure 1-6 : Diagramme contrainte-déformation	11
Figure 2-1 : Sollicitations d'un élément soumis a la flexion composée	13
Figure 2-2 : Sollicitations d'un élément soumis a la flexion composée	13
Figure 2-3 : Flexion composée uni axiale	14
Figure 2-4 : Section de forme quelconque soumise à la compression bi axialement excentrée	15
Figure 2-5 : Evolution de la distribution des contraintes.....	17
Figure 2-6 : Etat limite ultime d'une section rectangulaire en acier soumise à la compression excentrée uni axialement	17
Figure 2-7 : Etat limite ultime d'une section rectangulaire en acier soumise à la compression excentrée bi axialement	18
Figure 2-8 : Courbe d'interaction	19
Figure 2-9 : Section en béton armé	19
Figure 2-10 : Section mixte	20
Figure 3-1 : Exemples types de sections transversales de poteaux	22
Figure 3-2 : Résistance à la compression $N_{pl, Rd}$	26
Figure 3-3 : Les courbes de flambement	29
Figure 3-4 : Courbe d'interaction M-N (flexion uni-axiale)	32

Figure 3-5 : Répartition des contraintes correspondant à la courbe d'interaction (section en I enrobée de béton)	33
Figure 3-6 :Modèle de calcul pour l'interactioncompression-flexion uni axiale	35
Figure 3-7 :Hypothèse de ruine dans le plan xyavec prise en compte des imperfections	36
Figure 3-8 :Hypothèse de ruine dans le plan xy sans prise en compte des imperfections	37
Figure 3-9 :Courbe d'interaction des moments –résistance à la flexion bi axiale ...	37
Figure 4-1 : Poutrelle européen en I (IPE)	41
Figure 4-2 : La section selon l'axe de forte inertieyy	42
Figure 4-3 : La section selon l'axe de faible inertiezz	42
Figure4-4 :Courbe d'interaction pour la compression et la flexion uni-axiale	49
Figure 4-5 :La section mixte selon l'axe de forte inertieyy.....	50
Figure 4-6 :La section mixte selon l'axe de faible inertiezz	50
Figure 4-7 : La section mixte selon l'axe de forte inertie yy.....	53
Figure 4-8 : La section mixte selon l'axe de faible inertie zz	55
Figure 4-9 : Les courbes d'interactions réelles yy [cas 1]...	58
Figure 4-10 : Les courbes d'interactions réduites yy [cas 1]	58
Figure 4-11 : Les courbes d'interactions réelles zz [cas 1]	59
Figure 4-12 : Les courbes d'interactions réduites zz [cas 1]	59
Figure 4-13 : Les courbes d'interactions réelles yy [cas 2]	60
Figure 4-14 : Les courbes d'interactions réduites yy [cas 2]	60
Figure 4-15 : Les courbes d'interactions réelles zz [cas 2]	61
Figure 4-16 : Les courbes d'interactions réduites zz [cas 2]	61
Figure 4-17 : Les courbes d'interactions réelles yy [cas 3]	62
Figure 4-18 : Les courbes d'interactions réduites yy [cas 3]	62
Figure 4-19 : Les courbes d'interactions réelles zz [cas 3]	63
Figure 4-20 : Les courbes d'interactions réduites zz [cas 3]	63
Figure 4-21 : Les courbes d'interactions réelles yy [cas 4]	64
Figure4-22 : Les courbes d'interactions réduites yy [cas 4]	64
Figure 4-23 : Les courbes d'interactions réelles zz [cas 4]	65
Figure 4-24 : Les courbes d'interactions réduites zz [cas 4]	65

Figure 4-25: Les courbes d'interactions réelles yy [cas 5]	66
Figure 4-26: Les courbes d'interactions réduites yy [cas 5]	66
Figure 4-27: Les courbes d'interactions réelles zz [cas 5]	67
Figure 4-28: Les courbes d'interactions réduites zz [cas 5]	67
Figure5-1 : Section transversale mixte selon l'axe yy et selon l'axe zz	69
Figure5-2 : La section mixte selon l'axe de forte inertieyy.....	70
Figure5-3 : La section mixte selon l'axe de faible inertiezz.....	72
Figure 5-4 : Courbe d'interaction inversée yy pour la compression et la flexion uni-axiale	73
Figure 5-5 : Courbe d'interaction inverséezz pour la compression et la flexion uni-axiale	74
Figure 5-6 : Les courbes d'interactions inversées réelles yy [cas 1]	75
Figure5-7 : Les courbes d'interactions inversées réduites yy [cas 1]	75
Figure5-8 : Les courbes d'interactions inversées réelles zz [cas 1]	76
Figure5-9 : Les courbes d'interactions inversées réduites zz [cas 1]	76
Figure5-10 : Les courbes d'interactions inversées réelles yy [cas 2]	77
Figure 5-11 : Les courbes d'interactions inversées réduites yy [cas 2]	77
Figure5-12 : Les courbes d'interactions inversées réelles zz [cas 2]	78
Figure5-13 : Les courbes d'interactions inversées réduites zz [cas 2].....	78
Figure 5-14: Les courbes d'interactions inversées réelles yy [cas 3]	79
Figure5-15 : Les courbes d'interactions inversées réduites yy [cas 3]	79
Figure5-16 : Les courbes d'interactions inversées réelles zz [cas 3]	80
Figure5-17 : Les courbes d'interactions inversées réduites zz[cas 3]	80
Figure 5-18 : Les courbes d'interactions inversées réelles yy [cas 4]	81
Figure 5-19 : Les courbes d'interactions inversées réduites yy [cas 4]	81
Figure 5-20 : Les courbes d'interactions inversées réelles zz [cas 4]	82
Figure 5-21 : Les courbes d'interactions inversées réduites zz [cas 4]	82
Figure 5-22 : Les courbes d'interactions inversées réelles yy [cas 5]	83
Figure 5-23 : Les courbes d'interactions inversées réduites yy [cas 5]	83
Figure 5-24 : Les courbes d'interactions inversées réelles zz [cas 5]	84
Figure 5-25 : Les courbes d'interactions inversées réduites zz [cas 5].....	84

Figure5-26 : Section du poteau mixte enrobé de béton125

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1-3: Caractéristiques des principaux aciers de construction	11
Tableau 3-1 : Valeur nominale de la limite d'élasticité f_y et du module d'élasticité des aciers courants de construction, donnés dans l'Eurocode 3, pour des épaisseurs ne dépassant pas 40 mm	24
Tableau 3-2 : Résistance caractéristique sur cylindre f_{ck} et valeur moyenne du module sécant E_{cm} données dans l'Eurocode 2 pour différentes qualités de béton	24
Tableau 3-3 : Résistance caractéristique f_{sk} et module d'élasticité E_s des armatures admises dans l'Eurocode 2	24
Tableau 3-4 : Limites du rapport de la dimension de la paroi sur son épaisseur pour éviter le voilement local	25
Tableau 3-5 : Valeurs de référence η_{10} et η_{20} pour évaluer l'effet du frettage sur la résistance des tubes de section circulaire remplis de béton	27
Tableau 3-6 : Valeurs limites de l'élançement réduit $\bar{\lambda}$ pour la prise en compte du fluage et du retrait du béton	28
Tableau 3-7 : Facteur d'imperfection α relatif aux courbes européennes de flambement, tel que donné dans l'Eurocode 3	30
Tableau 4-1 : Caractéristiques mécaniques de béton de calcul.....	39
Tableau 4-2 : Caractéristiques mécaniques d'aciers de construction de calcul	40
Tableau 4-3 : Les caractéristiques géométriques des profilés IPE	41
Tableau 4-4 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe fort [cas 1]	43
Tableau 4-5 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe faible [cas 1]	44
Tableau 4-6 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe fort [cas 2]	44
Tableau 4-7 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe faible [cas 2]	45
Tableau 4-8 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe fort [cas 3]	46

Tableau 4-9 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe faible [cas 3]	46
Tableau 4-10 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe fort [cas 4]	47
Tableau 4-11 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe faible [cas 4]	48
Tableau 4-12 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe fort [cas 5]	48
Tableau 4-13 : Les caractéristiques géométriques Selon l'axe faible [cas 5]	49
Tableau 5-1 : La formule des moments pour axe neutre dans l'âme selon yy.....	70
Tableau 5-2 :La formule des moments pour axe neutre dans la semelle selon yy....	71
Tableau5-3 :La formule des moments pour axe neutre hors de la section en acier selon yy	71
Tableau5-4 :La formule des moments pour axe neutre dans l'âme selon zz	72
Tableau5-5 :La formule des moments pour axe neutre dans la semelle selon zz ...	72
Tableau5-6 :La formule des moments pour axe neutre hors de la section en acier selon zz	73
Tableau5-7 :Les points caractéristiques pour les cinq cas... ..	85
Tableau 5-8 : Valeurs des coefficients selon yy[cas 1]	86
Tableau 5-9 :Valeurs des coefficients selon zz[cas 1]	86
Tableau 5-10 :Valeurs des coefficients selon yy[cas 2]	86
Tableau 5-11 :Valeurs des coefficients selon zz[cas 2]	86
Tableau 5-12 :Valeurs des coefficients selon yy[cas 3].....	87
Tableau 5-13 :Valeurs des coefficients selon zz[cas 3]	87
Tableau 5-14 :Valeurs des coefficients selon yy[cas 4]	87
Tableau 5-15 :Valeurs des coefficients selon zz[cas 4]	88
Tableau 5-16 : Valeurs des coefficients selon yy[cas 5]	88
Tableau 5-17 :Valeurs des coefficients selon zz[cas 5]	88
Tableau 5-18 :Abaques 1 selon yy	92
Tableau 5-19 :Abaques 1 selon zz.....	93
Tableau 5-20 :Abaques 2 selon yy	94
Tableau 5-21 :Abaques 2 selon zz	95
Tableau 5-22 :Abaques 3 selon yy	96
Tableau 5-23 :Abaques 3 selon zz	96
Tableau 5-24 :Abaques 4 selon yy	97
Tableau 5-25 :Abaques 4 selon zz	98

Tableau 5-26 :Abaques 5 selon yy.....	99
Tableau 5-27 :Abaques 5 selon zz	100
Tableau 5-28 :La valeur des coefficients pour le premier cas selon yy	100
Tableau5-29 :La valeur des coefficientspour le premier cas selon zz.....	101
Tableau 5-30 : La valeur des coefficients pourle deuxième cas selon yy.....	101
Tableau 5-31 :La valeur des coefficients pour le deuxième cas selon zz.....	101
Tableau 5-32 :La valeur des coefficients pour le troisième cas selon yy	101
Tableau 5-33 :La valeur des coefficients pour le troisième cas selon zz	102
Tableau 5-34 :La valeur des coefficients pour le quatrième cas selon yy.....	102
Tableau 5-35 :La valeur des coefficients pour le quatrième cas selon zz	102
Tableau 5-36 :La valeur des coefficients pour le cinquième cas selon yy.....	102
Tableau 5-37 :La valeur des coefficients pour le cinquième cas selon zz.....	103
Tableau 5-38 : Abaque 1 pour le groupe 1 selon yy.....	110
Tableau 5-39 : Abaque 1 pour le groupe 2 selon yy	111
Tableau 5-40 : Abaque 1 pour le groupe 3 selon yy	111
Tableau5-41 ; Abaque 1 pour le groupe 1 selon zz	112
Tableau 5-42 : Abaque 1 pour le groupe 2 selon zz	112
Tableau 5-43 : Abaque 1 pour le groupe 3 selon zz	113
Tableau5-44 : Abaque 2 pour le groupe 1 selon yy	113
Tableau5-45 : Abaque 2 pour le groupe 2 selon yy	114
Tableau5-46 : Abaque 2 pour le groupe 3 selon yy	114
Tableau 5-47 : Abaque 2 pour le groupe 1 selon zz	115
Tableau5-48 : Abaque 2 pour le groupe 2 selon zz	115
Tableau 5-49 : Abaque 2 pour le groupe 3 selon zz	115
Tableau 5-50 : Abaque 3 pour le groupe 1 selon yy	116
Tableau 5-51 : Abaque 3 pour le groupe 2 selon yy	116
Tableau5-52 : Abaque 3 pour le groupe 3 selon yy	117
Tableau 5-53 : Abaque 3 pour le groupe 1 selon zz	117
Tableau 5-54 : Abaque 3 pour le groupe 2 selon zz	118
Tableau 5-55 : Abaque 3 pour le groupe 3 selon zz	118
Tableau5-56 : Abaque 4 pour le groupe 1 selon yy	119
Tableau5-57 : Abaque 4 pour le groupe 2 selon yy	119
Tableau5-58 : Abaque 4 pour le groupe 3 selon yy	120
Tableau 5-59 : Abaque 4 pour le groupe 1 selon zz	120

Tableau 5-60 : Abaque 4 pour le groupe 2 selon zz	121
Tableau 5-61 : Abaque 4 pour le groupe 3 selon zz	121
Tableau5-62 : Abaque 5 pour le groupe 1 selon yy	122
Tableau5-63 : Abaque 5 pour le groupe 2 selon yy	122
Tableau5-64 : Abaque 5 pour le groupe 3 selon yy	123
Tableau 5-65 : Abaque 5 pour le groupe 1 selon zz	123
Tableau 5-66 : Abaque 5 pour le groupe 2 selon zz	123
Tableau5-67 :Abaque 5 pour le groupe 3 selon zz	124

SOMMAIRE

Problématique	1
----------------------------	---

1. INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction	2
2. Avantages et inconvénients de la construction mixte	2
2.1 Les avantages	2
2.1.1 Aspects architecturaux	2
2.1.2 Aspects économiques	2
2.1.3 Fonctionnalité	3
2.1.4 Equipements et utilisation flexible de la construction	3
2.1.5 Montage	3
2.2 Les inconvénients	4
3. Les poteaux mixtes	4
3.1 Les différents types de poteaux mixtes	4
3.1.1 Classement 01	4
3.1.2 Classement 02	5
3.2 Avantage des poteaux mixtes	6
3.3 Comportement du béton dans les poteaux mixtes	6
3.4 Comportement de l'acier dans les poteaux mixtes	6
3.4.1 Flambement du poteau	7
4. Caractéristiques des matériaux	7
4-1 Le béton	7
4.1.1 Propriétés du béton	8
4.1.1.1 Caractéristiques du béton frais	8
4.1.1.2 Caractéristiques du béton durci	8
4-2 Aciers d'armatures	10
4-2.1 Caractéristiques mécaniques	10
4-3 Acier de construction	11
5. Conclusion	12

2. LA FLEXION COMPOSEE

1. Introduction	13
2. Définition de la flexion composée	13
3. Flexion composée uni axiale	14
4. Flexion composée bi axiale	14
4.1 Domaine élastique	15
4.2 Domaine élasto-plastique	16

4.3 Domaine plastique	17
4.4 Cas du béton armé	19
4.5 Cas d'une section mixte	20

3. LA METHODE DE L'EUROCODE 4

1. Introduction	21
2. Méthodes de calcul	21
2.1 La méthode simplifiée	22
3. Types de sections transversales pour les poteaux mixtes, avec leurs avantages	22
4. Nuance et sécurité des matériaux	23
5. Ruine par flambement local	25
6. Résistance des sections transversales sous Charges axiales	25
7. Elancement réduit et rigidités.....	27
8. Résistance des éléments structuraux en compression axiale	29
9. Poteaux mixtes soumis à compression et flexion	30
10. Analyse des moments de flexion	31
11. Courbe d'interaction pour compression et flexion combinées	31
12. Compression et flexion uni-axiale combinées	35
13. Compression et flexion bi-axiale combinées	36
14. Conclusion	38

4. DETERMINATION DES COURBES D'INTERACTIONS

1. Introduction	39
2. Caractéristiques mécaniques des matériaux	39
2.1 Le béton	39
2.2 Aciers d'armature	40
2.3 Armature de construction	40
3. Caractéristiques géométriques des sections	40
3.1 Caractéristiques géométriques des profilés	40
3.2 Caractéristiques géométriques des sections de calculs	42
3.2.1 Caractéristiques géométriques pour le premier cas	43
3.2.1.1 Caractéristiques géométriques Selon l'axe de forte inertie yy.....	43
3.2.1.2 Caractéristiques géométriques Selon l'axe de faible inertie zz	43
3.2.2 Caractéristiques géométriques pour le deuxième cas	44
3.2.2.1 Caractéristiques géométriques Selon l'axe de forte inertie yy	44
3.2.2.2 Caractéristiques géométriques Selon l'axe de faible inertie zz	45
3.2.3 Caractéristiques géométriques pour le troisième cas	45
3.2.3.1 Caractéristiques géométriques Selon l'axe de forte inertie yy	45
3.2.3.2 Caractéristiques géométriques Selon l'axe de faible inertie zz	46

3.2.4	Caractéristiques géométriques pour le quatrième cas	47
3.2.4.1	Caractéristiques géométriques Selon l'axe de forte inertie yy	47
3.2.4.2	Caractéristiques géométriques Selon l'axe de faible inertie zz.....	47
3.2.5	Caractéristiques géométriques pour le cinquième cas	48
3.2.5.1	Caractéristiques géométriques Selon l'axe de forte inertie yy	48
3.2.5.2	Caractéristiques géométriques Selon l'axe de faible inertie zz.....	49
4.	Détermination des courbes d'interactions pour des sections à une combinaison de compression et de flexion (N-M)	49
4. 1	Programme de calcul	50
4. 1.1	Organigramme A	50
4. 1.2	Organigramme B	53
4.2	Les résultats graphiques du programme	58
4.2.1	Les résultats graphiques du premier cas	58
4.2.2	Les résultats graphiques du deuxième cas	60
4.2.3	Les résultats graphiques du troisième cas	62
4.2.4	Les résultats graphiques du quatrième cas	64
4.2.5	Les résultats graphiques du Cinquième cas	66
5.	Conclusion	68

5. LES ABAQUES ET LES EQUATIONS APPROCHEES

1.	Introduction	69
2.	Détermination de la résistance plastique à la compression d'une section transversale mixte ($N_{pl Rd}$)	69
3.	Détermination de la résistance plastique à la flexion d'une section transversale mixte ($M_{pl Rd}$)	70
3.1	Selon l'axe de forte inertie yy	70
3.1.1	Axe neutre dans l'âme	70
3.1.2	Axe neutre dans la semelle	71
3.1.3	Axe neutre hors de la section en acier	71
3.2	Selon l'axe de faible inertie zz	72
3.2.1	Axe neutre dans l'âme	72
3.2.2	Axe neutre dans la semelle	72
3.2.3	Axe neutre hors de la section en acier	73
4.	Les courbes d'interactions inversées N—M	73
4.1	Le premier cas	75
4.2	Le deuxième cas	77
4.3	Le troisième cas	79
4.4	Le quatrième cas	81
4.5	Le cinquième cas	83
5.	Valeurs des points caractéristiques	85
6.	La première approche	85
6.1	Déterminations des coefficients	85

6.1.1 Le premier cas	85
6.1.2 Le deuxième cas	86
6.1.3 Le troisième cas	87
6.1.4 Le quatrième cas	87
6.1.5 Le cinquième cas	88
6.2 Les équations générales	89
6.2.1 Le premier cas	89
6.2.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy	89
6.2.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz	89
6.2.2 Le deuxième cas	89
6.2.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy	89
6.2.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz	90
6.2.3 Le troisième cas	90
6.2.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy	90
6.2.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz	90
6.2.4 Le quatrième cas	90
6.2.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy	90
6.2.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz	91
6.2.5 Le cinquième cas	91
6.2.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy	91
6.2.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz	91
6.3 Les abaques	92
6.3.1 Le premier cas	92
6.3.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy	92
6.3.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz	93
6.3.2 Le deuxième cas	93
6.3.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy	93
6.3.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz	94
6.3.3 Le troisième cas	95
6.3.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy	95
6.3.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz	96
6.3.4 Le quatrième cas	97
6.3.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy	97
6.3.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz	98
6.3.5 Le cinquième cas	98
6.3.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy	98
6.3.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz	99
7. La deuxième approche	100
7.1 Déterminations des coefficients	100
7.1.1 Le premier cas	100
7.1.2 Le deuxième cas	101
7.1.3 Le troisième cas	101
7.1.4 Le quatrième cas	102
7.1.5 Le cinquième cas	102

7.2 Les équations générales	103
7.2.1 Le premier cas	103
7.2.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy	103
7.2.1.1.1 Le groupe 1	103
7.2.1.1.2 Le groupe 2	103
7.2.1.1.3 Le groupe 3	104
7.2.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz	104
7.2.1.2.1 Le groupe 1	104
7.2.1.2.2 Le groupe 2	104
7.2.1.2.3 Le groupe 3	104
7.2.2 Le deuxième cas	104
7.2.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy	104
7.2.2.1.1 Le groupe 1	104
7.2.2.1.2 Le groupe 2	105
7.2.2.1.3 Le groupe 3	105
7.2.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz	105
7.2.2.2.1 Le groupe 1	105
7.2.2.2.2 Le groupe 2	105
7.2.2.2.3 Le groupe 3	106
7.2.3 Le troisième cas	106
7.2.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy	106
7.2.3.1.1 Le groupe 1	106
7.2.3.1.2 Le groupe 2	106
7.2.3.1.3 Le groupe 3	106
7.2.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz	107
7.2.3.2.1 Le groupe 1	107
7.2.3.2.2 Le groupe 2	107
7.2.3.2.3 Le groupe 3	107
7.2.4 Le quatrième cas	107
7.2.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy	107
7.2.4.1.1 Le groupe 1	107
7.2.4.1.2 Le groupe 2	108
7.2.4.1.3 Le groupe 3	108
7.2.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz	108
7.2.4.2.1 Le groupe 1	108
7.2.4.2.2 Le groupe 2	108
7.2.4.2.3 Le groupe 3	108
7.2.5 Le cinquième cas	109
7.2.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy	109
7.2.5.1.1 Le groupe 1	109
7.2.5.1.2 Le groupe 2	109
7.2.5.1.3 Le groupe 3	19
7.2.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz	110
7.2.5.2.1 Le groupe 1	110

7.2.5.2.2 Le groupe 2	110
7.2.5.2.3 Le groupe 3	110
7.3 Les abaques	110
7.3.1 Le premier cas	110
7.3.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy	110
7.3.1.1.1 Le groupe 1	110
7.3.1.1.2 Le groupe 2	111
7.3.1.1.3 Le groupe 3	111
7.3.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz	112
7.3.1.2.1 Le groupe 1	112
7.3.1.2.2 Le groupe 2	112
7.3.1.2.3 Le groupe 3	112
7.3.2 Le deuxième cas	113
7.3.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy	113
7.3.2.1.1 Le groupe 1	113
7.3.2.1.2 Le groupe 2	113
7.3.2.1.3 Le groupe 3	114
7.3.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz	114
7.3.2.2.1 Le groupe 1	114
7.3.2.2.2 Le groupe 2	115
7.3.2.2.3 Le groupe 3	115
7.3.3 Le troisième cas	116
7.3.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy	116
7.3.3.1.1 Le groupe 1	116
7.3.3.1.2 Le groupe 2	116
7.3.3.1.3 Le groupe 3	117
7.3.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz	117
7.3.3.2.1 Le groupe 1	117
7.3.3.2.2 Le groupe 2	118
7.3.3.2.3 Le groupe 3	118
7.3.4 Le quatrième cas	118
7.3.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy	118
7.3.4.1.1 Le groupe 1	118
7.3.4.1.2 Le groupe 2	119
7.3.4.1.3 Le groupe 3	119
7.3.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz	120
7.3.4.2.1 Le groupe 1	120
7.3.4.2.2 Le groupe 2	120
7.3.4.2.3 Le groupe 3	121
7.3.5 Le cinquième cas	121
7.3.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy	121
7.3.5.1.1 Le groupe 1	121
7.3.5.1.2 Le groupe 2	122
7.3.5.1.3 Le groupe 3	122

7.3.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz	123
7.3.5.2.1 Le groupe 1	123
7.3.5.2.2 Le groupe 2	123
7.3.5.2.3 Le groupe 3	123
8. Exemple d'application	125
9. Conclusion	132
Conclusion générale	133
ANNEXES.....	136

PROBLEMATIQUE :

Le calcul des poteaux mixtes acier béton soumis à la flexion composée uni axiale et bi axiale avec un effort normal de compression tel que présenté par l'Eurocode 4 se base sur la détermination graphique des courbes d'interactions qui elles même dépendent de plusieurs facteurs géométriques et mécaniques tel que :

- type de section mixte ;
- disposition des matériaux de la section ;
- caractéristiques mécaniques des matériaux.

Pour vérifier la résistance d'une section mixte soumise à un effort de compression et deux moments fléchissant selon EC4, il faut déterminer les deux courbes d'interactions par rapport aux deux axes centraux principaux. Ceci rend la procédure de calcul et la vérification de résistance très longues dans le temps et ne permet pas d'automatiser les calculs.

Le but principal de ce travail est de proposer des abaques et des modèles d'équations approchées des courbes d'interactions pour les sections IPE totalement enrobées de béton avec des différentes conditions d'enrobage et un ferrailage minimum pour permettre un calcul rapide et automatisable des poteaux mixtes totalement enrobés.

Pour atteindre l'objectif tracé ce travail a été réalisé en 05 chapitres :

- Le 1^{er} chapitre : consiste à faire une introduction générale.
- Le 2^{ème} chapitre : a été consacré à une étude de la flexion composée.
- Le 3^{ème} chapitre : qui a été consacré à la présentation de la méthode simplifiée de calcul de résistance des poteaux mixtes proposée par l'EC4.
- Le 4^{ème} chapitre : a été consacré à la détermination des diagrammes d'interactions pour les poteaux mixtes acier béton soumises à la compression excentrée bi axiale selon les deux axes centraux principaux ,tel que présenté par Eurocode 4 avec un programme de calcul en EXCEL 2007.
- Le 5^{ème} chapitre : a été consacré à proposer des abaques et des modèles d'équations approchées des courbes d'interactions pour les sections IPE totalement enrobées de béton avec des différentes conditions d'enrobage et un ferrailage minimum.

On terminera le travail par une conclusion générale.

I. INTRODUCTION GENERALE

1. Introduction :

D'une manière générale un élément structural en construction peut être défini comme mixte s'il associe deux matériaux de nature et de propriétés différentes avec l'objectif de tirer le meilleur parti possible de cette association au plan mécanique [1].

La combinaison la plus importante et la plus fréquente de matériaux de construction que l'on rencontre est celle qui concerne l'acier et le béton avec des applications dans les bâtiments commerciaux à étages multiples, les usines et les ponts. Dans les systèmes structuraux, l'acier et le béton peuvent être utilisés d'une manière composée, par exemple des noyaux de béton entourés par des profils creux en acier [1].

Ces deux matériaux, essentiellement différents, sont complètement compatibles et complémentaires vis à vis l'un de l'autre. Ils ont le même coefficient de dilatation thermique et forment une combinaison idéale pour la résistance, le béton résistant de manière efficace à la compression et l'acier à la traction. Le béton assure également une protection contre la corrosion et une isolation thermique de l'acier à température élevée, en plus il peut raidir les sections élancées en acier vis à vis du flambement et du déversement [1].

2. Avantages et inconvénients de la construction mixte :

2.1 Les avantages :

Les constructions mixtes présentent plusieurs avantages selon les différents aspects:

2.1.1 Aspects architecturaux :

Les constructions mixtes permettent de :

- Réduire les dimensions des poutres ;
- Des portées plus longues ;
- Des dalles plus minces ;
- Des poteaux plus élancés ;
- Une grande flexibilité et de nombreuses possibilités lors de la conception.

2.1.2 Aspects économiques :

L'intérêt économique des constructions mixtes est :

- Hauteur diminue économies sur la hauteur totale. celui-ci peut présenter plus d'étages portées augmentent avec même hauteur moins de colonne ;
- Temps de construction plus court ;
- Economie en personnel et matériel ;
- Cout de financement plus faible ;
- Prêt à l'emploi plus rapidement et donc revenu d'utilisation plus élevé.

2.1.3 Fonctionnalité :

Les constructions mixtes peuvent présenter une résistance au feu en utilisant les principes des constructions en béton armé dans lesquelles le béton protège l'acier grâce à sa masse élevée et sa conductivité thermique relativement faible.

2.1.4 Equipements et utilisation flexible de la construction :

- Structure adaptable ;
- Modification pendant la vie du bâtiment ;
- Modification des équipements sans perturber tous les occupants ;
- Placement des équipements dans les faux plafonds et entre les semelles de la poutre mixte.

2.1.5 Montage :

Les planchers mixtes sont maintenant la solution privilégiée pour une grande variété de structures car ils offrent aux concepteurs et aux clients les avantages suivants:

Plate-forme de travail:

Avant le bétonnage, la tôle profilée constitue une plate-forme de travail sûre et qui permet d'accélérer le processus de construction d'autres éléments.

Coffrage permanent:

La tôle profilée porte de poutre à poutre et sert de coffrage permanent au béton tel que généralement des étais provisoires ne sont pas nécessaires. La tôle profilée est également une barrière efficace à la vapeur.

La retombée de la poutre reste propre après le bétonnage et l'utilisation de tôles peintes peut donner un bon aspect au plafond mais la peinture peut causer des difficultés en cas de soudage des goujons à travers la tôle.

Armatures:

La section d'acier du profilé métallique est généralement suffisante pour résister, en tant qu'armature, au moment de flexion positif. Des armatures supplémentaires peuvent être présentes dans la dalle pour résister au retrait, aux mouvements dus à la température ou afin d'assurer une continuité aux appuis (moment négatifs). L'action mixte est obtenue grâce à la forme du profil ou à l'aide de moyens mécaniques tel que des indentations ou un bossage de la tôle profilée.

Vitesse et simplicité de construction :

Les tôles profilées combinant une rigidité élevée et un faible poids rendent aisé le transport et le stockage du matériel sur chantier. Un camion est souvent capable de transporter jusqu'à 1500m² de plancher. Une équipe de quatre hommes peut installer 400m² de plancher par jour. Les panneaux sont légers et sont des éléments préfabriqués qui peuvent être aisément transportés et installés par deux ou trois hommes.

Produits à la qualité contrôlée:

Les éléments métalliques des structures mixtes sont fabriqués et contrôlés en usine. Cela permet l'établissement de procédures de qualités strictes qui diminuent l'incertitude liée au travail sur chantier. Le résultat en est une précision de construction plus élevée.

2.2 Les inconvénients :

- La nécessité de la connexion au niveau de l'interface ce qui augmente le temps d'exécution et des dépenses (inconvenient principal) ;
- La difficulté de réaliser des assemblages lorsque l'élément mixte est complètement enrobé (exemple semelle de la poutre enrobée) ;
- Une méthode de construction légèrement plus compliquée par rapport aux méthodes traditionnelles et demande une main d'œuvre plus qualifiée ;

3. Les poteaux mixtes :

Ce sont des éléments porteurs verticaux composés essentiellement d'un profilé métallique et du béton armé ou non [2].

La capacité portante des poteaux mixtes est largement dominée par la partie métallique de ceux-ci.

3.1 Les différents types de poteaux mixtes :

On distingue deux principaux types de classement pour les poteaux mixtes :

3.1.1 Classement 01 :

Ce classement est basé sur le type de la section d'acier, eton distingue deux types :

- **Les poteaux partiellement ou totalement enrobés de béton** :pour les poteaux totalement enrobés, les semelles et âme des profilés les constituants sont enrobés d'une couche de béton. Par contre, pour les poteaux partiellement seulement l'espace entre semelles qui sont rempli de béton.
- **Les poteaux en profilés creux remplis de béton** : peuvent être de section circulaire, carrée ou rectangulaire.

L'ensemble des types de poteaux mixtes utilisés pratiquement est représenté à la Figure 1-1, tandis que la Figure 1-2 en présente une application :

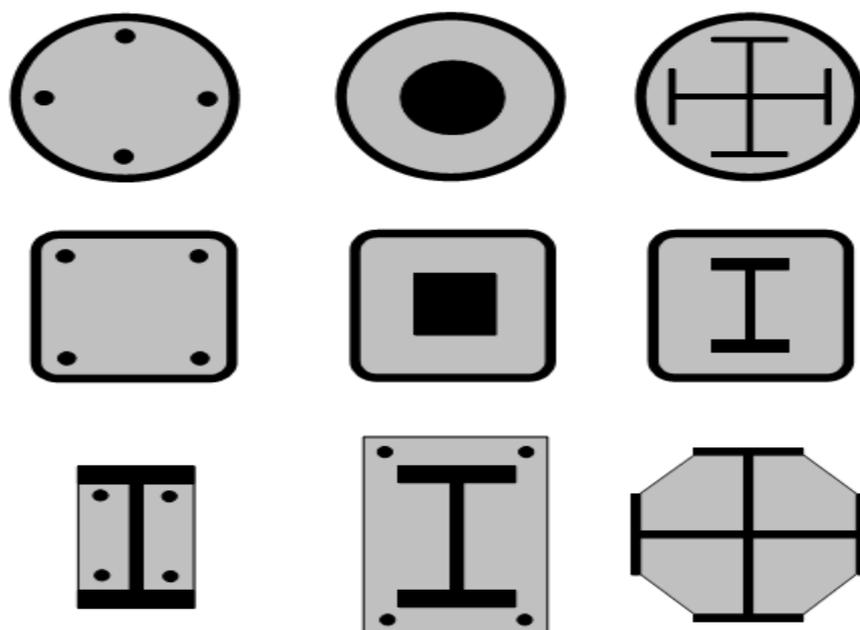


Figure 1-1 : Exemples de poteaux mixtes [2].



Profilé partiellement enrobé



Profil creux rempli de béton

Figure 1-2 : Exemples des poteaux mixtes sur chantier [3].

3.1.2 Classement 02 :

Ce classement est basé sur la catégorie du poteau mixte, et on distingue deux types :

- **Poteaux courts :** La résistance d'un poteau mixte court est régie par sa résistance de section, qui est la capacité de la section transversale de résister aux charges et aux moments axiaux appliqués, et est basée purement sur la résistance caractéristique des matériaux à savoir la résistance à la compression du béton et limite d'élasticité de l'acier. Les poteaux mixtes courts atteignent habituellement la résistance de la section, de sorte que la rupture soit régie par la résistance du matériau [4].

- **Poteaux élancés :** La résistance d'un poteau élancé est régie par ce qui peut se nommer résistance de l'élément reflétant le fait que la résistance de charge dépend non seulement des propriétés du matériau, mais également des propriétés géométriques de l'élément entier à savoir longueur et rigidité flexionnelle. dans ce cas non seulement les propriétés non-linéaires des matériaux qui doivent être prises en considération mais également les effets géométriques, tel l'élancement, qui cause des excentricités additionnelles de charge, produit par le flambement qui se produit pendant le chargement [4].

On peut donc en conclure que si la résistance de charge est sensiblement réduite par les moments du second ordre, provoqués par le flambement du poteau, ce dernier est classifié comme élancé; autrement il est classifié comme court [4].

3.2 Avantage des poteaux mixtes [5]:

Les poteaux mixtes présentent de nombreux avantages :

- Une section transversale de faibles dimensions extérieures peut reprendre des charges très élevées ;
- L'acier sert aussi de coffrage perdu ;
- Gain de temps et de coût appréciable lors du montage ;
- Résistances plus élevées ;
- L'acier, en confinant le béton, assure un rôle de fretage qui provoque une augmentation de la charge portante globale ;
- Satisfaire aux exigences relatives à la plus haute classe de protection contre l'incendie sans exiger de mesures complémentaires ;
- Dans les sections partiellement enrobées, le fait qu'après bétonnage, des faces d'acier restent apparentes et peuvent être utilisées pour réaliser l'assemblage des poutres.

3.3 Comportement du béton dans les poteaux mixtes :

La présence du béton entre les ailes et à l'intérieur des poteaux mixtes donne lieu à un comportement complexe entre l'acier et le béton. En effet, la présence de l'acier tend à confiner le béton en l'empêchant de se dilater transversalement lors de l'application du chargement. Par contre, ce même phénomène induit dans l'acier des efforts transversaux supplémentaires a ceux causés par le chargement axial, ce qui a pour effet de réduire la résistance aux charges axiales[6]. .

3.4 Comportement de l'acier dans les poteaux mixtes :

La ruine d'un poteau d'acier peut survenir selon trois types de mécanisme de rupture. Ces trois mécanismes sont le flambement du poteau, le voilement des sections minces et la plastification totale de la section. Les deux premiers mécanismes représentent respectivement un comportement global et local du poteau. Le troisième mécanisme n'est obtenu que pour des poteaux courts et trapus [6].

3.4.1 Flambement du poteau :

Le flambement est un phénomène global qui apparaît sur l'ensemble du poteau et non à un endroit localisé comme le voilement. Il est caractérisé par un déplacement hors plan de l'ensemble de la section. Il est influencé par les caractéristiques globales du poteau telles que la rigidité de la section, la hauteur et les conditions de retenue aux appuis.

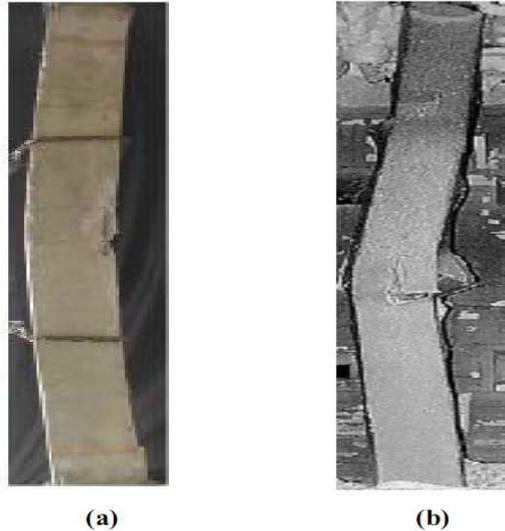


Figure1-3 : Flambement des poteaux mixtes : (a)- Profil d'acier enrobé de béton
(b)-Profil creux rempli de béton[7,8].

4. Caractéristiques des matériaux :

4-1 Le béton :

Le béton est un matériau composite aggloméré, constitué de granulats durs de diverses dimensions collés entre eux par un liant. Les composants sont très différents: leurs masses volumiques vont, dans les bétons courants de 1 pour l'eau à plus de 3 pour le ciment (en t/m³). Si le type de liant utilisé n'est pas un ciment, on parle alors, soit de liant composé binaire, ternaire ou quaternaire [10].

En bref le béton est un:

Mélange d'agrégat (sable plus granulats) et de la pâte composée: de ciment, d'eau et d'adjuvant

- Pâte 30 à 40%
 - Ciment portland 7% à 15% par volume
 - Eau 14% à 21% par volume
- Agrégats 60% à 80%
 - Gros granulats
 - Granulats fins
- Adjuvants chimiques

4.1.1 Propriétés du béton :

Le béton possède deux comportements l'état frais et l'état durci. Parmi tous les constituants du béton, l'eau reste l'ingrédient qui peut nuire le plus même si c'est à grâce à l'eau que le béton peut être manipulé. Réduire son dosage permet:

- D'augmenter la résistance en compression et en flexion ;
- Réduire la perméabilité ;
- Réduire la contraction volumique (retrait de séchage) ;
- Moins de risques d'attaques d'agents agressifs extérieurs.

La réduction d'eau rend par contre le béton moins plastique. Avec l'incorporation des adjuvants chimiques, cela devient possible.

4.1.1.1 Caractéristiques du béton frais :

La caractéristique essentielle du béton frais est l'ouvrabilité (maniabilité), qui conditionne non seulement sa mise en place pour le remplissage parfait du coffrage et du ferrailage, mais également ses performances à l'état durci. Un béton frais doit être facilement maniable et facile à mettre en place. Il doit être aussi homogène et cohésif. Pour remplir toutes ses qualités, les constituants du béton doivent être soigneusement mélangés. Il existe plusieurs facteurs qui affectent la maniabilité d'un béton[10]:

- Méthode et durée de transport ;
- Quantité et caractéristiques des composants (liants, granulats) ;
- Forme, granulométrie et type de granulats ;
- Le volume d'air ;
- Le dosage en eau .

Il existe un très grand nombre d'essais de mesure de l'ouvrabilité du béton reposant sur des principes différents. Certains mesurent une compacité, d'autres un temps d'écoulement[10] :

- Affaissement au cône d'Abrams ;
- Étalement des bétons autoplaçants ;
- Masse Volumique et teneur en air ;

4.1.1.2 Caractéristiques du béton durci :

Le béton est un matériau travaillant bien en compression, dont la connaissance de ses propriétés mécaniques est indispensable pour le calcul du dimensionnement des ouvrages. Assez souvent, beaucoup de professionnels du béton considèrent que la caractéristique essentielle du béton durci est sa résistance mécanique en compression à un âge donné (28 jours). Sa résistance à la traction ainsi que celle en flexion sont beaucoup plus faibles que sa résistance à la compression. De nos jours, il est aussi important de se soucier des autres caractéristiques telles que la perméabilité, la porosité.

Pour maximiser les performances du béton, on doit lui assurer un murissement adéquat.

A- Résistance a la compression :

La compression est le mode usuel de chargement du béton de par la bonne résistance de ce matériau à ce type de sollicitation par rapport à sa résistance à la traction. La résistance (contrainte) maximale en compression du béton, f_c , donnée en MPa est par conséquent une des propriétés les plus importantes. L'évaluation de la résistance à la compression est réalisée sur le béton à 28 jours d'âge afin de vérifier la qualité du béton produit. La résistance du béton en compression est une propriété qui continue d'augmenter plusieurs années après la production du béton. Le choix de réaliser le test à 28 jours d'âge n'est que purement normatif. La contrainte maximale en compression est évaluée par un test de compression uni axial sur une éprouvette cylindrique de longueur L et de diamètre φ (en général $L=320$ mm et $\varphi=160$ mm) .

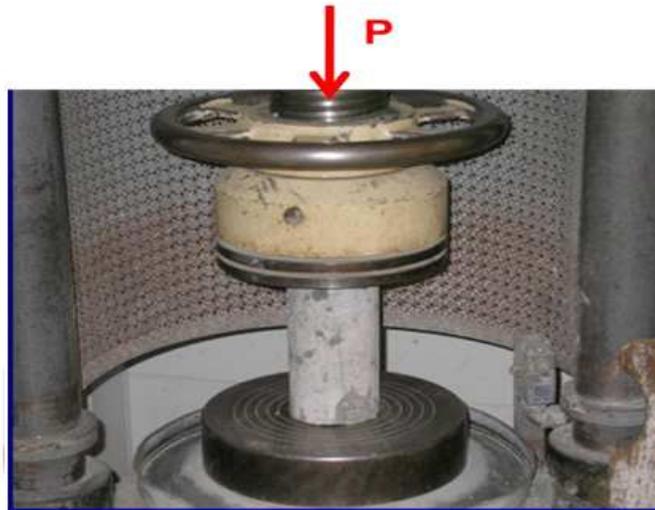


Figure 1-4 :Essai de compression [9].

B. La résistance en traction du béton :

Elle est comprise entre 8 et 12% fois la résistance en compression. Elle est estimée à environ $0,4\sqrt{f_c}$ à $0,7\sqrt{f_c}$.

C. La résistance en flexion du béton :

On établit souvent approximativement la résistance en flexion d'un béton de masse volumique normale entre $0,7\sqrt{f_c}$ et $0,8\sqrt{f_c}$.

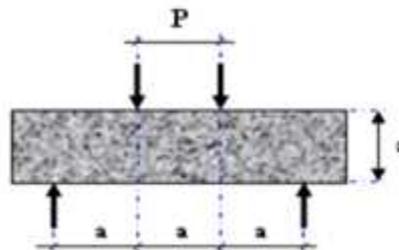


Figure 1-5 : essai de traction par flexion [9].

4-2 Aciers d'armatures :

L'acier présente une très bonne résistance à la traction, et une bonne résistance à la compression dans le cas d'élançements faibles. Si aucune précaution n'est prise il peut subir des effets de corrosion. C'est un matériau très ductile, qui attend des déformations très importantes avant rupture (de l'ordre de la dizaine de %).

4-2.1 Caractéristiques mécaniques :

Pour les aciers couverts par l'Eurocode 4, on doit distinguer :

- Selon leurs caractéristiques de surface :
 - a) Barres et fils lisses (y compris treillis soudés).
 - b) Barres et fils verrous (nervure) (y compris treillis soudés) conférant une haute adhérence [Le terme verrou (nervure) désigne un relief transversal sur les barres des armatures].

Pour la nuance d'acier qu'indique la valeur de la limite d'élasticité caractéristique f_{yk} en N/mm² (MPa) correspondant à un allongement permanent de 0.2%. La norme européenne EN10080 3 définit trois nuances d'acier d'armature S220, S400 et S500. La nuance S220 concerne les ronds lisses laminés à chaud, alors que la nuance S400 et S500 concernent les barres et les fils à verrous (y compris treillis soudés) conférant une haute adhérence.

Dans le calcul plastique on utilise essentiellement les nuances S400 et S550 pour satisfaire à l'exigence de « haute ductilité » conformément à l'Eurocode 3 (clause 3.2.4.2) :

$$\varepsilon_{sk}^{\mu} > 5 \%$$

Et

$$\frac{f_s^u}{f_{sk}} > 1,08$$

$f_s^{(u)}$: Résistance ultime caractéristique de l'acier.

$\varepsilon_{sk}^{(u)}$: L'allongement unitaire correspondant à l'atteinte de la résistance $f_s^{(u)}$.

Pour plus de simplicité, la valeur du module d'élasticité longitudinale E_s est prise égale à la valeur indiquée dans l'EC3 pour l'acier de construction, c'est-à-dire 210 KN/mm².

Pour le calcul des structures mixtes, le diagramme contrainte-déformation peut, par simplicité, ne comporter que deux branches :

- Une première branche, partant de l'origine avec une pente égale à E_s jusqu'à f_{sk} (ou f_{sk}/γ_s)
- Une deuxième branche horizontale.

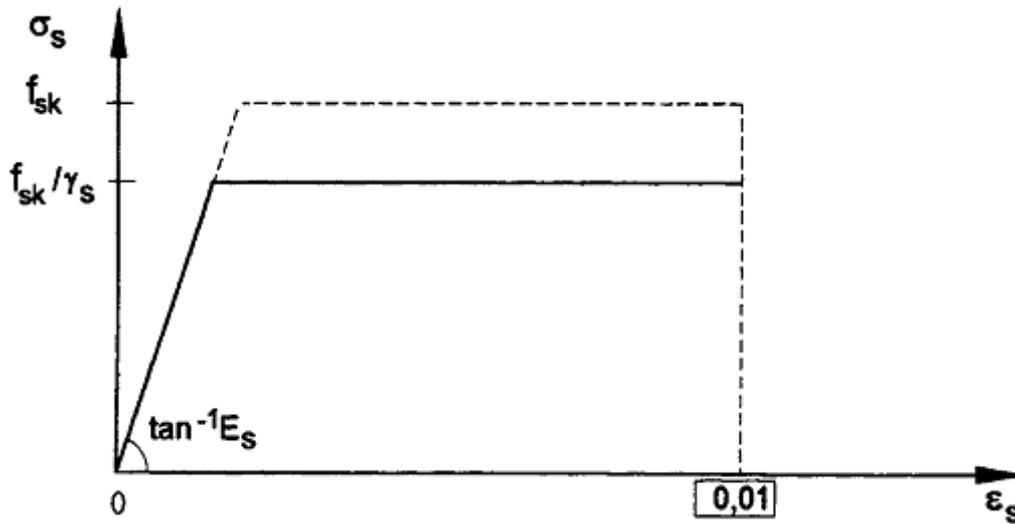


Figure 1-6 : Diagramme contrainte-déformation [11].

4-3 Acier de construction :

L'acier est un matériau constitué essentiellement de fer et d'un peu de carbone qui détermine la nuance d'acier (le pourcentage du carbone est généralement inférieur à 1%).

Il existe plusieurs types de classification des aciers basée soit sur leur composition chimique, soit sur leurs caractéristiques mécaniques. La classification couramment utilisée en construction métallique est la nuance d'acier qui est définie par sa limite d'élasticité f_y :

SIA161 (1989)	Nuance d'acier selon EN (1992)	Limite d'élasticité f_y (N/mm ²)	Allongement de rupture ϵ_r (%)	Désignations ou utilisations
Fe E235	S235	235	26	Acier doux
Fe E275	S275	275	22	Acier pour profilés creux
Fe E355	S355	355	22	Acier à haute résistance
Fe E460	S460	460	17	Acier à grain fin

Tableau1-1: Caractéristiques des principaux aciers de construction [12].

5. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons montrés :

- Les principaux avantages qui résultent de l'interaction entre l'acier et le béton. Ces avantages sont une des principales raisons du développement de la construction mixte partout dans le monde.
- La connaissance des matériaux utilisés en construction mixte est nécessaire pour définir les caractéristiques mécaniques et intrinsèques de chaque matériau qui sont indispensables dans les phases de conception et de calcul.

II. LA FLEXION COMPOSEE

1. Introduction :

Aquelques exceptions la plupart des éléments structuraux sont soumis à l'action combinée d'un moment de flexion et d'une charge axiale de traction ou de compression, un élément structural soumis simultanément à flexion et compression axiale toutesdeux significatives est habituellement désigné sous le nom d'élément comprimé etfléchi ou poutre-colonne. Il mérite une attention particulière. En effet, chacune dessollicitations est susceptible d'entraîner un phénomène d'instabilité, leur coexistencene peut donc que rendre plus complexe la réponse structurale d'un tel élément [13].

2. Définition de la flexion composée:

– Définition 1 :

On dit qu'un élément de structure est sollicité en flexion composée lorsqu'il est soumis a la fois à un moment fléchissant M_t (M_{fy} ou M_{fz}) et un effort normal N passant par le centre de gravité de la section [14].

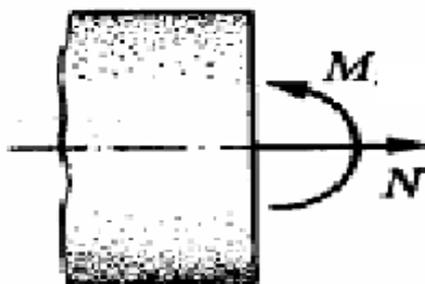


Figure 2-1 : Sollicitations d'un élémentsoumis a la flexion composée [14].

– Définition 2 :

Dans le cas d'un effort normal excentré N agissant sur une section a une distance e_y sur l'axe y ou e_z sur l'axe z , on peut le remplacer par un effort de compression équivalent N passant par le centre de gravité de la section plus un moment fléchissant $M_f = N \cdot e_{(y,z)}$ [14]

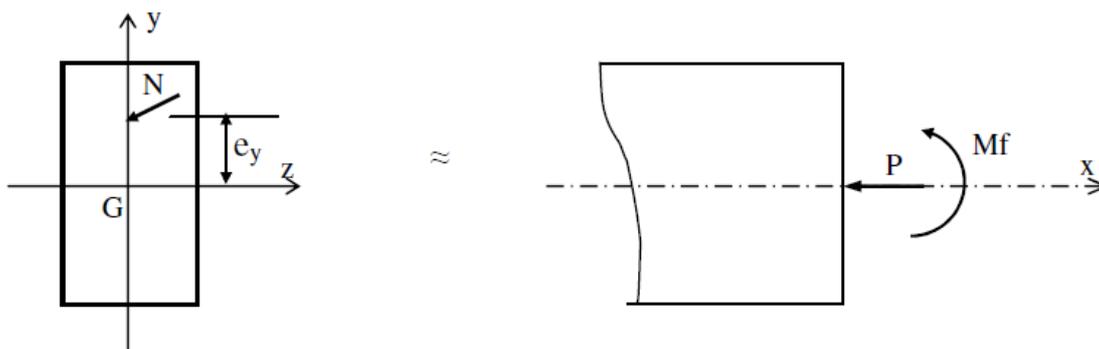


Figure 2-2 : Sollicitations d'un élémentsoumis a la flexion composée [14].

3. Flexion composée uni axiale :

Une flexion composée uni axiale est caractérisée par une action commune de la compression (ou traction) et de la flexion plane. Ce cas particulier de la flexion composée a lieu, si les charges extérieures sont appliquées dans l'un des plans de coordonnées. Ici, dans la section droite, il existe les efforts: N_x , T_y et M_z .

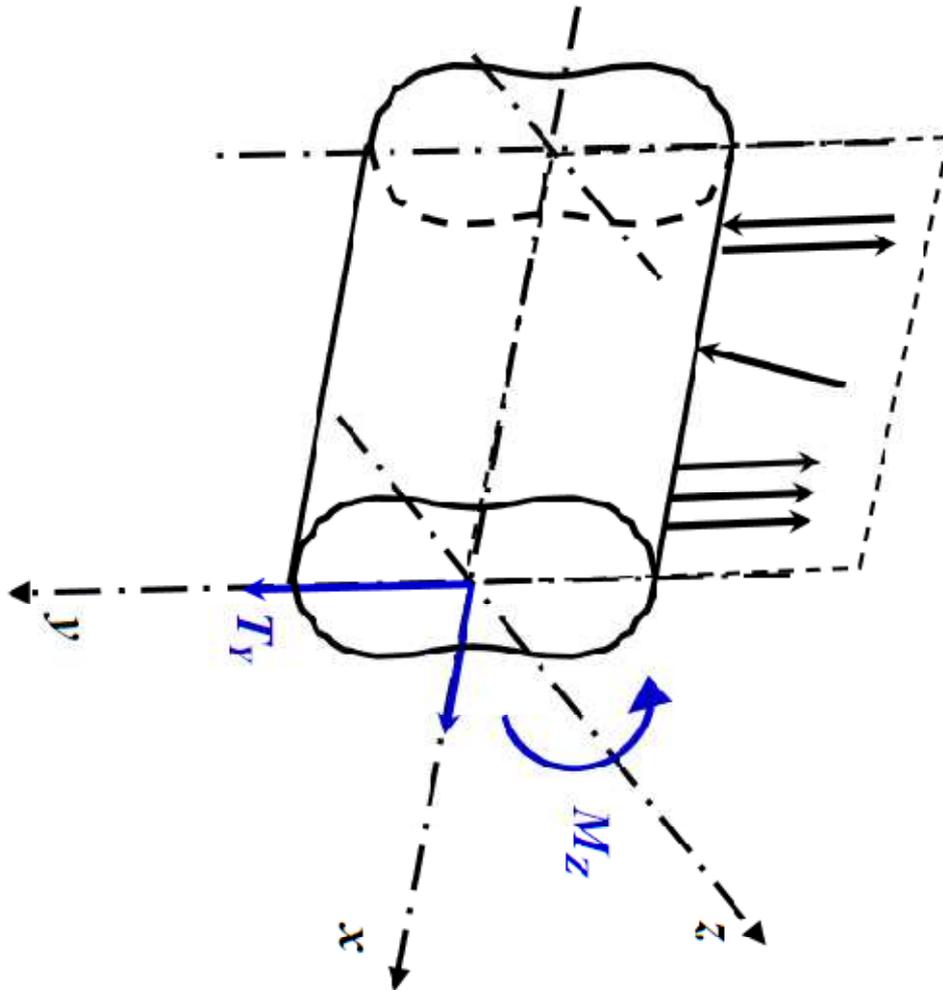


Figure 2-3 : Flexion composée uni axiale.

4. Flexion composée bi axiale :

Une section droite est dite sollicitée en flexion composée bi axiale si elle est soumise à une action commune de la compression (ou traction) et des flexions planes par rapport aux axes y et z . Donc, dans cette section droite, il existe les efforts N_x , T_y , M_z , T_z et M_y .

La flexion composée bi axiale peut être effectuée par un système de charges qui appartiennent aux plans passant par l'axe x ; c'est-à-dire que les charges peuvent être non perpendiculaires à l'axe x .

Soit une section de forme quelconque de matériau ductile et homogène soumise à un système de forces. On dit que cette section est soumise à une compression excentrée si et seulement si la direction (d-d) de la résultante N du système de forces ne coïncide pas avec la direction de l'axe longitudinal (Oz) de la Section (figure 2-5) [15] :

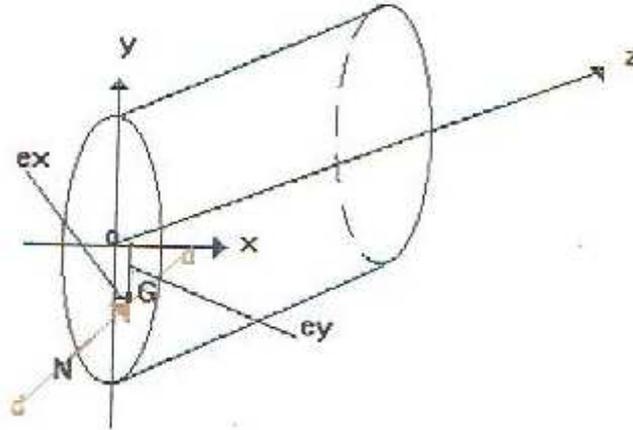


Figure 2-4: Section de forme quelconque soumise à la compression bi-axialement excentrée [15].

$$\mathbf{e} = \mathbf{OG} = \frac{\mathbf{M}}{N} \text{ avec } \mathbf{M} = N \cdot \mathbf{e}, \mathbf{e} = (e_x^2 + e_y^2)^{0,5} \dots\dots\dots(2-1)$$

Oz : Représente l'axe qui contient les centres de gravités de la section considérée.

G : Etant le point d'application de la force.

D'après le principe d'équilibre, on aura:

$$N = \int \sigma \cdot ds \dots\dots\dots(2-2)$$

$$M_x = N \cdot e_y = \int \sigma \cdot y \cdot ds \dots\dots\dots(2-3)$$

$$M_y = N \cdot e_x = \int \sigma \cdot x \cdot ds \dots\dots\dots(2-4)$$

Où :

S : Représente l'aire de la section.

σ : Contrainte se trouvant au point de coordonnées (x,y) dépendant de la loi de comportement du matériau.

4.1 Domaine élastique :

En particulier dans le domaine élastique on peut appliquer l'effet de superposition des charges et lorsque la section est homogène peut écrire cette σ sous la forme suivante:

$$\sigma = \frac{N}{S} + \frac{M_x \cdot y}{I_x} + \frac{M_y \cdot x}{I_y} \dots\dots\dots(2-5)$$

Avec:

$$M_x = N \cdot e_y$$

$$M_y = N \cdot e_x$$

Où :

M_x, M_y, x et y peuvent être positifs ou négatifs.

La contrainte peut s'écrire de manière suivante:

$$\sigma = N \left(\frac{1}{S} + \frac{e_y \cdot y}{I_x} + \frac{e_x \cdot x}{I_y} \right) \dots \dots \dots (2-6)$$

On remarque aussi qu'il existe une droite pour laquelle la valeur de σ est nulle, elle est appelée ligne neutre.

$$\sigma = 0 \dots \dots \dots (2-7)$$

donc :

$$\left(\frac{1}{S} + \frac{e_y \cdot y}{I_x} + \frac{e_x \cdot x}{I_y} \right) = 0 \dots \dots \dots (2-8)$$

d'où :

$$y = \left(-\frac{I_x}{S \cdot e_y} - \frac{e_x \cdot I_x}{I_y \cdot e_x} \cdot x \right) \dots \dots \dots (2-9)$$

Dont la pente est :

$$-\frac{e_x \cdot I_x}{I_y \cdot e_y} \dots \dots \dots (2-10)$$

Remarque :

- Si l'une des excentricités est nulle, la pente de la ligne neutre est nulle ou infinie de sorte que la ligne neutre se retrouve parallèle à l'un des axes principaux. On dit l'on est en présence d'un problème uni axial ou de flexion composée droite ;
- Si e_x et e_y sont toutes les deux différentes de zéro, nous sommes en présence d'un problème bi axial ou flexion composée déviée ;
- Pour chaque position de la résultante N , on a une ligne neutre propre et inversement à chaque ligne neutre correspond une résultante N de coordonnées propres.

4.2 Domaine élasto-plastique :

Lorsque l'effort normal augmente la distribution des contraintes dans la section évolue de la manière indiquée ci-dessous au départ d'un stade élastique la plastification se propage d'un côté à partir de la fibre où la limite élastique a été atteinte en premier lieu :

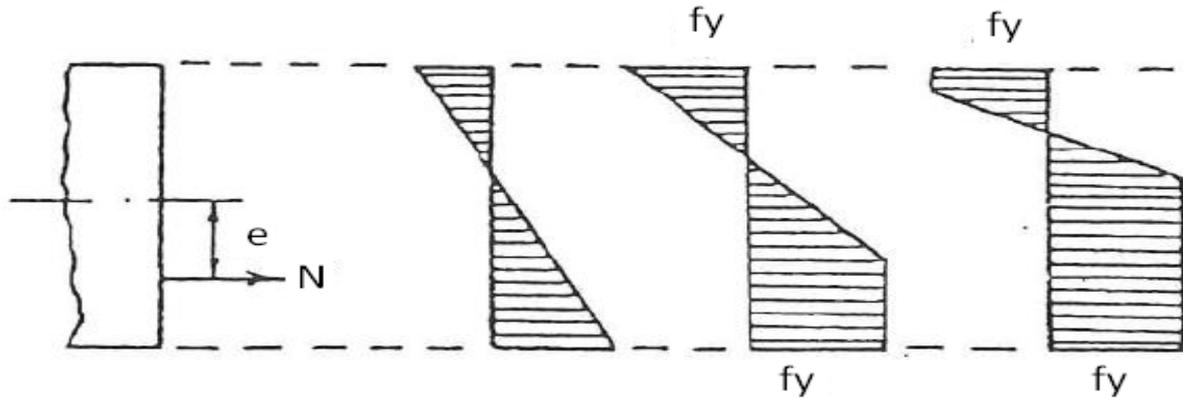


Figure 2-5: Evolution de la distribution des contraintes.

4.3 Domaine Plastique :

Les équations écrites précédemment ne sont valables que pour un matériau Homogène et ductile et travaillant dans le domaine élastique.

Pour un matériau travaillant au-delà de ce domaine élastique, l'écriture des équations est très complexe, parfois impossible, car elle dépend de la loi de comportement du matériau et de la géométrie de la section.

Comme exemple, l'état limite ultime d'une section en acier (matériau ductile) de forme rectangulaire sur la figure 2.5, soumise à la flexion composée uni axiale est déterminée de la manière suivante:

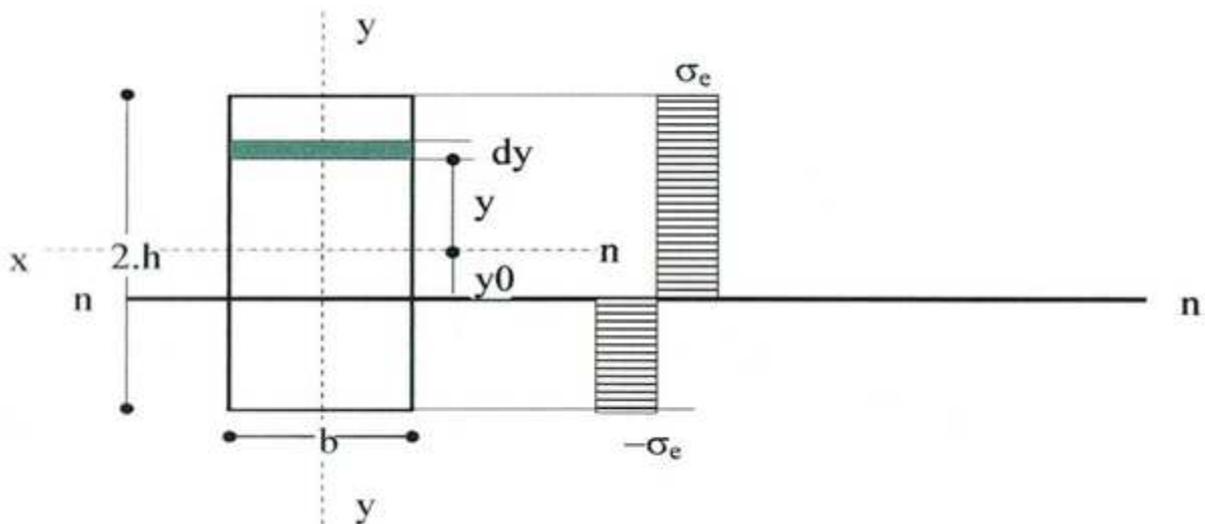


Figure 2-6: Etat limite ultime d'une section rectangulaire en acier soumise à la compression excentrée uni axialement [15].

$$N = \int (\pm \sigma_e) \cdot b \cdot dy = -2 * \sigma_e * b * y_0 \dots \dots \dots (2 - 11)$$

Soit :

$$N_p = 2 \cdot \sigma_e \cdot b \cdot h ;$$

N_p : Effort limite ultime centré.

$$\frac{N}{N_p} = \frac{y_0}{h} \dots \dots \dots (2 - 12)$$

$$M = \int (\pm \sigma_e) \cdot b \cdot y \cdot dy = \sigma_e \cdot b \cdot (h^2 - y_0^2) \dots \dots \dots (2 - 13)$$

soit :

$$M_p = \sigma_e \cdot b \cdot h^2 \dots \dots \dots (2 - 14)$$

M_p : Moment limite ultime en flexion simple (moment plastique).

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \left(\frac{y_0}{h}\right)^2 = 1 - \left(\frac{N}{N_p}\right)^2 \dots \dots \dots (2 - 15)$$

d'où :

$$\frac{M}{M_p} + \left(\frac{N}{N_p}\right)^2 = 1 \dots \dots \dots (2 - 16)$$

Cette équation représente l'état limite ultime en flexion composée simple d'une section rectangulaire.

Le problème se complique encore plus si l'axe neutre est oblique (figure 2.6).

La relation $N = f(M_x, M_y)$ n'est pas définie.

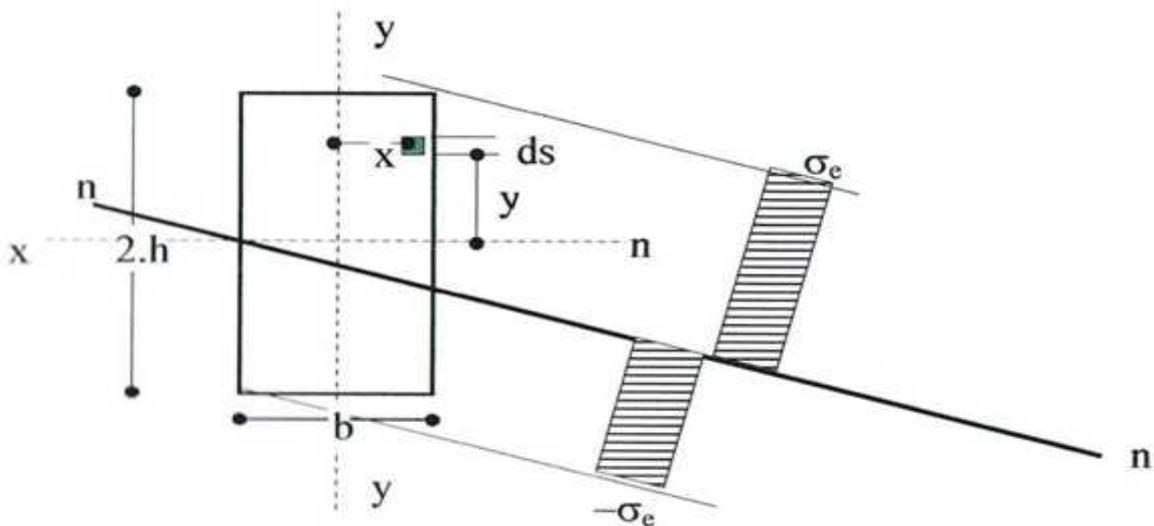


Figure 2-7: Etat limite ultime d'une section rectangulaire en acier soumise à la compression excentrée bi axialement [15].

$$N = \int (\pm \sigma_e) \cdot ds \dots \dots \dots (2 - 17)$$

$$M_x = \int (\pm \sigma_e) \cdot y \cdot ds \dots \dots \dots (2 - 18)$$

$$M_y = \int (\pm \sigma_e) \cdot x \cdot ds \dots \dots \dots (2 - 19)$$

Contrairement au domaine élastique, dans le domaine plastique il n'existe de relation générale pour la vérification de la résistance car celle-ci dépend de la géométrie de la section. La relation dans le cas de la flexion composée simple représente la courbe d'interaction elle est la frontière de l'état limite plastique.

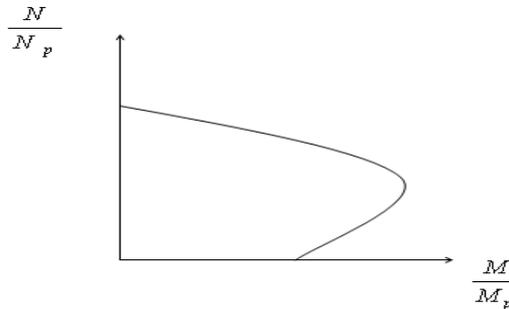


Figure 2-8: Courbe d'interaction.

4.4 Cas du béton armé :

Dans le béton armé, le problème est encore plus complexe : en plus des facteurs géométriques, il faut aussi tenir compte de deux lois de comportement dont celle du béton qui est un rectangle (figure 2.7). En plus, la section de calcul change de forme pour chaque position de l'axe neutre à cause de la fragilité du béton (béton tendu négligé).

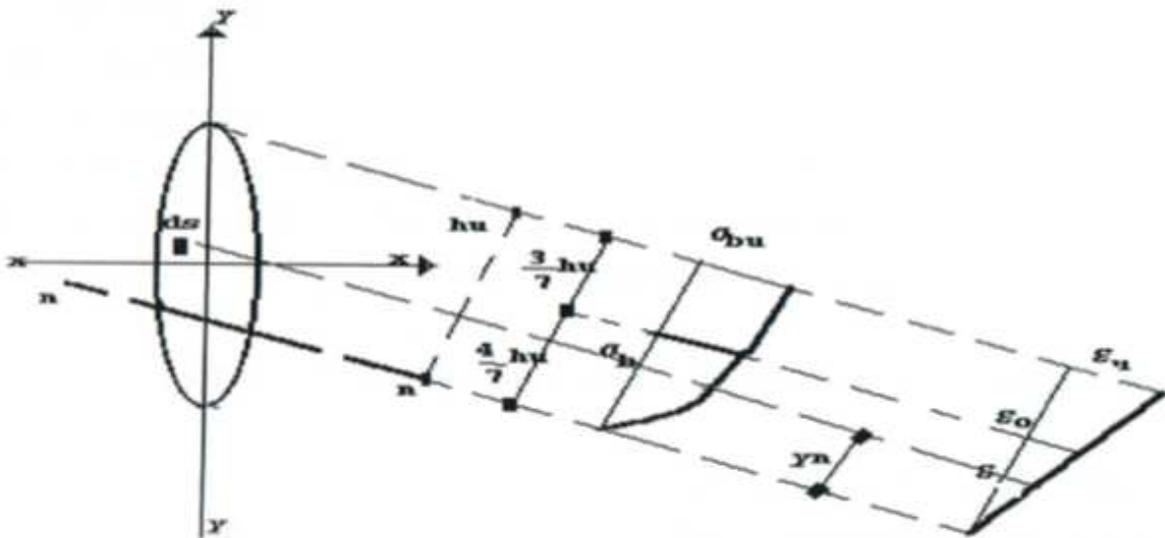


Figure 2-9: Section en béton armé [15].

$$N = \int (\pm \sigma_{bi}) \cdot ds + \sum A_{si} \cdot \sigma_{si} \dots \dots \dots (2 - 20)$$

$$M_x = \int (\pm \sigma_{bi}) \cdot y \cdot ds + \sum A_{si} \cdot \sigma_{si} \cdot y_{si} \dots \dots \dots (2 - 21)$$

$$M_y = \int (\pm \sigma_{bi}) \cdot x \cdot ds + \sum A_{si} \cdot \sigma_{si} \cdot x_{si} \dots \dots \dots (2 - 22)$$

Pour résoudre le problème, il faut tout d'abord trouver les valeurs de N , M_x et M_y pour toute position de l'axe neutre et pour toute variation du pourcentage d'acier et par la suite chercher une relation qui lie les trois efforts.

4.5 Cas d'une section mixte :

Dans le cas d'une section mixte, il faut tenir compte des trois lois de comportement (béton, acier, charpente métallique):

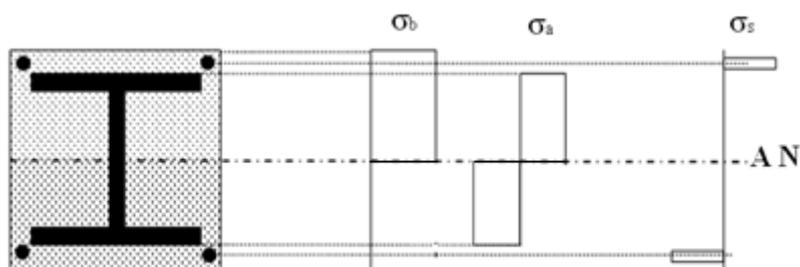


Figure 2-10: Section mixte.

$$N = \int (\pm \sigma_{bi}) \cdot ds + \sum A_{si} \cdot \sigma_{si} + \int (\pm \sigma_{ai}) \cdot da \dots \dots \dots (2-23)$$

$$M_x = \int (\pm \sigma_{bi}) \cdot y \cdot ds + \sum A_{si} \cdot \sigma_{si} \cdot y_{si} + \int (\pm \sigma_{ai}) \cdot y \cdot da \dots \dots \dots (2-24)$$

$$M_y = \int (\pm \sigma_{bi}) \cdot x \cdot ds + \sum A_{si} \cdot \sigma_{si} \cdot x_{si} + \int (\pm \sigma_{ai}) \cdot x \cdot da \dots \dots \dots (2-25)$$

Pour résoudre le problème, il faut tout d'abord trouver les valeurs de N , M_x et M_y pour toute position de l'axe neutre et pour toute variation du pourcentage d'acier et pour chaque type de profilé et par la suite chercher une relation qui lie les trois efforts.

Remarque :

Dans le cas de la flexion composée (uni-axiale ou bi-axiale), les contraintes tangentielles peuvent influencer la résistance de la section. Ordinairement, τ_x est maximale au centre de gravité de la section où $\sigma \neq 0$.

III. LA METHODE DE L'EUROCODE 4

1. Introduction :

Dans les années soixante, un travail de recherche important fut entrepris pour déterminer la capacité portante de poteaux composés d'un profilé en acier enrobé de béton, les deux matériaux travaillant conjointement. Ces poteaux ne pouvaient être dimensionnés, ni suivant les règles utilisées en charpente métallique, ni suivant celles qui sont respectées dans le cas des structures en béton. Le résultat de ces recherches a été décrit dans de nombreuses publications et il est à la base de la rédaction de recommandations pour le calcul des poteaux mixtes.

Conjointement aux résultats de recherches ultérieures, ces recommandations ont largement influencé la rédaction de l'Eurocode 4, relatif aux constructions mixtes dans les bâtiments.

L'Eurocode 4 définit les règles générales à respecter lors du dimensionnement de poteaux mixtes. Cependant, si toutes les non-linéarités, aussi bien géométriques que physiques devaient être prises en compte, il faudrait absolument avoir recours à un ordinateur et utiliser des méthodes d'analyse numérique pour satisfaire aux impositions du code. C'est la raison pour laquelle l'Eurocode 4 propose aussi une méthode de dimensionnement simplifiée et plus pratique. C'est celle-ci qui fait l'objet du présent chapitre.

2. Méthodes de calcul :

Pour le dimensionnement des poteaux mixtes acier-béton, deux méthodes sont présentées dans le règlement Européen l'EC4.

Une Méthode Générale qui prend en compte les effets du second ordre et les imperfections, applicable aux sections de poteaux non symétriques ainsi qu'à des poteaux de section variable sur leur hauteur. Cette méthode nécessite l'utilisation d'outils de calcul numérique.

Une Méthode Simplifiée faisant aux courbes de flambement européennes des poteaux en acier qui tiennent implicitement compte des imperfections, applicable au calcul des poteaux mixtes présentant une section doublement symétrique et uniforme sur leur hauteur.

Ces deux méthodes sont basées sur les hypothèses classiques suivantes :

- Il y a une interaction complète entre la section en acier et la section de béton et ce, jusqu'à la ruine ;
- Les imperfections géométriques et structurales sont prises en compte dans le calcul ;
- Les sections droites restent planes lors de la déformation du poteau .

2.1 La méthode simplifiée :

L'application de la méthode Simplifiée est soumise à diverses restrictions :

- La section transversale du poteau est constante et présente une double symétrie sur toute la hauteur du poteau ;
- La contribution relative de la section en acier à la résistance de calcul de la section complète, à savoir $\delta = (A_a f_y / \gamma_a) / N_{pl,Rd}$, est compris entre 0,2 et 0,9 ;
- L'élançement réduit du poteau mixte ne doit pas dépasser la valeur 2,0 ;
- Pour les sections totalement enrobées, l'aire des armatures doit au moins être égale à 0,3% de l'aire de béton et les armatures présentent des épaisseurs d'enrobage de béton satisfaisant les conditions suivantes :

$$40 \text{ mm} < c_y < 0,4 b_c;$$

$$40 \text{ mm} < c_z < 0,3 h_c;$$

- Il convient que le rapport entre la hauteur h de la section et sa largeur se situe entre 0,2 et 5 ;
- L'aire de la section d'armature longitudinale à considérer dans les calculs ne doit pas dépasser 6% de l'aire de la section du béton.

3. Types de sections transversales pour les poteaux mixtes, avec leurs avantages :

La figure 3-1 donne des exemples typiques de sections transversales de poteaux mixtes, ainsi que la signification des symboles utilisés dans l'Eurocode 4. Ces sections peuvent être divisées en deux catégories :

- Profils remplis de béton où celui-ci est entièrement recouvert d'acier ;
- Profils partiellement ou totalement enrobés de béton ;

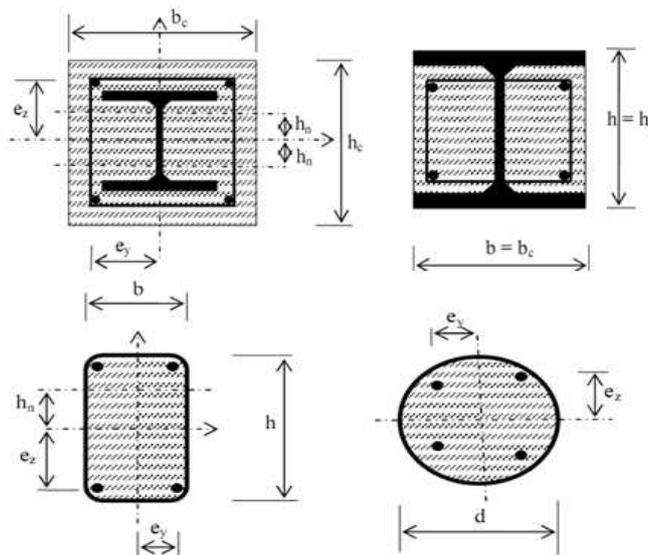


Figure 3-1:Exemples types de sections transversales de poteaux.

Toutes ces sections transversales présentent une double symétrie ; le béton est éventuellement armé.

Les poteaux mixtes présentent de nombreux avantages. Par exemple, une section transversale de faibles dimensions extérieures peut être conçue de manière pouvoir reprendre des charges très élevées et de la même manière, différentes sections transversales ayant les mêmes dimensions peuvent être destinées à reprendre des charges fort différentes ; il suffit de modifier les épaisseurs des éléments en acier, la résistance du béton et la quantité d'armatures. Ainsi, la section d'un poteau peut être maintenue constante sur plusieurs étages dans un bâtiment élevé, ce qui simplifie l'exécution des détails architecturaux. Une économie substantielle est réalisée grâce à l'emploi du béton (un matériau peu coûteux) et grâce à l'utilisation des techniques très élaborées pour la réalisation des assemblages dans le domaine de la construction métallique.

Dans le cas de profils remplis de béton, l'acier sert de coffrage ; ils offrent ainsi la possibilité de réaliser en premier lieu le montage de toute la charpente métallique d'un bâtiment. Il suffit ensuite de pomper du béton pour remplir les profilés, ce qui permet un gain de temps très appréciable lors du montage.

Cette section d'acier, protectrice, permet en outre au béton d'atteindre des résistances plus élevées. Dans le cas de tubes circulaires remplis de béton, par exemple, le frettage de l'acier provoque une augmentation de la charge portante globale. En outre, l'influence du fluage et de la relaxation du béton peut généralement être négligée, ce qui n'est pas le cas pour les profilés enrobés de béton.

L'enrobage complet d'une section d'acier permet généralement de satisfaire aux exigences relatives à la plus haute classe de protection contre l'incendie sans prendre de mesures complémentaires. Pour les profilés partiellement enrobés, aussi bien que pour les profils creux remplis de béton, ces prescriptions nécessitent un renforcement supplémentaire. Les profils partiellement enrobés présentent aussi l'avantage de servir de coffrage lorsqu'ils sont placés horizontalement. Le remplissage par le béton doit évidemment se faire en deux étapes ; le profil étant retourné 24 heures après le premier bétonnage.

4. Nuance et sécurité des matériaux :

Les aciers de construction définis dans l'Eurocode 3 ainsi que les bétons et les armatures admis par l'Eurocode 4 peuvent être utilisés pour la fabrication de poteaux mixtes.

La valeur de la résistance nominale des aciers de nuances habituelles est donnée au tableau 3-1. Ces valeurs ne sont valables que pour des épaisseurs ne dépassant pas 40 mm, sinon elles doivent être diminuées conformément aux directives de l'Eurocode 3.

Nuances d'acier	Fe 360	Fe 430	Fe 510
f_y (MPa)	235	275	355
E_a (GPa)	210	210	210

Tableau 3-1 : Valeur nominale de la limite d'élasticité f_y et du module d'élasticité des aciers courants de construction, donnés dans l'Eurocode 3, pour des épaisseurs ne dépassant pas 40 mm.

La résistance des bétons de différentes qualités définies dans l'Eurocode 2, est donnée au tableau 3-2. La classification C25/30 correspond aux résistances sur cylindre (25) et sur cube (30).

Qualités du béton	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{ck} (MPa)	20	25	30	35	40	45	50
E_{cm} (GPa)	29	30,5	32	33,5	35	36	37

Tableau 3-2 : Résistance caractéristique sur cylindre f_{ck} et valeur moyenne du module sécant E_{cm} données dans l'Eurocode 2 pour différentes qualités de béton [11].

L'Eurocode 2 admet les trois nuances d'armatures qui sont données au tableau 3-3 :

Nuances d'acier des armatures	S220	S420	S500
f_{sk} (MPa)	220	420	500
E_s (GPa)	200	200	200

Tableau 3-3 : Résistance caractéristique f_{sk} et module d'élasticité E_s des armatures admises dans l'Eurocode 2.

Dans les calculs, il faut considérer les résistances de calcul qui sont égales aux résistances caractéristiques divisées par le coefficient partiel de sécurité γ_M . Celui-ci est donné dans l'Eurocode 2 pour le béton et les armatures et dans l'Eurocode 3 pour l'acier. Dans ce dernier cas, il tient compte d'un coefficient partiel de sécurité γ_{RD} applicable aux éléments qui présentent un risque d'instabilité. Ce coefficient est également applicable aux poteaux mixtes mais uniquement en ce qui concerne leurs composants en acier.

Il faut toutefois préciser que dans les poteaux mixtes, il n'est pas nécessaire de vérifier si un phénomène d'instabilité ne peut se produire lorsque :

L'élançement réduit $\bar{\lambda}$ du poteau mixte ne doit pas dépasser la valeur 2,0.

L'effort normal dans le poteau est inférieur à 0,1 N_{cr}

Où: N_{cr} est donné par l'équation (3-10)

$\bar{\lambda}$ est donné par l'équation (3-9)

Pour tenir compte des effets à long terme du béton sur la charge portante du poteau, la résistance du béton est normalement multipliée par le facteur de réduction $\alpha=0,85$ conformément à l'Eurocode 2. Cette réduction n'est pas prise en considération pour

les tubes remplis de béton, car dans ce cas, le béton présente une résistance plus élevée parce qu'il est isolé de l'air extérieur et que son éclatement est empêché.

5. Ruine par flambement local :

A l'état limite ultime, il est supposé que tous les composants de la section supportent leur charge maximale. Toutefois, il faut s'assurer qu'aucune ruine prématurée ne peut se produire suite à l'apparition d'un phénomène d'instabilité dans un élément mince.

Pour éviter ce risque, il faut limiter le rapport entre la dimension de la paroi sur son épaisseur. Dans l'Eurocode 4, cette limite dépend de la valeur de $\varepsilon = \sqrt{235/f_y}$; elle est donnée au tableau 3-4 en fonction de différentes valeurs de la limite d'élasticité. Si la section satisfait à ces conditions, la résistance du poteau peut être déterminée en supposant une redistribution plastique des contraintes. Par contre, une redistribution des moments (en supposant la formation d'une rotule plastique) n'est pas permise, car il n'existe pas encore suffisamment de résultats d'essais pour connaître la capacité de rotation d'un poteau mixte.

Nuances d'acier	Fe 360	Fe 430	Fe 510
Tubes circulaires remplis de béton	90	77	60
Tubes de section rectangulaire remplis de béton	52	48	42
Profilés en I partiellement enrobés	44	41	36

Tableau 3-4 : Limites du rapport de la dimension de la paroi sur son épaisseur pour éviter le voilement local.

Pour les éléments d'acier complètement enrobés, il n'est pas nécessaire de vérifier le risque de voilement local. Les parties de dimensions importantes doivent être recouvertes par du béton ayant une épaisseur suffisante pour éviter son éclatement. La valeur minimale de cette épaisseur ne peut pas être inférieure à 40 mm et au 1/6 de la dimension de l'élément en acier :

$$40\text{mm} \leq C_z \leq b/6 \dots\dots\dots (3-1)$$

6. Résistance des sections transversales sous charges axiales :

La résistance plastique à la compression d'une section transversale mixte doit être calculée en additionnant les résistances plastiques de ses éléments constitutifs :

$$N_{pl,Rd} = A_a f_{yd} + A_c \alpha f_{cd} + A_s f_{sd} \dots\dots\dots (3-2)$$

Où : A_a , A_c et A_s représentent respectivement les aires de la section transversale de l'acier de construction, du béton et de l'armature.

f_{yd} , f_{cd} et f_{sd} représentent les résistances caractéristiques respectives de chaque matériau .

α : vaut 1,0 pour les profils creux remplis de béton et 0,85 dans les autres cas.
 La figure 3-2 montre la distribution des contraintes sur laquelle l'équation 3-2 est basée.

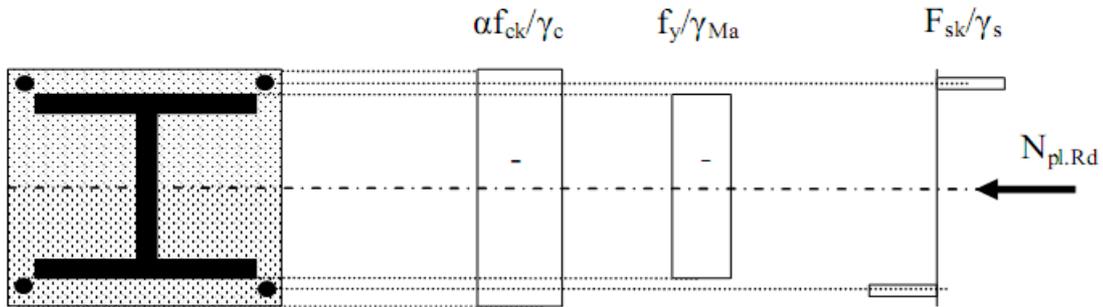


Figure 3-2 : Résistance à la compression $N_{pl.Rd}$ [16].

Pour les tubes remplis de béton de section transversale circulaire, on peut tenir compte de l'augmentation de la résistance du béton résultant du frettage. Cette résistance aux déformations transversales est due à une distribution tridimensionnelle des contraintes dans le béton, ce qui augmente sa résistance. Simultanément, les contraintes de traction circonférentielles dans le tube augmentent, ce qui réduit sa résistance aux contraintes longitudinales.

Cet effet ne peut être pris en considération que si l'élançement réduit est inférieur ou égale à 0,5. En outre, l'excentrement de l'effort normal « e » ne peut pas excéder la valeur $d/10$; d : étant le diamètre extérieur du tube.

L'excentrement « e » est défini par :

$$e = \frac{M_{sd}}{N_{sd}} \dots \dots \dots (3 - 3)$$

Où :

M_{sd} : Le moment fléchissant maximal dû aux charges axiales sans tenir compte des effets du second ordre ;

N_{sd} : L'effort normal de calcul.

La résistance plastique normale de ces sections transversales peut être calculée par :

$$N_{pl} = A_a \eta_2 f_{yd} + A_c f_{cd} \left[1 + \eta_1 \frac{t f_y}{d f_{ck}} \right] + A_s f_{sd} \dots \dots \dots (3 - 4)$$

Où :

t : Représente l'épaisseur de paroi du tube circulaire ;

$$\eta_1 = \eta_{10} \left(1 - \frac{10 e}{d} \right) \dots \dots \dots (3 - 5)$$

$$\eta_2 = \eta_{20} + (1 - \eta_{20}) \left(10 \frac{e}{d} \right) \dots \dots \dots (3 - 6)$$

Pour des excentremets de charge $e \leq d/10$, une interpolation linéaire peut être effectuée à partir des valeurs de référence η_{10} et η_{20} dépendant de l'élançement réduit $\bar{\lambda}$:

$$\eta_{10} = 4,9 - 18,5 \bar{\lambda} + 17 \bar{\lambda}^2 \quad \text{mais} \quad \eta_{10} \geq 0 \dots\dots\dots (3-7)$$

$$\eta_{20} = 0,25[3 + 2 \bar{\lambda}] \quad \text{mais} \quad \eta_{20} \leq 1,0 \dots\dots\dots (3-8)$$

Ces valeurs sont données au tableau 3-5, pour quelques valeurs de $\bar{\lambda}$:

$\bar{\lambda}$	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
η_{10}	4,90	3,22	1,88	0,88	0,22	0,00
η_{20}	0,70	0,80	0,85	0,90	0,95	1,00

Tableau 3-5 : Valeurs de référence η_{10} et η_{20} pour évaluer l'effet du frettage sur la résistance des tubes de section circulaire remplis de béton.

Si l'excentrement e est supérieur à $d/10$ ou si l'élançement relatif dépasse 0,5, on pose $\eta_1=0$ et $\eta_2=1$.

7. Elançement réduit et rigidités :

L'élançement réduit à prendre en considération pour déterminer la résistance en compression d'un poteau chargé axialement est donné par :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{cr}}} \dots\dots\dots (3-9)$$

Où :

$N_{pl,R}$: La résistance de la section transversale sous charge normale.

N_{cr} : La charge de flambement élastique du poteau.

$$N_{cr} = \frac{E I_e}{l_e^2} \pi^2 \dots\dots\dots (3-10)$$

Avec : $E I_e$ est la rigidité élastique de flexion ;

l_e : Longueur de flambement du poteau.

La longueur de flambement d'un poteau peut être déterminée suivant l'Eurocode 3. Pour des poteaux isolés dans des structures à nœuds fixes, la longueur de flambement est égale à la longueur du poteau.

La rigidité élastique de flexion est déterminée de la même manière que la résistance plastique sous charge normale, c'est-à-dire en additionnant les valeurs de chacun des composants :

$$(EI)_e = E_a I_a + 0,8 E_{cd} I_c + E_s I_s \dots \dots \dots (3 - 11)$$

Où :

I_a , I_c et I_s représentent les moments d'inertie de flexion respectivement de l'acier de construction, du béton (supposé non fissuré) et des armatures, pour le plan de flexion considéré.

E_a et E_s sont les modules d'élasticité de l'acier de construction et des armatures ; $0,8 E_{cd} I_c$ représente la rigidité réelle en flexion de la partie en béton ;

$$E_{cd} = E_{cm} / \gamma_c \dots \dots \dots (3 - 12)$$

Avec :

E_{cm} : Le module sécant du béton donné au tableau 3-2 de l'Eurocode 2.

Le coefficient partiel de sécurité relatif aux matériaux γ_c , peut être réduit à la valeur $\gamma_c = 1,35$, pour la détermination de la rigidité réelle en flexion, conformément à l'Eurocode 2.

Pour les poteaux élancés, l'influence du comportement à long terme du béton (fluage et retrait) sur la résistance en compression doit être prise en compte.

Si l'excentrement de l'effort normal, donné par l'équation 3-3, est supérieur à deux fois la dimension de la section transversale, l'influence du fluage et du retrait sur les effets du second ordre est si faible qu'elle peut être négligée. Ces effets peuvent donc être ignorés. Cette remarque est également valable lorsque l'élancement est inférieur aux limites données au tableau 3-6 :

	Structures à nœuds déplaçables contreventées	Structures à nœuds fixes contreventées
Profils enrobés de béton	0,8	0,5
Tubes remplis de béton	$\frac{0,8}{1 - \delta}$	$\frac{0,5}{1 - \delta}$

Tableau 3-6 : Valeurs limites de l'élancement réduit $\bar{\lambda}$ pour la prise en compte du fluage et du retrait du béton.

Si l'influence du fluage et du retrait doit être considérée, son effet est pris en compte de manière simple, en remplaçant le module d'élasticité du béton E_{cd} par $E_{c\infty}$ donné par :

$$E_{c\infty} = E_{cd} \left[1 - \frac{N_{G,sd}}{N_{sd}} \right] \dots \dots \dots (3 - 13)$$

Où :

N_{sd} : L'effort normal de calcul.

N_{GSd} : L'effort normal dû aux charges permanentes.

Il faut remarquer que pour déterminer l'influence du fluage et du retrait, à l'aide du tableau 3-6, il faut considérer la valeur suivante pour δ :

$$\delta = \frac{f_{yd} A_a}{N_{pl,Rd}} \dots\dots\dots (3 - 14)$$

Le coefficient δ représente la contribution de l'acier de construction à la résistance à l'effort normal. Pour des profils creux remplis de béton, les valeurs limites sont seulement applicables à la partie en béton ($1 - \delta$).

8. Résistance des éléments structuraux en compression axiale :

L'élément structural présente une résistance suffisante si, pour les deux axes :

$$N_{sd} \leq \chi N_{pl,Rd} \dots\dots\dots (3 - 15)$$

Avec :

$N_{pl,Rd}$: Représente la résistance de la section transversale sous charge axiale.

χ : Le coefficient de minoration pour la courbe de flambement adéquate.

Les courbes de flambement européennes relatives aux poteaux mixtes sont représentées à la figure 3-3 :

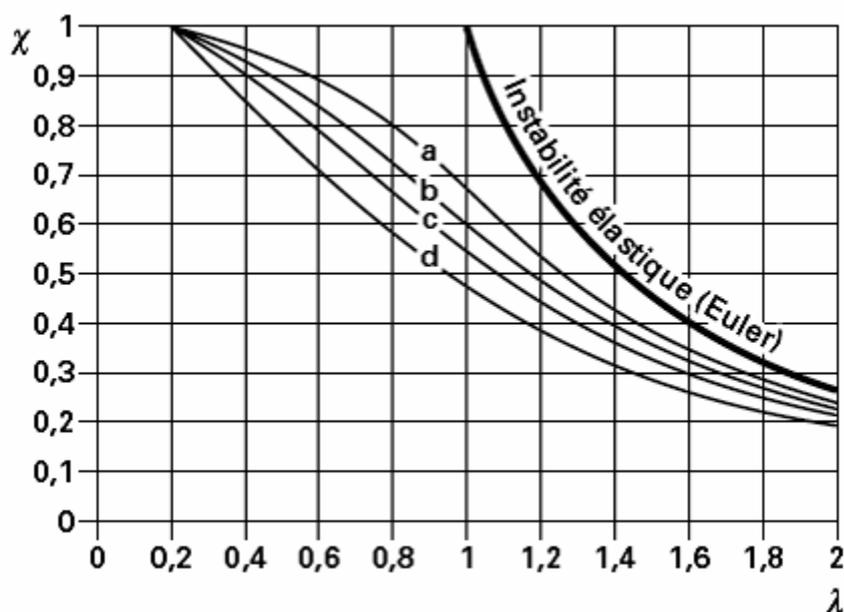


Figure 3-3 : Les courbes de flambement.

Où :

- La courbe **a** est relative aux profilés creux remplis de béton ;
- La courbe **b** est relative aux profilés en I totalement ou partiellement enrobés de béton avec flexion selon l'axe fort du profilé en acier ;
- La courbe **c** est relative aux profilés en I totalement ou partiellement enrobés de béton avec flexion selon l'axe faible du profilé en acier ;

Ces courbes peuvent être représentées mathématiquement par l'équation :

$$\chi = f(\bar{\lambda}) = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \text{ mais } \chi \leq 1,0 \dots \dots \dots (3 - 16)$$

ou:

$$\phi = 0,5 [1 + \alpha (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2] \dots \dots \dots (3 - 17)$$

α : Le facteur d'imperfection dépendant de la courbe de flambement appropriée.

Le flambement n'est pas à considérer si : $\bar{\lambda} \leq 2,0$

Le coefficient α qui tient compte des imperfections des sections transversales est donné au tableau 3-7 pour chacune des courbes :

Courbes européenne de flambement	a	b	c	d
Coefficient d'imperfection α	0,21	0,34	0,49	0,76

Tableau 3-7 : Facteur d'imperfection α relatif aux courbes européennes de flambement, tel que donné dans l'Eurocode 3.

9. Poteaux mixtes soumis à compression et flexion :

Le dimensionnement des poteaux mixtes soumis à compression et flexion est effectué en plusieurs étapes, de la manière suivante :

Le poteau est étudié seul, isolé de la structure ; ainsi, les moments d'extrémité qui résultent de l'analyse de toute la structure (en tenant compte des effets du second ordre) sont considérés comme agissant sur chacun des éléments. Les efforts intérieurs tout le long du poteau sont ensuite déterminés à partir des éléments de réduction aux extrémités, avec prise en compte des effets du second ordre pour les poteaux élancés. Dans la méthode simplifiée de l'Eurocode 4, les imperfections géométriques du poteau ne doivent pas être prises en considération car elles ont été envisagées pour déterminer sa résistance.

La résistance des poteaux comprimés et fléchis est déterminée en se basant sur la courbe d'interaction correspondante, cette courbe peut aussi être utilisée pour évaluer l'effet des efforts tranchants.

10. Analyse des moments de flexion :

L'influence des effets du second ordre peut être négligée pour les structures contreventées et les structures à nœuds fixes lorsque [2]:

L'effort normal N_{sd} est inférieur à 10 % de la charge critique N_{cr}

$$\text{Ou : } \bar{\lambda} \leq 0,2 (2 - r) \dots\dots\dots (3 - 18)$$

Avec :

$\bar{\lambda}$:Élancement relatif du poteau.

r :Le rapport entre le plus petit et le plus grand des moments d'extrémité.

Ce rapport est égal à 1 pour les charges transversales appliquées entre les extrémités. La rigidité flexionnelle qui est nécessaire pour étudier les effets du second ordre, est calculée en multipliant le moment de flexion maximal dû aux effets du premier ordre, par le coefficient k :

$$K = \frac{\beta}{1 - \frac{N_{sd}}{N_{cr}}} \geq 1,0 \dots\dots\dots (3 - 19)$$

Où :

N_{sd} :L'effort normal de calcul.

N_{cr} : La charge critique en considérant le égale à la longueur du poteau.

β : Le coefficient du moment équivalent.

Il est égal à 1,0 pour les poteaux soumis à des efforts transversaux entre les extrémités. Dans le cas de poteaux sollicités par des moments d'extrémité uniquement, il est calculé comme suit :

$$\beta = 0,66 + 0,44 r \text{ avec : } 0,44 \leq \beta \dots\dots\dots (3 - 20)$$

11. Courbe d'interaction pour compression et flexion combinées :

La courbe d'interaction peut être déterminée en recherchant la position de l'axe neutre de la section entière après avoir supposé l'existence de blocs de contrainte rectangulaires pour représenter les efforts internes. Cette méthode ne peut être utilisée qu'à l'aide d'un ordinateur, vu le grand nombre d'équations à résoudre. Il est cependant possible de calculer manuellement et de manière très simple, certains points de la courbe d'interaction. Ces points (A-B-C-D-E) sont indiqués sur le diagramme de la figure 3-4 ; ils sont ensuite reliés par des segments de droites. Ce procédé présente une précision relativement bonne et suffisante pour de nombreux projets.

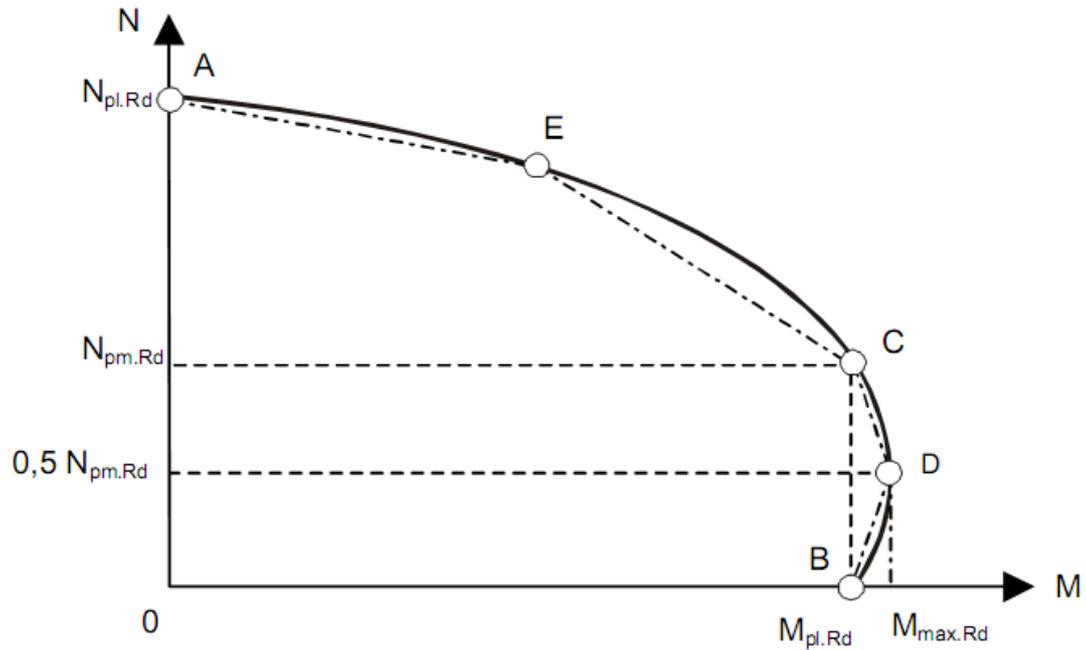
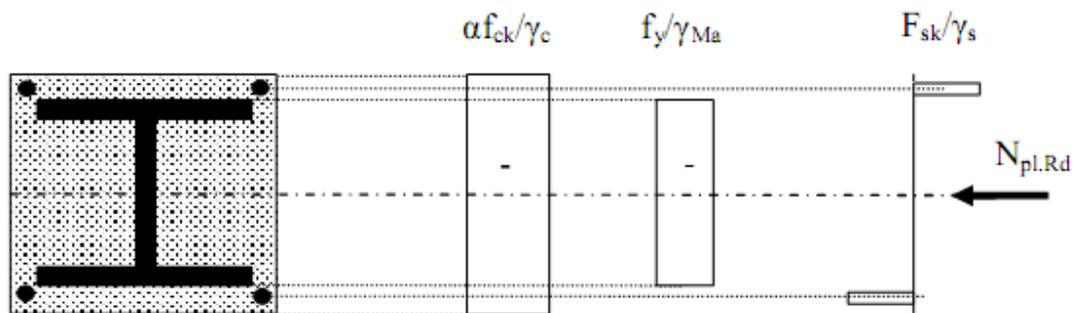
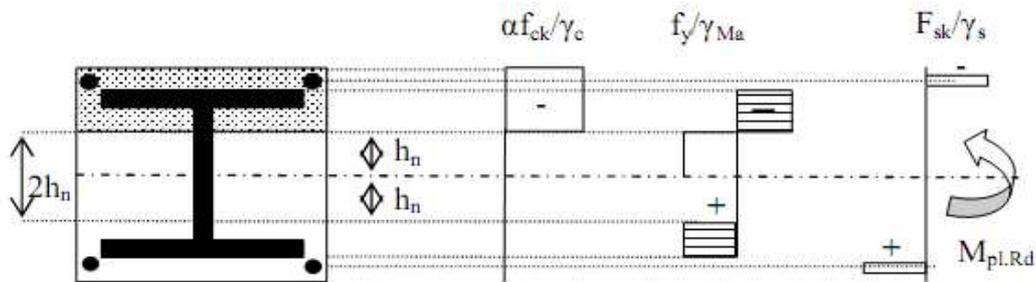


Figure 3-4 : Courbe d'interaction M-N (flexion uni-axiale).

La figure 3-5 montre la distribution des contraintes en chacun des points A, B, C, D, Edans le cas d'un profilé en I totalement enrobé de béton, fléchi selon l'axe de forte inertie de la section d'acier.



Point A : Résistance à la compression $N_{pl.Rd}$



Point B : Résistance à la flexion $M_{pl.Rd}$

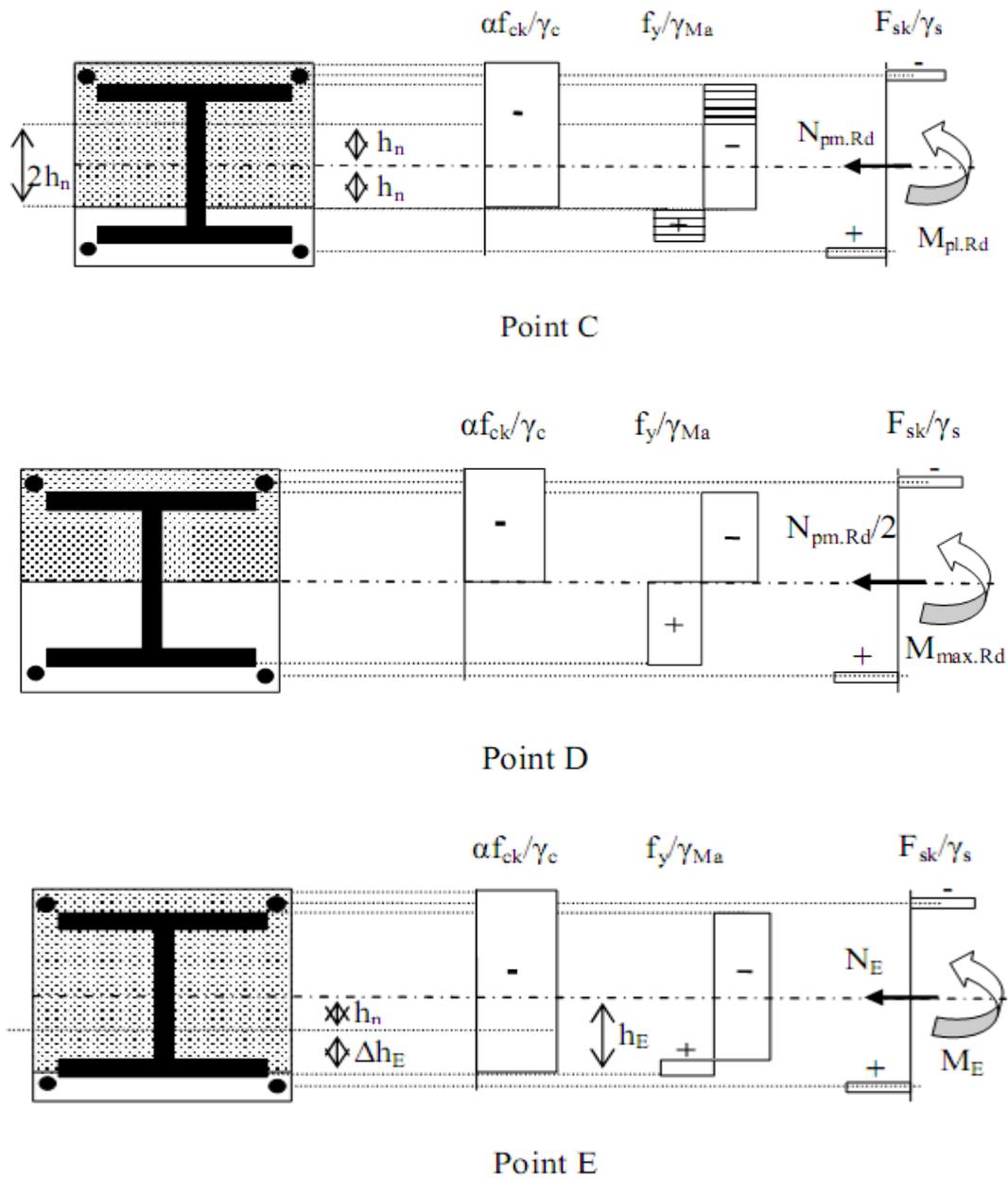


Figure 3-5 : Répartition des contraintes correspondant à la courbe d'interaction (section en I enrobée de béton) [16].

Le point A est relatif à l'effort normal agissant seul :

$$N_A = N_{pl.Rd} \dots \dots \dots (3 - 21)$$

$$M_A = 0 \dots \dots \dots (3 - 22)$$

Le point B, quant à lui, donne la distribution des contraintes lorsque seuls les moments de flexion agissent :

$$N_B = 0 \dots \dots \dots (3 - 23)$$

$$M_B = M_{pl.Rd} \dots \dots \dots (3 - 24)$$

Il est visible, dans ce cas-ci, que la partie tendue du béton, supposée fissurée, a été négligée pour déterminer la résistance de la section transversale.

Le moment résistant est identique aux points B et C, car dans la zone centrale de la section, l'effet des contraintes de compression additionnelles s'annule.

Dans ces zones, cependant, les efforts de compression additionnelle créent des contraintes normales internes qui sont égales à la résistance plastique du béton pris séparément. Ceci peut être expliqué en additionnant les distributions des contraintes aux points B et C ; la résultante des efforts normaux ne change pas, puisque celle-ci est nulle au point B. Les efforts s'équilibrent dans les parties métalliques et les zones comprimées du béton sont identiques aux points B et C. L'effort axial est dès lors donné par l'expression :

$$N_C = N_{c,Rd} = A_c \alpha f_{cd} \dots \dots \dots (3 - 25)$$

Où: $\alpha = 0,85$.

f_{cd} : La résistance de calcul du béton.

$M_C = M_{pl,Rd}$.

Au point D, l'axe neutre en plasticité coïncide avec l'axe de symétrie de la section transversale et l'effort normal résultant est égal à la moitié de l'effort résistant en C. cette distribution des contraintes permet un calcul simple et rapide du moment et de l'effort normal.

$$N_D = N_{c,Rd} / 2 \dots \dots \dots (3 - 26)$$

$$M_D = M_{max,Rd} \dots \dots \dots (3 - 27)$$

$$M_{max,Rd} = W_{pa} f_{yd} + 0,5 W_{pc} \alpha f_{cd} + W_{ps} f_{sd} \dots \dots \dots (3 - 28)$$

Où:

W_{pa} , W_{pc} et W_{ps} : Sont les moments de résistance plastique respectivement de l'acier de construction, du béton et des armatures.

f_{yd} , f_{cd} et f_{sd} : Sont les résistances de calcul respectives de ces matériaux.

Pour le point E, l'axe neutre se trouve entre celui correspondant au point C et le bord de la section transversale, de manière à ce que la contrainte résultante puisse être calculée sans difficulté. Ce point E ne doit pas être déterminé dans tous les cas.

La position de l'axe neutre pour le point B ($M_{pl,Rd}$) et de manière similaire pour le point C, c'est-à-dire la valeur h_n , peut être obtenue à partir de la différence des contraintes en ces deux points. Comme, dans la zone centrale, les différentes parties de la section transversale sont généralement rectangulaires, les efforts dépendant de la valeur de h_n sont aisément évalués.

Le moment résistant $M_{pl,Rd}$ peut être calculé de manière très simple à partir de la différence entre les contraintes aux points D et B :

$$M_{n,Rd} = W_{panf_{yd}} + 0,5 W_{pcn} \alpha_{fcd} + W_{psnf_{sd}} \dots \dots \dots (3 - 29)$$

Où : W_{pan} , W_{pcn} et W_{psn} , sont les moments de résistance plastique des aires comprises entre les deux droites distantes de $2.h_n$

Le moment résistant $M_{pl,Rd}$ est donné par :

$$M_{pl,Rd} = M_{max,Rd} - M_{n,Rd} \dots \dots \dots (3 - 30)$$

Cette méthode présente l'avantage d'être applicable à toute section transversale présentant une double symétrie. Même dans le cas de sections de forme très complexe, les points caractéristiques du diagramme d'interaction sont très facilement déterminés.

12.Compression et flexion uni-axiale combinées :

La figure 3-6 montre comment il est possible de contrôler la résistance de la section transversale d'un poteau mixte à l'aide de la courbe d'interaction M-N. En premier lieu, la résistance sous charge axiale est déterminée de la manière indiquée à l'équation 3- 2. A cet effet, un coefficient de réduction χ est utilisé (équation 3-16). Ce même coefficient est maintenant reporté sur la courbe d'interaction pour obtenir le moment μ_k dû aux imperfections.

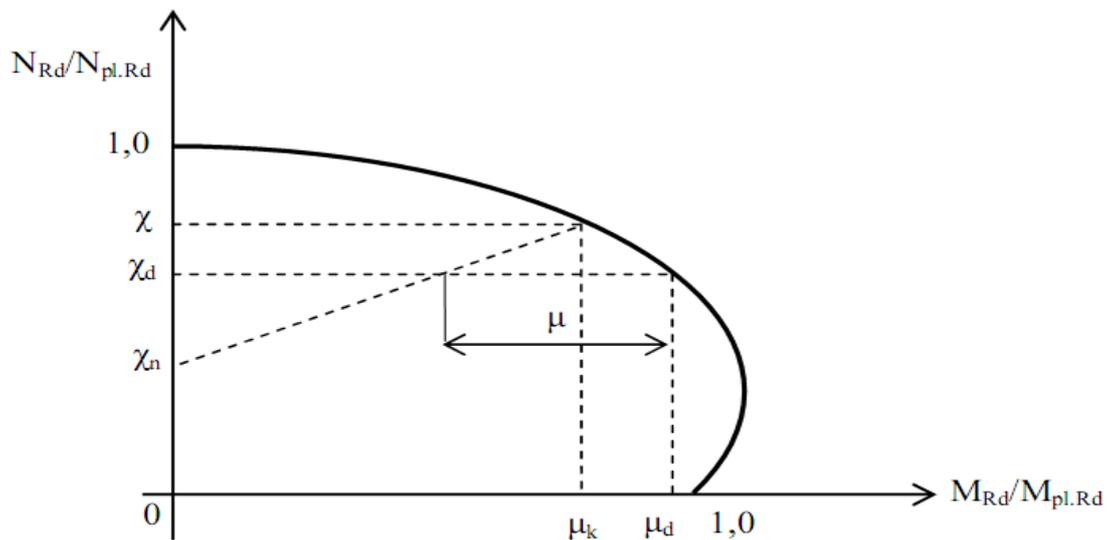


Figure 3-6 : Modèle de calcul pour l'interaction compression-flexion uni axiale [5].

L'influence de ce moment est supposée décroître linéairement jusqu'à la valeur χ_n . Pour un effort normal $\chi_d = N_{sd} / N_{pl,Rd}$, le coefficient μ représente la résistance flexionnelle résiduelle. Il faut s'assurer que :

$$M_{sd} \leq 0,9 \mu M_{pl,Rd} \dots \dots \dots (3 - 31)$$

En certains endroits de la courbe d'interaction, l'effort normal contribue à augmenter la résistance flexionnelle ($\mu > 1$). Si le moment de flexion et l'effort normal sont indépendants l'un de l'autre, la valeur de μ doit être limitée à 1,0. La valeur χ_n tient compte du fait que les imperfections et le moment de flexion n'ont pas toujours un effet défavorable.

Dans le cas de moments d'extrémités, χ_n peut être calculé par :

$$\chi_n = [(1 - r)/4] \chi \dots \dots \dots (3 - 32)$$

Où : r est le rapport de ces moments.

Si des efforts transversaux agissent le long du poteau, χ_n est pris égal à zéro et $r = 1$. La réduction de 10 % de la résistance flexionnelle est nécessaire à cause des simplifications qui ont été effectuées. En effet, la courbe d'interaction a été déterminée sans tenir compte des limites de déformation dans le béton et lorsque les moments sont déterminés en tenant compte des effets du second ordre, les calculs sont effectués en se basant sur la rigidité flexionnelle effective $(EI)_e$ et sur la résistance de la section de béton complète.

13. Compression et flexion bi-axiale combinées :

En raison des différentes valeurs d'élançements, de moments fléchissant et de résistances à la flexion pour les deux axes, il est nécessaire, dans la plupart des cas, de procéder à une vérification suivant chacun des axes. Les imperfections ne doivent être prises en compte qu'à l'intérieur du plan dans lequel on suppose qu'une ruine est susceptible de se produire. Pour l'autre plan de flexion, il est inutile de tenir compte de ces imperfections.

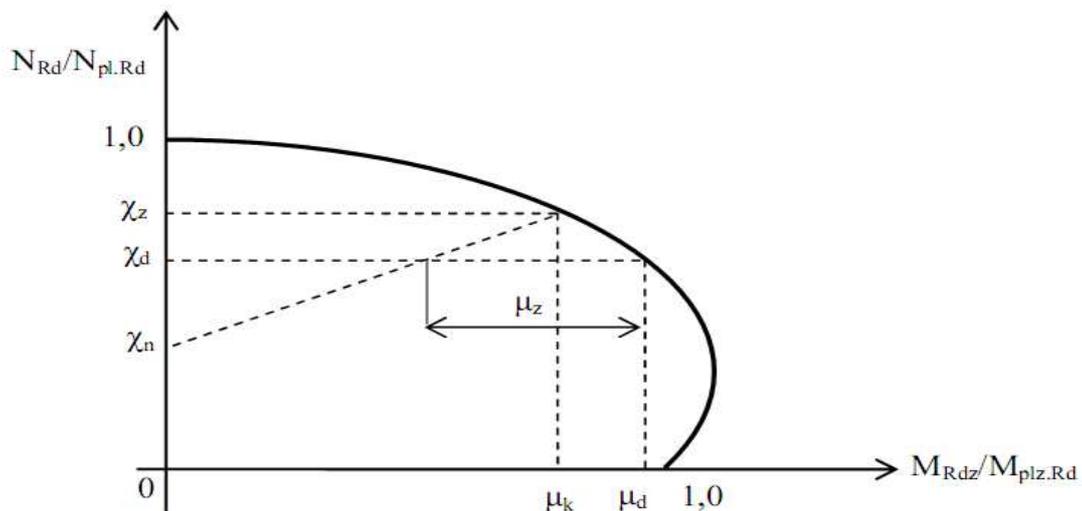


Figure 3-7 : Hypothèse de ruine dans le plan xy avec prise en compte des imperfections [5].

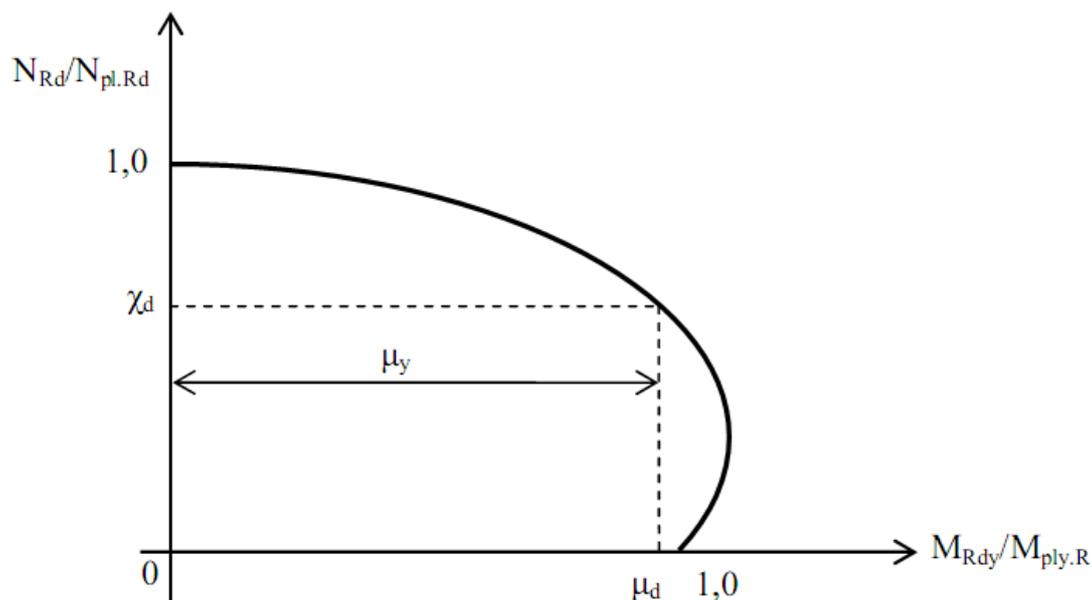


Figure 3-8 : Hypothèse de ruine dans le plan xy sans prise en compte des imperfections [5].

La résistance à la flexion bi axiale doit être contrôlée sur base des valeurs relatives μ_y et μ_z du moment résistant et une nouvelle courbe d'interaction (voir figure 3-9) doit être établie. Cette courbe d'interaction linéaire est tronquée à $0,9 \mu_y$ et $0,9 \mu_z$; les moments fléchissant de calcul M_{ySd} et M_{zSd} doivent satisfaire aux limites imposées par cette courbe.

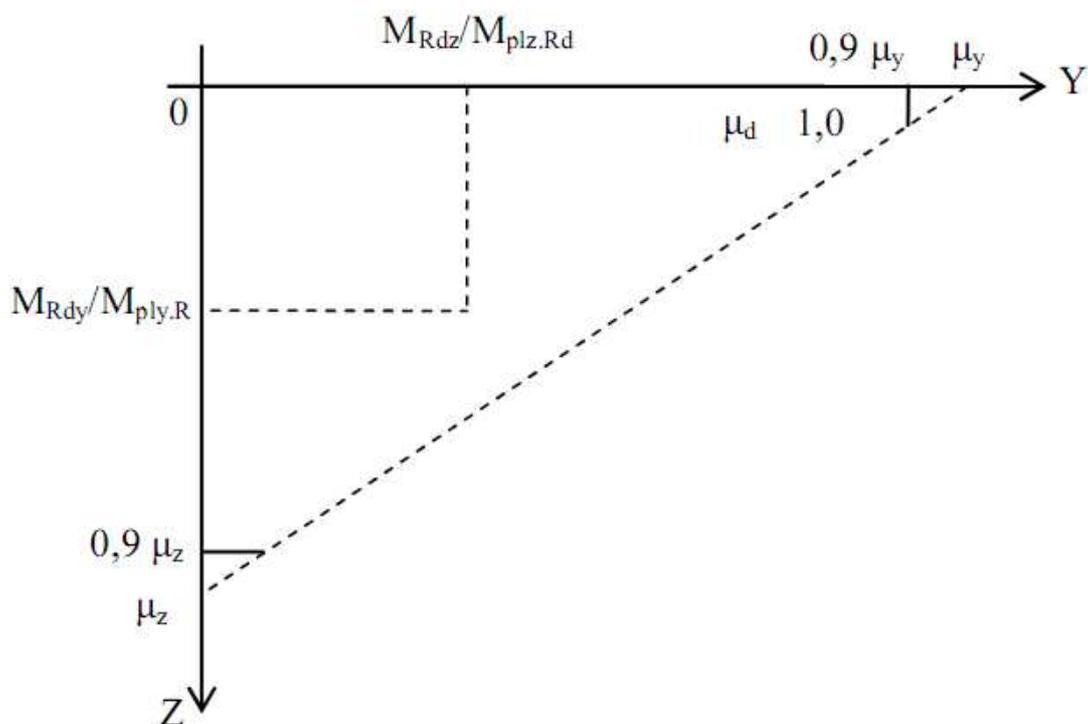


Figure 3-9 : Courbe d'interaction des moments –résistance à la flexion bi axiale [5].

Il en résulte les équations :

$$\frac{M_{y.sd}}{\mu_y \cdot M_{pl.y.Rd}} + \frac{M_{z.sd}}{\mu_z \cdot M_{pl.z.Rd}} \leq 1,0 \dots \dots \dots (3 - 33)$$

$$\frac{M_{y.sd}}{\mu_y \cdot M_{pl.y.Rd}} \leq 0,9 \dots \dots \dots (3 - 34)$$

$$\frac{M_{z.sd}}{\mu_z \cdot M_{pl.z.Rd}} \leq 0,9 \dots \dots \dots (3 - 35)$$

14. Conclusion :

- Les poteaux mixtes sont, soit des profilés ouverts partiellement ou complètement enrobés, soit des profils creux remplis de béton.
- L'Eurocode 4 donne les limites des rapports dimensionnels des éléments en acier non enrobés, de manière à éviter tout voilement local. Ce problème ne se pose pas pour les profilés complètement enrobés.
- L'Eurocode 4 présente des règles simplifiées (courbes européennes de flambement, etc.) pour déterminer la résistance de poteaux mixtes chargés axialement. Cette méthode est toutefois soumise à certaines restrictions.
- L'influence des effets du second ordre doit être prise en compte pour le dimensionnement de poteaux élancés soumis à des charges axiales élevées.
- L'effet combiné d'une charge axiale et d'un moment de flexion peut être évalué à l'aide de courbes d'interaction sur lesquelles est basée la méthode de dimensionnement décrite dans l'annexe D de l'Eurocode 4.

IV. DETERMINATION DES COURBES D'INTERACTIONS

1. Introduction :

Ce chapitre sera consacré à une détermination graphique des courbes d'interactions pour des profilés métalliques totalement enrobés, en développant un programme de calcul informatique à l'aide du langage de programmation (EXCEL), qui nous permet de calculer dans un laps de temps très court les courbes d'interactions des poteaux mixtes sous compression excentrée bi axiale, en se basant sur la méthode de calcul simplifiée de l'EC4.

L'utilisation de ce programme nous permet également de conduire une étude paramétrique pour déterminer les principaux facteurs influençant le diagramme d'interaction de ce type de poteau, tels que : la taille du profilé, le type de la section mixte (carrée ; rectangulaire), enrobage de la section d'acier (E_y ; E_z).

Enfin, la dernière partie de ce chapitre, sera consacrée aux résultats obtenus.

2. Caractéristiques mécaniques des matériaux de calcul:

Les matériaux entrant dans la composition de la structure jouent incontestablement un rôle important dans la résistance des constructions. Leur choix est souvent le fruit d'un compromis entre divers critères tel que; Le coût, la disponibilité sur place et la facilité de mise en œuvre du matériau prévalant généralement sur le critère de la résistance mécanique.

Les caractéristiques des matériaux utilisés doivent être conformes aux règles techniques de construction et de calcul des ouvrages et tous les règlements applicables en Algérie (BAEL91 [16], RPA 99version 2003[17] et CBA93 [18], Eurocode 4[2]).

2.1 Le béton :

Les caractéristiques mécaniques de béton adoptées pour cette étude sont :

f_{ck} (N/mm ²)	γ_c
25	1.5

Tableau 4-1 :Les caractéristiques mécaniques du béton de calcul.

Tel que :

f_{ck} : Résistance caractéristique en compression du béton, mesurée sur cylindre à 28 jours.

γ_c : coefficient de sécurité du béton.

2.2 Aciers d'armature :

Le deuxième matériau qui rentre dans le béton armé est l'acier d'armature. Il présente une très bonne résistance à la traction, et une bonne résistance à la compression dans le cas d'élançements faibles. Si aucune précaution n'est prise il peut subir des effets de corrosion. C'est un matériau très ductile, qui attend des déformations très importantes avant rupture (de l'ordre de la dizaine de %).

Les caractéristiques mécaniques de l'acier d'armature adoptées pour cette étude sont :

- Des hautes adhérences de nuance FeE400 ;
- La limite d'élasticité $f_{sk}=400 \text{ N/mm}^2$;
- Module de Young $E_s= 210000 \text{ N/mm}^2$;
- En général $\gamma_s=1.15$;

2.3 Aciers de constructions :

Les aciers de construction sont définis par leurs limite d'élasticité f_y , pour les aciers courants de construction les valeurs de la limite élastique varient de 235 MPa à 355 MPa. Les déformations sont linéaires et réversibles c'est le domaine de l'élasticité défini par la loi de Hooke.

Les caractéristiques mécaniques de l'acier de construction adoptées pour cette étude sont :

$f_y(\text{N/mm}^2)$	γ_a
235	1

Tableau 4-2 : Les caractéristiques mécaniques d'aciers de construction de calcul.

f_y : Limite d'élasticité.

γ_a : coefficient de sécurité de l'acier de construction.

3. Caractéristiques géométriques des sections :

3.1 Caractéristiques géométriques des profilés :

Les profilés de construction sont des produits longs obtenus par laminage à chaud, extraits des blooms et billettes, dont la section droite (forme transversale) rappelle les lettres : I, H et U.

Ils sont caractérisés par :

- Leur hauteur qui est supérieur ou égale à 80 mm ;
- Leur âme qui est raccordée par des congés aux faces intérieures des ailes ;
- Leurs ailes sont symétriques et de largeur égale ;
- Les faces extérieures des ailes qui sont parallèles .

Remarque : On a adopté dans cette étude des Profilés IPE (profil européen) : aux ailes à épaisseur constante.

Les caractéristiques géométriques des profilés IPE sont illustrées dans le tableau suivant :

	h (mm)	b (mm)	t _w (mm)	t _f (mm)	r ₁ (mm)	r ₂ (mm)	A _a (cm ²)	I _{yy} (cm ⁴)	I _{zz} (cm ⁴)	W _{ply} (cm ³)	W _{plz} (cm ³)
IPE100	100	55	4,1	5,7	2,0	1,0	10,32	171	15,92	39,41	9,15
IPE120	120	64	4,4	6,3	2,0	1,0	13,21	317,8	27,67	60,73	13,58
IPE140	140	73	4,7	6,9	2,0	1,0	16,43	541,2	44,92	88,34	19,25
IPE160	160	82	5,0	7,4	2,0	1,0	20,09	869,3	68,31	123,9	26,1
IPE180	180	91	5,3	8,0	2,0	1,0	23,95	1317	100,9	166,4	34,6
IPE200	200	100	5,6	8,5	2,0	1,0	28,48	1943	142,4	220,6	44,61
IPE220	220	110	5,9	9,2	2,0	1,0	33,37	2772	204,9	285,4	58,11
IPE240	240	120	6,2	9,8	2,0	1,0	39,12	3892	283,6	366,6	73,92
IPE270	270	135	6,6	10,2	2,0	1,0	45,94	5790	419,9	484	96,95
IPE300	300	150	7,1	10,7	2,0	1,0	53,81	8356	603,8	628,4	125,2
IPE330	330	160	7,5	11,5	2,0	1,0	62,61	11770	788,1	804,3	153,7
IPE360	360	170	8,0	12,7	2,0	1,0	72,73	16270	1043	1019	191,1
IPE400	400	180	8,6	13,5	2,0	1,0	84,46	23130	1318	1307	229
IPE450	450	190	9,4	14,6	2,0	1,0	98,82	33740	1676	1702	276,4
IPE500	500	200	10,2	16,0	2,0	1,0	115,5	48200	2142	2194	335,9
IPE550	550	210	11,1	17,2	2,0	1,0	134,4	67120	2668	2787	400,5
IPE600	600	220	12,0	19,0	2,0	1,0	156,0	92080	3387	3512	485,6

Tableau 4-3 : Les caractéristiques géométriques des profilés IPE.

Tel que :

h : Hauteur du profilé.

b : Largeur du profilé.

t_f : Epaisseur du la semelle.

t_w : Epaisseur du lame.

r₁ = Cordon laser.

r₂ = Angle vif.

A_a : Aire de la section droite.

I_Y : Moment d'inertie principale autour de l'axe fort inertie.

I_z : Moment d'inertie principale autour de l'axe faible inertie.

W_{ply} : Module plastique de flexion autour de l'axe fort inertie.

W_{plz} : Module plastique de flexion autour de l'axe faible inertie.

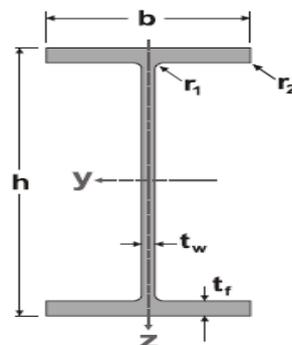


Figure 4-1 : Poutrelle européenne I (IPE).

3.2 Caractéristiques géométriques des sections de calculs :

- Selon l'axe de forte inertie yy :

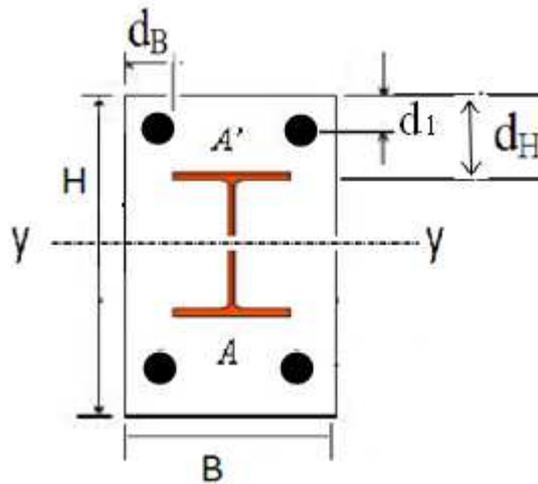


Figure4-2 : La section selon l'axe de forte inertie yy.

- Selon l'axe de faible inertie zz :

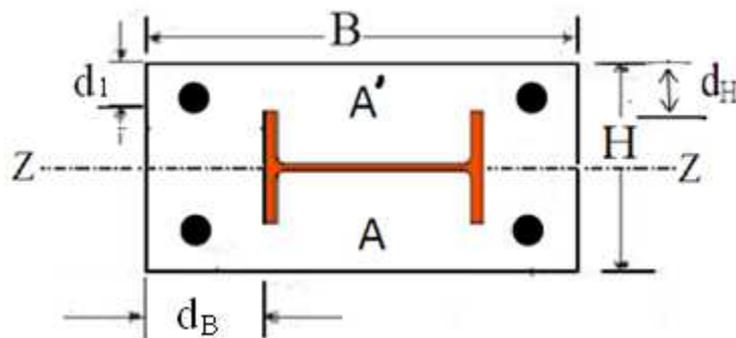


Figure 4-3 : La section selon l'axe de faible inertie zz.

Tel que :

H : La hauteur de la section.

B : La largeur de la section.

d_H : L'enrobage de l'acier de construction selon la hauteur H.

d_B : L'enrobage de l'acier de construction selon la largeur B.

d₁ : L'Enrobage des aciers d'armatures.

A_s : La section des aciers d'armatures ($A_s = A_{smin} = 0,3\% * B * H = 4$ barres).

A['] : La section des aciers d'armatures comprimées ($A' = \frac{A_{smin}}{2} = 2$ barres).

A : La section des aciers d'armatures tendues ($A = \frac{A_{smin}}{2} = 2$ barres).

3.2.1 Caractéristiques géométriques pour le premier cas:

Les caractéristiques géométriques des sections pour le premier cas sont calculées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y = 40$ mm.
- Selon l'axe de faible inertie zz: $E_z = 40$ mm.

3.2.1.1 Caractéristiques géométriques selon l'axe de forte inertie yy :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de forte inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d_1 (mm)	d_H (mm)	d_B (mm)	Asmin (mm ²)
section1	IPE 100	180	135	20	40	40	72,9
section2	IPE 120	200	144	20	40	40	86,4
section3	IPE 140	220	153	20	40	40	100,98
section4	IPE 160	240	162	20	40	40	116,64
section5	IPE 180	260	171	20	40	40	133,38
section6	IPE 200	280	180	20	40	40	151,2
section7	IPE 220	300	190	20	40	40	171
section8	IPE 240	320	200	20	40	40	192
section9	IPE 270	350	215	20	40	40	225,75
section10	IPE 300	380	230	20	40	40	262,2
section11	IPE 330	410	240	20	40	40	295,2
section12	IPE 360	440	250	20	40	40	330
section13	IPE 400	480	260	20	40	40	374,4
section14	IPE 450	530	270	20	40	40	429,3
section15	IPE 500	580	280	20	40	40	487,2
section16	IPE 550	630	290	20	40	40	548,1
section17	IPE 600	680	300	20	40	40	612

Tableau 4-4 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe fort.

3.2.1.2 Caractéristiques géométriques selon l'axe de faible inertie zz :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de faible inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	d_1 (mm)	d_H (mm)	d_B (mm)	Asmin (mm ²)
section1	IPE 100	180	135	20	40	40	72,9
section2	IPE 120	200	144	20	40	40	86,4
section3	IPE 140	220	153	20	40	40	100,98
section4	IPE 160	240	162	20	40	40	116,64
section5	IPE 180	260	171	20	40	40	133,38
section6	IPE 200	280	180	20	40	40	151,2
section7	IPE 220	300	190	20	40	40	171

section8	IPE 240	320	200	20	40	40	192
section9	IPE 270	350	215	20	40	40	225,75
section10	IPE 300	380	230	20	40	40	262,2
section11	IPE 330	410	240	20	40	40	295,2
section12	IPE 360	440	250	20	40	40	330
section13	IPE 400	480	260	20	40	40	374,4
section14	IPE 450	530	270	20	40	40	429,3
section15	IPE 500	580	280	20	40	40	487,2
section16	IPE 550	630	290	20	40	40	548,1
section17	IPE 600	680	300	20	40	40	612

Tableau 4-5 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe faible.

3.2.2 Caractéristiques géométriques pour le deuxième cas :

Les caractéristiques géométriques des sections pour le deuxième cas sont calculées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy: $E_y=60$ mm.
- Selon l'axe de faible inertie zz: E_z varie d'une section à une autre tel que le rapport de la hauteur sur la largeur de chaque section reste constant ($H/B=1$).

3.2.2.1 Caractéristiques géométriques selon l'axe de forte inertie yy :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de forte inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d_l (mm)	d_H (mm)	d_B (mm)	A_{smin} (mm ²)
section1	IPE 100	220	220	30	60	82,5	145,2
section2	IPE 120	240	240	30	60	88	172,8
section3	IPE 140	260	260	30	60	93,5	202,8
section4	IPE 160	280	280	30	60	99	235,2
section5	IPE 180	300	300	30	60	104,5	270
section6	IPE 200	320	320	30	60	110	307,2
section7	IPE 220	340	340	30	60	115	346,8
section8	IPE 240	360	360	30	60	120	388,8
section9	IPE 270	390	390	30	60	127,5	456,3
section10	IPE 300	420	420	30	60	135	529,2
section11	IPE 330	450	450	30	60	145	607,5
section12	IPE 360	480	480	30	60	155	691,2
section13	IPE 400	520	520	30	60	170	811,2
section14	IPE 450	570	570	30	60	190	974,7
section15	IPE 500	620	620	30	60	210	1153,2
section16	IPE 550	670	670	30	60	230	1346,7
section17	IPE 600	720	720	30	60	250	1555,2

Tableau 4-6 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe fort.

3.2.2.2 Caractéristiques géométriques selon l'axe de faible inertie zz :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de faible inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d _l (mm)	d _B (mm)	d _H (mm)	Asmin (mm ²)
section1	IPE 100	220	220	30	60	82,5	145,2
section2	IPE 120	240	240	30	60	88	172,8
section3	IPE 140	260	260	30	60	93,5	202,8
section4	IPE 160	280	280	30	60	99	235,2
section5	IPE 180	300	300	30	60	104,5	270
section6	IPE 200	320	320	30	60	110	307,2
section7	IPE 220	340	340	30	60	115	346,8
section8	IPE 240	360	360	30	60	120	388,8
section9	IPE 270	390	390	30	60	127,5	456,3
section10	IPE 300	420	420	30	60	135	529,2
section11	IPE 330	450	450	30	60	145	607,5
section12	IPE 360	480	480	30	60	155	691,2
section13	IPE 400	520	520	30	60	170	811,2
section14	IPE 450	570	570	30	60	190	974,7
section15	IPE 500	620	620	30	60	210	1153,2
section16	IPE 550	670	670	30	60	230	1346,7
section17	IPE 600	720	720	30	60	250	1555,2

Tableau 4-7 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe faible.

3.2.3 Caractéristiques géométriques pour le troisième cas :

Les caractéristiques géométriques des sections pour le troisième cas sont calculées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y=80$ mm.
- Selon l'axe de faible inertie zz: E_z varie d'une section à une autre tel que le rapport de la hauteur sur la largeur de chaque section reste constant ($H/B=1$).

3.2.3.1 Caractéristiques géométriques selon l'axe de forte inertie yy :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de forte inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d _l (mm)	d _H (mm)	d _B (mm)	Asmin (mm ²)
section1	IPE 100	260	260	30	80	102,5	202,8
section2	IPE 120	280	280	30	80	108	235,2
section3	IPE 140	300	300	30	80	113,5	270
section4	IPE 160	320	320	30	80	119	307,2
section5	IPE 180	340	340	30	80	124,5	346,8
section6	IPE 200	360	360	30	80	130	388,8

section7	IPE 220	380	380	30	80	135	433,2
section8	IPE 240	400	400	30	80	140	480
section9	IPE 270	430	430	30	80	147,5	554,7
section10	IPE 300	460	460	30	80	155	634,8
section11	IPE 330	490	490	30	80	165	720,3
section12	IPE 360	520	520	30	80	175	811,2
section13	IPE 400	560	560	30	80	190	940,8
section14	IPE 450	610	610	30	80	210	1116,3
section15	IPE 500	660	660	30	80	230	1306,8
section16	IPE 550	710	710	30	80	250	1512,3
section17	IPE 600	760	760	30	80	270	1732,8

Tableau 4-8 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe fort.

3.2.3.2 Caractéristiques géométriques selon l'axe de faible inertie zz :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de faible inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d ₁ (mm)	d _B (mm)	d _H (mm)	Asmin (mm ²)
section1	IPE 100	260	260	30	80	102,5	202,8
section2	IPE 120	280	280	30	80	108	235,2
section3	IPE 140	300	300	30	80	113,5	270
section4	IPE 160	320	320	30	80	119	307,2
section5	IPE 180	340	340	30	80	124,5	346,8
section6	IPE 200	360	360	30	80	130	388,8
section7	IPE 220	380	380	30	80	135	433,2
section8	IPE 240	400	400	30	80	140	480
section9	IPE 270	430	430	30	80	147,5	554,7
section10	IPE 300	460	460	30	80	155	634,8
section11	IPE 330	490	490	30	80	165	720,3
section12	IPE 360	520	520	30	80	175	811,2
section13	IPE 400	560	560	30	80	190	940,8
section14	IPE 450	610	610	30	80	210	1116,3
section15	IPE 500	660	660	30	80	230	1306,8
section16	IPE 550	710	710	30	80	250	1512,3
section17	IPE 600	760	760	30	80	270	1732,8

Tableau 4-9 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe faible.

3.2.4 Caractéristiques géométriques pour le quatrième cas :

Les caractéristiques géométriques des sections pour le quatrième cas sont calculées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y = 100$ mm.
- Selon l'axe de faible inertie zz : E_z varie d'une section à une autre tel que le rapport de la hauteur sur la largeur de chaque section reste constant ($H/B=1$).

3.2.4.1 Caractéristiques géométriques selon l'axe de forte inertie yy :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de forte inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d_1 (mm)	d_H (mm)	d_B (mm)	A_{smin} (mm ²)
section1	IPE 100	300	300	30	100	122,5	270
section2	IPE 120	320	320	30	100	128	307,2
section3	IPE 140	340	340	30	100	133,5	346,8
section4	IPE 160	360	360	30	100	139	388,8
section5	IPE 180	380	380	30	100	144,5	433,2
section6	IPE 200	400	400	30	100	150	480
section7	IPE 220	420	420	30	100	155	529,2
section8	IPE 240	440	440	30	100	160	580,8
section9	IPE 270	470	470	30	100	167,5	662,7
section10	IPE 300	500	500	30	100	175	750
section11	IPE 330	530	530	30	100	185	842,7
section12	IPE 360	560	560	30	100	195	940,8
section13	IPE 400	600	600	30	100	210	1080
section14	IPE 450	650	650	30	100	230	1267,5
section15	IPE 500	700	700	30	100	250	1470
section16	IPE 550	750	750	30	100	270	1687,5
section17	IPE 600	800	800	30	100	290	1920

Tableau 4-10 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe fort.

3.2.4.2 Caractéristiques géométriques selon l'axe de faible inertie zz :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de faible inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	d_1 (mm)	d_B (mm)	d_H (mm)	A_{smin} (mm ²)
section1	IPE 100	300	300	30	100	122,5	270
section2	IPE 120	320	320	30	100	128	307,2
section3	IPE 140	340	340	30	100	133,5	346,8
section4	IPE 160	360	360	30	100	139	388,8
section5	IPE 180	380	380	30	100	144,5	433,2
section6	IPE 200	400	400	30	100	150	480

section7	IPE 220	420	420	30	100	155	529,2
section8	IPE 240	440	440	30	100	160	580,8
section9	IPE 270	470	470	30	100	167,5	662,7
section10	IPE 300	500	500	30	100	175	750
section11	IPE 330	530	530	30	100	185	842,7
section12	IPE 360	560	560	30	100	195	940,8
section13	IPE 400	600	600	30	100	210	1080
section14	IPE 450	650	650	30	100	230	1267,5
section15	IPE 500	700	700	30	100	250	1470
section16	IPE 550	750	750	30	100	270	1687,5
section17	IPE 600	800	800	30	100	290	1920

Tableau 4-11 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe faible.

3.2.5 Caractéristiques géométriques pour le cinquième cas :

Les caractéristiques géométriques des sections pour le cinquième cas sont calculées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y = h/2$ (h : la hauteur du profilé).
- Selon l'axe de faible inertie zz : $E_z = b$ (b : la largeur du profilé).

3.2.5.1 Caractéristiques géométriques selon l'axe de forte inertie yy :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de forte inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$d_1 = 1,2\% H$ (mm)	d_H (mm)	d_B (mm)	A_{smin} (mm ²)
section1	IPE 100	200	165	2,4	50	55	99
section2	IPE 120	240	192	3	60	64	138,24
section3	IPE 140	280	219	3,5	70	73	183,96
section4	IPE 160	320	246	4	80	82	236,16
section5	IPE 180	360	273	4,5	90	91	294,84
section6	IPE 200	400	300	5	100	100	360
section7	IPE 220	440	330	5,5	110	110	435,6
section8	IPE 240	480	360	6	120	120	518,4
section9	IPE 270	540	405	6,5	135	135	656,1
section10	IPE 300	600	450	7,5	150	150	810
section11	IPE 330	660	480	8	165	160	950,4
section12	IPE 360	720	510	9	180	170	1101,6
section13	IPE 400	800	540	10	200	180	1296
section14	IPE 450	900	570	11	225	190	1539
section15	IPE 500	1000	600	12	250	200	1800
section16	IPE 550	1100	630	13,5	275	210	2079
section17	IPE 600	1200	660	14,5	300	220	2376

Tableau 4-12 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe fort.

3.2.5.2 Caractéristiques géométriques selon l'axe de faible inertie zz :

Les caractéristiques géométriques des sections selon l'axe de faible inertie sont illustrées dans le tableau suivant :

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$d_1=1,2\%H$ (mm)	d_B (mm)	d_H (mm)	A_{smin} (mm ²)
section1	IPE 100	200	165	2	50	55	99
section2	IPE 120	240	192	2,5	60	64	138,24
section3	IPE 140	280	219	3	70	73	183,96
section4	IPE 160	320	246	3	80	82	236,16
section5	IPE 180	360	273	3,5	90	91	294,84
section6	IPE 200	400	300	4	100	100	360
section7	IPE 220	440	330	4	110	110	435,6
section8	IPE 240	480	360	4,5	120	120	518,4
section9	IPE 270	540	405	5	135	135	656,1
section10	IPE 300	600	450	5,5	150	150	810
section11	IPE 330	660	480	6	165	160	950,4
section12	IPE 360	720	510	6,5	180	170	1101,6
section13	IPE 400	800	540	6,5	200	180	1296
section14	IPE 450	900	570	7	225	190	1539
section15	IPE 500	1000	600	7,5	250	200	1800
section16	IPE 550	1100	630	8	275	210	2079
section17	IPE 600	1200	660	8	300	220	2376

Tableau 4-13 : Les caractéristiques géométriques selon l'axe faible.

4. Détermination des courbes d'interactions pour des sections à une combinaison de compression et de flexion (N-M) :

Une courbe d'interaction délimite la zone de validité des différentes combinaisons ($N_{x.Sd}$; $M_{y.Sd}$) ou ($N_{x.Sd}$; $M_{z.Sd}$).

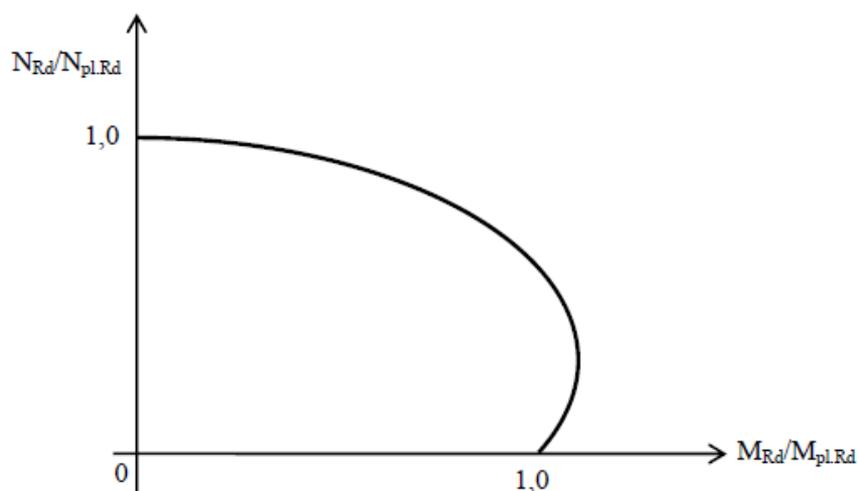


Figure4-4 : Courbe d'interaction pour la compression et la flexion uni-axiale.

Dans une courbe d'interaction d'une section mixte, il est montré que le moment résistant peut subir des augmentations en présence d'un effort axial. Ceci est dû au fait qu'à l'effet de précontrainte qui peut empêcher la fissuration du béton et rendre plus efficace la résistance du béton aux moments ($M_{Rd}/M_{pl,Rd}$), comme la montre la figure ci-dessus.

4. Programme de calcul :

Pour le calcul des plusieurs différentes combinaisons résistantes ($N_{rd}-M_{rd}$) pour avoir l'allure la plus précise, on a développé un programme de calcul à l'aide du logiciel de programmation (EXCEL 2007) qui nous a permis d'exécuter des opérations de procédure très compliquée d'une façon très rapide et très précise.

4.1.1 Organigramme A:

C'est l'organigramme qui donne la position de l'axe neutre (X) pour déterminer la première combinaison ($N_{rd}=0 : M_{rd}=M_{rd,pl}$).

- Selon l'axe de forte inertie yy :

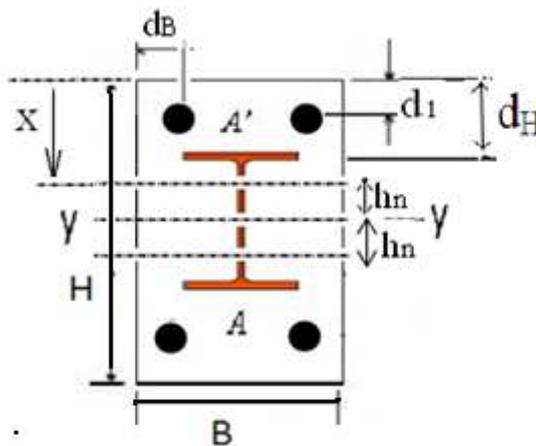


Figure 4-5 : La section mixte selon l'axe de forte inertie yy.

- Selon l'axe de faible inertie zz :

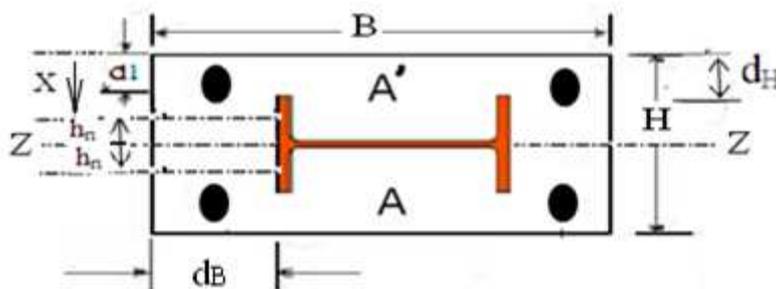
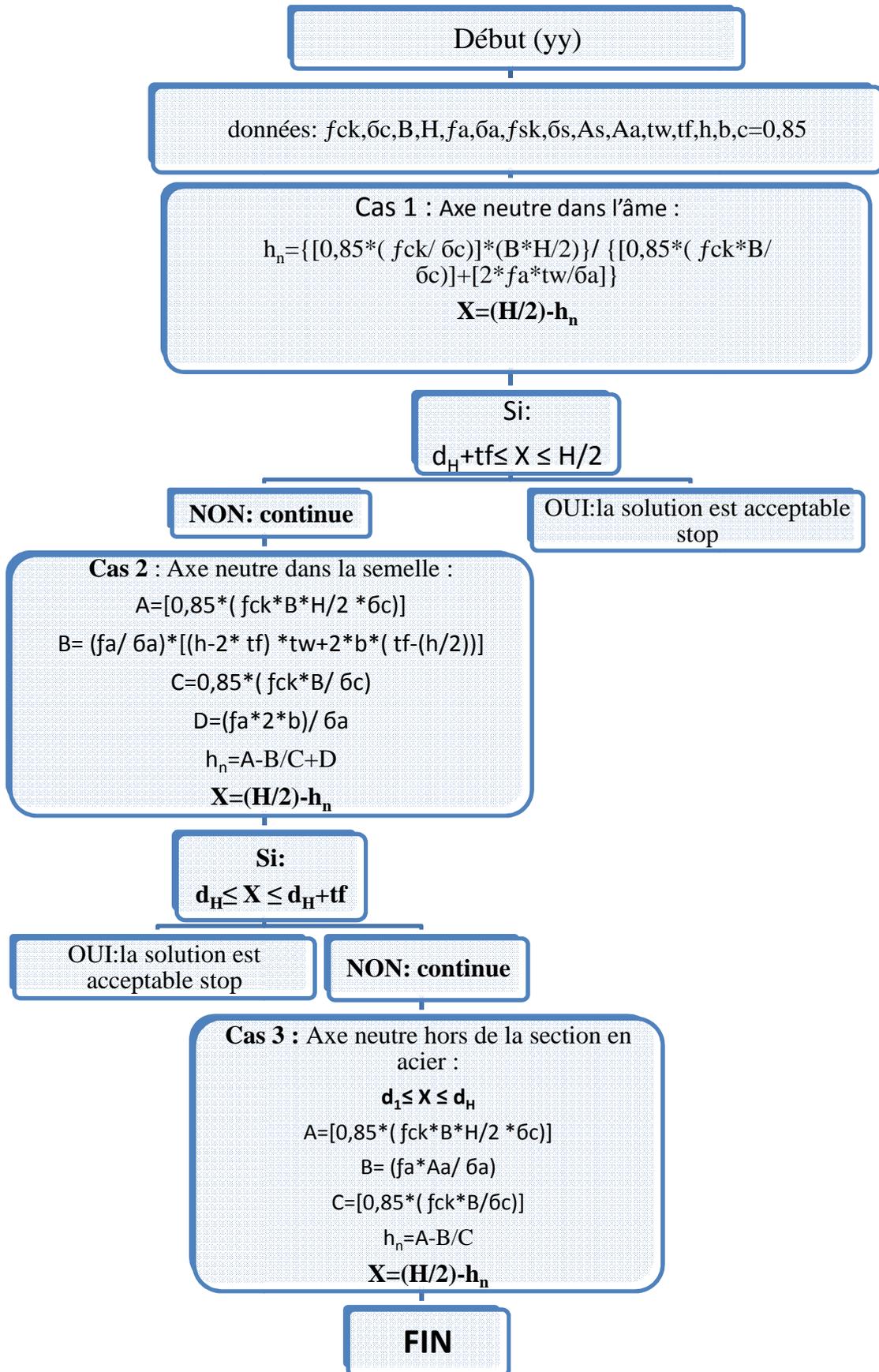
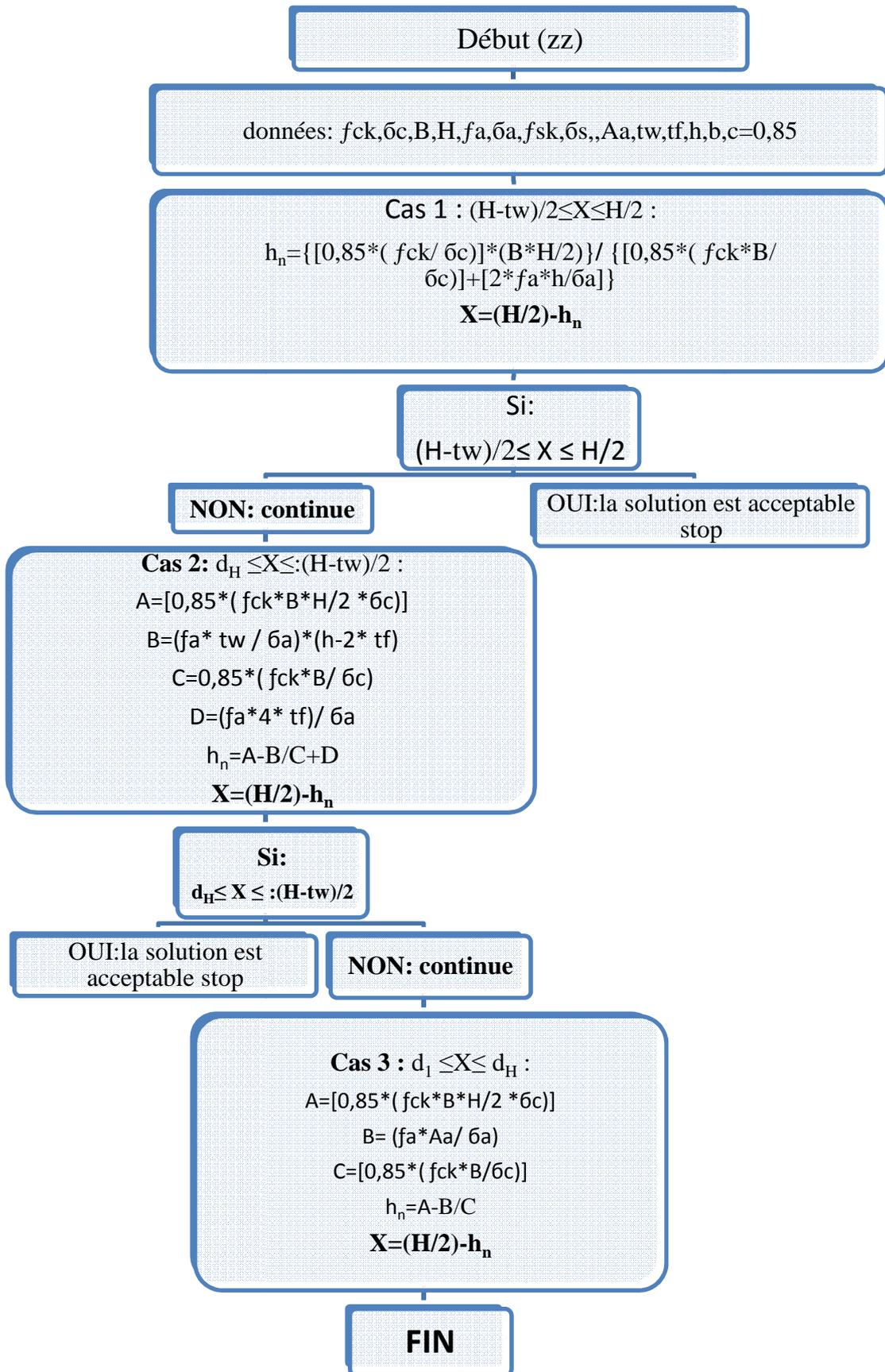


Figure 4-6: La section mixte selon l'axe de faible inertie zz.





4. 1.2 Organigramme B :

C'est l'organigramme qui donne la combinaison $(N_{rd} ; M_{rd})$ en fonction des différentes positions de l'axe neutre.

- Selon l'axe de forte inertie yy :

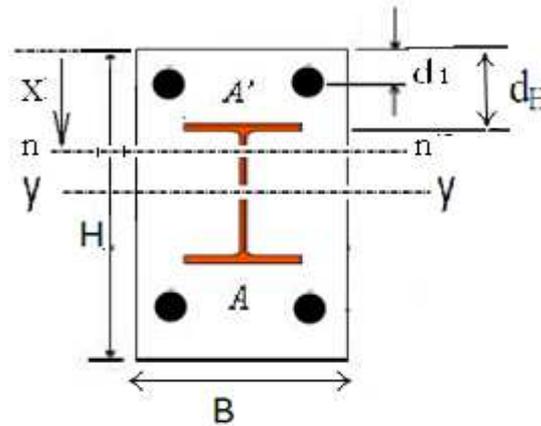


Figure 4-7: la section mixte selon l'axe de forte inertie yy.

- Organigramme :

Début

Données:

$f_{ck}, \bar{\sigma}_c, B, H, f_a, \bar{\sigma}_a, f_{sk}, \bar{\sigma}_s, A_a, t_w, t_f, h, b, A_s, A_{sc}, A_{st}, c=0,85$

Le béton :

$0 \leq x \leq H$

$N_c = (0,85 * f_{ck} * B * x) / \bar{\sigma}_c$

$M_{cnn} = (N_c * x) / 2$

Les armatures :

$0 \leq x \leq d_1$

$N_{sc} = 0$

$N_{st} = (f_{sk} * A_s) / \bar{\sigma}_s$

$N_s = N_{sc} - N_{st}$

$M_{sc} = 0$

$M_{st} = (N_{st} / 2) * (H - 2 * x)$

$M_s = M_{sc} + M_{st}$

$d_1 \leq x \leq H - d_1$

$N_{sc} = (f_{sk} * A_{sc}) / \bar{\sigma}_s$

$N_{st} = (f_{sk} * A_{st}) / \bar{\sigma}_s$

$N_s = N_{sc} - N_{st}$

$M_{sc} = N_{sc} * (x - d_1)$

$M_{st} = N_{st} * (H - x - d_1)$

$M_s = M_{sc} + M_{st}$

$H - d_1 \leq x \leq H$

$N_{sc} = (f_{sk} * A_s) / \bar{\sigma}_s$

$N_{st} = 0$

$N_s = N_{sc} - N_{st}$

$$M_{sc} = (N_{sc}/2) * (2 * x - H)$$

$$M_{st} = 0$$

$$M_s = M_{sc} + M_{st}$$

Les aciers de constructions:

$$0 \leq x \leq d_H$$

$$N_{ac} = 0$$

$$N_{at} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a)$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = 0$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H/2) - x)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$d_H \leq x \leq d_H + t_f$$

$$N_{ac} = (f_a * b / \bar{\sigma}_a) * (x - d_H)$$

$$N_{at} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a) - N_{ac}$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * ((x - d_H) / 2)$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H - x - d_H) / 2)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$d_H + t_f \leq x \leq H - t_f - d_H$$

$$N_{ac} = (f_a / \bar{\sigma}_a) * [(b * t_f) + (x - d_H - t_f) * t_w]$$

$$N_{at} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a) - N_{ac}$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * ((x - d_H) / 2)$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H - x - d_H) / 2)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$H - t_f - d_H \leq x \leq H - d_H$$

$$N_{ac} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a) - N_{at}$$

$$N_{at} = (f_a * b / \bar{\sigma}_a) * (H - x - d_H)$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * ((x - d_H) / 2)$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H - x - d_H) / 2)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$H - d_H \leq x \leq H$$

$$N_{ac} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a)$$

$$N_{at} = 0$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * (x - (H/2))$$

$$M_{at} = 0$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

L'effort normal total

$$N_{tot} = N_c + N_s + N_a \quad (\text{valeur algébrique})$$

Le moment total par rapport à l'axe n n

$$M_{totn} = M_{cnn} + M_{snn} + M_{ann}$$

Excentricité par rapport a l'axe nn

$$e_{nn} = M_{tot} / N_{tot}$$

Excentricité par rapport a l'axe y y

$$e_y = (H/2) + e_{nn} \cdot x$$

Le moment par rapport a l'axe y y

$$M_{yy} = N_{tot} \cdot e_y$$

Donc:

$$N_{yy} = N_{tot}$$

$$M_{yy} = N_{tot} \cdot e_y$$

FIN

- Selon l'axe de faible inertie zz :

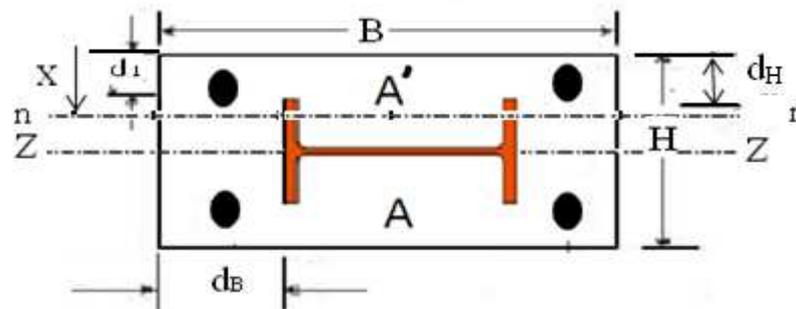


Figure 4-8: la section mixte selon l'axe de faible inertie zz.

- Organigramme :

Début

Données:

$$f_{ck}, \bar{\sigma}_c, B, H, f_a, \bar{\sigma}_a, f_{sk}, \bar{\sigma}_s, A_a, t_w, t_f, h, b, A_s, A_{sc}, A_{st}, c=0,85$$

Le béton :

$$0 \leq x \leq H$$

$$N_c = (0,85 \cdot f_{ck} \cdot B \cdot x) / \bar{\sigma}_c$$

$$M_{cnn} = (N_c \cdot x) / 2$$

Les armatures :

$$0 \leq x \leq d_1$$

$$N_{sc} = 0$$

$$N_{st} = (f_{sk} \cdot A_s) / \bar{\sigma}_s$$

$$N_s = N_{sc} - N_{st}$$

$$M_{sc} = 0$$

$$M_{st} = (N_{st} / 2) \cdot (H - 2 \cdot x)$$

$$M_s = M_{sc} + M_{st}$$

$$d_1 \leq x \leq H - d_1$$

$$N_{sc} = (f_{sk} \cdot A_{sc}) / \bar{\sigma}_s$$

$$N_{st} = (f_{sk} \cdot A_{st}) / \bar{\sigma}_s$$

$$N_s = N_{sc} - N_{st}$$

$$M_{sc} = N_{sc} * (x - d_1)$$

$$M_{st} = N_{st} * (H - x - d_1)$$

$$M_s = M_{sc} + M_{st}$$

$$\mathbf{H - d_1 \leq x \leq H}$$

$$N_{sc} = (f_{sk} * A_s) / \bar{\sigma}_s$$

$$N_{st} = 0$$

$$N_s = N_{sc} - N_{st}$$

$$M_{sc} = (N_{sc} / 2) * (2 * x - H)$$

$$M_{st} = 0$$

$$M_s = M_{sc} + M_{st}$$

Les aciers de constructions:

$$\mathbf{0 \leq x \leq d_H}$$

$$N_{ac} = 0$$

$$N_{at} = (f_a * A_a) / \bar{\sigma}_a$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = 0$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H/2) - x)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$\mathbf{d_H \leq x \leq d_H + ((b - t_w) / 2)}$$

$$N_{ac} = (2 * f_a * t_f / \bar{\sigma}_a) * (x - d_H)$$

$$N_{at} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a) - N_{ac}$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * ((x - d_H) / 2)$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H - x - d_H) / 2)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$\mathbf{d_H + ((b - t_w) / 2) \leq x \leq d_H + ((b + t_w) / 2)}$$

$$N_{ac} = (f_a / \bar{\sigma}_a) * [t_f * (b - t_w) + (h * (x - ((H - t_w) / 2)))]$$

$$N_{at} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a) - N_{ac}$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * ((x - d_H) / 2)$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H - x - d_H) / 2)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$\mathbf{d_H + ((b + t_w) / 2) \leq x \leq H - d_H}$$

$$N_{ac} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a) - N_{at}$$

$$N_{at} = (2 * f_a * t_f / \bar{\sigma}_a) * (H - x - d_H)$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * ((x - d_H) / 2)$$

$$M_{at} = N_{at} * ((H - x - d_H) / 2)$$

$$M_{ann} = M_{ac} + M_{at}$$

$$\mathbf{H - d_H \leq x \leq H}$$

$$N_{ac} = (f_a * A_a / \bar{\sigma}_a)$$

$$N_{at} = 0$$

$$N_a = N_{ac} - N_{at}$$

$$M_{ac} = N_{ac} * (x - (H/2))$$

$$Mat=0$$

$$Mann=Mac+Mat$$

L'effort normal total

$$Ntot=Nc+Ns+Na \quad (\text{valeur algébrique})$$

Le moment total par rapport à l'axe n n

$$Mtotnn=Mcnn+Msnn+Mann$$

Excentricité par rapport à l'axe nn

$$Enn=Mtotnn/Ntot$$

Excentricité par rapport à l'axe z z

$$Ez=(H/2)+(Enn)-x$$

Le moment par rapport à l'axe z z

$$Mzz= Ntot * Ez$$

Donc:

$$Nzz=Ntot$$

$$Mzz= Ntot * Ez$$

FIN.

4.2 Les résultats graphiques du programme :

4.2.1 Les résultats graphiques du premier cas :

Les courbes d'interactions pour le premier cas sont déterminées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y = 40$ mm.

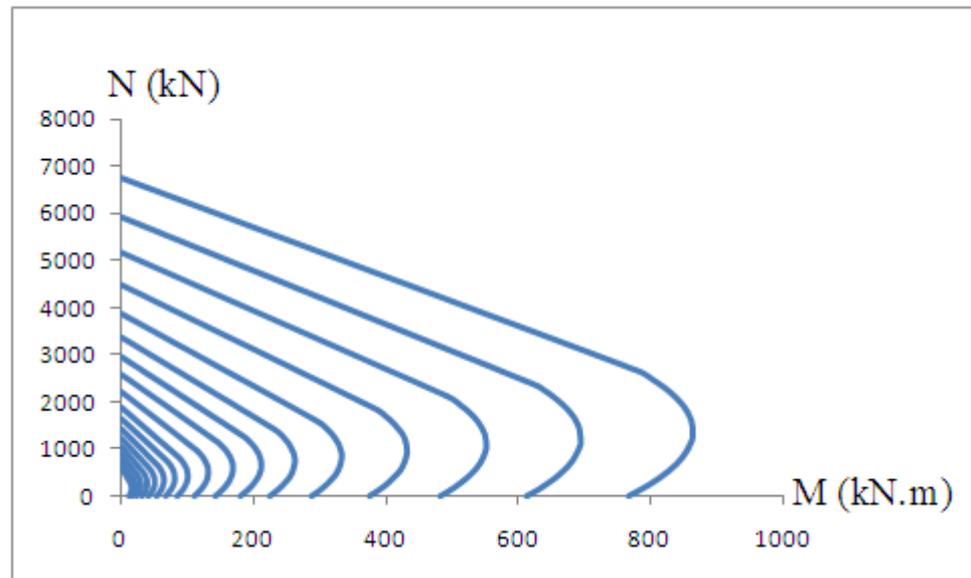


Figure4-9 : Les courbes d'interactions réelles yy .

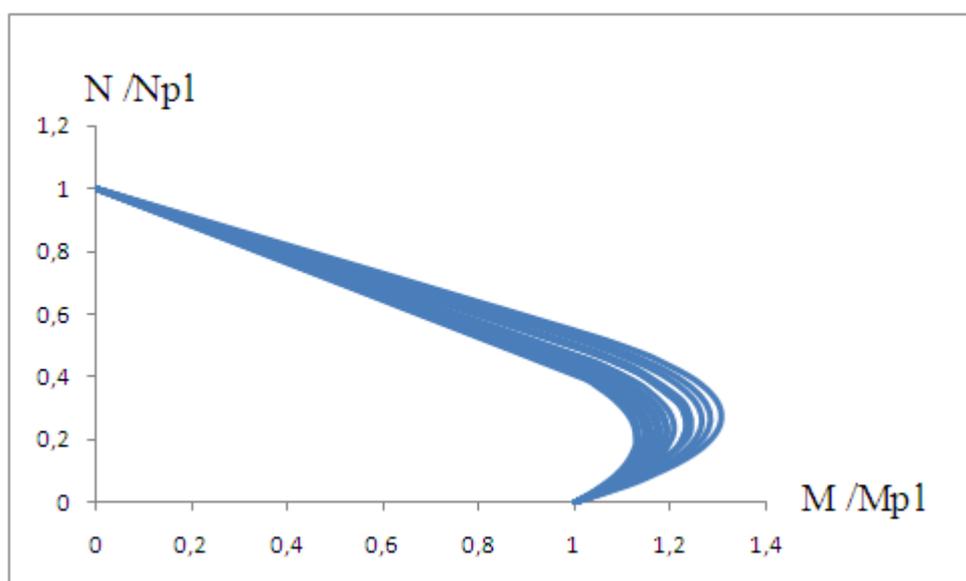


Figure 4-10: Les courbes d'interactions réduites yy .

- Selon l'axe de faible inertie zz : $E_z = 40$ mm.

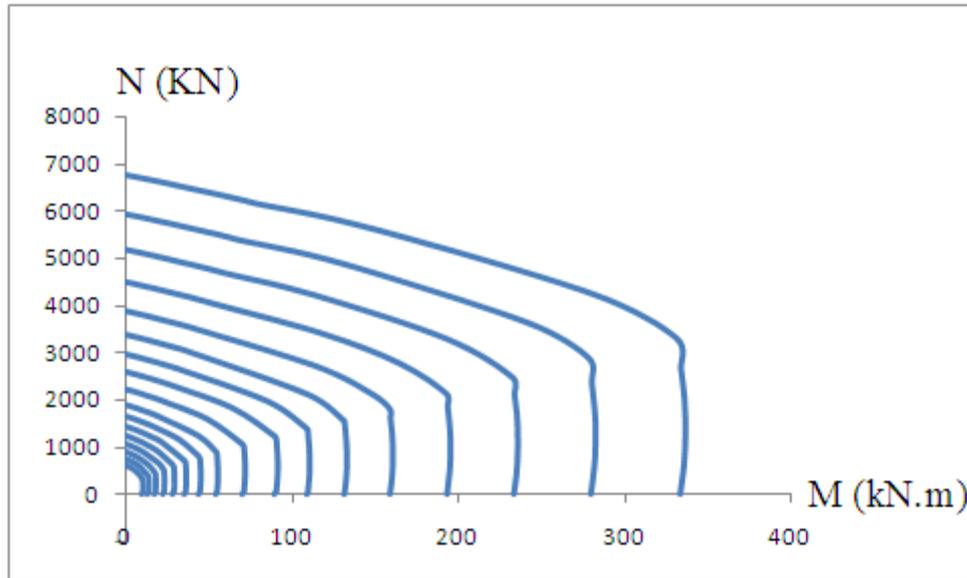


Figure 4-11: Les courbes d'interactions réelles zz .

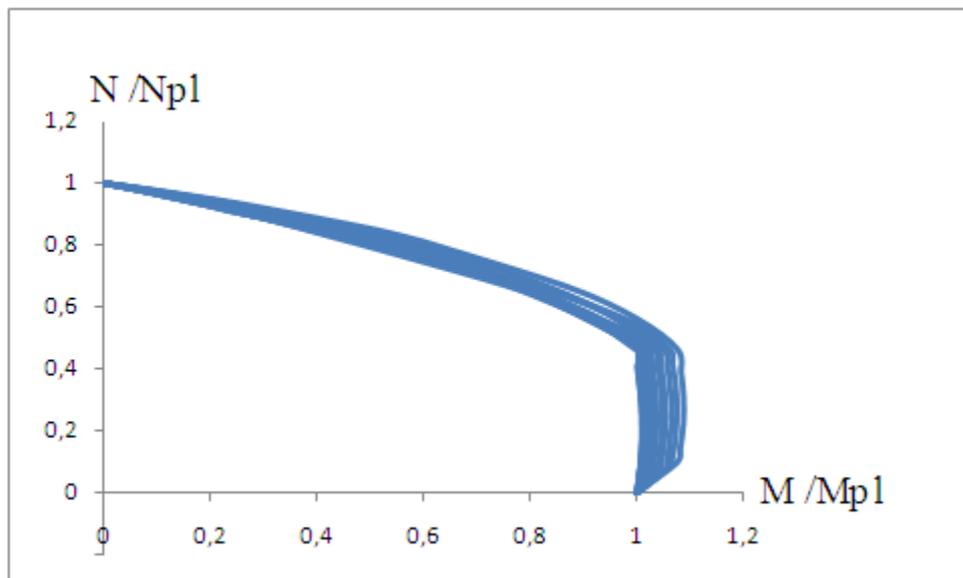


Figure 4-12: Les courbes d'interactions réduites zz .

4.2.2 Les résultats graphiques du deuxième cas :

Les courbes d'interactions pour le deuxième cas sont déterminées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y=60$ mm.

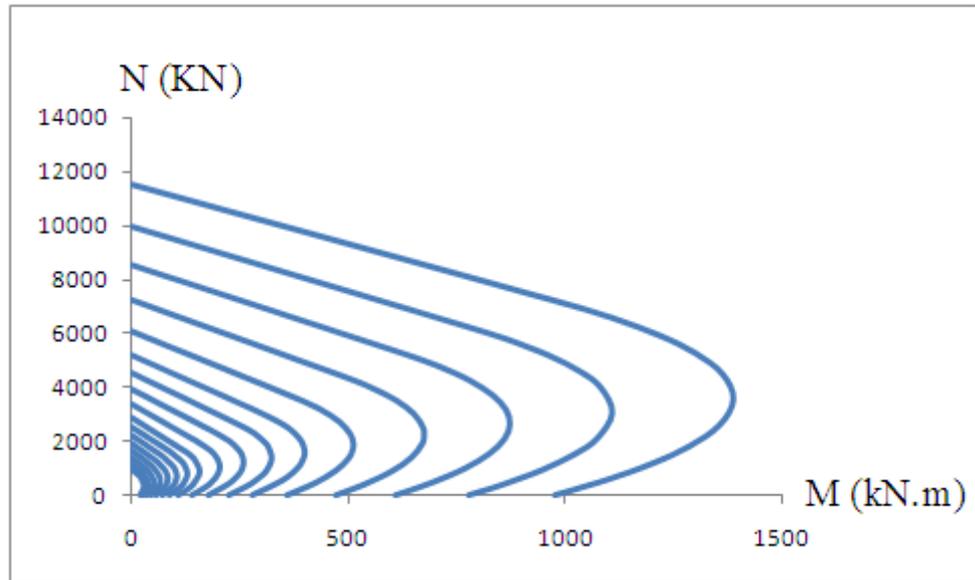


Figure 4-13: Les courbes d'interactions réelles yy .

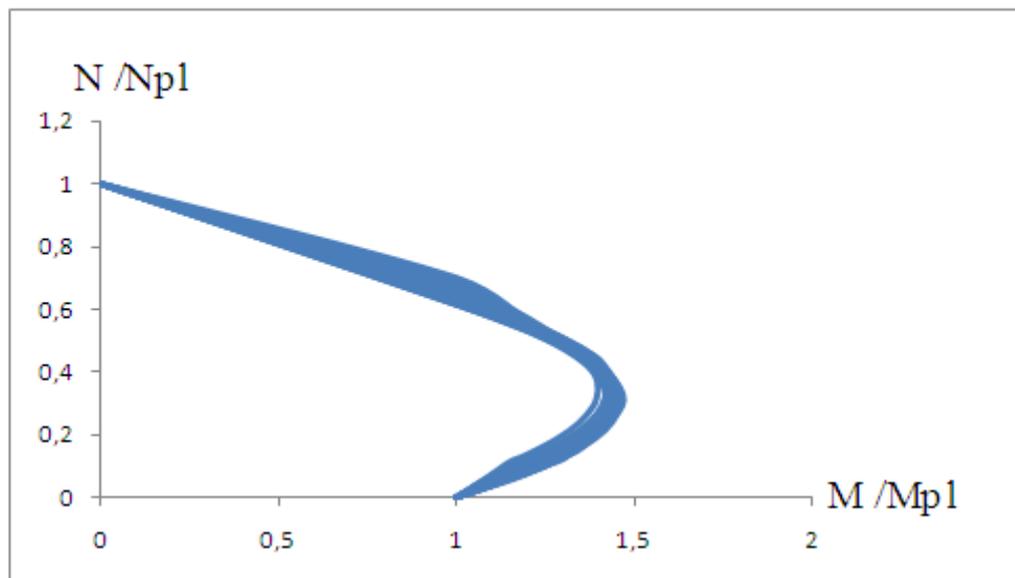


Figure 4-14: Les courbes d'interactions réduites yy .

- Selon l'axe de faible inertie zz : E_z varie d'une section à une autre tel que le rapport de la hauteur sur la largeur de chaque section reste constant ($H/B=1$).

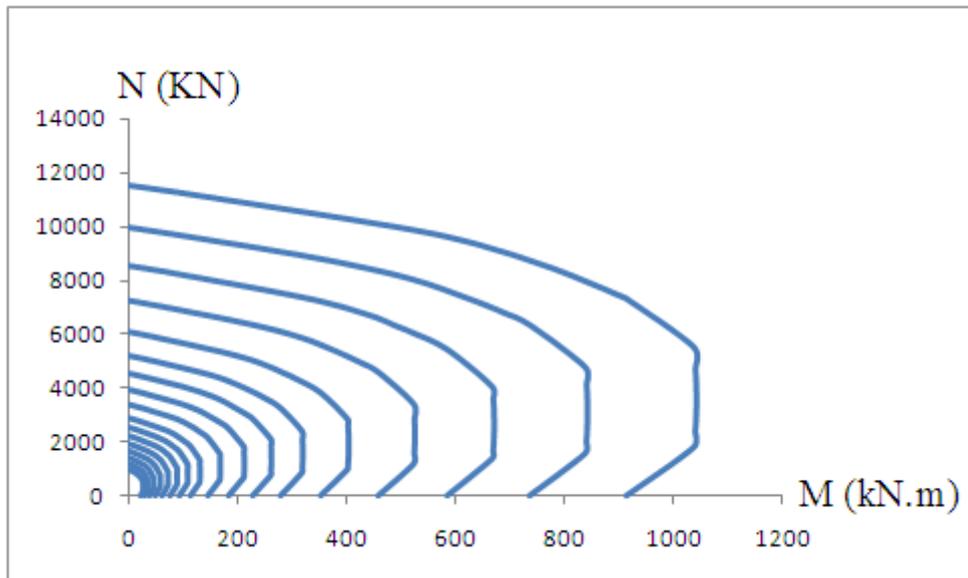


Figure 4-15: Les courbes d'interactions réelles zz .

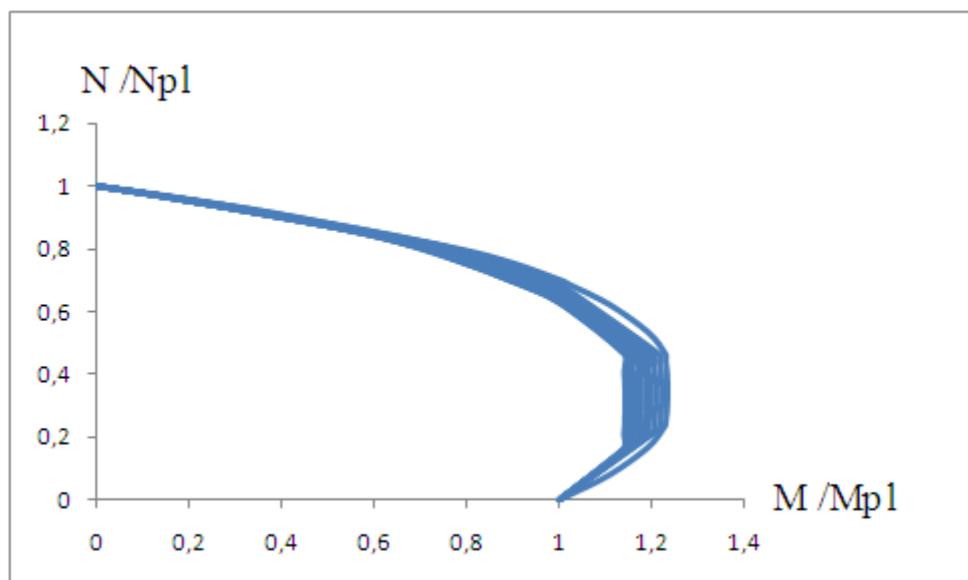


Figure 4-16: Les courbes d'interactions réduites zz .

4.2.3 Les résultats graphiques du troisième cas :

Les courbes d'interactions pour le troisième cas sont déterminées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y=80\text{mm}$.

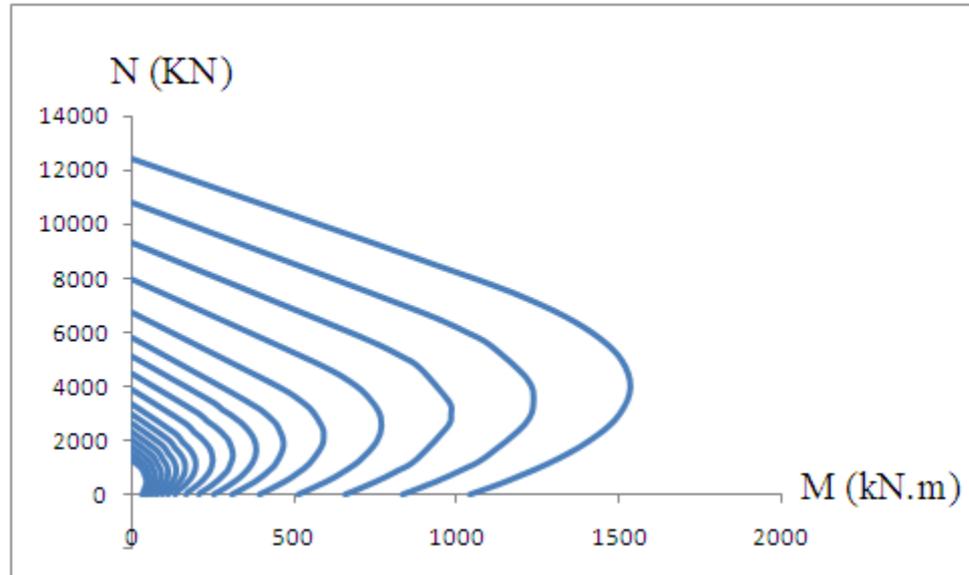


Figure 4-17: Les courbes d'interactions réelles yy .

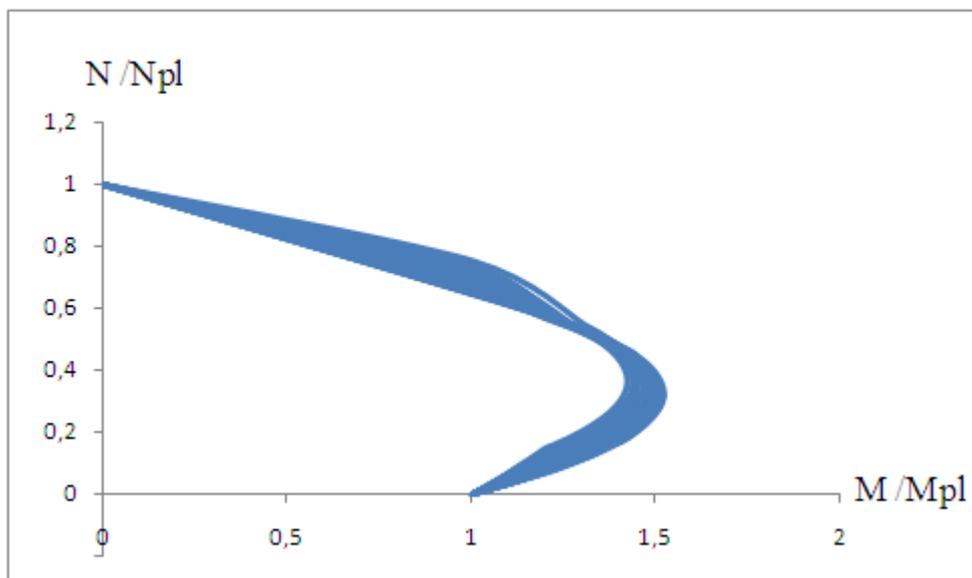


Figure 4-18: Les courbes d'interactions réduites yy .

- Selon l'axe de faible inertie zz : E_z varie d'une section à une autre tel que le rapport de la hauteur sur la largeur de chaque section reste constant ($H/B=1$).

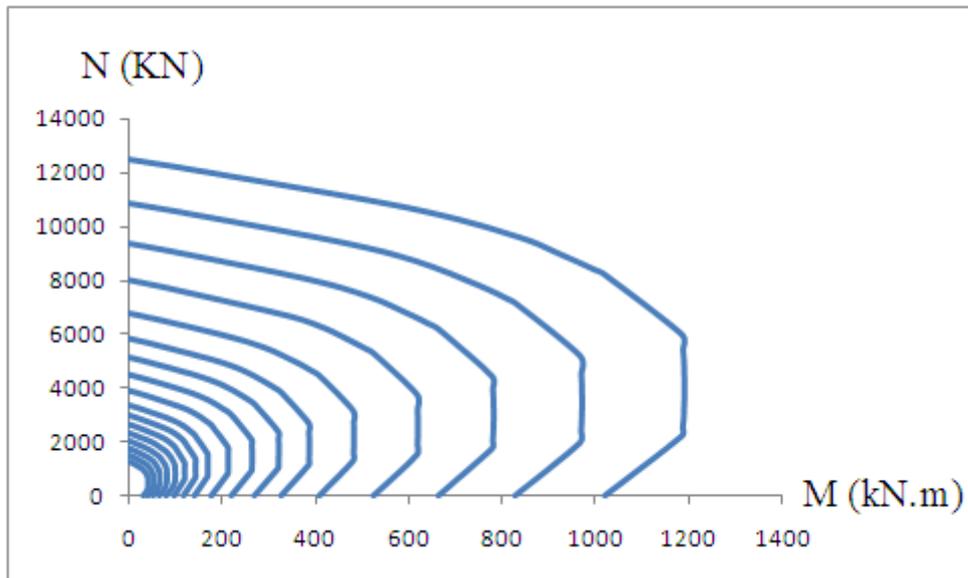


Figure 4-19: Les courbes d'interactions réelles zz .

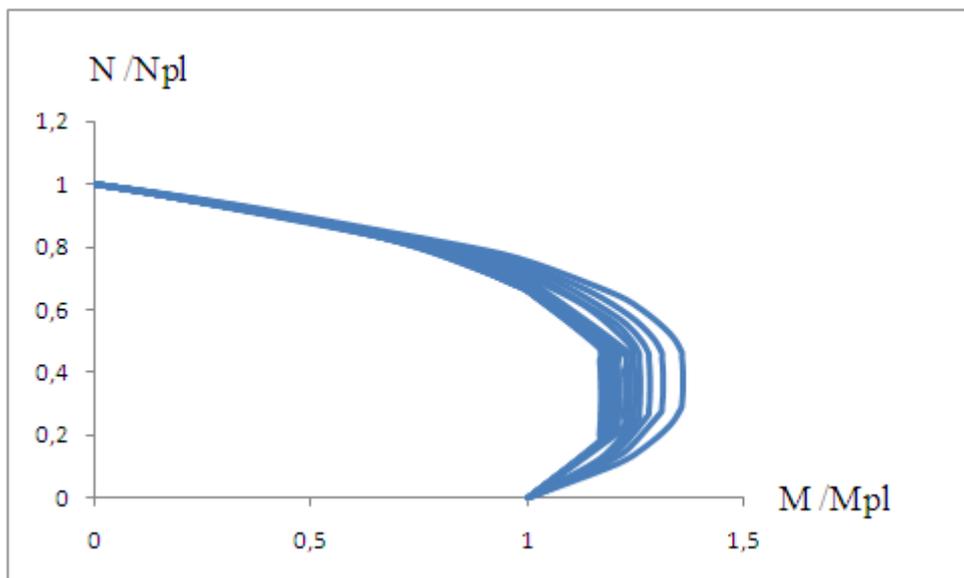


Figure 4-20: Les courbes d'interactions réduites zz .

4.2.4 Les résultats graphiques du quatrième cas :

Les courbes d'interactions pour le quatrième cas sont déterminées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y=100\text{mm}$.

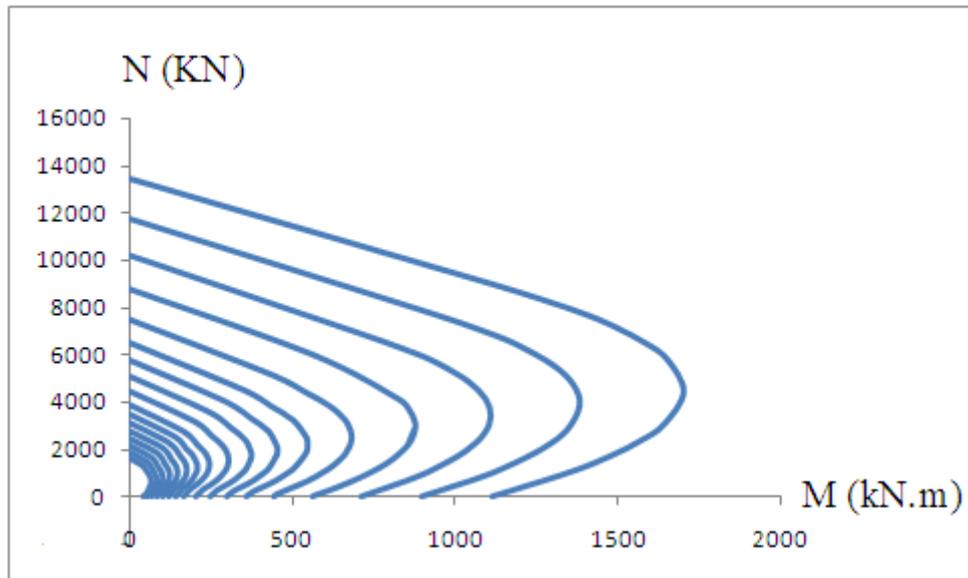


Figure 4-21: Les courbes d'interactions réelles yy .

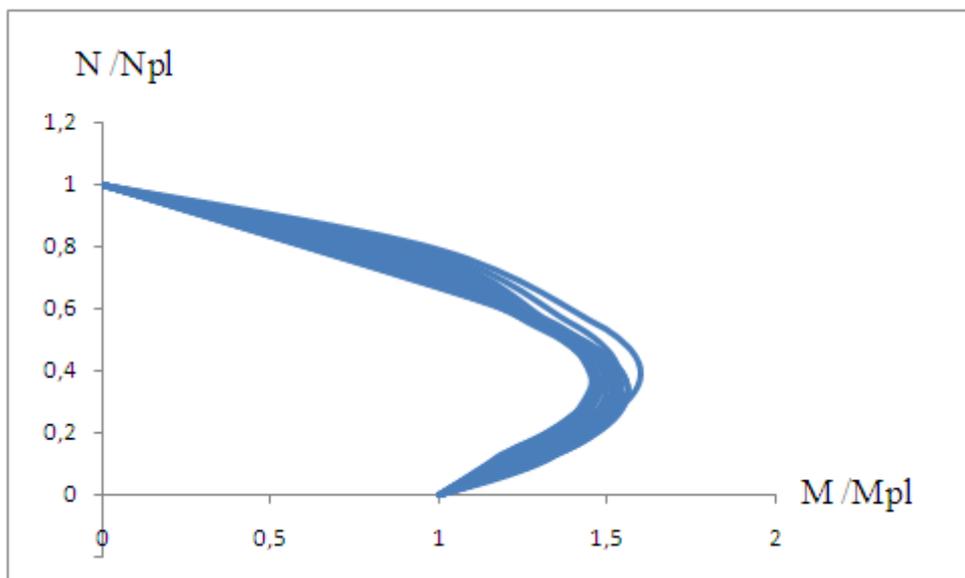


Figure4-22 : Les courbes d'interactions réduites yy .

- Selon l'axe de faible inertie zz : E_z varie d'une section à une autre tel que le rapport de la hauteur sur la largeur de chaque section reste constant ($H/B=1$).

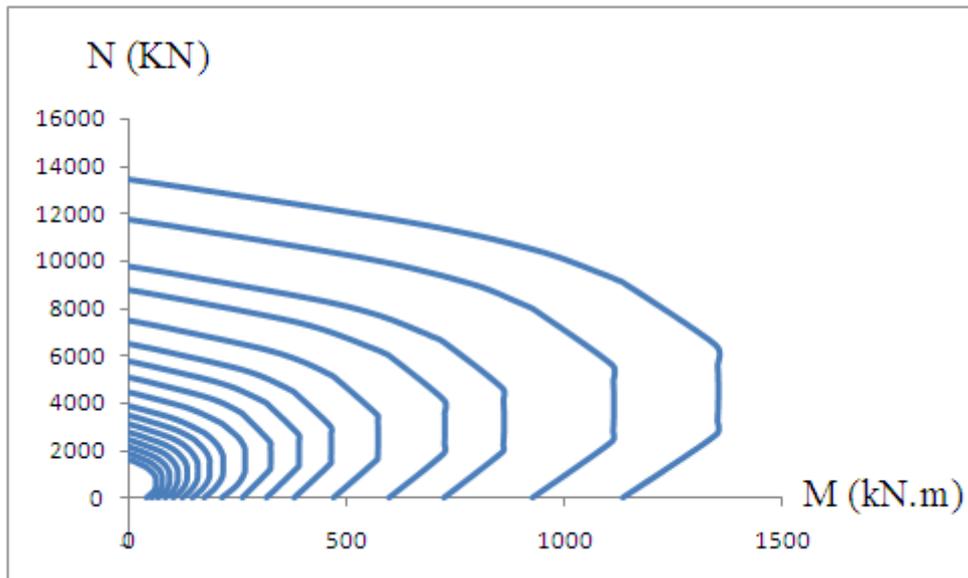


Figure 4-23: Les courbes d'interactions réelles zz .

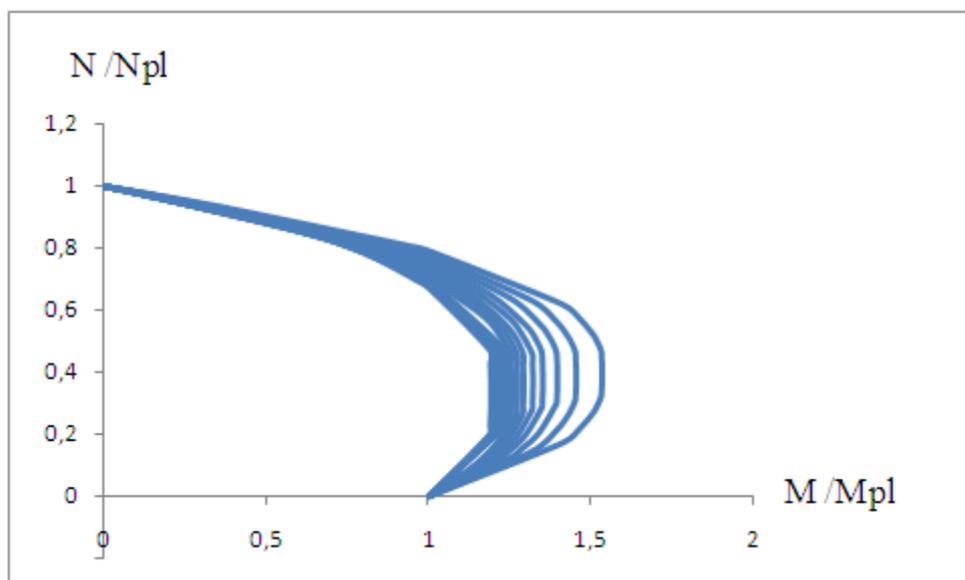


Figure 4-24: Les courbes d'interactions réduites zz .

4.2.5 Les résultats graphiques du Cinquième cas :

Les courbes d'interactions pour le cinquième cas sont déterminées pour l'enrobage suivant :

- Selon l'axe de forte inertie yy : $E_y = h/2$ (h : la hauteur du profilé).

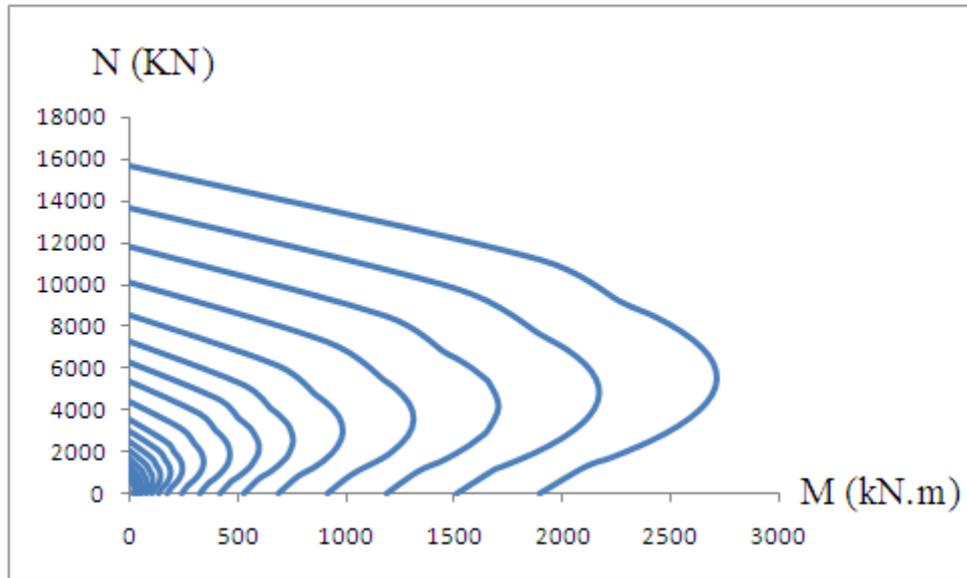


Figure 4-25: Les courbes d'interactions réelles yy .

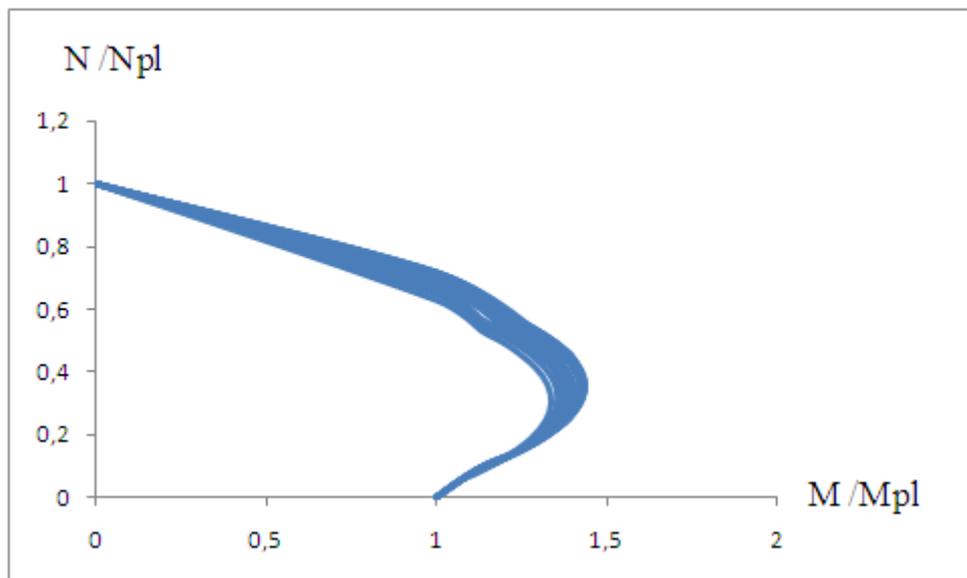


Figure 4-26: Les courbes d'interactions réduites yy .

- Selon l'axe de faible inertie zz : $E_z=b$ (b : la largeur du profilé).

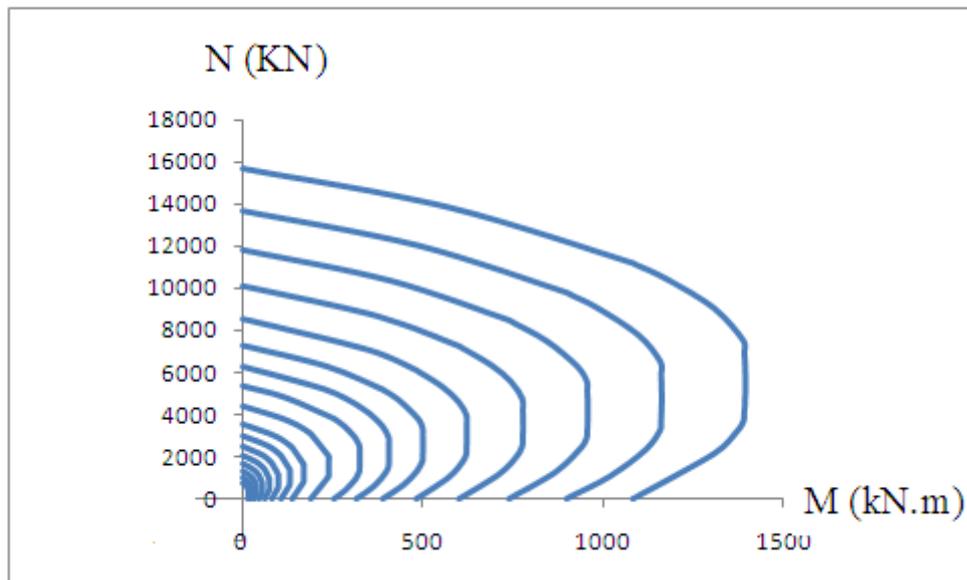


Figure 4-27: Les courbes d'interactions réelles zz .

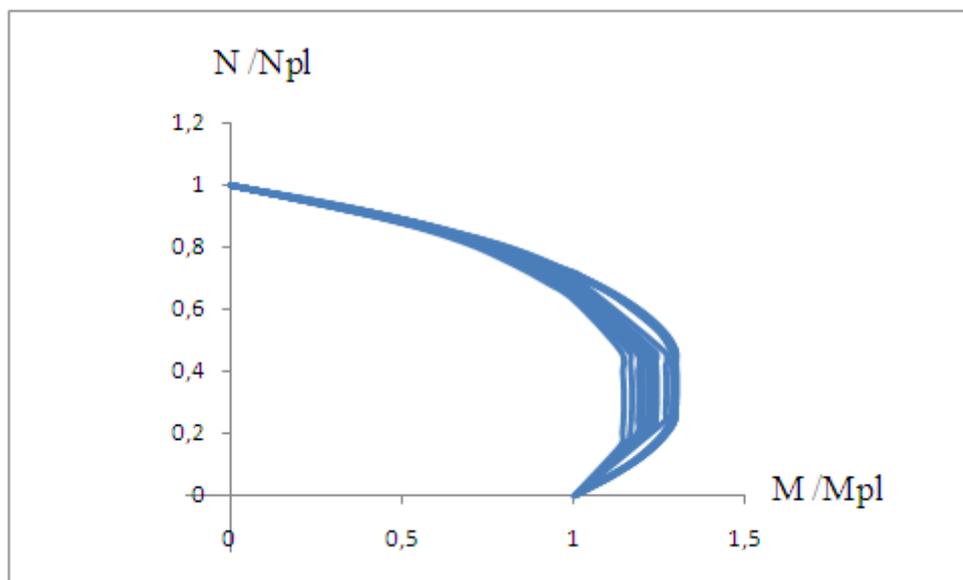


Figure 4-28: Les courbes d'interactions réduites zz .

5. Conclusion :

L'utilisation du programme que nous avons développé pour le calcul des poteaux mixtes acier béton soumis à la compression excentrée. Cas des poteaux formes par des sections IPE enrobés de béton est très avantageux, car ce programme nous a permis de tracer toutes les courbes d'interactions moment-effort normal pour les cinq cas de calculs dans un temps réduit.

V. LES ABAQUES ET LES EQUATIONS APPROCHEES

1. Introduction :

L'Eurocode 4 définit les règles générales à respecter lors du dimensionnement de poteaux mixtes. Cependant, si toutes les non-linéarités, aussi bien géométriques que physiques devaient être prises en compte, il faudrait absolument avoir recours à un ordinateur et utiliser des méthodes d'analyse numérique pour satisfaire aux impositions du code. C'est la raison pour laquelle l'Eurocode 4 propose aussi une méthode de dimensionnement simplifiée et plus pratique.

Pour obtenir une courbe d'interaction avec la méthode simplifiée de l'EC4, on peut calculer manuellement cinq points et tracer un schéma polygonal passant par ces points, et pour faciliter les choses dans ce chapitre nous devons proposer des abaques et des équations approchées des courbes d'interactions pour la section IPE avec une certaine tolérance d'erreur.

2. Détermination de la résistance plastique à la compression d'une section transversale mixte ($N_{pl,Rd}$) :

La résistance plastique à la compression d'une section transversale mixte doit être calculée en additionnant les résistances plastiques de ces éléments constitutifs :

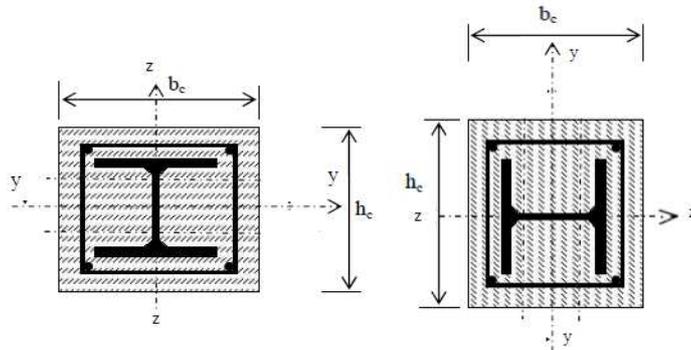


Figure5-1 :Section transversale mixte selon l'axe yy et selon l'axe zz.

$$N_{pl,Rd} = A_a \frac{f_y}{\gamma_a} + 0,85 A_c \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

Tel que :

A_a, A_c et A_s : Représentent respectivement les aires de la section transversale de l'acier de construction, du béton et de l'armature.

f_y : La limite d'élasticité de l'acier de construction.

f_{ck} : La résistance à la compression du béton.

f_{sk} : La limite d'élasticité de l'armature.

γ_{Ma} , γ_c , γ_s : Les coefficients partiels de sécurité aux ELU pour l'acier de construction, le béton et l'armature.

3. Détermination de la résistance plastique à la flexion d'une section transversale mixte ($M_{pl,Rd}$) :

La résistance plastique à la flexion d'une section transversale mixte doit être calculée en additionnant les résistances plastiques de ces éléments constitutifs :

$$M_{pl,Rd} = M_a + M_c + M_s$$

3.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

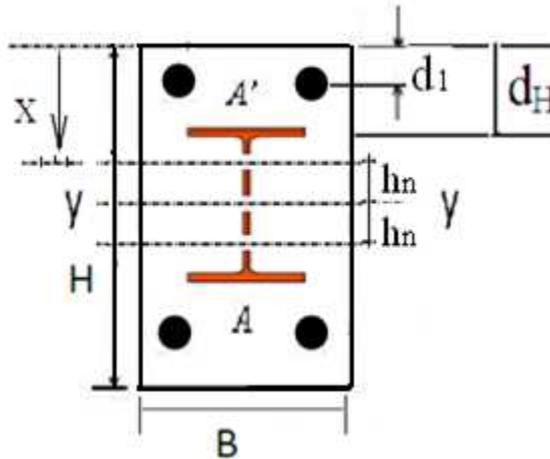


Figure5-2 : La section mixte selon l'axe de forte inertieyy.

3.1.1 Axe neutre dans l'âme :

$$h_n \leq \frac{h}{2} - t_f$$

$$d_H + t_f \leq x \leq \frac{H}{2}$$

Le moment	La formule
M_{ayy}	$\left(\frac{f_y}{\gamma_a}\right) \times \left\{ (t_f \times b) + (t_w \times [\frac{h}{2} - h_n - t_f]) \right\} \times (h_n + \frac{h}{2} - t_f)$
M_{cyy}	$\left(\frac{0,85 \times f_{ck} \times B \times x}{\gamma_c}\right) \times \left(\frac{x}{2} + h_n\right)$
M_{syy}	$\left(\frac{f_{sk} \times A_s}{\gamma_s}\right) \times \left(\frac{H}{2} - d_1\right)$

Tableau 5-1 : La formule des moments pour axe neutre dans l'âme selon yy.

3.1.2 Axe neutre dans la semelle :

$$\frac{h}{2} - t_f \leq h_n \leq \frac{h}{2} + (d_H - d_1)$$

$$d_1 \leq x \leq d_H$$

Le moment	La formule
M_{ayy}	$\left(\frac{f_y}{\gamma_a}\right) \times \{b \times (x - d_H)\} \times (2h_n + x - d_H)$
M_{cyy}	$\left(\frac{0,85 \times f_{ck} \times B \times x}{\gamma_c}\right) \times \left(\frac{x}{2} + h_n\right)$
M_{syy}	$\left(\frac{f_{sk} \times A_s}{\gamma_s}\right) \times \left(\frac{H}{2} - d_1\right)$

Tableau 5-2 : La formule des moments pour axe neutre dans la semelle selon yy.**3.1.3 Axe neutre hors de la section en acier :**

$$\frac{h}{2} \leq h_n \leq \frac{H}{2} - d_1$$

$$d_1 \leq x \leq d_H$$

Le moment	La formule
M_{ayy}	0
M_{cyy}	$\left(\frac{0,85 \times f_{ck} \times B \times x}{\gamma_c}\right) \times \left(\frac{x}{2} + h_n\right)$
M_{syy}	$\left(\frac{f_{sk} \times A_s}{\gamma_s}\right) \times \left(\frac{H}{2} - d_1\right)$

Tableau 5-3 : La formule des moments pour axe neutre hors de la section en acier selon yy.

3.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

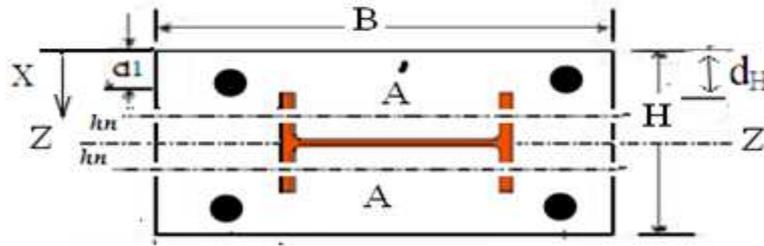


Figure5-3 :la section mixte selon l'axe de faible inertiezz.

3.2.1 Axe neutre dans l'âme :

$$h_n \leq \frac{t_w}{2}$$

$$\frac{H}{2} - \frac{t_w}{2} \leq x \leq \frac{H}{2}$$

Le moment	La formule
$M_{a\ zz}$	$\left(\frac{f_y}{\gamma_a}\right) \times \{((b- t_w) \times t_f) + \left(\frac{t_w}{2} - h_n\right) \times h\} \times (h_n + \frac{b}{2})$
$M_{c\ zz}$	$\left(\frac{0,85 \times f_{ck} \times B \times x}{\gamma_c}\right) \times \left(\frac{x}{2} + h_n\right)$
$M_{s\ zz}$	$\left(\frac{f_{sk} \times A_s}{\gamma_s}\right) \times \left(\frac{H}{2} - d_1\right)$

Tableau5-4 :La formule des moments pour axe neutre dans l'âme selon zz.

3.2.2 Axe neutre dans la semelle :

$$t_w/2 \leq h_n \leq b/2$$

$$d_H \leq x \leq (H-t_w)/2$$

Le moment	La formule
$M_{a\ zz}$	$\left(\frac{f_y}{\gamma_a}\right) \times \{t_f \times [\frac{b}{2} - h_n]\} \times (2h_n + b)$
$M_{c\ zz}$	$\left(\frac{0,85 \times f_{ck} \times B \times x}{\gamma_c}\right) \times \left(\frac{x}{2} + h_n\right)$
$M_{s\ zz}$	$\left(\frac{f_{sk} \times A_s}{\gamma_s}\right) \times \left(\frac{H}{2} - d_1\right)$

Tableau5-5 :La formule des moments pour axe neutre dans la semelle selon zz.

3.2.3 Axe neutre hors de la section en acier :

$$\frac{b}{2} \leq h_n \leq \frac{H}{2} - d_1$$

$$d_1 \leq x \leq d_H$$

Le moment	La formule
$M_{a\ zz}$	0
$M_{c\ zz}$	$(\frac{0,85 \times f_{ck} \times B \times x}{\gamma_c}) \times (\frac{x}{2} + h_n)$
$M_{s\ zz}$	$(\frac{f_{sk} \times A_s}{\gamma_s}) \times (\frac{H}{2} - d_1)$

Tableau5-6 :La formule des moments pour axe neutre hors de la section en acier selon zz.

4. Les courbes d’interactions inversées N–M :

Les courbes d’interactions inversées N–M sont utilisées pour trouver les équations approchées tel que en générale ces courbes inversées sont des paraboles du seconde ordre ou d’ordre trois ou une parabole plus une droite.

– Selon l’axe de forte inertie yy on a:

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$ $\frac{M}{M_{pl,rd}} = a[\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + b[\frac{N}{N_{pl,rd}}] + c$

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1]$ $\frac{M}{M_{pl,rd}} = a_1[\frac{N}{N_{pl,rd}}] + b_1$

$N_c = (\frac{0,85 \times f_{ck} \times A_c}{\gamma_c})$

A_c : L’aire de la section transversale du béton.

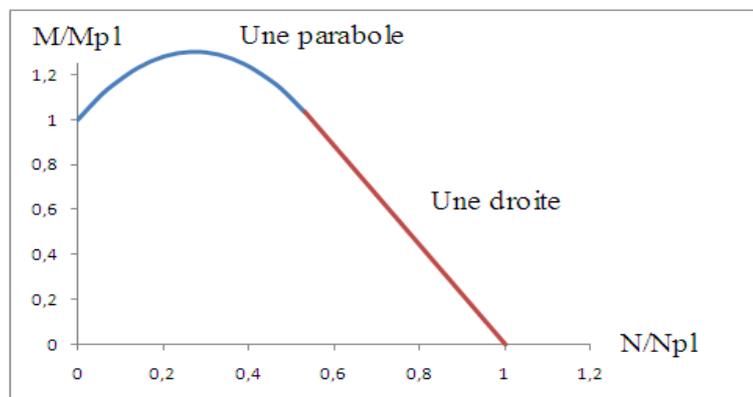


Figure 5-4 : Courbe d’interaction inverséeyy pour la compression et la flexion uniaxiale.

– Selon l'axe de faible inertie zz on a :

$$\text{Pour } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0;1] \frac{M}{M_{pl,rd}} = a \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^3 + b \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + c \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + d$$

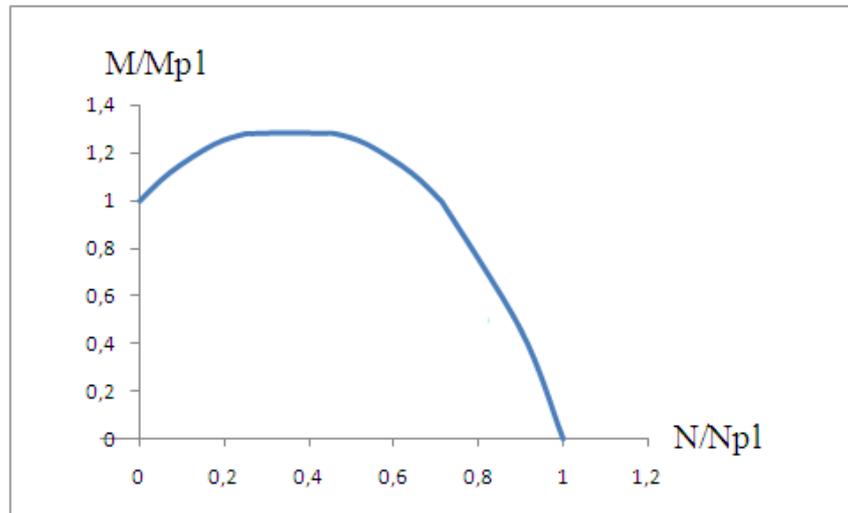


Figure 5-5 : Courbe d'interaction inversée pour la compression et la flexion uniaxiale.

Remarque :

- Les coefficients a , b , c , d , a_1 , b_1 sont des équations en fonction des caractéristiques géométriques de la section mixte dans la première approche.
- Les coefficients a , b , c , d , a_1 , b_1 sont des constants dans la deuxième approche.

4.1 Le premier cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

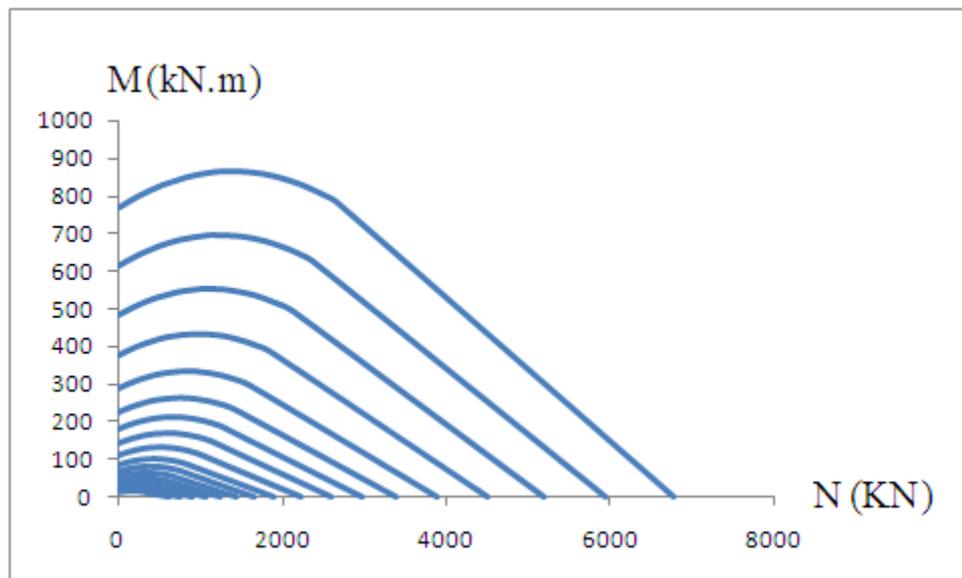


Figure 5-6 : Les courbes d'interactions inversées réellesyy.

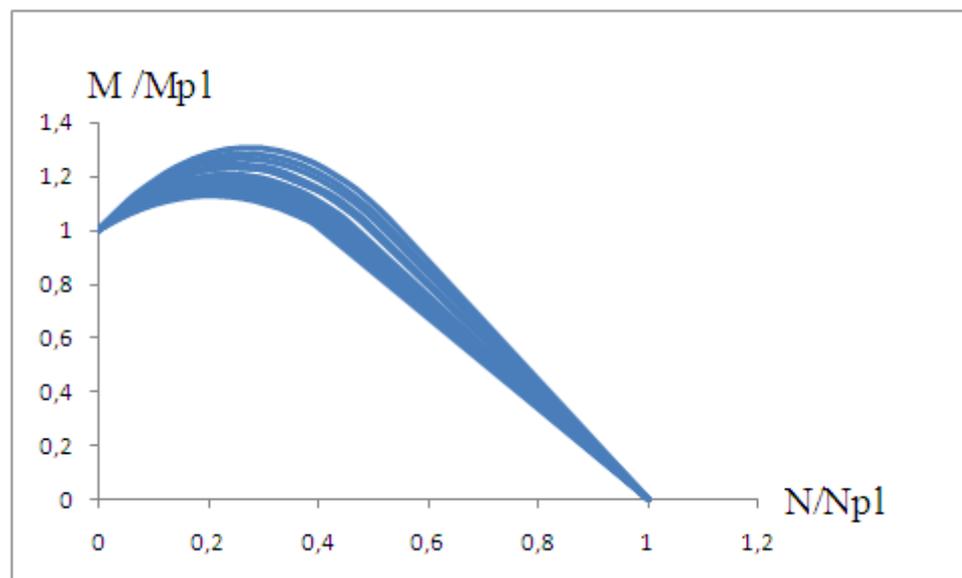


Figure5-7 : Les courbes d'interactions inversées réduitesyy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

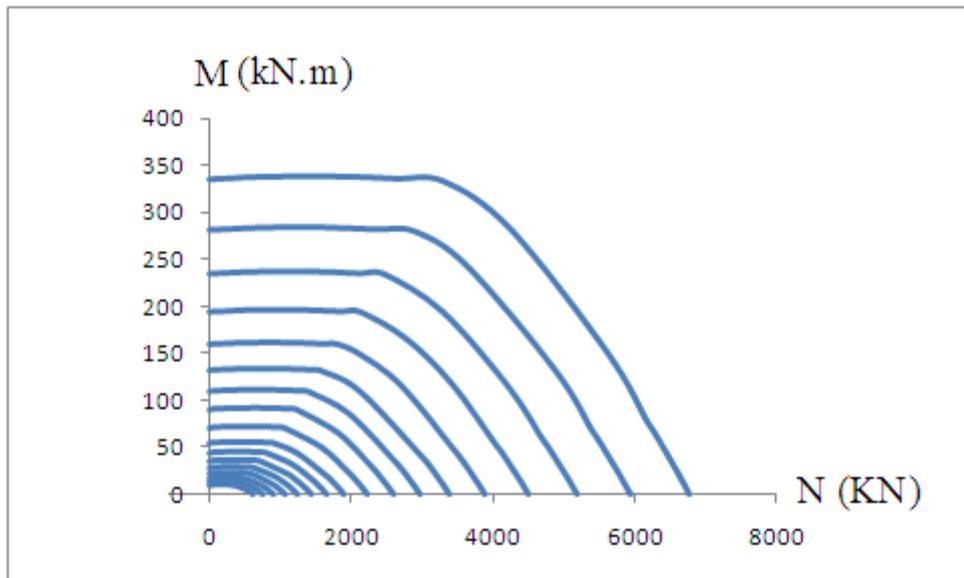


Figure5-8 : Les courbes d'interactions inversées réelleszz.

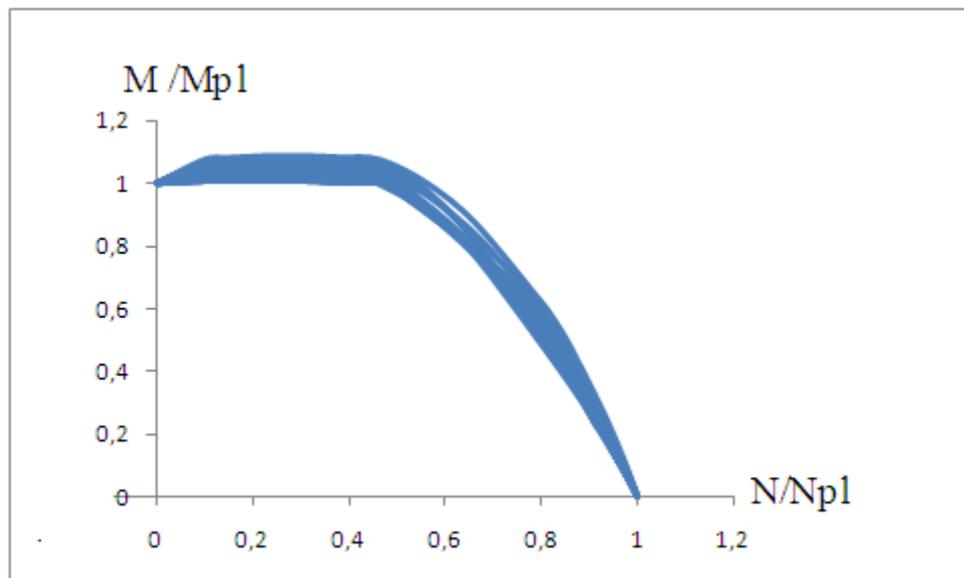


Figure5-9 : Les Courbes d'interactions inversées réduiteszz.

4.2 Le deuxième cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

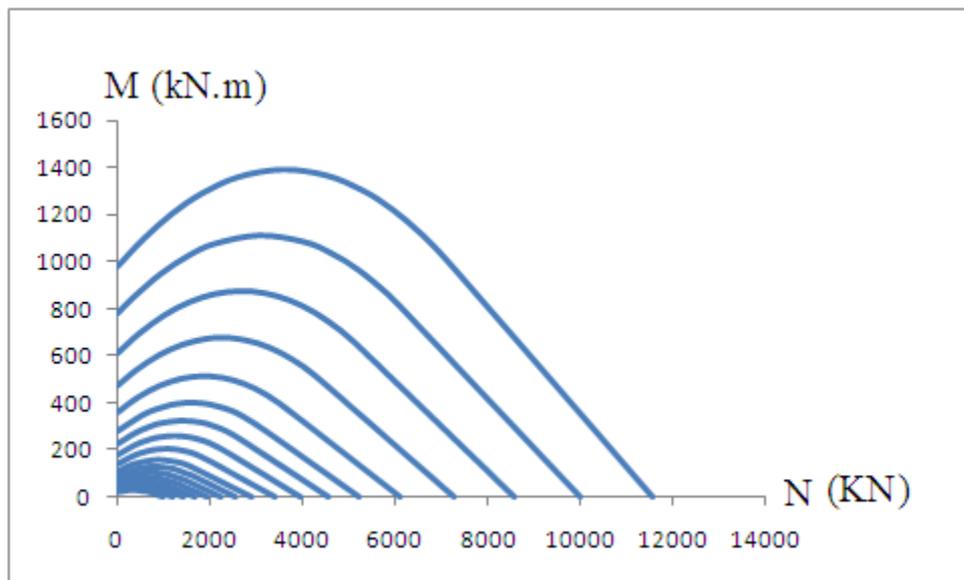


Figure 5-10 : Les Courbes d'interactions inversées réellesyy.

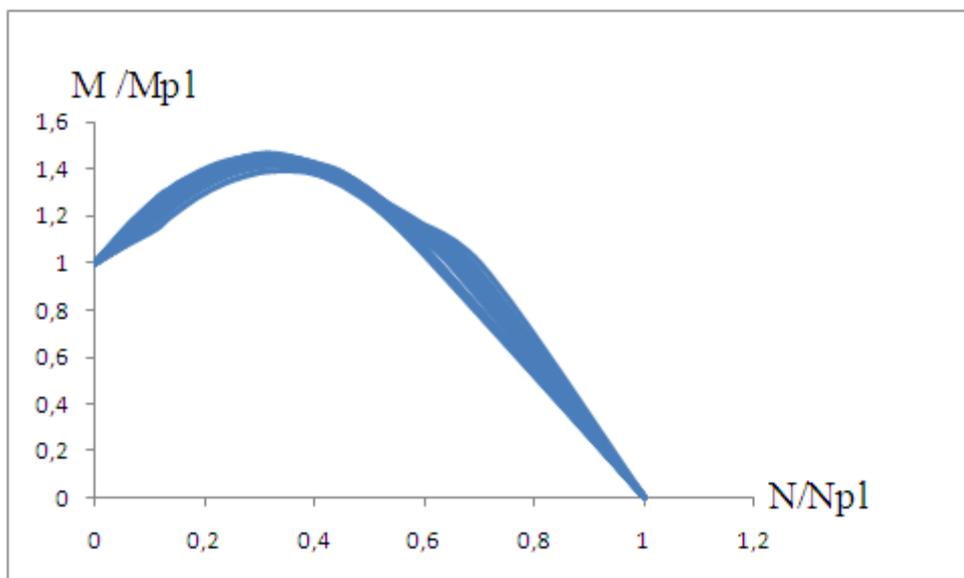


Figure 5-11 : Les courbes d'interactions inversées réduitesyy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

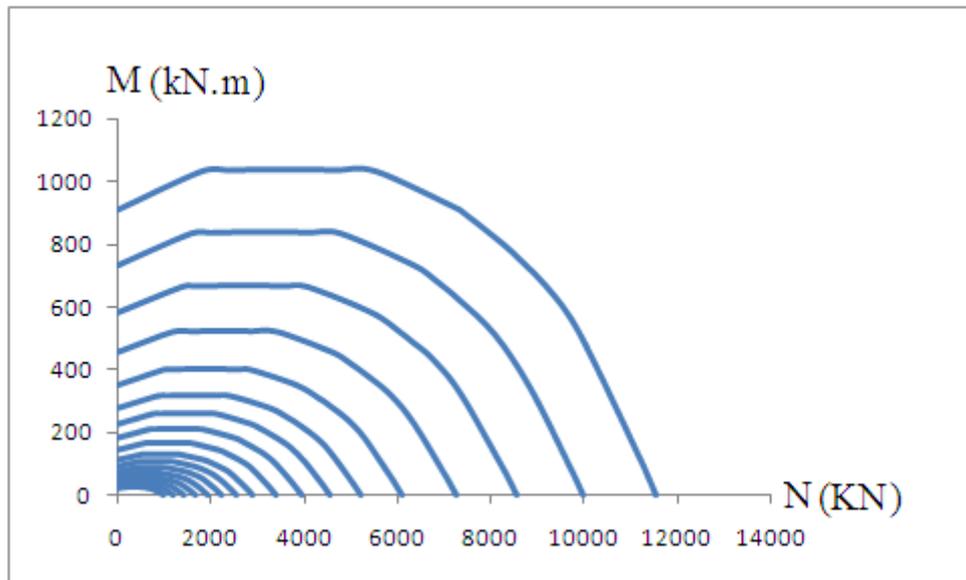


Figure5-12 : Les courbes d'interactions inversées réelleszz.

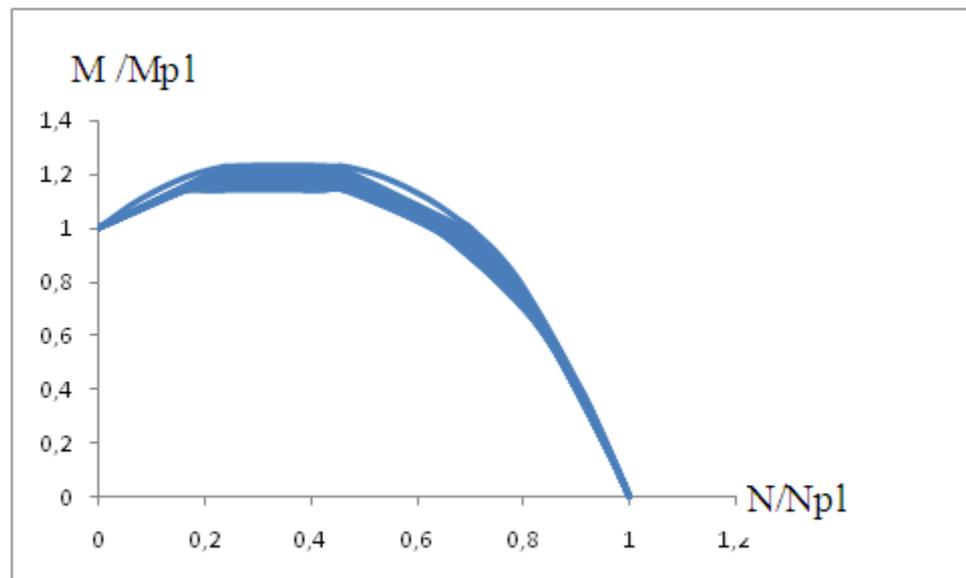


Figure5-13 : Les courbes d'interactions inversées réduiteszz.

4.3 Le troisième cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

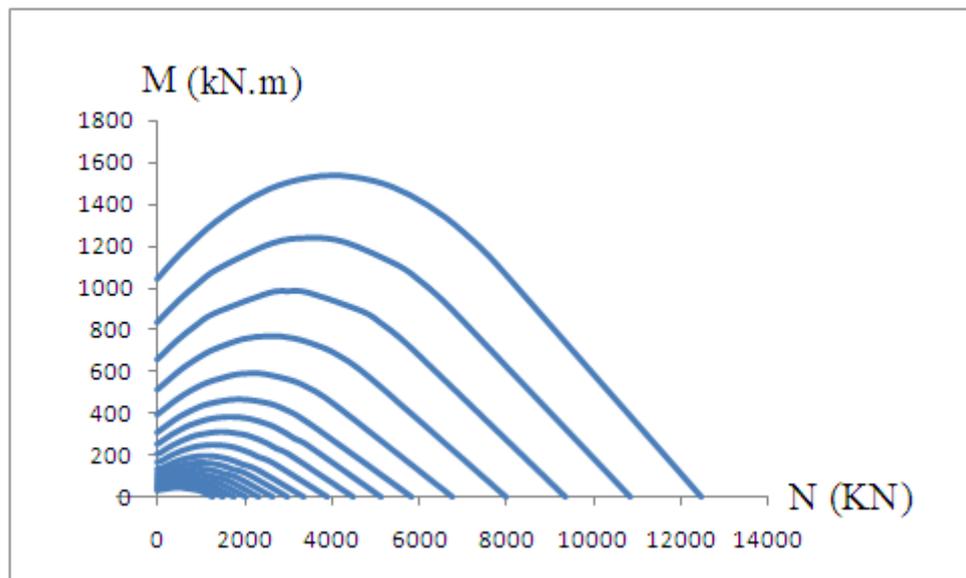


Figure 5-14: Les courbes d'interactions inversées réellesyy.

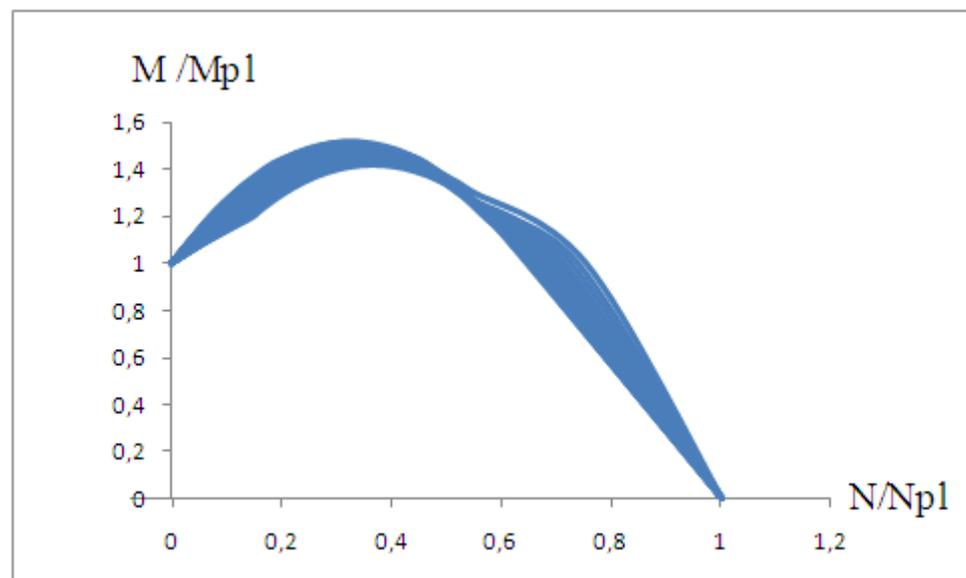


Figure5-15 : Les courbes d'interactions inversées réduitesyy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

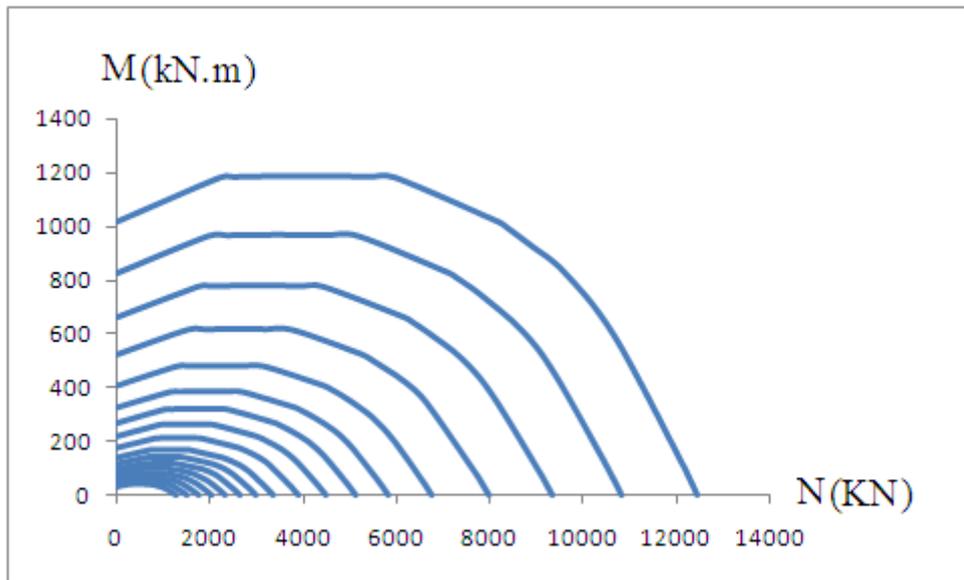


Figure5-16 : Les courbes d'interactions inversées réelleszz.

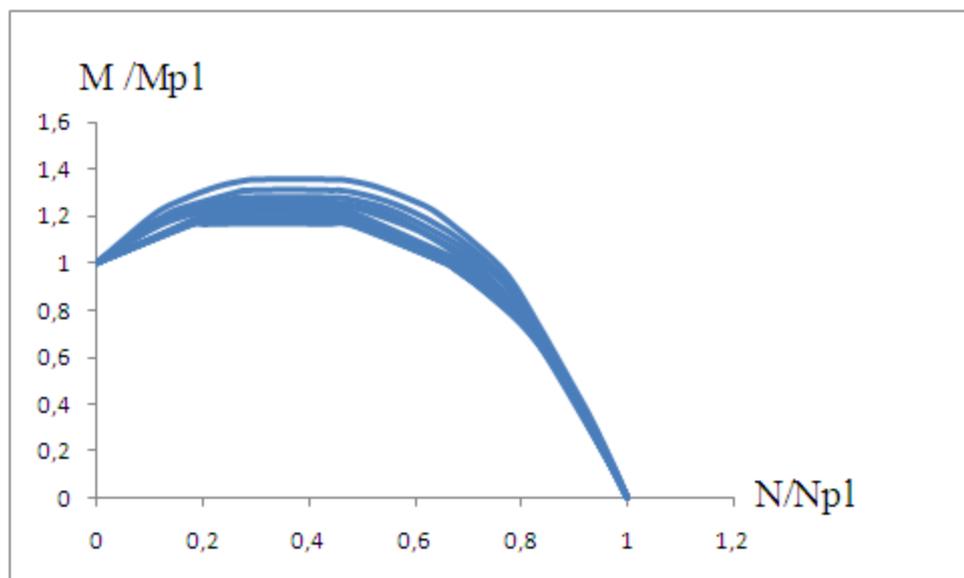


Figure5-17 : Les courbes d'interactions inversées réduiteszz.

4.4 Le quatrième cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

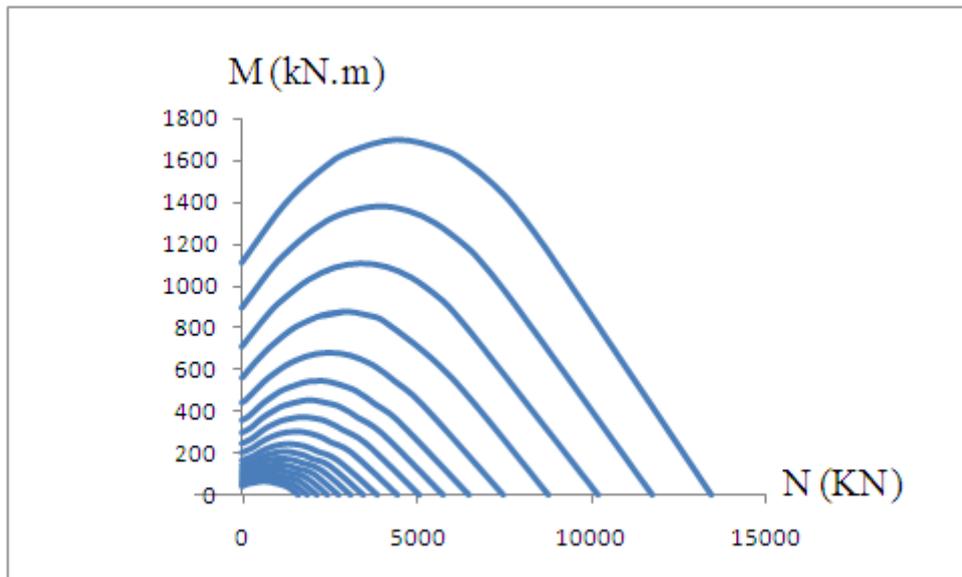


Figure 5-18 : Les courbes d'interactions inversées réellesyy.

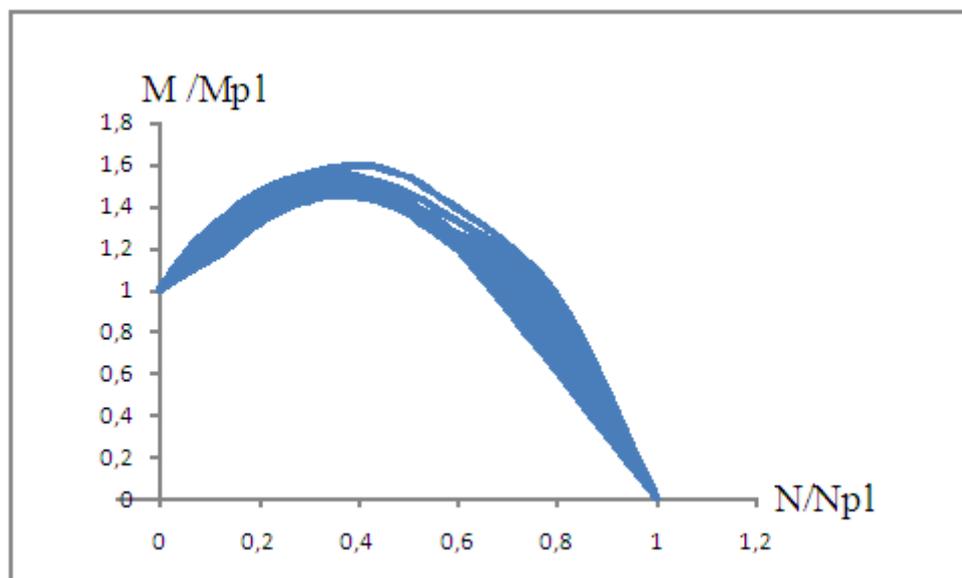


Figure 5-19 : Les courbes d'interactions inversées réduitesyy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

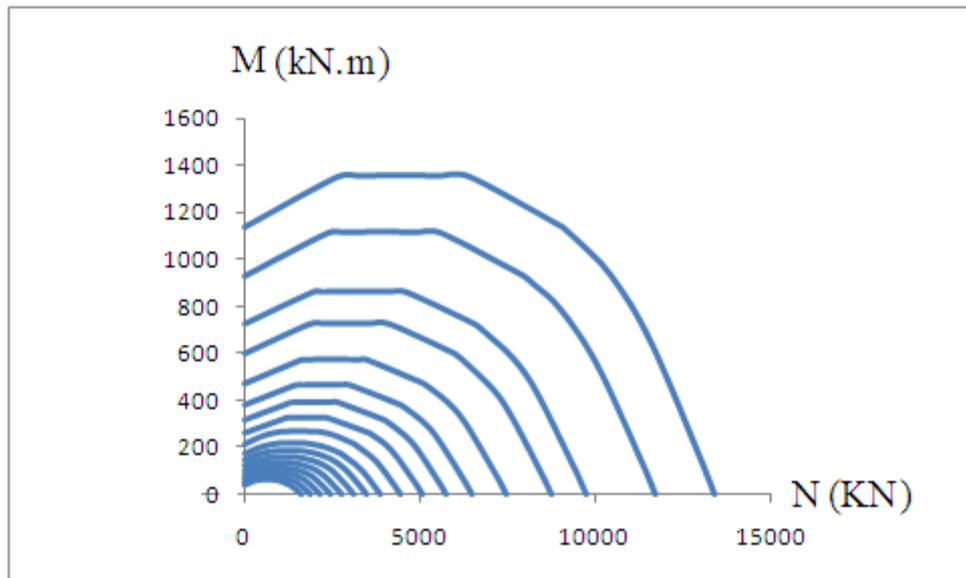


Figure 5-20 : Les courbes d'interactions inversées réelleszz.

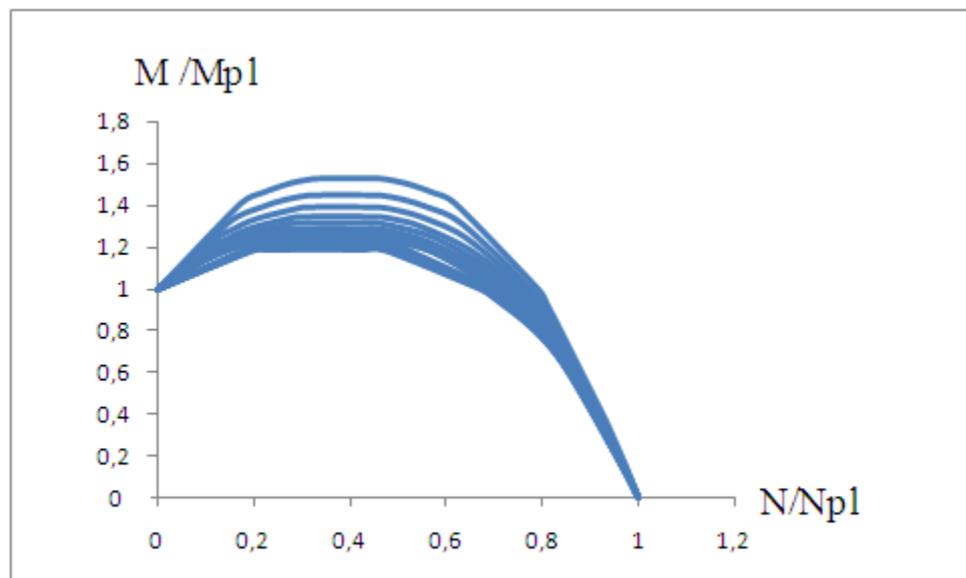


Figure 5-21 : Les courbes d'interactions inversées réduiteszz.

4.5 Le cinquième cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

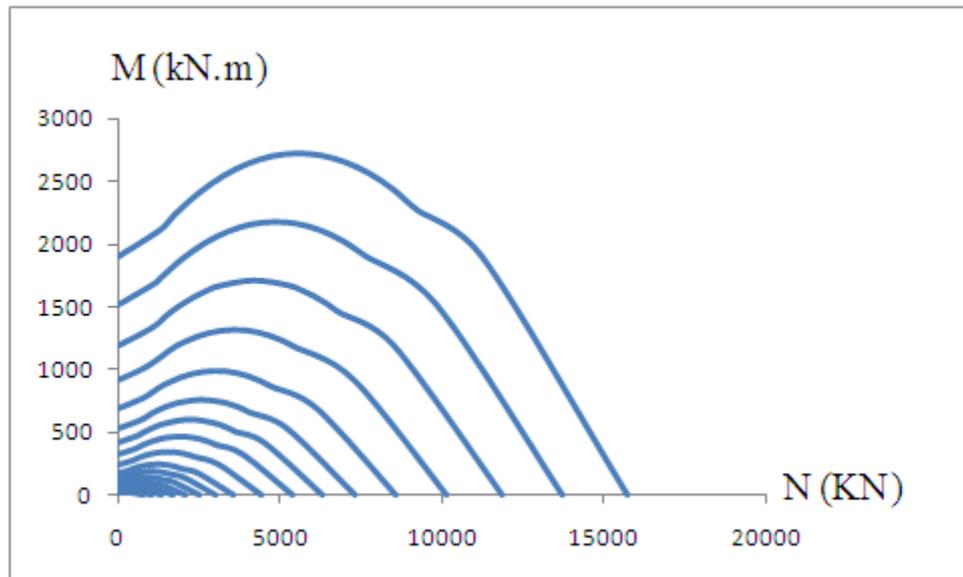


Figure 5-22 : Les courbes d'interactions inversées réellesyy.

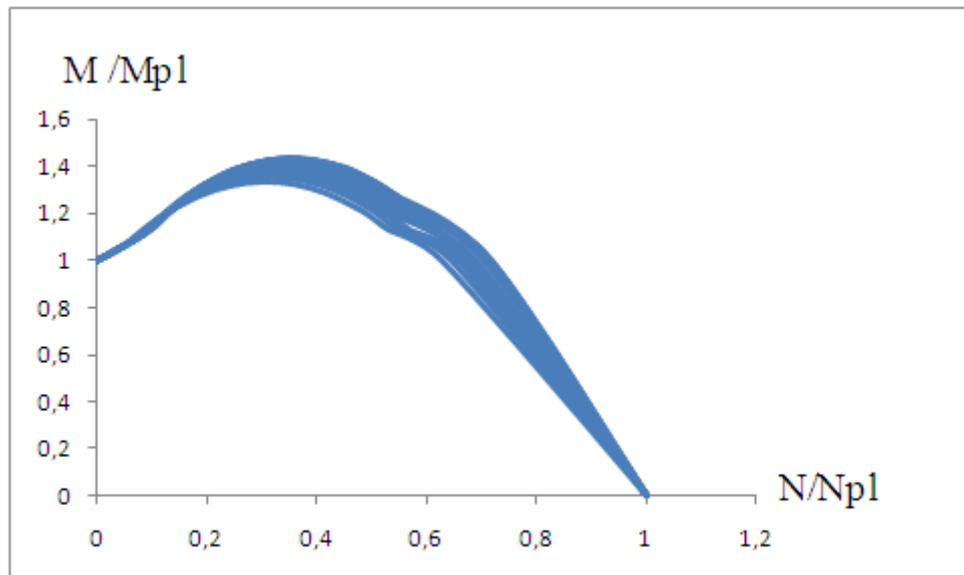


Figure 5-23 : Les courbes d'interactions inversées réduitesyy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

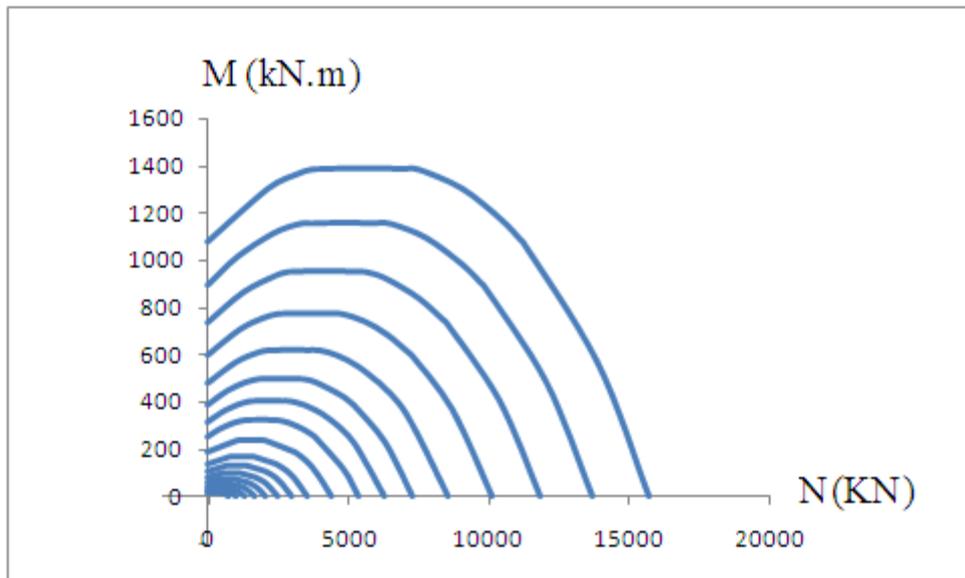


Figure 5-24 : Les courbes d'interactions inversées réelleszz.

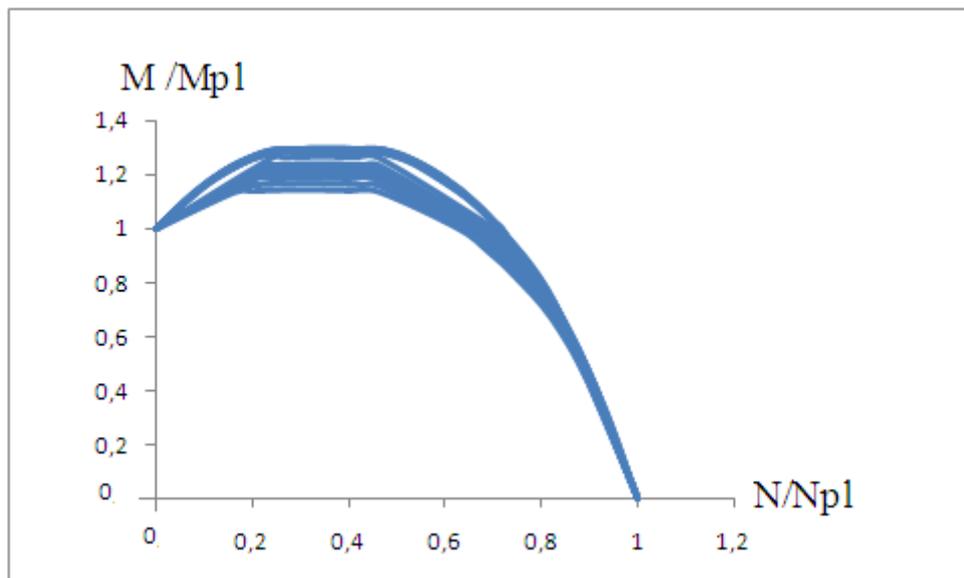


Figure 5-25 : Les courbes d'interactions inversées réduiteszz.

5. Valeurs des points caractéristiques :

Les points caractéristiques sont les points pour lequel on change notre équation générale c'est à dire on passe de l'équation du deuxième degré a l'équation du première degré. Ces points sont utilisés seulement selon l'axe de forte inertie.

	Classe IPE	Valeurs des points				
		cas 01	cas 02	cas 03	cas 04	cas 05
section1	IPE 100	0,53033424	0,70059556	0,75363735	0,79122115	0,6279753
section2	IPE 120	0,5187008	0,68771401	0,73901039	0,77660734	0,64549373
section3	IPE 140	0,50874578	0,67712579	0,72648824	0,76369538	0,65870933
section4	IPE 160	0,48724849	0,66723116	0,71474297	0,75142734	0,66800139
section5	IPE 180	0,48184857	0,66002719	0,70555049	0,74140652	0,67663632
section6	IPE 200	0,456932	0,65145799	0,69531879	0,73049858	0,68149979
section7	IPE 220	0,45387492	0,64411976	0,68634091	0,72074107	0,68733733
section8	IPE 240	0,43096184	0,60738015	0,67602275	0,70979904	0,69003743
section9	IPE 270	0,43859384	0,62149167	0,67303511	0,70490114	0,70318103
section10	IPE 300	0,44237773	0,61007074	0,66867398	0,69895733	0,71212153
section11	IPE 330	0,42557229	0,60154268	0,66391241	0,69281169	0,71352383
section12	IPE 360	0,42207698	0,60097861	0,63550782	0,68569654	0,71315755
section13	IPE 400	0,40953655	0,59907047	0,63139819	0,68360375	0,71532157
section14	IPE 450	0,41107554	0,60914589	0,63812996	0,6841605	0,7177725
section15	IPE 500	0,4096457	0,61543509	0,6417802	0,6653498	0,71788497
section16	IPE 550	0,39691734	0,61362283	0,63826785	0,66049554	0,71665655
section17	IPE 600	0,39251453	0,61561054	0,63844705	0,65919566	0,7140841

Tableau5-7 :Les points caractéristiques pour les cinq cas.

6. La première approche :

6.1Déterminations des coefficients :

Dans cette recherche nous avons souligné l'importance d'avoir une bonne précision dans la détermination des coefficients (petite tolérance d'erreur), en variant plusieurs paramètres géométriques pour choisir la solution la plus adéquate de ces derniers.Pour cela, on a mené une étude paramétrique, cette dernière est faite avec le logiciel de calcul Microsoft office Excel.

6.1.1 Le premier cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	équation
a	$-3.437 \times \left(\frac{B}{H}\right) - 1.517$
b	$0.209 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 2.787$
c	1

a1	$-0.11 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.460$
b1	$2.54 \times 0.058^{h/I_{yy}}$

Tableau 5-8: Valeurs des coefficients selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	équation
a	$-0,539 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 1,1543$
b	$-0,037 \times \ln\left(\frac{I_{zz}}{h}\right) + 0,0387$
c	$0,0335 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,3659$
d	$0,009 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,022$

Tableau 5-9: Valeurs des coefficients selon zz.

6.1.2 Le deuxième cas :

– Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	équation
a	$23.8 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 4.617$
b	$-8.653 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 2.870$
c	$-0,714 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,997$
a1	$-14.03 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.639$
b1	$2.643 \times e^{\frac{h}{I_{yy}} \times 4.774}$

Tableau 5-10: Valeurs des coefficients selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	équation
a	$-0,0496 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 1,8159$
b	$0,0086 \times \left(\frac{I_{zz}}{h}\right) + 0,0008$
c	$0,9799 \times 0.1819^{\frac{h}{I_{zz}}}$
d	$-0,0096 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,021$

Tableau 5-11: Valeurs des coefficients selon zz.

6.1.3 Le troisième cas :

- Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	équation
a	$0.434 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 1.897$
b	$3.05 \times e^{-6.73 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right)}$
c	$-0,368 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,989$
a1	$-23.08 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.916$
b1	$4.837 \times 0.08 \frac{h}{I_{yy}}$

Tableau 5-12 : Valeurs des coefficients selon yy.

- Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	équation
a	$-0,042 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 1,8876$
b	$-1,1268 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,208$
c	$1,134 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,6684$
d	$0,0389 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0156$

Tableau 5-13: Valeurs des coefficients selon zz.**6.1.4 Le quatrième cas :**

- Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	équation
a	$-0.41 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) - 1.845$
b	$0.184 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) + 1.910$
c	$0,2954 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,9804$
a1	$0.374 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) - 5.552$
b1	$6.034 \times \left(-0.10\right) \frac{I_{yy}}{h}$

Tableau 5-14 : Valeurs des coefficients selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	équation
a	$0,6053 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 1,97$
b	$-3,0827 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,2135$
c	$2,4448 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,742$
d	$0,0419 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0177$

Tableau 5-15 : Valeurs des coefficients selon zz.

6.1.5 Le cinquième cas :

– Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	équation
a	$-1.962 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 3.421$
b	$2.45 \times e^{\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) \times (-2.13)}$
c	$0,192 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,969$
a1	$0.195 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.233$
b1	$2.350 \times (-0.06)^{\frac{h}{I_{yy}}}$

Tableau 5-16 : Valeurs des coefficients selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	équation
a	$-0,117 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 2,0172$
b	$0,3594 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,6044$
c	$-0,243 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,3987$
d	$0,0093 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0157$

Tableau 5-17 : Valeurs des coefficients selon zz.

6.2 Les équations générales :

6.2.1 Le premier cas :

6.2.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3.437 \times (\frac{B}{H}) - 1.517] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [0.209 \times \ln(\frac{h}{I_{yy}}) + 2.787] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0.11 \times \ln(\frac{h}{I_{yy}}) - 2.460] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [2.54 \times 0.058^{h/I_{yy}}]$$

6.2.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0,539 \times (\frac{h}{I_{yy}}) - 1,1543] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^3 + [-0,037 \times \ln(\frac{I_{zz}}{h}) + 0,0387] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [0,0335 \times \ln(\frac{h}{I_{zz}}) + 0,3659] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,009 \times \ln(\frac{h}{I_{zz}}) + 1,022]$$

6.2.2 Le deuxième cas :

6.2.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [23.8 \times (\frac{h}{I_{yy}}) - 4.617] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [-8.653 \times (\frac{h}{I_{yy}}) + 2.870] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [-0,714 \times (\frac{h}{I_{yy}}) + 0,997]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-14.03 \times (\frac{h}{I_{yy}}) - 2.639] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [2.643 \times e^{\frac{h}{I_{yy}} \times 4.774}]$$

6.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0,0496 \times (\frac{h}{I_{zz}}) - 1,8159] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^3 + [0,0086 \times (\frac{I_{zz}}{h}) + 0,0008] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [0,9799 \times 0,1819 \frac{h}{I_{zz}}] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [-0,0096 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 1,021]$$

6.2.3 Le troisième cas :**6.2.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy :**

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [0,434 \times \ln(\frac{h}{I_{yy}}) - 1,897] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [3,05 \times e^{-6,73 \times (\frac{h}{I_{yy}})}] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [-0,368 \times (\frac{h}{I_{yy}}) + 0,989]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-23,08 \times (\frac{h}{I_{yy}}) - 2,916] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [4,837 \times 0,08 \frac{h}{I_{yy}}]$$

6.2.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0,042 \times (\frac{h}{I_{zz}}) - 1,8876] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^3 + [-1,1268 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 0,208] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [1,134 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 0,6684] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,0389 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 1,0156]$$

6.2.4 Le quatrième cas :**6.2.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy :**

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0,41 \times \ln(\frac{I_{yy}}{h}) - 1,845] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [0,184 \times \ln(\frac{I_{yy}}{h}) + 1,910] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,2954 \times (\frac{h}{I_{yy}}) + 0,9804]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [0.374 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) - 5.552] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [6.034 \times (-0.10) \frac{I_{yy}}{h}]$$

6.2.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [0,6053 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 1,97] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [-3,0827 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,2135] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [2,4448 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,742] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [0,0419 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0177]$$

6.2.5 Le cinquième cas :**6.2..5.1 Selon l'axe de forte inertie yy :**– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1.962 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 3.421] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [2.45 \times e^{\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) \times (-2.13)}] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [0,192 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,969]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [0.195 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.233] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [2.350 \times (-0.06) \frac{h}{I_{yy}}]$$

6.2..5.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0,117 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 2,0172] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [0,3594 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,6044] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [-0,243 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,3987] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [0,0093 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0157]$$

6.3 Les Abaques :

6.3.1 Le premier cas :

6.3.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– Equation 1 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = \left[-3.437 \times \left(\frac{B}{H} \right) - 1.517 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + \left[0.209 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 2.787 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [1]$$

– Equation 2:

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = \left[-0.11 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.460 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + \left[2.54 \times 0.058^{h/I_{yy}} \right]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	I _{yy} (cm ⁴)	h (cm)	N _c /N _{pl,rd}	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section1	IPE 100	180	135	171	10	0,53033424	11,9452854	612,126522
section2	IPE120	200	144	317,8	12	0,5187008	17,0973017	748,487174
section3	IPE 140	220	153	541,2	14	0,50874578	23,5654537	898,078478
section4	IPE160	240	162	869,3	16	0,48724849	31,7849671	1063,48543
section5	IPE180	260	171	1317	18	0,48184857	41,3338287	1239,06804
section6	IPE200	280	180	1943	20	0,456932	53,4649927	1435,8713
section7	IPE220	300	190	2772	22	0,45387492	67,3015826	1651,17326
section8	IPE 240	320	200	3892	24	0,43096184	84,690235	1892,76928
section9	IPE270	350	215	5790	27	0,43859384	110,538464	2224,15341
section10	IPE 300	380	230	8356	30	0,44237773	142,229385	2593,90167
section11	IPE330	410	240	11770	33	0,42557229	180,040371	2968,01326
section12	IPE360	440	250	16270	36	0,42207698	224,404338	3382,27094
section13	IPE400	480	260	23130	40	0,40953655	287,718372	3883,03609
section14	IPE450	530	270	33740	45	0,41107554	375,2914357	4498,84174
section15	IPE500	580	280	48200	50	0,4096457	482,118223	5184,37754
section16	IPE550	630	290	67120	55	0,39691734	612,584636	5937,29348
section17	IPE600	680	300	92080	60	0,39251453	766,621002	6768,86957

Tableau 5-18 : Abaques1 selon yy.

6.3.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz:

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-0,539 \times (\frac{h}{I_{yy}}) - 1,1543] [\frac{N}{N_{pl,rd}}]^3 + [-0,037 \times \ln(\frac{I_{zz}}{h}) + 0,0387] [\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [0,0335 \times \ln(\frac{h}{I_{zz}}) + 0,3659] [\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [0,009 \times \ln(\frac{h}{I_{zz}}) + 1,022]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I _{zz} (cm ⁴)	h (cm)	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section1	IPE 100	180	135	15,92	10	9,51085931	612,126522
section2	IPE120	200	144	27,67	12	12,9059167	748,487174
section3	IPE 140	220	153	44,92	14	17,0450252	898,078478
section4	IPE160	240	162	68,31	16	22,1303551	1063,48543
section5	IPE180	260	171	100,9	18	27,981237	1239,06804
section6	IPE200	280	180	142,4	20	35,1762929	1435,8713
section7	IPE220	300	190	204,9	22	43,7143985	1651,17326
section8	IPE 240	320	200	283,6	24	54,1586096	1892,76928
section9	IPE270	350	215	419,9	27	70,1131787	2224,15341
section10	IPE 300	380	230	603,8	30	89,4983457	2593,90167
section11	IPE330	410	240	788,1	33	109,044102	2968,01326
section12	IPE360	440	250	1043	36	131,572364	3382,27094
section13	IPE400	480	260	1318	40	159,297191	3883,03609
section14	IPE450	530	270	1676	45	193,759684	4498,84174
section15	IPE500	580	280	2142	50	234,059972	5184,37754
section16	IPE550	630	290	2668	55	280,61946	5937,29348
section17	IPE600	680	300	3387	60	334,386932	6768,86957

Tableau 5-19 :Abaques1 selon zz.

6.3.2 Le deuxième cas :

6.3.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– Equation 1 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [23.8 \times (\frac{h}{I_{yy}}) - 4.617] [\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [-8.653 \times (\frac{h}{I_{yy}}) + 2.870] [\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [-0,714 \times (\frac{h}{I_{yy}}) + 0,997]$$

– Equation 2:

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = \left[-14,03 \times \left(\frac{h}{I_{yy}} \right) - 2,639 \right] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + \left[2,643 \times e^{\frac{h}{I_{yy}} \times 4,774} \right]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	I _{yy} (cm ⁴)	h (cm)	N _c /N _{pl.rd}	M _{pl.rd} (KN.m)	N _{pl.rd} (KN)
section1	IPE 100	220	220	171	10	0,70059556	20,7169025	978,6910145
section2	IPE120	240	240	317,8	12	0,68771401	27,6109791	1186,539348
section3	IPE 140	260	260	541,2	14	0,67712579	35,9730181	1414,310797
section4	IPE160	280	280	869,3	16	0,66723116	46,072873	1664,590362
section5	IPE180	300	300	1317	18	0,66002719	57,8084628	1931,738043
section6	IPE200	320	320	1943	20	0,65145799	71,9106882	2226,798841
section7	IPE220	340	340	2772	22	0,64411976	88,1706613	2542,487754
section8	IPE 240	360	360	3892	24	0,60738015	108,090982	2890,554783
section9	IPE270	390	390	5790	27	0,62149167	139,657383	3393,053043
section10	IPE 300	420	420	8356	30	0,61007074	178,164636	3947,604565
section11	IPE330	450	450	11770	33	0,60154268	224,787216	4551,389348
section12	IPE360	480	480	16270	36	0,60097861	279,094452	5213,572391
section13	IPE400	520	520	23130	40	0,59907047	359,053987	6097,633188
section14	IPE450	570	570	33740	45	0,60914589	471,873511	7264,046087
section15	IPE500	620	620	48200	50	0,61543509	609,47958	8561,02971
section16	IPE550	670	670	67120	55	0,61362283	778,573787	9986,234058
section17	IPE600	720	720	92080	60	0,61561054	977,262116	11550,93913

Tableau 5-20 :Abaques2 selon yy.

6.3.2.2 Selon l'axe de faible inertiezz:

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = \left[-0,0496 \times \left(\frac{h}{I_{zz}} \right) - 1,8159 \right] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + \left[0,0086 \times \left(\frac{I_{zz}}{h} \right) + 0,0008 \right] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + \left[0,9799 \times 0,1819 \frac{h}{I_{zz}} \right] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + \left[-0,0096 \times \left(\frac{h}{I_{zz}} \right) + 1,021 \right]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I _{zz} (cm ⁴)	h (cm)	M _{pl.rd} (KN.m)	N _{pl.rd} (KN)
section1	IPE 100	220	220	15,92	10	21,2818435	978,691014
section2	IPE120	240	240	27,67	12	28,5742275	1186,539348
section3	IPE 140	260	260	44,92	14	37,4678469	1414,3108
section4	IPE160	280	280	68,31	16	48,1851523	1664,59036
section5	IPE180	300	300	100,9	18	60,5978107	1931,73804

section6	IPE200	320	320	142,4	20	75,4569924	2226,79884
section7	IPE220	340	340	204,9	22	92,5379481	2542,48775
section8	IPE 240	360	360	283,6	24	112,8008813	2890,55478
section9	IPE270	390	390	419,9	27	144,67843	3393,05304
section10	IPE 300	420	420	603,8	30	182,896576	3947,60457
section11	IPE330	450	450	788,1	33	226,876408	4551,38935
section12	IPE360	480	480	1043	36	278,137374	5213,57239
section13	IPE400	520	520	1318	40	351,990115	6097,63319
section14	IPE450	570	570	1676	45	456,986752	7264,04609
section15	IPE500	620	620	2142	50	583,624726	8561,02971
section16	IPE550	670	670	2668	55	734,779726	9986,23406
section17	IPE600	720	720	3387	60	912,161189	11550,9391

Tableau5-21 :Abaques2 selon zz.

6.3.3 Le troisième cas :

6.3.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– Equation 1 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [0.434 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 1.897] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [3.05 \times e^{-6.73 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right)}] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [-0,368 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,989]$$

– Equation 2:

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1\right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-23.08 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2.916] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [4.837 \times 0.08 \frac{h}{I_{yy}}]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	I _{yy} (cm ⁴)	h (cm)	N _c /N _{pl.rd}	M _{pl.rd} (KN.m)	N _{pl.rd} (KN)
section1	IPE 100	260	260	171	10	0,75363735	30,597463	1270,7258
section2	IPE120	280	280	317,8	12	0,73901039	40,31241	1502,91036
section3	IPE 140	300	300	541,2	14	0,72648824	50,6643612	1755,01804
section4	IPE160	320	320	869,3	16	0,71474297	62,7102503	2029,63384
section5	IPE180	340	340	1317	18	0,70555049	76,4952239	2321,11775
section6	IPE200	360	360	1943	20	0,69531879	92,771115	2640,51478
section7	IPE220	380	380	2772	22	0,68634091	111,319894	2980,53993
section8	IPE 240	400	400	3892	24	0,67602275	133,129638	3352,94319

section9	IPE270	430	430	5790	27	0,67303511	166,531547	3891,9458
section10	IPE 300	460	460	8356	30	0,66867398	206,185246	4483,00167
section11	IPE330	490	490	11770	33	0,66391241	252,762124	5123,2908
section12	IPE360	520	520	16270	36	0,63550782	308,488464	5821,97819
section13	IPE400	560	560	23130	40	0,63139819	393,499159	6754,71145
section14	IPE450	610	610	33740	45	0,63812996	512,982696	7981,96493
section15	IPE500	660	660	48200	50	0,6417802	657,8492	9339,78913
section16	IPE550	710	710	67120	55	0,63826785	835,234802	10825,8341
section17	IPE600	760	760	92080	60	0,63844705	1042,607941	12451,3797

Tableau 5-22 :Abaques 3 selon yy.

6.3.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-0,042 \times (\frac{h}{I_{zz}}) - 1,8876] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^3 + [-1,1268 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 0,208] [\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [1,134 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 0,6684] [\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,0389 \times (\frac{h}{I_{zz}}) + 1,0156]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I _{zz} (cm ⁴)	h (cm)	M _{pl.rd} (KN.m)	N _{pl.rd} (KN)
section1	IPE 100	260	260	15,92	10	30,597463	1270,7258
section2	IPE120	280	280	27,67	12	40,31241002	1502,91036
section3	IPE 140	300	300	44,92	14	51,64684	1755,01804
section4	IPE160	320	320	68,31	16	64,8454645	2029,63384
section5	IPE180	340	340	100,9	18	79,6850025	2321,11775
section6	IPE200	360	360	142,4	20	96,90746	2640,51478
section7	IPE220	380	380	204,9	22	116,808925	2980,53993
section8	IPE 240	400	400	283,6	24	140,093875	3352,94319
section9	IPE270	430	430	419,9	27	176,283191	3891,9458
section10	IPE 300	460	460	603,8	30	219,244582	4483,00167
section11	IPE330	490	490	788,1	33	268,642183	5123,2908
section12	IPE360	520	520	1043	36	325,961563	5821,97819
section13	IPE400	560	560	1318	40	407,866259	6754,71145
section14	IPE450	610	610	1676	45	523,738403	7981,96493
section15	IPE500	660	660	2142	50	662,56588	9339,78913
section16	IPE550	710	710	2668	55	826,937951	10825,8341
section17	IPE600	760	760	3387	60	1019,14787	12451,3797

Tableau 5-23 :Abaques3 selon zz.

6.3.4 Le quatrième cas :

6.3.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– Equation 1 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = \left[-0.41 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) - 1.845 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + \left[0.184 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) + 1.910 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + \left[0,2954 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,9804 \right]$$

– Equation 2:

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = \left[0.374 \times \ln\left(\frac{I_{yy}}{h}\right) - 5.552 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + \left[6.034 \times \left(-0.10\right) \frac{I_{yy}}{h} \right]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	I _{yy} (cm ⁴)	h (cm)	N _c /N _{pl,rd}	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section1	IPE 100	300	300	171	10	0,79122115	40,7280498	1611,43304
section2	IPE120	320	320	317,8	12	0,77660734	52,9313512	1867,95384
section3	IPE 140	340	340	541,2	14	0,76369538	67,0503747	2144,39775
section4	IPE160	360	360	869,3	16	0,75142734	83,4137183	2443,34978
section5	IPE180	380	380	1317	18	0,74140652	100,837434	2759,16993
section6	IPE200	400	400	1943	20	0,73049858	119,61736	3102,90319
section7	IPE220	420	420	2772	22	0,72074107	140,788544	3467,26457
section8	IPE 240	440	440	3892	24	0,70979904	165,34945	3864,00406
section9	IPE270	470	470	5790	27	0,70490114	202,978355	4439,51101
section10	IPE 300	500	500	8356	30	0,69895733	247,120732	5067,07123
section11	IPE330	530	530	11770	33	0,69281169	298,418654	5743,86471
section12	IPE360	560	560	16270	36	0,68569654	358,280032	6479,05645
section13	IPE400	600	600	23130	40	0,68360375	442,948261	7460,46217
section14	IPE450	650	650	33740	45	0,6841605	562,235318	8748,55623
section15	IPE500	700	700	48200	50	0,6653498	711,275381	10167,221
section16	IPE550	750	750	67120	55	0,66049554	897,365532	11714,1065
section17	IPE600	800	800	92080	60	0,65919566	1113,834	13400,4928

Tableau 5-24 :Abaques 4 selon yy.

6.3.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [0,6053 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 1,97] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [-3,0827 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,2135] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [2,4448 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,742] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [0,0419 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0177]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I_{zz} (cm ⁴)	h (cm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	300	300	15,92	10	40,728109	1611,43304
section2	IPE120	320	320	27,67	12	52,9313761	1867,95384
section3	IPE 140	340	340	44,92	14	67,0504137	2144,39775
section4	IPE160	360	360	68,31	16	83,4137183	2443,34978
section5	IPE180	380	380	100,9	18	101,623755	2759,16993
section6	IPE200	400	400	142,4	20	122,714899	3102,90319
section7	IPE220	420	420	204,9	22	146,136019	3467,26457
section8	IPE 240	440	440	283,6	24	172,841009	3864,00406
section9	IPE270	470	470	419,9	27	213,434056	4439,51101
section10	IPE 300	500	500	603,8	30	261,048175	5067,07123
section11	IPE330	530	530	788,1	33	316,252318	5743,86471
section12	IPE360	560	560	1043	36	380,09114	6479,05645
section13	IPE400	600	600	1318	40	470,515088	7460,46217
section14	IPE450	650	650	1676	45	597,860047	8748,55623
section15	IPE500	700	700	2142	50	724,317838	9741,33696
section16	IPE550	750	750	2668	55	927,7434873	11714,1065
section17	IPE600	800	800	3387	60	1135,51173	13400,4928

Tableau 5-25 :Abaques 4 selon zz.

6.3.5 Le cinquième cas :

6.3.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,962 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 3,421] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [2,45 \times e^{\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) \times (-2,13)}] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [0,192 \times \left(\frac{h}{I_{yy}}\right) + 0,969]$$

– Equation 2:

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = \left[0,195 \times \ln\left(\frac{h}{I_{yy}}\right) - 2,233 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + \left[2,350 \times (-0,06) \frac{h}{I_{yy}} \right]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	I _{yy} (cm ⁴)	h (cm)	N _c /N _{pl,rd}	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section1	IPE 100	200	165	171	10	0,6279753	15,7885729	744,454783
section2	IPE120	240	192	317,8	12	0,64549373	25,4691795	1011,31848
section3	IPE 140	280	219	541,2	14	0,65870933	38,4396023	1318,79109
section4	IPE160	320	246	869,3	16	0,66800139	55,2984698	1669,45761
section5	IPE180	360	273	1317	18	0,67663632	76,2731769	2057,67804
section6	IPE200	400	300	1943	20	0,68149979	102,432203	2494,49739
section7	IPE220	440	330	2772	22	0,68733733	134,693533	2992,70804
section8	IPE 240	480	360	3892	24	0,69003743	173,893964	3547,63304
section9	IPE270	540	405	5790	27	0,70318103	240,990647	4406,0487
section10	IPE 300	600	450	8356	30	0,71212153	324,605611	5371,27413
section11	IPE330	660	480	11770	33	0,71352383	417,766317	6289,90891
section12	IPE360	720	510	16270	36	0,71315755	528,642851	7294,32022
section13	IPE400	800	540	23130	40	0,71532157	688,009724	8555,59261
section14	IPE450	900	570	33740	45	0,7177725	914,587856	10125,0743
section15	IPE500	1000	600	48200	50	0,71788497	1188,27785	11840,337
section16	IPE550	1100	630	67120	55	0,71665655	1513,46476	13699,0304
section17	IPE600	1200	660	92080	60	0,7140841	1896,78023	15712,4348

Tableau 5-26 :Abaques 5 selon yy.

6.3.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = \left[-0,117 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) - 2,0172 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^3 + \left[0,3594 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,6044 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + \left[-0,243 \times \ln\left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 0,3987 \right] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + \left[0,0093 \times \left(\frac{h}{I_{zz}}\right) + 1,0157 \right]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I _{zz} (cm ⁴)	h (cm)	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section1	IPE 100	200	165	15,92	10	13,772324	744,454783
section2	IPE120	240	192	27,67	12	21,5422494	1011,31848
section3	IPE 140	280	219	44,92	14	31,7443027	1318,79109
section4	IPE160	320	246	68,31	16	44,8368761	1669,45761
section5	IPE180	360	273	100,9	18	60,86457659	2057,67804

section6	IPE200	400	300	142,4	20	80,7571938	2494,49739
section7	IPE220	440	330	204,9	22	105,937352	2992,70804
section8	IPE 240	480	360	283,6	24	136,646034	3547,63304
section9	IPE270	540	405	419,9	27	188,209985	4406,0487
section10	IPE 300	600	450	603,8	30	252,3286	5371,27413
section11	IPE330	660	480	788,1	33	314,787953	6289,90891
section12	IPE360	720	510	1043	36	388,000106	7294,32022
section13	IPE400	800	540	1318	40	480,88876	8555,59261
section14	IPE450	900	570	1676	45	599,259479	10125,0743
section15	IPE500	1000	600	2142	50	737,576144	11840,337
section16	IPE550	1100	630	2668	55	897,146049	13699,0304
section17	IPE600	1200	660	3387	60	1080,67714	15712,4348

Tableau5-27 :Abaques 5 selon zz.

7. La deuxième approche :

7.1 Déterminations des coefficients :

Dans cette approche nous avons divisés nos sections d'étude en trois groupes :

- **Groupe 1** : section1. section2. section3. section4. Section5.
- **Groupe 2** : Section6. Section7. Section8. Section9. Section10.
- **Groupe 3** : Section11. Section12. Section13. Section14. Section15. Section16. Section17.

Les courbes d'interactions réduites dans chaque groupe sont presque identique pour cela nous devons adopter une équation unique pour chaque groupe.

7.1.1 Le premier cas :

- **Selon l'axe de forte inertie yy**

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-4,084	-3,72	-3,532
b	2,231	1,775	1,581
c	1	1	1
a1	-2,203	-1,904	-1,798
b1	2,203	1,904	1,798

Tableau 5-28 :La valeur des coefficients pour le premier cas selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-1,504	-1,169	-1,206
b	0,135	-0,145	-0,036
c	0,361	0,307	0,234
d	1,017	1,003	0,994

Tableau 5-29 : La valeur des coefficients pour le premier cas selon zz.**7.1.2 Le deuxième cas :**

– Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-3,312	-4,429	-4,654
b	2,344	2,858	2,866
c	0,965	0,992	1
a1	-3,34	-2,869	-2,61
b1	3,34	2,869	2,61

Tableau 5-30 : La valeur des coefficients pour le deuxième cas selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-1,799	-1,83	-1,702
b	-0,124	0,162	0,095
c	0,918	0,658	0,594
d	1,02	1,017	1,02

Tableau 5-31 : La valeur des coefficients pour le deuxième cas selon zz.**7.1.3 Le troisième cas :**

– Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-2,971	-4,003	-4,773
b	2,249	2,782	3,132
c	0,989	0,97	0,998
a1	-4,059	-3,282	-2,975
b1	4,059	3,282	2,975

Tableau 5-32 : La valeur des coefficients pour le troisième cas selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-1,857	-1,983	-1,784
b	-0,533	0,098	0,007
c	1,36	0,875	0,766
d	1,038	1,012	1,016

Tableau 5-33 :La valeur des coefficients pour le troisième cas selon zz.

7.1.4 Le quatrième cas :

– Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-3,682	-3,47	-4,424
b	2,895	2,569	3,057
c	1,013	0,962	0,979
a1	-4,789	-3,71	-3,255
b1	4,789	3,71	3,255

Tableau 5-34 :La valeur des coefficients pour le quatrième cas selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-1,55	-1,983	-1,88
b	-1,711	-0,092	-0,053
c	2,237	1,047	0,924
d	1,033	1,031	1,013

Tableau 5-35 :La valeur des coefficients pour le quatrième cas selon zz.

7.1.5 Le cinquième cas :

– Selon l'axe de forte inertie yy

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-3,5	-3,497	-3,402
b	2,187	2,392	2,435
c	0,982	0,972	0,968
a1	-2,688	-3,139	-3,49
b1	2,688	3,139	3,49

Tableau 5-36 :La valeur des coefficients pour le cinquième cas selon yy.

– Selon l'axe de faible inertie zz

Le coefficient	La valeur		
	Groupe 1	Groupe 2	Groupe 3
a	-1,932	-1,817	-1,618
b	0,456	-0,075	-0,632
c	0,46	0,88	1,238
d	1,022	1,017	1,017

Tableau 5-37 :La valeur des coefficients pour le cinquième cas selon zz.

7.2 Les équations générales :

7.2.1 Le premier cas :

7.2.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

7.2.1.1.1 Le groupe 1 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,084][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [2,231][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,203][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [2,203]$$

7.2.1.1.2 Le groupe 2 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,72][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [1,775][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,904][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1,904]$$

7.2.1.1.3 Le groupe 3 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,532] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [1,581] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,798] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,798]$$

7.2.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.2.1.2.1 Le groupe 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,504] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [0,135] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,361] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,017]$$

7.2.1.2.2 Le groupe 2 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,169] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [-0,145] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,307] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,003]$$

7.2.1.2.3 Le groupe 3 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,206] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [-0,036] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,234] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [0,994]$$

7.2.2 Le deuxième cas :**7.2.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy :****7.2.2.1.1 Le groupe 1 :**– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,312] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [2,344] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [0,965]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,34] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [3,34]$$

7.2.2.1.2 Le groupe 2 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,429] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [2,858] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [0,992]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,869] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [2,869]$$

7.2.2.1.3 Le groupe 3 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,654] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [2,866] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,61] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [2,61]$$

7.2.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.2.2.2.1 Le groupe 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,799] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [-0,124] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,918] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,02]$$

7.2.2.2.2 Le groupe 2 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,83] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [0,162] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,658] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,017]$$

7.2.2.2.3 Le groupe 3 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,702]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [0,095]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [0,594]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,02]$$

7.2.3 Le troisième cas :**7.2.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy :****7.2.3.1.1 Le groupe 1 :**

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,971]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [2,249]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [0,989]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,059]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [4,059]$$

7.2.3.1.2 Le groupe 2 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,003]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [2,782]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [0,97]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,282]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [3,282]$$

7.2.3.1.3 Le groupe 3 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,773]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [3,132]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [0,998]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,975] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [2,975]$$

7.2.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.2.3.2.1 Le groupe 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,857] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [-0,533] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [1,36] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,038]$$

7.2.3.2.2 Le groupe 2 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,983] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [0,098] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,875] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,012]$$

7.2.3.2.3 Le groupe 3 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,784] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^3 + [0,007] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [0,766] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,016]$$

7.2.4 Le quatrième cas :**7.2.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy :****7.2.4.1.1 Le groupe 1 :**– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,682] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right]^2 + [2,895] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [1,013]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,789] \left[\frac{N}{N_{pl.rd}} \right] + [4,789]$$

7.2.4.1.2 Le groupe 2 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{\text{pl.rd}}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-3,47] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^2 + [2,569] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [0,962]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in \left] \frac{N_c}{N_{\text{pl.rd}}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-3,71] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [3,71]$$

7.2.4.1.3 Le groupe 3 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{\text{pl.rd}}} \right]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-4,424] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^2 + [3,057] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [0,979]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in \left] \frac{N_c}{N_{\text{pl.rd}}} ; 1 \right]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-3,255] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [3,255]$$

7.2.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.2.4.2.1 Le groupe 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-1,55] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^3 + [-1,711] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^2 + [2,237] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [1,033]$$

7.2.4.2.2 Le groupe 2 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-1,983] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^3 + [-0,092] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^2 + [1,047] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [1,031]$$

7.2.4.2.3 Le groupe 3 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{\text{pl.rd}}} = [-1,88] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^3 + [-0,053] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right]^2 + [0,924] \left[\frac{N}{N_{\text{pl.rd}}} \right] + [1,013]$$

7.2.5 Le cinquième cas :**7.2.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy :****7.2.5.1.1 Le groupe 1 :**– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,5][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [2,187][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,982]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,688][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [2,688]$$

7.2.5.1.2 Le groupe 2 :– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,497][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [2,392][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,972]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,139][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [3,139]$$

7.2.5.1.3 Le groupe 3 :– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,402][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [2,435][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,968]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,49][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [3,49]$$

7.2.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.2.5.2.1 Le groupe 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,932]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [0,456]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [0,46]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,022]$$

7.2.5.2.2 Le groupe 2 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,817]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [-0,075]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [0,88]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,017]$$

7.2.5.2.3 Le groupe 3 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,618]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [-0,632]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [1,238]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,017]$$

7.3 LES ABAQUES :**7.3.1 Le premier cas :****7.3.1.1 Selon l'axe de forte inertie yy :****7.3.1.1.1 Le groupe 1 :**

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}\right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,084]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [2,231]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in \left[\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1\right]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,203]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [2,203]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl.rd}$	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section1	IPE 100	180	135	0,53033424	11,9452854	612,126522
section2	IPE120	200	144	0,5187008	17,0973017	748,487174
section3	IPE 140	220	153	0,50874578	23,5654537	898,078478
section4	IPE160	240	162	0,48724849	31,7849671	1063,48543
section5	IPE180	260	171	0,48184857	41,3338287	1239,06804

Tableau 5-38 : Abaque 1 pour le groupe 1 selon yy.

7.3.1.1.2 Le groupe 2 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,72][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [1,775][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,904][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1,904]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl.rd}$	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section6	IPE200	280	180	0,456932	53,4649927	1435,8713
section7	IPE220	300	190	0,45387492	67,3015826	1651,17326
section8	IPE 240	320	200	0,43096184	84,690235	1892,76928
section9	IPE270	350	215	0,43859384	110,538464	2224,15341
section10	IPE300	380	230	0,44237773	142,229385	2593,90167

Tableau 5-39 : Abaque 1 pour le groupe 2 selon yy.**7.3.1.1.3 Le groupe 3 :**– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,532][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [1,581][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,798][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1,798]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl.rd}$	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section11	IPE330	410	240	0,42557229	180,040371	2968,01326
section12	IPE360	440	250	0,42207698	224,404338	3382,27094
section13	IPE400	480	260	0,40953655	287,718372	3883,03609
section14	IPE450	530	270	0,41107554	375,2914357	4498,84174
section15	IPE500	580	280	0,4096457	482,118223	5184,37754
section16	IPE550	630	290	0,39691734	612,584636	5937,29348
section17	IPE600	680	300	0,39251453	766,621002	6768,86957

Tableau 5-40 : Abaque 1 pour le groupe 3 selon yy.

7.3.1.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.3.1.2.1 Le groupe 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,504]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [0,135]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [0,361]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,017]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section1	IPE 100	180	135	9,51085931	612,126522
section2	IPE120	200	144	12,9059167	748,487174
section3	IPE 140	220	153	17,0450252	898,078478
section4	IPE160	240	162	22,1303551	1063,48543
section5	IPE180	260	171	27,981237	1239,06804

Tableau5-41 ; Abaque 1 pour le groupe 1 selon zz.

7.3.1.2.2 Le groupe 2 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,169]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [-0,145]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [0,307]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,003]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section6	IPE200	280	180	35,1762929	1435,8713
section7	IPE220	300	190	43,7143985	1651,17326
section8	IPE 240	320	200	54,1586096	1892,76928
section9	IPE270	350	215	70,1131787	2224,15341
section10	IPE 300	380	230	89,4983457	2593,90167

Tableau 5-42 : Abaque 1 pour le groupe 2 selon zz.

7.3.1.2.3 Le groupe 3 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,206]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [-0,036]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [0,234]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [0,994]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	M _{pl,rd} (KN.m)	N _{pl,rd} (KN)
section11	IPE330	410	240	109,044102	2968,01326
section12	IPE360	440	250	131,572364	3382,27094
section13	IPE400	480	260	159,297191	3883,03609

section14	IPE450	530	270	193,759684	4498,84174
section15	IPE500	580	280	234,059972	5184,37754
section16	IPE550	630	290	280,61946	5937,29348
section17	IPE600	680	300	334,386932	6768,86957

Tableau 5-43 : Abaque 1 pour le groupe 3 selon zz.

7.3.2 Le deuxième cas :

7.3.2.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

7.3.2.1.1 Le groupe 1 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,312][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [2,344][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [0,965]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,34][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [3,34]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	220	220	0,70059556	20,7169025	978,6910145
section2	IPE120	240	240	0,68771401	27,6109791	1186,539348
section3	IPE 140	260	260	0,67712579	35,9730181	1414,310797
section4	IPE160	280	280	0,66723116	46,072873	1664,590362
section5	IPE180	300	300	0,66002719	57,8084628	1931,738043

Tableau5-44 : Abaque 2 pour le groupe 1 selon yy.

7.3.2.1.2 Le groupe 2 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-4,429][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [2,858][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [0,992]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-2,869][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [2,869]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section6	IPE200	320	320	0,65145799	71,9106882	2226,798841
section7	IPE220	340	340	0,64411976	88,1706613	2542,487754
section8	IPE 240	360	360	0,60738015	108,090982	2890,554783
section9	IPE270	390	390	0,62149167	139,657383	3393,053043
section10	IPE 300	420	420	0,61007074	178,164636	3947,604565

Tableau5-45 : Abaque 2 pour le groupe 2 selon yy.

7.3.2.1.3 Le groupe 3 :

– Equation 1 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-4,654][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [2,866][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [1]$$

– Equation 2:

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-2,61][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [2,61]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section11	IPE330	450	450	0,60154268	224,787216	4551,389348
section12	IPE360	480	480	0,60097861	279,094452	5213,572391
section13	IPE400	520	520	0,59907047	359,053987	6097,633188
section14	IPE450	570	570	0,60914589	471,873511	7264,046087
section15	IPE500	620	620	0,61543509	609,47958	8561,02971
section16	IPE550	670	670	0,61362283	778,573787	9986,234058
section17	IPE600	720	720	0,61561054	977,262116	11550,93913

Tableau5-46 : Abaque 2 pour le groupe 3 selon yy.

7.3.2.2 Selon l'axe de faible inertie zz :

7.3.2.2.1 Le groupe 1 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,799][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^3 + [-0,124][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [0,918][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [1,02]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	220	220	21,2818435	978,691014
section2	IPE120	240	240	28,5742275	1186,539348

section3	IPE 140	260	260	37,4678469	1414,3108
section4	IPE160	280	280	48,1851523	1664,59036
section5	IPE180	300	300	60,5978107	1931,73804

Tableau 5-47 : Abaque 2 pour le groupe 1 selon zz.

7.3.2.2.2 Le groupe 2 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,83] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^3 + [0,162] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + [0,658] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [1,017]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section6	IPE200	320	320	75,4569924	2226,79884
section7	IPE220	340	340	92,5379481	2542,48775
section8	IPE 240	360	360	112,8008813	2890,55478
section9	IPE270	390	390	144,67843	3393,05304
section10	IPE 300	420	420	182,896576	3947,60457

Tableau5-48 : Abaque 2 pour le groupe 2 selon zz.

7.3.2.2.3 Le groupe 3 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,702] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^3 + [0,095] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + [0,594] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [1,02]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section11	IPE330	450	450	226,876408	4551,38935
section12	IPE360	480	480	278,137374	5213,57239
section13	IPE400	520	520	351,990115	6097,63319
section14	IPE450	570	570	456,986752	7264,04609
section15	IPE500	620	620	583,624726	8561,02971
section16	IPE550	670	670	734,779726	9986,23406
section17	IPE600	720	720	912,161189	11550,9391

Tableau 5-49 : Abaque 2 pour le groupe 3 selon zz.

7.3.3 Le troisième cas :

7.3.3.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

7.3.3.1.1 Le groupe 1 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-2,971][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [2,249][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [0,989]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-4,059][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [4,059]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	260	260	0,75363735	30,597463	1270,7258
section2	IPE120	280	280	0,73901039	40,31241	1502,91036
section3	IPE 140	300	300	0,72648824	50,6643612	1755,01804
section4	IPE160	320	320	0,71474297	62,7102503	2029,63384
section5	IPE180	340	340	0,70555049	76,4952239	2321,11775

Tableau 5-50 : Abaque 3 pour le groupe 1 selon yy.

7.3.3.1.2 Le groupe 2 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-4,003][\frac{N}{N_{pl,rd}}]^2 + [2,782][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [0,97]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,282][\frac{N}{N_{pl,rd}}] + [3,282]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section6	IPE200	360	360	0,69531879	92,771115	2640,51478
section7	IPE220	380	380	0,68634091	111,319894	2980,53993
section8	IPE 240	400	400	0,67602275	133,129638	3352,94319
section9	IPE270	430	430	0,67303511	166,531547	3891,9458
section10	IPE 300	460	460	0,66867398	206,185246	4483,00167

Tableau 5-51 : Abaque 3 pour le groupe 2 selon yy.

7.3.3.1.3 Le groupe 3 :– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-4,773][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [3,132][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,998]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-2,975][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [2,975]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl.rd}$	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section11	IPE330	490	490	0,66391241	252,762124	5123,2908
section12	IPE360	520	520	0,63550782	308,488464	5821,97819
section13	IPE400	560	560	0,63139819	393,499159	6754,71145
section14	IPE450	610	610	0,63812996	512,982696	7981,96493
section15	IPE500	660	660	0,6417802	657,8492	9339,78913
section16	IPE550	710	710	0,63826785	835,234802	10825,8341
section17	IPE600	760	760	0,63844705	1042,607941	12451,3797

Tableau5-52 : Abaque 3 pour le groupe 3 selon yy.**7.3.3.2 Selon l'axe de faible inertie zz :****7.3.3.2.1 Le groupe 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,857][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^3 + [-0,533][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [1,36][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [1,038]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section1	IPE 100	260	260	30,597463	1270,7258
section2	IPE120	280	280	40,31241002	1502,91036
section3	IPE 140	300	300	51,64684	1755,01804
section4	IPE160	320	320	64,8454645	2029,63384
section5	IPE180	340	340	79,6850025	2321,11775

Tableau 5-53 : Abaque 3 pour le groupe 1 selon zz.

7.3.3.2.2 Le groupe 2 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,983]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [0,098]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [0,875]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,012]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section6	IPE200	360	360	96,90746	2640,51478
section7	IPE220	380	380	116,808925	2980,53993
section8	IPE 240	400	400	140,093875	3352,94319
section9	IPE270	430	430	176,283191	3891,9458
section10	IPE 300	460	460	219,244582	4483,00167

Tableau 5-54 : Abaque 3 pour le groupe 2 selon zz.

7.3.3.2.3 Le groupe 3 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,784]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [0,007]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [0,766]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,016]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section11	IPE330	490	490	268,642183	5123,2908
section12	IPE360	520	520	325,961563	5821,97819
section13	IPE400	560	560	407,866259	6754,71145
section14	IPE450	610	610	523,738403	7981,96493
section15	IPE500	660	660	662,56588	9339,78913
section16	IPE550	710	710	826,937951	10825,8341
section17	IPE600	760	760	1019,14787	12451,3797

Tableau 5-55 : Abaque 3 pour le groupe 3 selon zz.

7.3.4 Le quatrième cas :**7.3.4.1 Selon l'axe de forte inertie yy :****7.3.4.1.1 Le groupe 1 :**

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,682]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [2,895]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,013]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in] \frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-4,789] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [4,789]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	300	300	0,79122115	40,7280498	1611,43304
section2	IPE120	320	320	0,77660734	52,9313512	1867,95384
section3	IPE 140	340	340	0,76369538	67,0503747	2144,39775
section4	IPE160	360	360	0,75142734	83,4137183	2443,34978
section5	IPE180	380	380	0,74140652	100,837434	2759,16993

Tableau5-56 : Abaque 4 pour le groupe 1 selon yy.

7.3.4.1.2 Le groupe 2 :

– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,47] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + [2,569] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [0,962]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in] \frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,71] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [3,71]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section6	IPE200	400	400	0,73049858	119,61736	3102,90319
section7	IPE220	420	420	0,72074107	140,788544	3467,26457
section8	IPE 240	440	440	0,70979904	165,34945	3864,00406
section9	IPE270	470	470	0,70490114	202,978355	4439,51101
section10	IPE 300	500	500	0,69895733	247,120732	5067,07123

Tableau5-57 : Abaque 4 pour le groupe 2 selon yy.

7.3.4.1.3 Le groupe 3 :

– **Equation 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}}]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-4,424] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + [3,057] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [0,979]$$

– **Equation 2:**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl,rd}}; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,255]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [3,255]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section11	IPE330	530	530	0,69281169	298,418654	5743,86471
section12	IPE360	560	560	0,68569654	358,280032	6479,05645
section13	IPE400	600	600	0,68360375	442,948261	7460,46217
section14	IPE450	650	650	0,6841605	562,235318	8748,55623
section15	IPE500	700	700	0,6653498	711,275381	10167,221
section16	IPE550	750	750	0,66049554	897,365532	11714,1065
section17	IPE600	800	800	0,65919566	1113,834	13400,4928

Tableau5-58 : Abaque 4 pour le groupe 3 selon yy.

7.3.4.2 Selon l'axe de faible inertie zz :**7.3.4.2.1 Le groupe 1 :**

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,55]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [-1,711]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [2,237]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,033]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	300	300	40,728109	1611,43304
section2	IPE120	320	320	52,9313761	1867,95384
section3	IPE 140	340	340	67,0504137	2144,39775
section4	IPE160	360	360	83,4137183	2443,34978
section5	IPE180	380	380	101,623755	2759,16993

Tableau 5-59 : Abaque 4 pour le groupe 1 selon zz.

7.3.4.2.2 Le groupe 2 :

$$\text{Pour : } \frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,983]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^3 + [-0,092]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right]^2 + [1,047]\left[\frac{N}{N_{pl,rd}}\right] + [1,031]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section6	IPE200	400	400	122,714899	3102,90319
section7	IPE220	420	420	146,136019	3467,26457

section8	IPE 240	440	440	172,841009	3864,00406
section9	IPE270	470	470	213,434056	4439,51101
section10	IPE 300	500	500	261,048175	5067,07123

Tableau 5-60 : Abaque 4 pour le groupe 2 selon zz.

7.3.4.2.3 Le groupe 3 :

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-1,88] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^3 + [-0,053] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + [0,924] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [1,013]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section11	IPE330	530	530	316,252318	5743,86471
section12	IPE360	560	560	380,09114	6479,05645
section13	IPE400	600	600	470,515088	7460,46217
section14	IPE450	650	650	597,860047	8748,55623
section15	IPE500	700	700	724,317838	9741,33696
section16	IPE550	750	750	927,7434873	11714,1065
section17	IPE600	800	800	1135,51173	13400,4928

Tableau 5-61 : Abaque 4 pour le groupe 3 selon zz.

7.3.5 Le cinquième cas :

7.3.5.1 Selon l'axe de forte inertie yy :

7.3.5.1.1 Le groupe 1 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left[0 ; \frac{N_c}{N_{pl,rd}} \right]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-3,5] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right]^2 + [2,187] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [0,982]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl,rd}} \in \left] \frac{N_c}{N_{pl,rd}} ; 1 \right]$

$$\frac{M}{M_{pl,rd}} = [-2,688] \left[\frac{N}{N_{pl,rd}} \right] + [2,688]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl,rd}$	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section1	IPE 100	200	165	0,6279753	15,7885729	744,454783
section2	IPE120	240	192	0,64549373	25,4691795	1011,31848
section3	IPE 140	280	219	0,65870933	38,4396023	1318,79109

section4	IPE160	320	246	0,66800139	55,2984698	1669,45761
section5	IPE180	360	273	0,67663632	76,2731769	2057,67804

Tableau5-62 : Abaque 5 pour le groupe 1 selon yy.

7.3.5.1.2 Le groupe 2 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,497][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [2,392][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,972]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,139][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [3,139]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl.rd}$	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section6	IPE200	400	300	0,68149979	102,432203	2494,49739
section7	IPE220	440	330	0,68733733	134,693533	2992,70804
section8	IPE 240	480	360	0,69003743	173,893964	3547,63304
section9	IPE270	540	405	0,70318103	240,990647	4406,0487
section10	IPE 300	600	450	0,71212153	324,605611	5371,27413

Tableau5-63 : Abaque 5 pour le groupe 2 selon yy.

7.3.5.1.3 Le groupe 3 :

– **Equation 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; \frac{N_c}{N_{pl.rd}}]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,402][\frac{N}{N_{pl.rd}}]^2 + [2,435][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [0,968]$$

– **Equation 2:**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in]\frac{N_c}{N_{pl.rd}} : 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-3,49][\frac{N}{N_{pl.rd}}] + [3,49]$$

	Classe IPE	H (mm)	B (mm)	$N_c/N_{pl.rd}$	$M_{pl.rd}$ (KN.m)	$N_{pl.rd}$ (KN)
section11	IPE330	660	480	0,71352383	417,766317	6289,90891
section12	IPE360	720	510	0,71315755	528,642851	7294,32022
section13	IPE400	800	540	0,71532157	688,009724	8555,59261
section14	IPE450	900	570	0,7177725	914,587856	10125,0743
section15	IPE500	1000	600	0,71788497	1188,27785	11840,337

section16	IPE550	1100	630	0,71665655	1513,46476	13699,0304
section17	IPE600	1200	660	0,7140841	1896,78023	15712,4348

Tableau5-64 : Abaque 5 pour le groupe 3 selon yy.**7.3.5.2 Selon l'axe de faible inertie zz :****7.3.5.2.1 Le groupe 1 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,932]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [0,456]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [0,46]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,022]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I _{zz} (cm ⁴)	h (cm)	M _{pl.rd} (KN.m)	N _{pl.rd} (KN)
section1	IPE 100	200	165	15,92	10	13,772324	744,454783
section2	IPE120	240	192	27,67	12	21,5422494	1011,31848
section3	IPE 140	280	219	44,92	14	31,7443027	1318,79109
section4	IPE160	320	246	68,31	16	44,8368761	1669,45761
section5	IPE180	360	273	100,9	18	60,86457659	2057,67804

Tableau 5-65 : Abaque 5 pour le groupe 1 selon zz.**7.3.5.2.2 Le groupe 2 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,817]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [-0,075]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [0,88]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,017]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I _{zz} (cm ⁴)	h (cm)	M _{pl.rd} (KN.m)	N _{pl.rd} (KN)
section6	IPE200	400	300	142,4	20	80,7571938	2494,49739
section7	IPE220	440	330	204,9	22	105,937352	2992,70804
section8	IPE 240	480	360	283,6	24	136,646034	3547,63304
section9	IPE270	540	405	419,9	27	188,209985	4406,0487
section10	IPE 300	600	450	603,8	30	252,3286	5371,27413

Tableau 5-66 : Abaque 5 pour le groupe 2 selon zz.**7.3.5.2.3 Le groupe 3 :**

Pour : $\frac{N}{N_{pl.rd}} \in [0 ; 1]$

$$\frac{M}{M_{pl.rd}} = [-1,618]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^3 + [-0,632]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right]^2 + [1,238]\left[\frac{N}{N_{pl.rd}}\right] + [1,017]$$

	Classe IPE	B (mm)	H (mm)	I_{zz} (cm ⁴)	h (cm)	$M_{pl,rd}$ (KN.m)	$N_{pl,rd}$ (KN)
section11	IPE330	660	480	788,1	33	314,787953	6289,90891
section12	IPE360	720	510	1043	36	388,000106	7294,32022
section13	IPE400	800	540	1318	40	480,88876	8555,59261
section14	IPE450	900	570	1676	45	599,259479	10125,0743
section15	IPE500	1000	600	2142	50	737,576144	11840,337
section16	IPE550	1100	630	2668	55	897,146049	13699,0304
section17	IPE600	1200	660	3387	60	1080,67714	15712,4348

Tableau5-67 :Abaque 5 pour le groupe 3 selon zz.

8. Exemple d'application :

8.1 Calcul d'un poteau mixte rectangulaire à profil totalement enrobés de béton :

8.1.1 Position du problème :

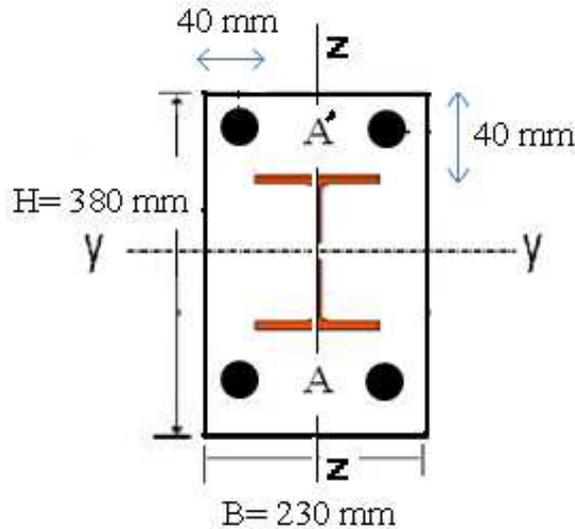


Figure5-26 : Section du Poteau mixte enrobé de béton.

Acier : IPE 300	$f_y = 235 \text{ N/mm}^2$	$E_a = 210000 \text{ N/mm}^2$
Béton : classe C25/30	$f_{ck} = 25 \text{ N/mm}^2$	$E_{cm} = 30500 \text{ N/mm}^2$
Armatures: $4\phi 10$	$f_{sk} = 400 \text{ N/mm}^2$	$E_s = 210000 \text{ N/mm}^2$

Coefficients partiels de sécurité:

$$\gamma_a = 1, \gamma_c = 1,5, \gamma_s = 1,15.$$

$$\gamma_c \text{ en rigidité} = 1,35$$

IPE 300	$h = 300 \text{ mm}$	$b = 150 \text{ mm}$	$t_w = 7,1 \text{ mm}$
	$A_a = 5381 \text{ mm}^2$	$I_y = 8356 \text{ cm}^4$	$I_z = 603,8 \text{ cm}^4$
	$W_{pl,y} = 628,4 \text{ cm}^3$	$W_{pl,z} = 125,2 \text{ cm}^3$	$t_f = 10,7 \text{ mm}$

Sollicitations extérieures:

$$N_{sd} = 500 \text{ KN},$$

$$M_{y, sd} = 50 \text{ KN.m (axe fort)}$$

$$M_{z, sd} = 25 \text{ KN.m (axe faible).}$$

Calcul pour la longueur de flambement: $L_f = 10 \text{ m}$.

8.1.2 Vérification des conditions d'application de la méthode simplifiée:

- La section du poteau mixte est constante et doublement symétrique sur toute sa hauteur. (Condition vérifiée).
- Le rapport entre la hauteur H de la section et sa largeur B :

Selon yy :

$$0,2 \leq \frac{H}{B} = \frac{380}{230} = 1,65 \leq 5 \text{ Condition vérifiée}$$

Selon zz :

$$0,2 \leq \frac{H}{B} = \frac{230}{380} = 0,60 \leq 5 \text{ Condition vérifié}$$

– Les armatures longitudinales :

$$0,3 \% A_c = 2,62 \text{ cm}^2 \leq A_s = 3,14 \text{ cm}^2 \leq 4\% A_c = 34,96 \text{ cm}^2 \text{ Condition vérifié}$$

– Profilé totalement enrobé :

$$40 \text{ mm} \leq E_y = 40 \text{ mm} \leq 0,4B = 92 \text{ mm} \text{ Condition vérifié}$$

$$40 \text{ mm} \leq E_z = 40 \text{ mm} \leq 0,3H = 114 \text{ mm} \text{ Condition vérifié}$$

– Le coefficient, donnant la contribution de l'acier :

$$\delta = [A_a (f_y / \gamma_a) / N_{pl,rd}] = 0,48$$

$$0,2 \leq \delta = 0,48 \leq 0,9 \text{ Condition vérifié}$$

– L'élanement maximal des poteaux mixtes est :

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{cr}}}$$

$$N_{pl,R} = A_a \frac{f_y}{\gamma_a} + 0,85 A_c \cdot \frac{f_{ck}}{\gamma_c} + A_s \frac{f_{sk}}{\gamma_s}$$

$$\gamma_a = \gamma_c = \gamma_s = 1$$

$$N_{pl,R} = 3226,67 \text{ KN}$$

– **Selon l'axe yy:**

$$\bar{\lambda}_y = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{cr,y}}}$$

La charge critique élastique selon l'axe y est :

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 (EI_y)}{L_{b,y}^2}$$

$$EI_y = E_a I_{y,a} + 0,8 E_{cd} I_{y,c} + E_s I_{z,s}$$

Avec :

$$E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,35}$$

I _{ay} (cm ⁴)	I _{cy} (cm ⁴)	I _{sy} (cm ⁴)	(EI _y) _e (KN.m ²)	N _{cr,y} (KN)	$\bar{\lambda}$
8356	96768,13	47,1	35136,45	3464	0,96 ≤ 2

Donc: Condition vérifié

– Selon l'axe zz:

$$\bar{\lambda}_{z=} = \sqrt{\frac{N_{pl,R}}{N_{crz}}}$$

La charge critique élastique selon l'axe z est :

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2(EI_z)}{L_{b,z}^2}$$

$$EI_z = E_a I_{z,a} + 0,8 E_{cd} I_{z,c} + E_s I_{z,s}$$

Avec : $E_{cd} = \frac{E_{cm}}{1,35}$

Iaz (cm ⁴)	Icz(cm ⁴)	Isz(cm ⁴)	(EIz)e(KN.m ²)	Ncr.z(KN)	$\bar{\lambda}$
604	37901,3	23,55	8168,16	806	1,98 ≤ 2

Donc:Condition vérifié

D'où :La méthode simplifiée est applicable.

8.1.3 Vérification des erreurs entre la méthode analytique et les deux approches :

$$N_{pl,rd} = 2593,90167 \text{ KN}$$

$$M_{pl,rd}(yy) = 142,229385 \text{ KN.m}$$

$$M_{pl,rd}(zz) = 89,4983457 \text{ KN.m}$$

– La première approche :

– Selon l'axe yy

IPE	N/N _{pl}	M/M _{pl} (calcul)	M/M _{pl} (equation)	erreur%
300	2.0682E-07	1	1.00000033	3.332E-05
300	0.01777853	1.02818654	1.02748225	-0.06849815
300	0.06863114	1.09629395	1.09327541	-0.27534058
300	0.11948375	1.14585292	1.14007737	-0.50403954
300	0.17033636	1.17686346	1.16788814	-0.76264734
300	0.22118897	1.18932555	1.17670771	-1.06092399
300	0.27204158	1.1832392	1.16653608	-1.41164346
300	0.32289419	1.15860441	1.13737326	-1.83247652
300	0.37374679	1.11542118	1.08921923	-2.3490629
300	0.4245994	1.05368951	1.02207401	-3.00045625
300	0.44237773	1.02773196	0.99411941	-3.27055592
300	0.44237773	1.02773196	1.00799629	-1.92031342
300	1	0	-0.03891469	-3.89146937

– Selon l'axe zz

IPE	N/N _{pl}	M/M _{pl} (calcul)	M/M _{pl} (equation)	erreur%
300	1.1005E-08	1	0.99498159	-0.50184078
300	0.02084952	1.01318606	1.00047146	-1.25491283
300	0.05188802	1.0162715	1.00838925	-0.77560406
300	0.10832167	1.0206138	1.02137236	0.07432371
300	0.16475532	1.0233205	1.03144978	0.79440191
300	0.22118897	1.02439161	1.03734789	1.2647781
300	0.27762262	1.02382711	1.03779305	1.36409083
300	0.33405626	1.02162702	1.03151162	0.96753467
300	0.39048991	1.01779133	1.01722997	-0.05515502
300	0.45648803	1.01318606	0.98867189	-2.41951262
300	0.47733754	1	0.97668684	-2.33131638
300	0.70323727	0.72144173	0.73502258	1.88245956
300	1	0	0.00685698	0.68569811

– La deuxième approche :

– Selon l'axe yy

IPE	N/N _{pl}	M/M _{pl} (calcul)	M/M _{pl} (equation)	erreur%
300	2.0682E-07	1	1.00000037	3.671E-05
300	0.01777853	1.02818654	1.03038109	0.21343959
300	0.06863114	1.09629395	1.10429821	0.73011969
300	0.11948375	1.14585292	1.15897557	1.14522989
300	0.17033636	1.17686346	1.19441319	1.4912294
300	0.22118897	1.18932555	1.21061106	1.78971258
300	0.27204158	1.1832392	1.20756917	2.05621783
300	0.32289419	1.15860441	1.18528754	2.30304089
300	0.37374679	1.11542118	1.14376616	2.541191
300	0.4245994	1.05368951	1.08300503	2.78217854
300	0.44237773	1.02773196	1.0572237	2.86959447
300	0.44237773	1.02773196	1.0617128	3.30639122
300	1	0	0	0

– Selon l'axe zz

IPE	N/N _{pl}	M/M _{pl} (calcul)	M/M _{pl} (equation)	erreur%
300	1.1005E-08	1	1.003	0.30000034
300	0.02084952	1.01318606	1.00932718	-0.38086616
300	0.05188802	1.0162715	1.01837592	0.20707278
300	0.10832167	1.0206138	1.03306758	1.22022494
300	0.16475532	1.0233205	1.04441599	2.06147424
300	0.22118897	1.02439161	1.05116053	2.61315365
300	0.27762262	1.02382711	1.0520406	2.75568892
300	0.33405626	1.02162702	1.04579559	2.3656942

300	0.39048991	1.01779133	1.03116489	1.31397869
300	0.45648803	1.01318606	1.00172707	-1.13098568
300	0.47733754	1	0.98936155	-1.06384451
300	0.70323727	0.72144173	0.74062936	2.659623
300	0.91295609	0.25094086	0.27288429	8.74446499
300	0.96264315	0.11476637	0.12133986	5.72772087
300	0.96886929	0.09699202	0.10114221	4.2789076
300	0.9896231	0.03383442	0.03182345	-5.94357227
300	1	0	-0.004	-0.4

8.1.4 Vérification de la résistance de la section transversale sous combinaison de la compression et de la flexion bi axiale :

On doit d'abord déterminer la résistance du poteau mixte sous l'effort axial en l'absence du moment de flexion (la résistance au flambement) :

χ est calculé à partir des formules :

$$\phi = 0,5 \left[1 + \alpha \left(\bar{\lambda} - 0,2 \right) + \bar{\lambda}^2 \right]$$

Avec $\alpha=0.34$ pour la courbe b

$$\kappa = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1$$

– Selon l'axe yy:

$$\Phi = 1,09$$

$$\chi = 0,62$$

– Selon l'axe zz:

$$\Phi = 2,78$$

$$\chi = 0,22$$

– Vérification :

$$N_{Sd} \leq \chi N_{Rd,pl}$$

$$\chi = \min(0,22 ; 0,62) = 0,22$$

$$500 \text{ KN} \leq 0,22 \cdot 2593,9 = 571 \text{ KN}$$

Le poteau peut supporter cette charge axiale.

Vérification de la stabilité du poteau sous $N_{x,Sd}$ et $M_{y,Sd}$ ou $N_{x,Sd}$ et $M_{z,Sd}$:

$$\text{On a : } r = 0$$

$$\text{Donc : } \chi_n = 0,25\chi$$

$$\chi_d = N_{Sd} / N_{pl,Rd}$$

$$\chi_d = 500 / 2593,9 = 0,192$$

$$\mu = \mu_d - \mu_k \frac{(\chi_d - \chi_n)}{(\chi - \chi_n)}$$

$$\frac{M_{y.sd}}{\mu_y \cdot M_{pl.y.Rd}} \leq 0,9$$

$$\frac{M_{z.sd}}{\mu_z \cdot M_{pl.z.Rd}} \leq 0,9$$

$$\frac{M_{y.sd}}{\mu_y \cdot M_{pl.y.Rd}} + \frac{M_{z.sd}}{\mu_z \cdot M_{pl.z.Rd}} \leq 1,0$$

– **La première approche :**

– **Selon yy :**

	La courbe réelle	Equation approchée
χ	0,62	0,62
χ_n	0,155	0,155
χ_d	0,192	0,192
μ_k	0,643	0,78
μ_d	1,184	1,26
μ_y	1,132	1,19

La courbe réelle : $M_{y.Sd} = 50 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 1,132 \times 142,23 = 144,9 \text{ KN.m}$

Equation approchée : $M_{y.Sd} = 50 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 1,19 \times 142,23 = 152,32 \text{ KN.m}$

Donc : la résistance est vérifiée selon yy.

– **Selon zz :**

	La courbe réelle	Equation approchée
χ	0,22	0,22
χ_n	0,155	0,155
χ_d	0,192	0,192
μ_k	1,0243	1,0765
μ_d	1,024	1,071
μ_z	0,441	0,458

La courbe réelle : $M_{z.Sd} = 25 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 0,441 \times 89,49 = 35,52 \text{ KN.m}$

Equation approchée : $M_{z.Sd} = 25 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 0,458 \times 89,49 = 36,88 \text{ KN.m}$

Donc : la résistance est vérifiée selon zz.

$$\text{La courbe réelle : } \frac{50}{1,132 \times 142,23} + \frac{25}{0,441 \times 89,49} = 0,94 \leq 1$$

$$\text{Equation approchée : } \frac{50}{1,19 \times 142,23} + \frac{25}{0,458 \times 89,49} = 0,90 \leq 1$$

Donc : Les trois conditions de la résistance sont vérifiées.

– **La deuxième approche :**

– **Selon yy :**

	La courbe réelle	Equation approchée
χ	0,62	0,62
χ_n	0,155	0,155
χ_d	0,192	0,192
μ_k	0,643	0,72
μ_d	1,184	1,2
μ_y	1,132	1,14

La courbe réelle : $M_{y\,sd} = 50 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 1,132 \times 142,23 = 144,9 \text{ KN.m}$

Equation approchée : $M_{y\,sd} = 50 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 1,14 \times 142,23 = 145,92 \text{ KN.m}$

Donc : la résistance est vérifié selon yy.

– **Selon zz :**

	La courbe réelle	Equation approchée
χ	0,22	0,22
χ_n	0,155	0,155
χ_d	0,192	0,192
μ_k	1,0243	1,05
μ_d	1,024	1,04
μ_z	0,441	0,44

La courbe réelle : $M_{z\,sd} = 25 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 0,441 \times 89,49 = 35,52 \text{ KN.m}$

Equation approchée : $M_{z\,sd} = 25 \text{ KN.m} \leq 0,9 \times 0,44 \times 89,49 = 35,62 \text{ KN.m}$

Donc : la résistance est vérifié selon zz.

$$\text{La courbe réelle : } \frac{50}{1,132 \times 142,23} + \frac{25}{0,441 \times 89,49} = 0,94 \leq 1$$

$$\text{Equation approchée : } \frac{50}{1,14 \times 142,23} + \frac{25}{0,44 \times 89,49} = 0,93 \leq 1$$

Donc : Les trois conditions de la résistance sont vérifiées.

9. Conclusion :

Les équations approchées et les abaques des courbes d'interactions que nous avons développées, facilitant à l'utilisateur la détermination de la résistance des poteaux mixtes acier béton soumis à la compression excentrée. Cas des poteaux formés par des sections IPE enrobés de béton de différents types (rectangulaire ou carrée), ainsi que les points d'interactions momentfléchissant effort normal de la section du poteau malgré que ces équations approchées comportent certaine tolérance admissible.

Conclusion générale

L'étude présentée dans cette thèse a été consacrée aux poteaux mixtes acier béton soumis à la compression excentrée. Cas des poteaux formés par des sections IRE totalement enrobés de béton, et plus précisément sur la détermination graphique des courbes d'interactions des poteaux mixtes sous une flexion composée bi axiale avec un effort normal de compression, et de proposer des abaques et des modèles d'équations approchées de ces courbes d'interactions.

Ce travail de recherche a été mené selon 5 chapitres comme suit :

- ✓ **Le 1^{er} chapitre** : consiste à donner une introduction générale sur la construction mixte et sur les poteaux mixtes, en mettant en avant l'avantage et l'inconvénient de la construction mixte et des poteaux mixtes. la fin, de ce chapitre a été consacrée à définir les caractéristiques mécaniques et intrinsèques des matériaux utilisés en construction mixte.
- ✓ **Le 2^{ème} chapitre** : est consacré à une étude générale de la flexion composée uni axiale et bi axiale Dans les domaines suivants :
 - Domaine élastique.
 - Domaine élasto plastique.
 - Domaine plastique.
- ✓ **Le 3^{ième} chapitre** : a été consacré à la présentation en détail de « la méthode simplifiée » présentée par l'Eurocode 4 pour la détermination des diagrammes d'interactions. Dans cette présentation on remarque la difficulté qui accompagne l'application de cette méthode et qui est due principalement au nombre important des points et des données à prendre en compte, qui rend le calcul très long en temps et prend énormément d'effort. D'où la nécessité d'élaboration d'un programme de calcul automatique pour un calcul rapide et précise de ces diagrammes d'interactions.
- ✓ **Le 4^{ième} chapitre** : a été consacré à l'élaboration d'un programme de calcul, qui nous a permis la détermination des diagrammes d'interactions selon les deux axes principaux yy et zz , pour les cinq cas avec des différentes

conditions d'enrobages, tel que chaque cas contient 17 sections (IPE 100..... IPE 600) :

- Cas 01 : sections rectangulaires ($E_{yy} = 40 \text{ mm}$. $E_{zz} = 40 \text{ mm}$).
- Cas 02 : sections carrées ($E_{yy} = 60 \text{ mm}$. E_{zz} dépend de $H/B = 1$).
- Cas 03 : sections carrées ($E_{yy} = 80 \text{ mm}$. E_{zz} dépend de $H/B = 1$).
- Cas 04 : sections carrées ($E_{yy} = 100 \text{ mm}$. E_{zz} dépend de $H/B = 1$).
- Cas 05 : sections rectangulaires ($E_{yy} = h/2$. $E_{zz} = b$).

L'utilisation de ce programme de calcul ont permis de tracer les diagrammes d'interactions selon les deux axes principaux yy et zz dans un temps réduit avec une très bonne précision.

✓ **Le 5^{ème} chapitre** : a été consacré à la proposition des abaques et des modèles d'équations approchées des diagrammes d'interactions pour les sections IPE totalement enrobées de béton avec des différentes conditions d'enrobage et un ferrailage minimum, avec deux différentes approches :

- **La première approche** : les coefficients sont déterminés avec une bonne précision (petite tolérance d'erreur), en variant plusieurs paramètres géométriques pour choisir la solution la plus adéquate de ces derniers. Pour cela, on a mené une étude paramétrique.

Dans cette première approche :

On a adopté une seule équation pour toutes les sections de calculs de chaque cas.

Les coefficients a , b , c , d , a_1 , b_1 sont des équations en fonction des caractéristiques géométriques de la section de calcul.

- **La deuxième approche** : les sections d'étude de chaque cas sont divisées en trois groupes :

Pour chaque groupe on a adopté une équation.

Les coefficients a , b , c , d , a_1 , b_1 sont des constants.

Les coefficients sont déterminés avec une très bonne précision (très petite tolérance d'erreur).

La deuxième approche est plus précise que la première approche ,mais elle comporte trois équations .

Au terme de ce travail, on peut dire que :

L'étude paramétrique nous a permis de mettre à la disposition des utilisateurs des abaques et des équations approchées de calcul pour des poteaux mixtes totalement enrobés de béton soumise à la flexion composée bi axiale avec un effort normal de compression.

La disposition des abaques et les équations approchées permettent la rapidité des calculs et leur automatisation par rapport à la méthode de l'Eurocode 4.

Notons qu'à la fin de ce travail qui constitue pour nous une très bonne expérience, que l'utilisation de l'outil informatique pour l'analyse et le calcul des structures mixtes est très bénéfique en temps et en effort à condition de maîtriser les notions de bases des sciences de la structure mixte, ainsi que l'outil informatique lui-même.

Dans le futur cette méthode peut être étendue à d'autre type de sections mixtes.

D1H	d2	d1B	X	Nc	Mc nn
40	20	40	0	0	0
40	20	40	5	9562.5	23906.25
40	20	40	15	28687.5	215156.25
40	20	40	18	34425	309825
40	20	40	25	47812.5	597656.25
40	20	40	30	57375	860625
40	20	40	35	66937.5	1171406.25
40	20	40	40	76500	1530000
40	20	40	42	80325	1686825
40	20	40	44	84150	1851300
40	20	40	45.7	87401.25	1997118.56
40	20	40	47.72482	91273.7183	2178010.89
40	20	40	55	105187.5	2892656.25
40	20	40	60	114750	3442500
40	20	40	70	133875	4685625
40	20	40	80	153000	6120000
40	20	40	90	172125	7745625
40	20	40	100	191250	9562500
40	20	40	110	210375	11570625
40	20	40	120	229500	13770000
40	20	40	125	239062.5	14941406.3
40	20	40	132.27518	252976.282	16731241.6
40	20	40	180	344250	30982500

Nsc	Nst	Msc	Mst	Ms nn totale	Ns totale
0	25356.5217	0	2282086.96	2282086.96	-25356.5217
0	25356.5217	0	2155304.35	2155304.35	-25356.5217
0	25356.5217	0	1901739.13	1901739.13	-25356.5217
0	25356.5217	0	1825669.57	1825669.57	-25356.5217
12678.2609	12678.2609	63391.3043	1711565.22	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	126782.609	1648173.91	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	190173.913	1584782.61	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	253565.217	1521391.3	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	278921.739	1496034.78	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	304278.261	1470678.26	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	325831.304	1449125.22	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	351502.501	1423454.02	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	443739.13	1331217.39	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	507130.435	1267826.09	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	633913.043	1141043.48	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	760695.652	1014260.87	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	887478.261	887478.261	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	1014260.87	760695.652	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	1141043.48	633913.043	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	1267826.09	507130.435	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	1331217.39	443739.13	1774956.52	0
12678.2609	12678.2609	1423454.02	351502.501	1774956.52	0
25356.5217	0	2282086.96	0	2282086.96	25356.5217

Nac	Nat	N a totale	Mac	Mat	Ma nn total
0	242520	-242520	0	21826800	21826800
0	242520	-242520	0	20614200	20614200
0	242520	-242520	0	18189000	18189000
0	242520	-242520	0	17461440	17461440
0	242520	-242520	0	15763800	15763800
0	242520	-242520	0	14551200	14551200
0	242520	-242520	0	13338600	13338600
0	242520	-242520	0	12126000	12126000
25850	216670	-190820	25850	10616830	10642680
51700	190820	-139120	103400	9159360	9262760
73672.5	168847.5	-95175	209966.625	7961159.63	8171126.25
75623.4141	166896.586	-91273.1719	292088.631	7700206.25	7992294.88
82633.05	159886.95	-77253.9	619747.875	6795195.38	7414943.25
87450.55	155069.45	-67618.9	874505.5	6202778	7077283.5
97085.55	145434.45	-48348.9	1456283.25	5090205.75	6546489
106720.55	135799.45	-29078.9	2134411	4073983.5	6208394.5
116355.55	126164.45	-9808.9	2908888.75	3154111.25	6063000
125990.55	116529.45	9461.1	3779716.5	2330589	6110305.5
135625.55	106894.45	28731.1	4746894.25	1603416.75	6350311
145260.55	97259.45	48001.1	5810422	972594.5	6783016.5
150078.05	92441.95	57636.1	6378317.13	693314.625	7071631.75
157087.686	85432.3141	71655.3719	7247647.25	329974.624	7577621.87
242520	0	242520	21826800	0	21826800

Mnn total	Ntotal	Ex	Eyy	Myy	Nyy
24108887	-267876.522	-90	0	0	-267876.522
22793410.6	-258314.022	-88.2391534	-3.23915343	836718.75	-258314.022
20305895.4	-239189.022	-84.8947633	-9.89476328	2366718.75	-239189.022
19596934.6	-233451.522	-83.9443428	-11.9443428	2788425	-233451.522
18136412.8	-194707.5	-93.1469654	-28.1469654	5480425.27	-194707.5
17186781.5	-185145	-92.8287641	-32.8287641	6078081.52	-185145
16284962.8	-175582.5	-92.7482111	-37.7482111	6627925.27	-175582.5
15430956.5	-166020	-92.9463711	-42.9463711	7129956.52	-166020
14104461.5	-110495	-127.647962	-79.6479616	8800701.52	-110495
12889016.5	-54970	-234.47365	-188.47365	10360396.5	-54970
11943201.3	-7773.75	-1536.35007	-1492.05007	11598824.2	-7773.75
11945262.3	0.54639	21862153.9	21862196.2	11945285.4	0.54639
12082556	27933.6	432.545609	467.545609	13060232	27933.6
12294740	47131.1	260.862573	290.862573	13708673	47131.1
13007070.5	85526.1	152.083054	172.083054	14717592.5	85526.1
14103351	123921.1	113.809117	123.809117	15342562	123921.1
15583581.5	162316.1	96.0076143	96.0076143	15583581.5	162316.1
17447762	200711.1	86.9297314	76.9297314	15440651	200711.1
19695892.5	239106.1	82.373024	62.373024	14913770.5	239106.1
22327973	277501.1	80.4608451	50.4608451	14002940	277501.1
23787994.5	296698.6	80.1756211	45.1756211	13403543.5	296698.6
26083820	324631.654	80.3489731	38.0737931	12359958.4	324631.654
55091387	612126.522	90	0	0	612126.522

Mpl	Npl	M/Mpl	N/Npl
11945285.4	612126.522	0	-0.43761626
11945285.4	612126.522	0.07004594	-0.42199449
11945285.4	612126.522	0.19812995	-0.39075095
11945285.4	612126.522	0.2334331	-0.38137789
11945285.4	612126.522	0.458794	-0.31808375
11945285.4	612126.522	0.50882682	-0.30246198
11945285.4	612126.522	0.554857	-0.28684021
11945285.4	612126.522	0.59688457	-0.27121844
11945285.4	612126.522	0.73675105	-0.18051007
11945285.4	612126.522	0.86732097	-0.0898017
11945285.4	612126.522	0.97099599	-0.01269958
11945285.4	612126.522	1	8.9261E-07
11945285.4	612126.522	1.0933378	0.0456337
11945285.4	612126.522	1.14762206	0.07699568
11945285.4	612126.522	1.23208379	0.13971964
11945285.4	612126.522	1.28440314	0.20244361
11945285.4	612126.522	1.30458009	0.26516757
11945285.4	612126.522	1.29261466	0.32789153
11945285.4	612126.522	1.24850684	0.39061549
11945285.4	612126.522	1.17225663	0.45333945
11945285.4	612126.522	1.12207813	0.48470143
11945285.4	612126.522	1.03471437	0.53033424
11945285.4	612126.522	0	1

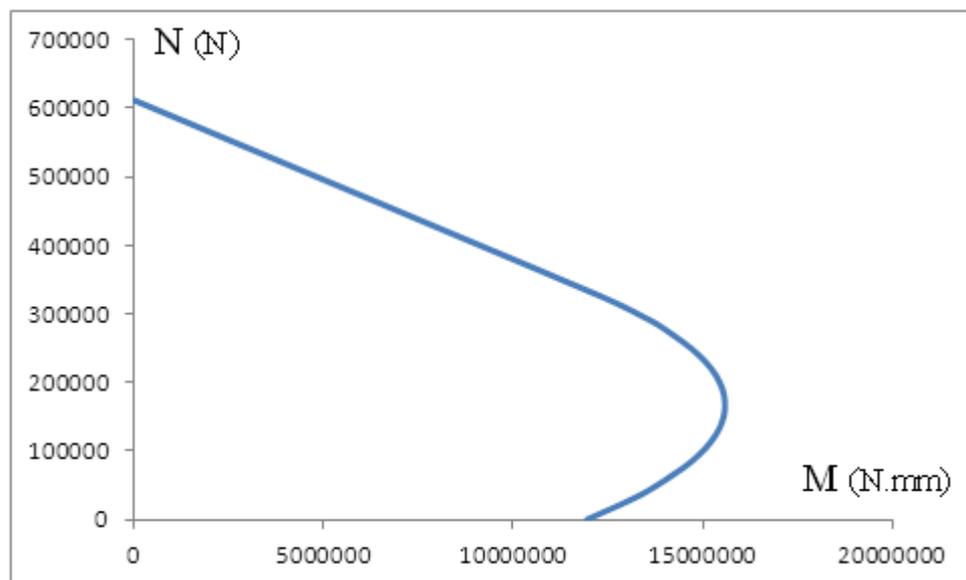


Figure 1 : diagramme d'interaction réel.

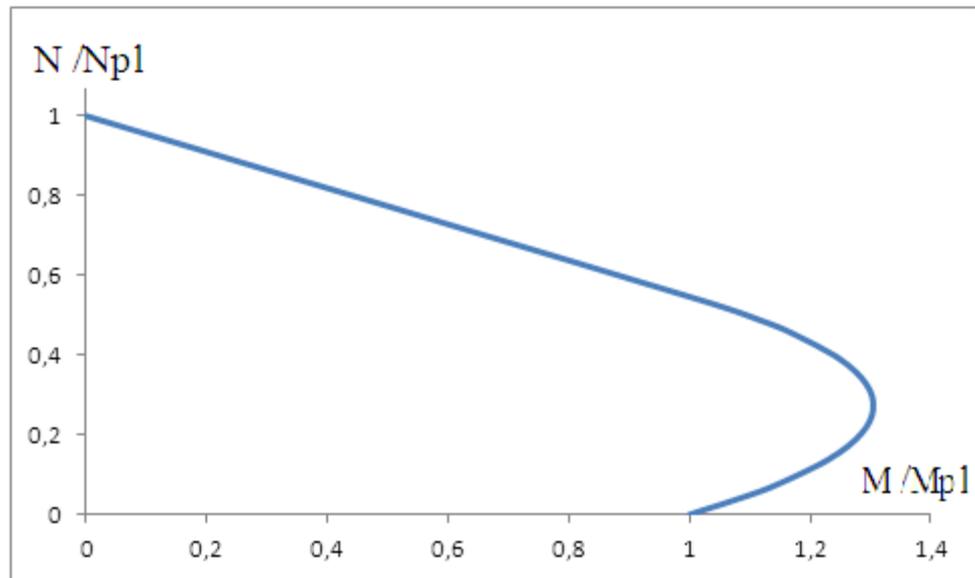


Figure 2 : diagramme d'interaction réduit.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Pannell F.N.** “Failure surfaces for members in compression au biaxial bending”, A.C.I journal, proceedings v ,60 n⁰ 1, 1963.
- [2] **Eurocode4.** “Calcul des structures mixtes acier-béton, Partie-1.1, Règles générales et règles pour les bâtiments ”. DD ENV 1994-1-1.
- [3] **Jallil W . Horisset A. and perchat J.** “Abaques en flexion simple et composée conformes aux règles BAEL”, Edition Eyrolles .1976.
- [4] **Mathias Johansson.** “Composite Action and Confinement Effects in Tubular Steel-Concrete Columns”. Chalmers University of Technology- Goteborg, Sweden 2002.
- [5] **Mimoune Mostefa .** “Cours : construction mixte poteaux mixtes Acier-béton ”.
- [6] **Richard Maranda.** “Analyses par éléments finis de poteaux mixtes avec section d’acier en classe 4”. Ecole polytechnique de Montréal 1998.
- [7] **Z.-F. Huang, K-H .Tan, G-H .Phng.** “Axial restraint effects on the fire resistance of composite columns encasing I-section steel”. Journal of Constructional Steel Research 63 (2007) 437–447.
- [8] **L.-H. Han, Y-F. Yang, L. Xu.** “An experimental study and calculation on the fire resistance of concrete-filled SHS and RHS columns”. Journal of Constructional Steel Research 59 (2003) 427–452.
- [9] **Furlong R .W.** “Ultimate strength of square columns under biaxially excentric loads”, A.C.I. journal , proceedings vol.57 n⁰ 7 . 1961.
- [10] **Czerniak E.** “Analytical approach to biaxial eccentricity”, Proceeding ACE , vol 88 n⁰ ST4, 1962 .
- [11] **ENV 1993-1-1-Eurocode 3: Part 1-1: Revised Annex J “Joint in building frames 1993”.**

[12] **Hirt M, Bez R.:** Traité de génie civil - Construction métallique, “Notions fondamentales et méthodes de dimensionnement” - Volume 10 ; Presses polytechniques et universitaires romandes, Lausanne, 1996.

[13] **Brester S.,”** design criteria for reinforced concrete columns under axial load and biaxial bending”, A.C.I. journal n^o 5, vol 57, 1960.

[14] **Boutemeur. M.,”**Cours de béton armé“la flexion composée”, Ecole nationale supérieure polytechnique,2009.

[15] **Boulfoul A.,”** Thèse de doctorat “Analyse aux états limites ultimes des poteaux en béton armé de formes polygonales soumis à la compression excentrée bi axialement ”Université Constantine 1,pp.3 - 7. 2008.

[16] **Jean- Pierre Mougin“**Cours de béton armé BAEL91 modifié 99 et DTU associés”, deuxième édition Eyrolles2000.

[17] **RPA99**Règles parasismique Algérienne version 2003 ; et Document technique réglementaire **D.T.R-B.C.2.48.**

[18] **C.B.A.93 :**Règles de conception et de calcul des structures en béton armé.

.