

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID – TLEMCEM FACULTE DE TECHNOLOGIE



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Civil

Spécialité : Structures

Par : Fedili Islam & Bouaicha Abdelkader

Sujet

Analyse plastique globale des structures
en béton armé avec contrôle de dissipation

Soutenu le: 20 /09/2020

Devant le jury composé de :

Pr BOUKLI HACENE S.M.A
Pr MATALLAH M.
M^{me} MEDJAHED A

Président
Encadrant
Examinatrice

Année universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENTS

C'est une tâche difficile de trouver les plus justes mots pour exprimer ses <<mercis>>. C'est paradoxalement la dernière page que l'on rédige, mais qu'on croise en premier.

Nous remercions le Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le courage de mener à terme ce modeste travail.

Nous tient à exprimer notre gratitude à notre encadreur, Monsieur MOHAMMED MATALLAH, professeur à l'université de Tlemcen, pour avoir accepté de diriger ce mémoire et de nous avoir transmis sa passion pour la recherche scientifique. Merci pour votre accueil, votre disponibilité, votre exigence, vos conseils précieux et vos motivations. Veuillez trouver ici l'expression de notre profonde reconnaissance.

Nous remercions énormément Monsieur BENYACOUB HAKIM pour le temps qu'il nous a consacré. Il était toujours à nos côtés comme un bon guide, sans oublier son aide et sa générosité.

Sans oublier ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail et ceux qui nous ont fait l'honneur de juger ce mémoire.

FEDILI.I & BOUAICHA.A

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, qui je ne remercierai jamais assez pour tout ce qu'ils ont fait pour moi. Sans eux je ne serai pas arrivé là où j'en suis aujourd'hui.

A mes frères

A ma sœur

A ma belle sœur

A mon binôme Abdelkader avec qui j'ai partagé ce travail.

A tous mes collègues des études.

FEDILI ISLAM

Dédicaces

Mes parents, les mots ne sauraient exprimer l'immense et profonde gratitude que je leur témoigne ici pour leur précieux soutien, pour leur patience, pour avoir cru en moi, pour leurs sourires réconfortants et pour leurs sacrifices qui m'ont permis d'atteindre cette étape dans ma vie. Ils n'ont jamais cessé de consentir pour mon instruction et mon bien être. Que dieu me les gardes et les protège.

A ma sœur.

A mes amis.

A mon binôme Islam avec qui j'ai partagé ce travail.

Toute la promotion 2019/2020 génie civil.

BOUAICHA ABDELKADER

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	2
Dédicaces	3
Dédicaces	4
NOTATIONS UTILISÉES	11
Listes des figures	14
Liste des tableaux.....	16
Résumé.....	17
ملخص	17
Abstract.....	17
chapitre 1 Introduction à l'Analyse plastique	18
1.1 Introduction générale :	19
1.2 Introduction d'analyse plastique :	20
1.2.1 Analyse globale :.....	20
1.2.2 Analyse semi-globale :.....	20
1.2.3 Analyse locale :	21
1.3 Objectifs de l'analyse plastique :	21
1.4 Objectifs Du Mémoire :	21
chapitre 2 Analyse plastique à l'échelle globale.....	22
2.1 Notion de rotules plastiques :.....	23
2.1.1 Introduction :	23
2.1.2 Capacité de rotation :	23
2.1.2.1 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC2 (A. Nouali 2017)	23
2.1.2.2 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC3 :	25
2.1.2.3 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC8 :	26
2.1.2.3.1 Estimation de la longueur de la rotule plastique :	26
2.1.2.3.2 Loi de calcul :	27
2.2 Loi moment courbure :	28
2.2.1 Approche Analytique :	28
2.2.1.1 Introduction :	28
2.2.1.2 Définition de la courbure :	28
2.2.1.3 Détermination expérimentale de la courbure :	29

2.2.1.4	Courbure d'une section rectangulaire soumise à une flexion croissante :.....	29
2.2.1.4.1	Approche de modélisation « couche par couche » :.....	30
2.2.1.4.2	Prise en compte de l'endommagement :.....	31
2.2.1.5	Exemple de détermination de loi Moment Courbure :	32
2.2.1.5.1	Approche Analytique	32
2.2.1.5.1.1	Moment-Courbure élastique.....	32
2.2.1.5.1.2	Moment-Courbure plastique.....	33
2.2.1.5.1.3	Moment-Courbure ultime.....	34
2.2.1.5.2	Numériquement (SAP2000).....	35
2.2.1.5.2.1	Exemple d'une section rectangulaire	35
2.2.1.5.2.2	Exemple section circulaire :	35
2.2.1.5.3	Comparaison des deux résultats :	37
2.2.1.6	Remarques :	37
2.2.2	L'influence de la force normale sur le moment plastique :	38
2.2.2.1	Introduction :	38
2.2.2.2	Section rectangulaire :	38
2.2.2.3	Le diagramme moment-courbure en présence d'une force normale :.....	41
2.2.2.3.1	Seule la zone de compression cède (Fig20) :	41
2.2.2.3.2	Les zones de compression et de tension cèdent (Fig20) :	43
2.2.2.4	Conclusion :	44
chapitre 3	Calcule plastique des éléments de structures	45
3.1	L'analyse push-over :.....	46
3.1.1	Objectif :	46
3.1.2	Détermination analytique de la courbe de capacité :	47
3.1.2.1	Calcule des forces :.....	47
3.1.2.2	La COURBE DE CAPACITE :	52
3.1.3	La courbe de capacité numérique (SAP):	53
3.1.3.1	Étapes de push-over par le SAP2000.....	53
3.1.3.2	Les résultats obtenus de la courbe de capacité	55
3.1.4	Comparaison des deux résultats :.....	56
3.1.5	Remarques :	57
3.2	Calcule de la rotation plastique :	58

3.2.1	Présentation du portique :	58
3.2.2	Les rotules plastiques	58
3.2.3	Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC 8 :	59
3.2.4	Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC2 2 :	62
3.2.5	Capacité de rotation des rotules plastiques par l'utilisation du SAP2000 :	63
3.2.5.1	Mécanisme de ruine et distribution des rotules plastiques :	63
3.2.6	Comparaison des valeurs des rotations limites :	65
3.2.7	Conclusion :	66
chapitre 4	Analyse plastique d'une structure (bâtiment en béton armé)	67
4.1	Introduction :	68
4.1.1	Présentation de la structure :	68
4.1.2	Caractéristiques géométriques de la structure :	68
4.2	Calcul de la descente de charge :	69
4.2.1	Plancher terrasse inaccessible	69
4.2.1.1	Charge permanente (G) :	69
4.2.1.2	Charge d'exploitation (Q) :	69
4.2.2	Plancher étage courant	69
4.2.2.1	Charge permanente (G) :	69
4.2.2.2	Charge d'exploitation (Q) :	70
4.2.3	Maçonnerie	70
4.2.3.1	Mur extérieur :	70
4.2.3.1.1	Charge permanente (G) :	70
4.2.3.2	Mur de séparation	70
4.2.3.2.1	Charge permanente (G) :	70
4.3	Pré dimensionnement des éléments structuraux :	72
4.3.1	Déterminer la hauteur du plancher :	72
4.3.2	Les poteaux :	72
4.3.3	Les poutres	72
4.3.3.1	Poutres principales :	72
4.3.3.2	Poutres secondaires :	73
4.3.4	Poutrelles :	73
4.3.4.1	Largeur de la nervure (b_0) :	74

4.3.4.2	Selon la B.A.E.L 91 :	74
4.3.4.3	Largeur de la poutrelle (b) :	74
4.3.4.4	Vérification :	74
4.4	Détermination de la courbe de capacité:	75
4.4.1	Les éléments résistants.....	75
4.4.1.1	L'analyse Push Over:.....	75
4.4.1.1.1	Exécution de l'analyse push over par SAP 2000 :	75
4.4.1.1.2	Résultat de l'analyse push-over.....	86
4.4.1.1.2.1	La courbe push-over de la structure:	86
4.4.1.1.2.2	Développement des rotules plastiques par le logiciel SAP 2000:.....	88
4.5	Calcule Analytique des moments-courbure des éléments de bâtiment :	92
4.5.1	Poutre principale :	92
4.5.1.1	Moment-Courbure élastique :	92
4.5.1.2	Moment-Courbure plastique :	93
4.5.1.3	Moment-Courbure ultime :	93
4.5.2	Poutre secondaire :	94
4.5.2.1	Moment-Courbure élastique :	94
4.5.2.2	Moment-Courbure plastique :	95
4.5.2.3	Moment-Courbure ultime :	95
4.5.3	Poutre palier :	95
4.5.3.1	Moment-Courbure élastique :	96
4.5.3.2	Moment-Courbure plastique :	96
4.5.3.3	Moment-Courbure ultime :	97
4.5.4	Poteau type 1 :	98
4.5.4.1	Moment-Courbure élastique :	98
4.5.4.2	Moment-Courbure plastique :	99
4.5.4.3	Moment-Courbure ultime :	99
4.5.5	Poteau type 2 :	99
4.5.5.1	Moment-Courbure élastique :	100
4.5.5.2	Moment-Courbure plastique :	100
4.5.5.3	Moment-Courbure ultime :	101
4.6	Calcule de rotation des rotules plastiques :	102

4.6.1	Capacité de rotation des rotules plastiques selon EC8.....	102
4.6.1.1	Poutre principal.....	102
4.6.1.2	Poutre secondaire :.....	103
4.6.1.3	Poutre palier :.....	104
4.6.1.4	Poteau type 1 :	105
4.6.1.5	Poteau type 2 :	106
4.6.2	Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC2 :	107
4.6.2.1	<i>Poutre principale</i> :	107
4.7	Comparaison des valeurs des rotations plastiques des rotules entre EC2, EC8, et calcul numérique :	108
4.8	Conclusion :	110
chapitre 5	Analyse plastique avec contrôle de la dissipation.....	111
5.1	Contrôle des rotations plastiques sur portique:	112
Après l'analyse plastique, les valeurs des rotations plastiques maximales obtenues au niveau des quatre rotules sont données sur le tableau suivant :		112
5.1.1	Ordre d'apparition de rotules :	113
5.1.2	La courbe de capacité obtenue par le SAP :	113
5.1.3	Contrôle de la dissipation :	115
5.1.3.1	Les diagrammes des déplacements en fonction de la rotation des 4 rotules :	115
5.1.3.1.1	Contrôle par l'EC2 et l'EC8 :	115
5.1.3.2	Courbe de capacité contrôlée:.....	116
5.1.3.2.1	Par l'euro-code 8 :	116
5.1.3.2.2	Par l'euro-code 2 :	116
5.1.4	Conclusion :	116
5.2	Portique avec un degré d'hyperséductibilité élevé:	117
5.2.1	Formulation des rotules par rapport au step :	117
5.2.2	Résultat des rotations limites calculés :	118
5.2.3	La courbe de push-over avec et sans contrôle:	119
5.2.4	Résultats de rotation limites des rotules donnés par le SAP :	120
5.2.5	<i>Courbe de capacité contrôlée par l'EC8</i> :	122
5.2.6	Calcul de la ductilité :	124
5.2.6.1	Ductilité avec contrôle avec le SAP :	125

5.2.6.2	Ductilité avec contrôle avec l'EC8 :	125
5.3	Conclusions.....	125
	Conclusions générales et perspectives	126
	Bibliographie :	127

NOTATIONS UTILISÉES

b Largeur de la section transversale

h Profondeur de la section transversale

d Profondeur effective de la section transversale

d' Enrobage

l Longueur d'élément

L_p Longueur de la rotule plastique

L_v Portée de cisaillement

x Profondeur de l'axe neutre

l_{max} Longueur de la localisation des contraintes sur l'acier

A_s Sections des armatures de traction

A_{st} Sections des armatures transversales

A'_s Sections des armatures de compression

A_c Sections de béton

ρ Pourcentage des armatures de traction

ρ' Pourcentage des armatures de compression

ρ_{sw} Pourcentage des armatures de confinement

d_s, d_{pl} Diamètre d'armature longitudinale

d_{st} Diamètre d'armature transversale

S Espacement entre les cadres

α, β Coefficients

ε_c Déformation du béton en compression

ε₀ Déformation (en compression) du béton à la contrainte maximale f_c

ε_t Déformation du béton en traction

ε_t⁰ Déformation (en traction) du béton à la contrainte maximale f_t

ε_s Déformation du l'acier en traction

ϵ'_s Déformation du l'acier en compression

ϵ_{sy} Déformation de plastification de l'acier

ϵ_{su} Déformation ultime de l'acier

ϵ_{su}^m Déformation ultime moyenne de l'acier

w, δ, d Déplacement

δ_y, d_y Déplacement élastique

δ_u , du Déplacement ultime

ϕ Courbure

ϕ_y Courbure élastique

ϕ_u Courbure ultime

θ Rotation

θ_y Rotation élastique

θ_u Rotation ultime

θ_{pl} Capacité de rotation

k_μ Facteur

N Charge axiale

F, P Force (la charge)

F_y Force élastique

F_u Force ultime

M Moment

M_y Moment élastique

M_u Moment ultime

$P(t)$ Vecteur des forces sismiques (appliquées) (variant avec le temps)

$[u(t)]$ Vecteur de déplacement en fonction de temps

$[u'(t)]$ Vecteur de vitesse en fonction de temps

$[u''(t)]$ Vecteur d'accélération en fonction de temps

$[u''g(t)]$ Vecteur d'accélération de sol en fonction de temps

$[\phi_i]$ Vecteur des modes propres

E_c Module de Young du béton

σ_c Contrainte dans le béton comprimé

f_c Contrainte maximale dans le béton comprimé

σ_t Contrainte dans le béton tracté

f_t Contrainte maximale du béton en tracté

σ_s Contrainte dans l'acier

f_y Contrainte de plastification de l'acier longitudinale

Listes des figures

Figure 1: Rotation plastique θ_s d'une section droite de béton armé dans le cas d'une poutre ou d'une dalle continue portant dans une seule direction	23
Figure 2:Rotation plastique selon Model Code 78 et le modèle analytique STUTTGART pour différents types d'aciers (Eligehausen and Langer, 1987)	24
Figure 3:Capacité de rotation par rapport à la profondeur relative de l'axe neutre x/d pour diverses classes d'acier (CEB-FIP model code, 1990)	25
Figure 4:Valeur de base de la capacité rotation admissible des sections en béton armé pour des aciers de classe B et C (haute ductilité) (Euro-code 2-1992, 2004).....	25
Figure 5:Définition de la longueur de la rotule plastique	26
Figure 6:diagramme moment-courbure	28
Figure 7: Représentation géométrique de la courbure	29
Figure 8: Diagramme de déformation et de contraintes.....	29
Figure 9:Représentation des étapes de calcul requises pour obtenir un point de la courbe $M-\Phi$	30
Figure 10:Démarche de calcul pour construire la courbe $M-\Phi$	31
Figure 11:Démarche de calcul de l'endommagement en flexion	32
Figure 12: Résultat moment courbure analytique	34
Figure 13:résultat moment (MN.m) courbure numérique obtenu par le sap 2000 pour la section rectangulaire.....	37
Figure 14:Force et moment de flexion sur une section rectangulaire	38
Figure 15:Contour de rendement pour état limite élastique.....	38
Figure 16 : État élastique, élastique-plastique et entièrement plastique	39
Figure 17:Modèle de séparation des contributions de force et de moment	39
Figure 18: Modèle pour le traitement du moment	39
Figure 19:Contours d'élasticité des zones élastiques et plastiques	40
Figure 20:Force de compression et moment de flexion normaux sur une section rectangulaire	41
Figure 21:Coupe transversale rectangulaire.....	44
Figure 22:Signification physique de la courbe de capacité.....	46
Figure 23 Portique Auto-stable	47
Figure 24:Diagramme (courbe) de Capacité	47
Figure 25 Courbe de capacité analytique	52
Figure 26:Affectation du ferrailage calculé à l'élément	53
Figure 27:Courbe moment-courbure obtenue à partir du SAP2000	53
Figure 28:Les propriétés de la rotule plastique	54
Figure 29:Les caractéristiques de cas de charge de Push-over	54
Figure 30:Création des rotules	55
Figure 31:Affectation des rotules aux éléments poteau	55
Figure 32:Courbe de capacité numérique par le SAP	56
Figure 33 Comparaison des deux courbes	57
Figure 34:courbe de déformation plastique	59

Figure 35:résultat de la rotation plastique.....	61
Figure 36:bi-linéarisation de la courbe de déplacement	61
Figure 37: Étapes d'apparition des rotules dans le portique	65
Figure 38:Modèle en éléments finis en 3D de la structure	68
Figure 39:Affectation du ferrailage calculé à l'élément.....	76
Figure 40:Loi de comportement non linéaire du poteau du RDC.....	77
Figure 41:Déclaration des rotules plastique.....	80
Figure 42:Définition de l'élément non linéaire de type (Shell – Layered / Nonlinéaire).....	81
Figure 43:Affectation de la non-linéarité et attribution du ferrailage.....	82
Figure 44:Définition des couches	82
Figure 45:La boîte de dialogue de lancement l'analyse.....	86
Figure 46:Courbes de capacité push-over dans le sens X_X	87
Figure 47:Courbes de capacité push-over dans le sens Y_Y	87
Figure 48:Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan X-Z	88
Figure 49:Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan Y-Z	89
Figure 50:Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan X-Z	90
Figure 51:Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan Y-Z	91
Figure 52:Projection du X_u/d sur le diagramme de Valeur de base de la capacité rotation admissible	108
Figure 53 Ordre d'apparition des rotules	113
Figure 54 Courbe de Capacité du portique	114
Figure 55 Valeurs de rotations plastiques des quatre rotules et comparaison avec les valeurs limites des ECs.....	115
Figure 56 Courbe de capacité avec contrôle avec l'EC8	116
Figure 57 Courbe de capacité avec contrôle avec l'EC2	116
Figure 58 Portique multi-étages	117
Figure 59 Rotules plastiques.....	117
Figure 60:courbe de FEMA	118
Figure 61 Courbe de capacité.....	119
Figure 62: Comparaison entre la courbe de capacité son et avec contrôle	120
Figure 63 Courbe de capacité sans contrôle.....	123
Figure 64 Comparaison Courbe de capacité sans et avec contrôle	124
Figure 65 Courbes de capacité : Contrôle avec le SAP et contrôle avec l'EC8.	124

Liste des tableaux

Tableau 1:les résultats des moments courbure analytique et numérique	37
Tableau 2:Les résultats d'analyse push-over	63
Tableau 3:représente les résultats des rotations limite	65
Tableau 4:charge permanente pour plancher terrasse inaccessible.....	69
Tableau 5:charge permanente pour plancher étage courant.....	69
Tableau 6:charge permanente pour mure extérieure	70
Tableau 7:charge permanente pour mur de séparation	71
Tableau 8:ferraillages des éléments structuraux	71
Tableau 9:dimensionnement des éléments structuraux.....	74
Tableau 10:Développement des Rotules Plastiques selon push X-X	89
Tableau 11:Développement des Rotules Plastiques selon push Y-Y	91
Tableau 12: Valeurs de rotations plastiques tirées du logiciel (SAP2000).....	91
Tableau 13:résultat des moment-courbure	101
Tableau 14:caractéristique de la poutre principale (moment-courbure, longueur de la travée)	102
Tableau 15:Résultat de calcule pour poutre principal.....	103
Tableau 16:caractéristique de la poutre secondaire (moment-courbure, longueur de la travée)	103
Tableau 17:Résultat de calcule pour poutre secondaire.....	104
Tableau 18:caractéristique de la poutre palier (moment-courbure, longueur de la travée)	104
Tableau 19:Résultat de calcule pour poutre palier.....	105
Tableau 20:caractéristique du poteau 1(moment-courbure, longueur de la travée).....	105
Tableau 21:Résultat de calcule pour poteau type1.....	106
Tableau 22:caractéristique du poteau type2 (moment-courbure, longueur de la travée).....	106
Tableau 23:Résultat de calcule pour poteau type2.....	106
Tableau 24:les valeurs de rotation des rotules plastiques de toute la structure avec l' EC8.....	107
Tableau 25:les valeurs de capacité de rotation des rotules plastiques de toute la structure avec le EC2.....	108
Tableau 26:comparaison des valeurs des rotations plastiques des rotules entre EC2, EC8, et calcule sap	109
Tableau 27: Comparaison des valeurs des rotations plastique des rotules entre EC2, EC8, et calcule Sap.....	113
Tableau 28:courbe de capacité (push-over)du portique	114
Tableau 29:push-over par rapport à la ruine de la première rotule	119
Tableau 30 Informations sur les rotules plastiques	120
Tableau 31 Rotules plastiques ayant dépassé les valeurs limites.....	121
Tableau 32 Rotules plastiques qui peuvent dissiper davantage	122
Tableau 33: Résultats du push-over par rapport à la limite de l'EC8	123

Résumé

L'analyse plastique à l'échelle globale est basée sur l'utilisation des lois reliant des variables généralisées. Pour les éléments fléchis, la dissipation est canalisée au niveau des rotules plastiques. Ces rotules obéissent à des écoulements plastiques régis par des lois moments-courbure (ou moment-rotation). Expérimentalement, il a été démontré qu'une rotule plastique possède une capacité de rotations limitée. Ainsi, l'effondrement d'une rotule affecte de manière significative le comportement global. L'objectif de ce travail est de faire une analyse plastique à l'échelle globale tout en contrôlant la dissipation plastique au niveau des rotules. Les valeurs limites données par l'EC8 et l'EC2 sont utilisées. Les résultats montrent que le calcul plastique sans contrôle de dissipation peut s'avérer dangereux pour les structures en béton armées.

ملخص

يعتمد تحليل البلاستيك على المستوى المعمم على استخدام القوانين المتعلقة بالمتغيرات المعممة. بالنسبة للعناصر المثنية، يتم توجيه التبدد على مستوى المفصلات البلاستيكية. تخضع الوصلات الكروية للتدفقات البلاستيكية التي تحكمها قوانين الانحناء اللحظي (أو الدوران اللحظي). من الناحية التجريبية، تم إثبات أن المفصل الكروي البلاستيكي لديه قدرة دوران محدودة. وبالتالي، فإن انهيار الوصلات يؤثر بشكل كبير على السلوك العام. الهدف من هذا العمل هو إجراء تحليل بلاستيكي على نطاق معمم مع التحكم في تبدد البلاستيك في الوصلات الكروية. يتم استخدام القيم الحدية التي يمنحها EC2 و EC8. أظهرت النتائج أن التصميم البلاستيكي بدون التحكم في التبدد يمكن أن يكون خطيرًا على الهياكل الخرسانية المسلحة.

Abstract

The plastic analysis at the global scale is based on the use of behaviors laws relating generalized variables. For the structural elements under bending, the dissipation is activated in plastic hinges. The plastic flow of these zones is governed by moment-curvature laws (or moment-rotation). Experimentally, it has been shown that a plastic hinge has a limited rotational capacity. Thus, the collapse of these plastic zones significantly affects the overall behavior. The objective of this work is to propose a plastic analysis on a global scale while controlling plastic dissipation at the plastic hinges. The limit values of rotational capacities given by EC8 and EC2 are used. The results show that plastic design without dissipation control can be dangerous for reinforced concrete structures.

chapitre 1 Introduction à l'Analyse plastique

Le dimensionnement à la rupture s'intéresse à la façon d'utiliser la capacité de résistance et la ductilité des matériaux traités jusqu'à leurs maximums en vue de prévoir le comportement au point de la rupture (la ruine). Les avancées scientifiques dans la prévision du comportement des structures et le besoin de réduire les couts rendent cette problématique de plus en plus importante dans le processus de conception. En plus des situations de dimensionnement, l'ingénieur est appelé, dans certains cas, à vérifier la stabilité des structures existantes. A cet effet, un calcul à la rupture est obligatoire pour connaître les limites d'une structure en service. Le calcul plastique des structures exploite les réserves de résistance du matériau (Acier ou béton armé) à différents niveaux :

- Le matériau : côté ductilité.
- La section : facteur de forme
- L'élément de structure : hyperstatiques, capacité de rotation, instabilité.

1.1 Introduction générale :

Le souci majeur des concepteurs de génie civil a toujours été de livrer des constructions fiables et sécuritaires. Pendant de longues années durant le siècle dernier, le calcul était basé sur les principes de l'élasticité et les codes traitant la charpente métallique ou le béton armé utilisaient le principe des contraintes admissibles. Puis, le calcul plastique a connu une évolution, et les principaux objectifs étaient de déterminer la charge réelle de ruine d'une partie de la structure ou d'une structure et les mécanismes de ruine.

La différence entre cette approche et celle utilisant les E.L.U et qu'elle montre particulièrement la marge de sécurité pour tous types de structures. La charge étant plus grande que la charge ou la combinaison de charges à l'E.L.U. Ces dernières étant obtenues par consensus pour chaque pays concerné.

l'analyse plastique des structures arrive à déterminer avec exactitude les charges de ruine et les mécanismes de ruine pour des éléments de structures ou structures simples allant de la poutre simplement appuyée au portique à un niveau et une travée en passant par la poutre continue, Dès que le nombre de niveaux ou de travées dépasse l'unité, la détermination du bon mécanisme de ruine devient extrêmement laborieuse pour les raisons suivantes :

- Augmentation du degré d'hyperstatique.
- Augmentation du nombre de sections critiques (sections potentielles pour la formation de rotules plastiques).
- Augmentation du nombre de mécanismes de ruine élémentaires ou mécanismes partiels de ruine.
- Augmentation du nombre de combinaisons de ces différents mécanismes élémentaires.
- Lourdeur des calculs avec l'augmentation des risques d'erreurs sans garantie d'obtention des vrais mécanismes de ruine

1.2 Introduction d'analyse plastique :

Le calcul plastique est un calcul basé sur la charge maximale que la structure supportera. Cette charge maximale est déterminée à partir d'une analyse de la résistance du matériau dans la plage "plastique" ce qui explique l'origine du terme. Le calcul plastique peut se faire à différentes échelles :

1.2.1 Analyse globale :

L'analyse globale permet de déterminer le comportement global de la structure et de caractériser l'influence des actions extérieures (charges permanentes, climatiques, d'exploitation, etc.) dans les différents éléments, sections et assemblages de l'ossature. Elle est le plus souvent menée sur la totalité de la structure. Les lois de comportement globales sont généralement des lois simplifiées bilinéaires ou tri linéaires comme la loi de Takeda pour le béton armé.

Une fois l'analyse globale effectuée, la résistance des sections et des assemblages, ainsi que la stabilité des différents éléments constitutifs de la structure peuvent être vérifiées et effectuées au moyen des méthodes élastique ou plastique.

À l'échelle globale, les lois de comportement utilisées sont des lois exprimées en fonction des variables généralisées. Ces lois globales sont des relations entre une variable généralisée (courbure, rotation, déplacement) et sa variable associée (moment, force). L'analyse sismique non linéaire à l'échelle globale peut se faire par l'introduction des lois moment-courbure aux endroits des rotules plastiques.

1.2.2 Analyse semi-globale :

Ce type de modèle dit modèle à fibre ou modèle multicouche est basé sur une description géométrique à deux (ou trois) dimensions d'une section de poutre supposée se comporter sur le plan cinématique suivant les différentes théories de poutre.

Elle constitue un niveau de discrétisation intermédiaire entre l'approche globale et l'approche locale. Elle permet de simplifier la modélisation d'une structure par rapport à une approche locale tout en apportant un degré d'analyse supérieur à une approche globale. Chaque élément de la structure est décomposé en plusieurs éléments poutres possédant un nœud à chaque extrémité. Les déplacements à chaque nœud peuvent être utilisés pour déterminer les déformations généralisées au niveau de la poutre. La théorie des poutres suivant l'hypothèse de Bernoulli ou de Timoshenko permettent d'accéder aux déformations locales au niveau de chaque fibre. Ces déformations sont alors utilisées pour calculer les contraintes, dont l'intégration sur la section conduit aux efforts généralisés. A cette échelle, on distingue deux possibilité de discrétisation, à savoir : une modélisation en poutres multifibres et une autre en coques multicouches.

1.2.3 Analyse locale :

Une analyse plus approfondie peut être basée sur une approche dite « locale ». Cette approche présente l'avantage de permettre une représentation détaillée de la structure au plus proche de la réalité et ne nécessite pas de faire appel aux hypothèses simplificatrices de la théorie des poutres ou des plaques et coques. Chaque matériau peut être décrit par une loi de comportement qui relie les contraintes aux déformations. Contrairement à l'approche globale, l'approche locale permet d'obtenir des informations locales sur l'état de fissuration, d'endommagement et de plastification du matériau. Cependant, ce type de discrétisation nécessite des espaces de stockage importants et des couts élevés en termes de temps de calcul.

1.3 Objectifs de l'analyse plastique :

L'objectif primordial de l'étude plastique des structures est la détermination de vraies charges de ruine et des vrais mécanismes de ruine.

L'analyse plastique n'est pas toujours utilisable. Elle est conditionnée par certaines règles restrictives. La formation des rotules plastiques dans les zones critiques est conditionnée d'une part, par un ferrailage adapté, pour permettre la rotation plastique des sections, et d'autre part, pour pallier à toute éventualité de rupture fragile.

D'un point de vue mécanique, la rotation plastique des sections de béton armé est provoquée par le seul mécanisme local ductile en béton armé : la flexion plastique. Autrement dit, par raccourcissement des fibres de béton comprimées et allongements des armatures longitudinales tendues, lesquelles doivent plastifier.

1.4 Objectifs Du Mémoire :

L'objectif de cette étude est de contrôler la ruine des structures par dissipation plastique. En effet, la réglementation fixe des valeurs limites à la rotation plastique. Cependant le calcul non linéaire ne tient jamais compte de cette limitation. On suppose que l'écoulement plastique se fait à l'infini. Le document est structuré comme suit :

Après ce premier chapitre qui est une introduction à l'analyse plastique. Le chapitre 2 est dédié à l'analyse plastique à l'échelle globale. Le chapitre 3 concerne le calcul plastique sur des éléments de structure. Le chapitre 4 est dédié à une analyse plastique d'une structure. Le chapitre 5 traite le contrôle de la dissipation (contrôle de rotations plastiques limites).

chapitre 2 Analyse plastique à l'échelle globale

2.1 Notion de rotules plastiques :

2.1.1 Introduction :

La rotule plastique sert à décrire la déformation d'un élément de structure soumise à une sollicitation dans le domaine plastique. C'est une zone d'un élément de structure (poteaux, poutres, voile) subissant des déformations irréversibles, capable de dissiper de l'énergie sous sollicitations mécaniques. Au-delà d'un seuil de sollicitation, elle se comporte comme une articulation autorisant la rotation des autres parties de l'élément.

2.1.2 Capacité de rotation :

2.1.2.1 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC2 (A. Nouali 2017)

Une des premières grandes contributions à l'étude de la capacité de rotation est celle réalisée dans le cadre des programmes expérimentaux coordonnés par la CEB au début des années soixante (Comité Euro-International du Béton, 1961). Ce travail, développé sur la base d'essais expérimentaux, a conduit à la proposition d'une relation hyperbolique entre la rotation plastique et la profondeur relative de l'axe neutre x/d :

$$\theta_{pl} = \frac{0,004}{x_u/d}$$

La méthode simplifiée utilisée pour les poutres et les dalles continues portant dans une seule direction est basée sur la capacité de rotation de portions de poutres ou de dalles d'une longueur égale à environ 1,2 fois la hauteur de la section. On admet que ces zones subissent une déformation plastique (formation de rotules plastiques) sous la combinaison d'actions considérée. La vérification de la rotation plastique à l'état-limite ultime est considérée comme satisfaite si l'on montre que, sous l'action considérée, la rotation calculée, θ_s , est inférieure ou égale à la rotation plastique admissible (Figure 1).

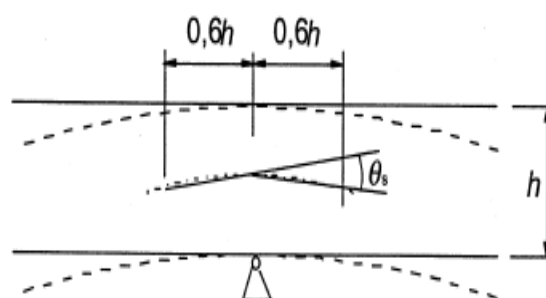


Figure 1: Rotation plastique θ_s d'une section droite de béton armé dans le cas d'une poutre ou d'une dalle continue portant dans une seule direction

La rotation plastique est calculée à partir de la relation moment-courbure. Dans ce modèle (modèle de STUTTGART), la rupture peut être causée soit par la rupture des aciers tendus ou par l'écrasement du béton comprimé. Deux aspects sont mis en évidence : la branche ascendante pour des valeurs faibles de x/d en raison de la rupture de l'acier et l'introduction de deux classes d'acier avec une ductilité différente.

Dans les zones de rotule plastique, il convient de limiter X_u/d à 0,30 pour des bétons de classe de résistance inférieure ou égale à C50/60, et à 0,23 pour des bétons de classe de résistance supérieure ou égale à C55/67 (Figure 2).

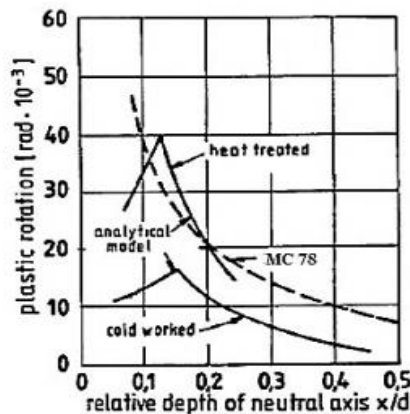


Figure 2:Rotation plastique selon Model Code 78 et le modèle analytique STUTTGART pour différents types d'aciers (Eligehausen and Langer, 1987)

L'équation $\theta_{pl} = \frac{0,004}{x_u/d}$ qui a été proposée dans le Model Code 78 s'est révélée insuffisante. Cette équation a été remplacée dans le Model Code 90 (CEB-FIP model code, 1990) par un graphique destiné pour la conception. Dans ce graphique, la rotation plastique admissible est reliée à la position de l'axe neutre relatif x/d pour diverses classes d'acier

L'Euro-code 2 (Euro-code 2, 2004) fournit un diagramme de conception similaire de Model Code 90 pour évaluer la capacité de rotation des poutres en béton armé, Les valeurs sont données en fonction de la classe d'acier ; les lignes pointillées se réfèrent à l'acier à haute ductilité (classe C), et les lignes pleines se réfèrent à l'acier à ductilité normale (classe B) (Figure 4)

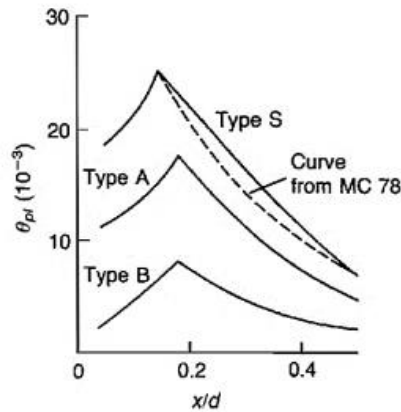


Figure 3: Capacité de rotation par rapport à la profondeur relative de l'axe neutre x/d pour diverses classes d'acier (CEB-FIP model code, 1990)

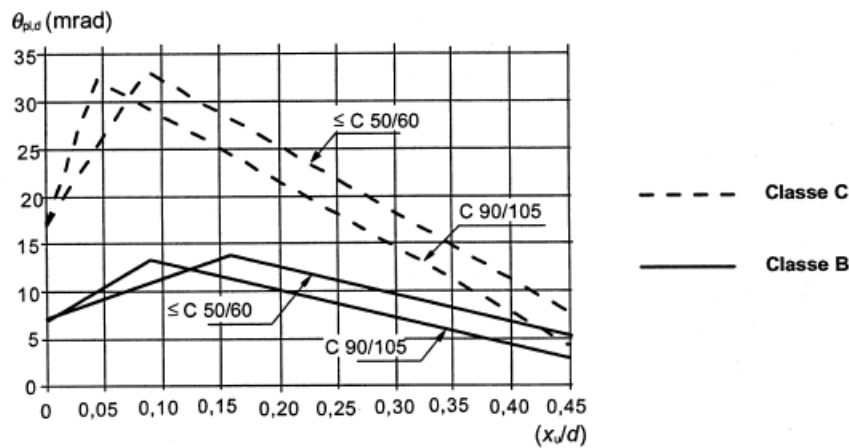


Figure 4: Valeur de base de la capacité rotation admissible des sections en béton armé pour des aciers de classe B et C (haute ductilité) (Euro-code 2-1992, 2004)

2.1.2.2 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC3 :

L'approche de l'Euro-code 3 ne propose pas de formule permettant de calculer la capacité de rotation des assemblages boulonnés. Cependant, le règlement stipule que dans un assemblage par platine d'extrémité boulonnée, la capacité de rotation est suffisante pour une analyse plastique si le moment résistant de l'assemblage est piloté par la résistance de la semelle du poteau en flexion dont l'épaisseur t doit satisfaire la condition suivante :

$$t \leq 0,36d \sqrt{\frac{f_{ub}}{f_y}}$$

d' : est le diamètre nominal du boulon

f_{ub} : est la résistance ultime du boulon en traction

f_y : est la limite d'élasticité

Si la résistance de calcul de l'assemblage est au moins égale 1,2 fois la résistance plastique de calcul de la poutre assemblée, il n'est pas nécessaire de vérifier sa capacité de rotation. Dans le cas d'un assemblage à résistance partielle, la capacité de rotation ne doit pas être inférieure à celle nécessaire pour permettre le développement de toutes les rotules plastiques.

2.1.2.3 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC8 :

2.1.2.3.1 Estimation de la longueur de la rotule plastique :

Pour le calcul de la capacité de rotation des rotules plastique avec l'EC 8 il faut d'abord calculer la longueur de la rotule plastique comme suit (Figure 5). Dans la littérature, il existe plusieurs possibilités permettant de définir la longueur de la rotule plastique. Priestley et Paulay proposent l'équation suivante :

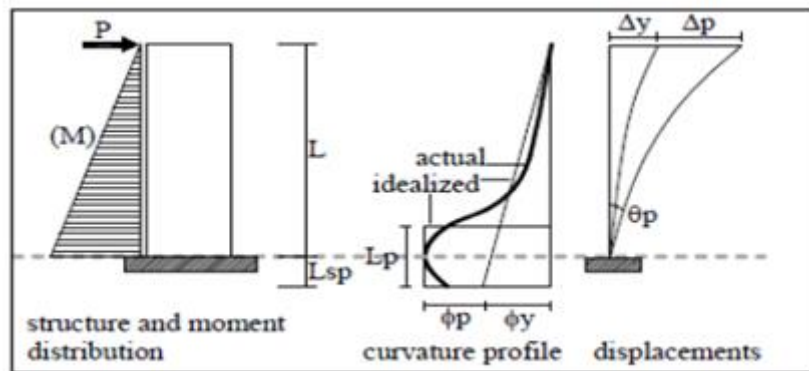


Figure 5: Définition de la longueur de la rotule plastique

$$L_p = a_{st}(0.08L_v + 0.022 f_y d_{bl})$$

Avec:

L_v : portée de cisaillement

a_{st} : Coefficient de nuance d'acier ;

$$a_{st} = \begin{cases} 0,8 & \text{pour les aciers d'armatures avec } \left(\frac{f_t}{f_s}\right) < 1,15 \\ 1 & \text{pour les aciers d'armatures avec } \left(\frac{f_t}{f_s}\right) > 1,15 \end{cases}$$

f_s : limite d'écoulement de l'armature longitudinale en [Mpa] ;

f_y : limite élastique des aciers longitudinaux

f_t : résistance à la traction de l'armature longitudinale en [Mpa] ;

d_{bl} : diamètre de l'armature longitudinale, en [mm].

2.1.2.3.2 Loi de calcul :

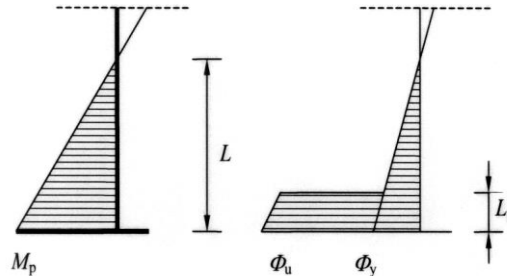
En l'absence de résultats appropriés d'essais en laboratoire, la capacité de rotation plastique $\theta_{p,u}$ et la rotation globale peuvent être évaluées sur la base de la courbure ultime ϕ_u et de la longueur des rotules plastiques L_p de la manière suivante :

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - \frac{0,5L_p}{Lv}\right)$$

Où :

L : est la distance entre la section d'extrémité de la rotule plastique et le point de moment nul (dans une pile par exemple)



Pour une variation linéaire du moment fléchissant, la rotation à la limite d'élasticité θ_y peut être supposée égale à :

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5L_p}{Lv}\right)\right)$$

Il convient de déterminer ϕ_y et ϕ_u au moyen d'une analyse moment-courbure de la section soumise à l'effort normal correspondant à la combinaison sismique de calcul

Lorsque $\varepsilon_c \geq \varepsilon_{cu1}$ il convient de tenir compte uniquement de la section du noyau en béton confiné.

Il convient d'évaluer ϕ_y par idéalisation du diagramme réel M- ϕ par un diagramme bilinéaire de même surface égale au-delà de la première plastification des armatures, telle qu'illustré dans la figure 6.

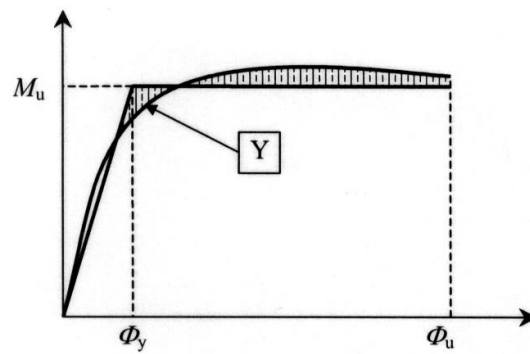


Figure 6:diagramme moment-courbure

2.2 Loi moment courbure :

2.2.1 Approche Analytique :

2.2.1.1 Introduction :

Lors de la flexion élasto-plastique, on peut établir à tout instant une relation entre le moment appliqué et la courbure produite : c'est la loi moment-courbure (M, ψ). Elle se traduit par un diagramme adimensionnel montrant comment varie le rapport M/M_e en fonction de ψ/ψ_e . Cette loi dépend de la forme de la section droite et on l'établit ci-après pour une section rectangulaire a titre d'illustration.

2.2.1.2 Définition de la courbure :

Pour deux sections droites, infiniment voisines distantes de dx et soumises à l'action d'un moment fléchissant M_z la loi de HOOKE et l'hypothèse des petites déformations conduisent à partir de la déformation de la fibre d'ordonnée y à:

$$\varepsilon_x = \frac{dl(y)}{dx} = \frac{\sigma(y)}{E} = \frac{M_z y}{El_z}$$

La rotation relative (dw) entre les deux sections est:

$$dw = d\theta_z = \frac{dl}{y} = \frac{M_z}{El_z} dx = \frac{dx}{r}$$

d'où la valeur de la courbure de la ligne neutre:

$$\chi = \frac{1}{r} = \frac{d\theta_z}{dx} = \frac{\varepsilon_x(y)}{y} = \frac{M_z}{El_z}$$

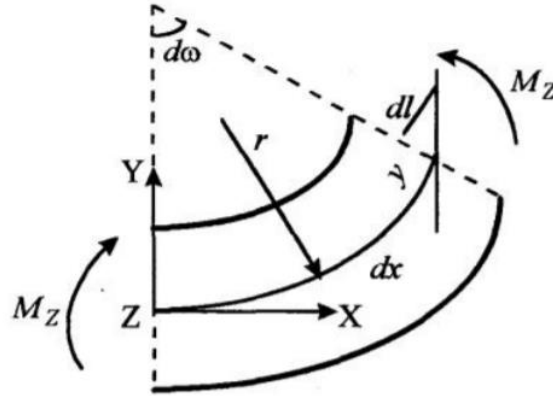


Figure 7: Représentation géométrique de la courbure

2.2.1.3 Détermination expérimentale de la courbure :

Dans un essai de poutre, on peut mesurer la déformation d'une fibre par exemple en collant une jauge ou en utilisant un déformé à bille. La figure 8 montre les notations utilisées et les variations de déformation et de contrainte dues à un chargement en flexion simple M pour une section en béton armé. En supposant que la section droite est plane après déformation et que les déformations de l'acier et du béton sont égales à une même hauteur (adhérence parfaite), on peut écrire les relations suivantes :

$$\frac{l}{r} = \frac{\epsilon_c}{x} = \frac{\epsilon_s + \epsilon'_s}{d - d'} \quad \text{ou} \quad \frac{l}{r} = \frac{\epsilon_c}{x} = \frac{\epsilon_c + \epsilon_s}{d}$$

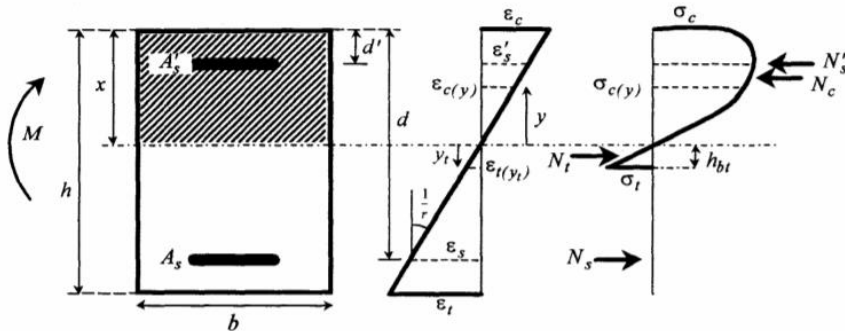


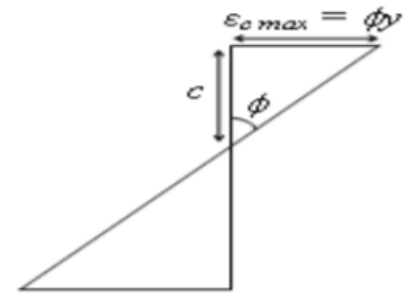
Figure 8: Diagramme de déformation et de contraintes

2.2.1.4 Courbure d'une section rectangulaire soumise à une flexion croissante :

L'issue théorique pour l'investigation de la ductilité de courbure, est la «courbure de flexion». Sous l'application d'un moment, ou d'un moment plus un effort axial l'élément a tendance à fléchir. En d'autres termes, l'élément prend la forme d'une ligne fléchie, qui fait partie d'un grand cercle.

2.2.1.4.1 Approche de modélisation « couche par couche » :

Le comportement à l'ELU de poutres simplement appuyées et chargées symétriquement est normalement contrôlé par la zone où le moment fléchissant est maximal, soit la section du centre. Le diagramme des déformations axiales étant considéré linéaire, seuls deux paramètres sont nécessaires pour le définir à chacune des couches (pour une position par rapport au centre de gravité y), soit la courbure Φ et la profondeur de l'axe neutre (c), qui est la distance des fibres extrêmes en compression et le point de déformation nulle.



y est la distance par rapport au centre de gravité de la section. La structure du modèle fixe les paramètres (c et Φ) et calcule la déformation axiale moyenne sur chacune des couches ainsi que la contrainte et l'effort qui y sont associés. L'intégration numérique sur la section permet ensuite de calculer l'effort axial (N) et le moment (M) agissant sur la section. À cette étape, si l'effort axial calculé ne correspond pas à celui visé (effort axial nul si aucun effort axial externe), la profondeur de l'axe neutre est modifiée et le calcul est repris. Bref, la courbure et la profondeur de l'axe neutre sont modifiées de façon à équilibrer les efforts sur la section (effort normal, N , et moment de flexion, M) et à construire la courbe moment-courbure (M - Φ). La Figure 9 illustre le cheminement d'une itération pour une discrétisation qui se fait en plusieurs couches orientées parallèlement à l'axe neutre de la section, tandis que la Figure 10 décrit l'approche utilisée.

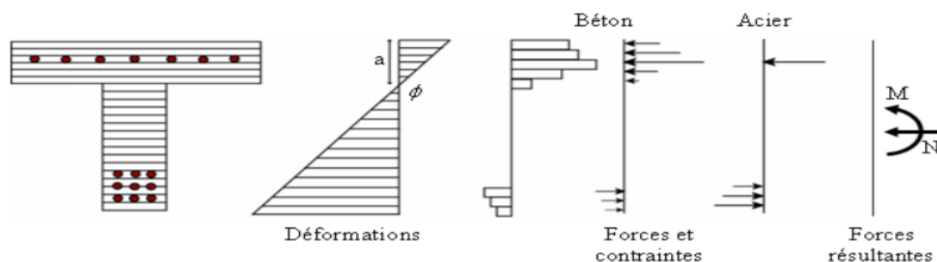


Figure 9: Représentation des étapes de calcul requises pour obtenir un point de la courbe M - Φ

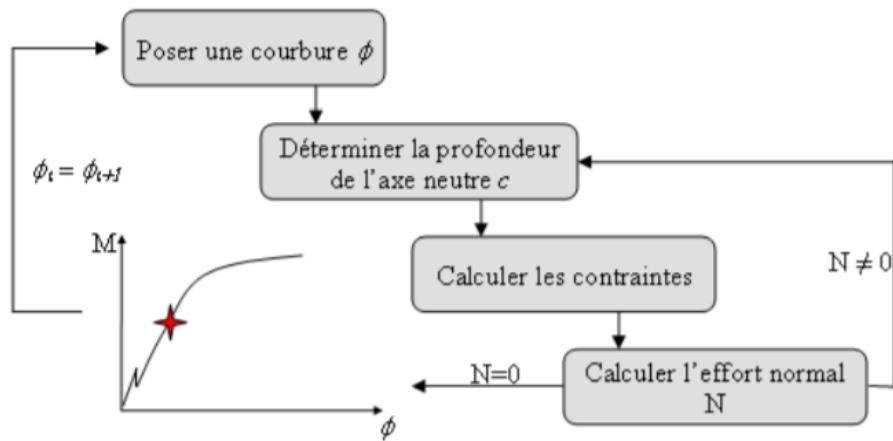


Figure 10:Démarche de calcul pour construire la courbe M- Φ
(analyse d'une section de poutre en béton armé fléchie)

Ce double processus itératif, sur l'axe neutre et la courbure, est complété pour construire la courbe M- Φ (moment-courbure) de la section fissurée. Il permet également de suivre l'évolution des divers paramètres avec l'augmentation du moment fléchissant, entre autres les déformations et contraintes dans les fibres extrêmes du béton et dans les barres d'armature

2.2.1.4.2 Prise en compte de l'endommagement :

La courbe M- Φ est modifiée pour tenir compte de l'endommagement engendré par les chargements cycliques ou les surcharges. La distinction entre ces deux types d'endommagement repose sur l'intensité des charges appliquées. Des chargements inférieurs au moment résistant ultime sont considérés cycliques, tandis que l'application d'un moment ou d'une courbure affectant le moment ultime est considérée comme une surcharge. Les deux cas de chargements sont imposés de manière similaire. Les déformations permanentes enregistrées à chaque cycle de chargement sont incluses dans l'itération suivante, affaiblissant ainsi graduellement la section étudiée. Il est rappelé qu'un chargement inférieur à la limite élastique du béton ($0.4f_c$) n'impose pas de déformations permanentes et est par conséquent négligeable. Il est également possible de simuler directement un certain niveau d'endommagement par l'imposition d'un profil de déformations permanentes au repos.

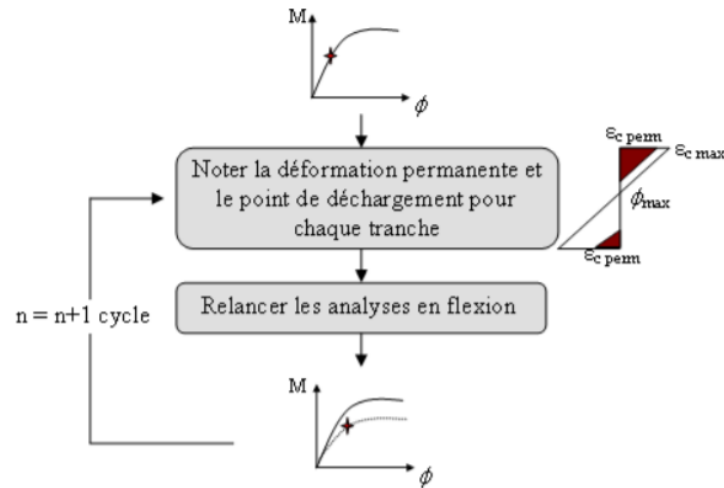
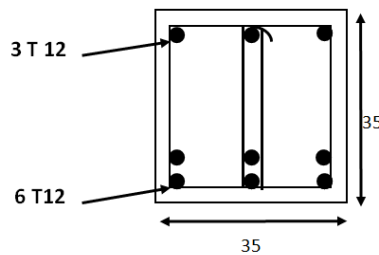


Figure 11: Démarche de calcul de l'endommagement en flexion

L'approche de discrétisation horizontale de la section associée à des lois de comportement pour les matériaux qui prennent en compte l'endommagement permet de représenter le plus justement possible les effets des surcharges et chargements cycliques, puisque seules les couches ayant réellement atteint un niveau d'endommagement significatif verront leur réponse modifiée lors de la réévaluation de la courbe moment-courbure

2.2.1.5 Exemple de détermination de loi Moment Courbure :

2.2.1.5.1 Approche Analytique



$$h=b= 0,35 \text{ m} , \quad L= 3,06 \text{ m} , \quad e= 0,025 \text{ m} , \quad f_{c28} = 28 \text{ MPa} , \quad f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$E_c = 1,05 E_{cm}$$

$$E_{cm} = 30500 \text{ MPa} , \quad E_c = 32025 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} , \quad f_y = 360 \text{ MPa} , \quad A'_s \text{ et } A_s: \text{ section de ferrailage longitudinal}$$

2.2.1.5.1.1 Moment-Courbure élastique

$$A_g = bh + (n - 1)(A'_s + A_s)$$

$$A'_s = 3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_s = 6,79 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = 0,35 * 0,4 + (15 - 1)(6,79 \times 10^{-4} + 3,39 \times 10^{-4}) = 0,1542 \text{ m}^2$$

$$y_g = \frac{bh \frac{h}{2} + A_s(n-1)d + A_s'(n-1)d'}{A_g}$$

$$y_g = \frac{0,35 * 0,4 \frac{0,4}{2} + 6,79 \times 10^{-4} (15 - 1)0,375 + 3,39 \times 10^{-4} (15 - 1)0,025}{0,1542} = 0,20 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh\left(\frac{h}{2} - y_g\right)^2 + (n-1)A_s(d - y_g)^2 + (n-1)A_s'(y_g - d')^2$$

$$I_g = \frac{0,35 * 0,4^3}{12} + 0,35 * 0,4 \left(\frac{0,4}{2} - 0,2\right)^2 + (15 - 1)6,79 \times 10^{-4} (0,375 - 0,2)^2 + (15 - 1)3,39 \times 10^{-4} (0,2 - 0,025)^2 = 2,303 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$M_e = \frac{f_t I_g}{d_g} = \frac{3 \times 2,303 \times 10^{-3}}{0,2} = 0,0345 \text{ MN.m}$$

$$\phi_e = \frac{M_e}{E_c I_g} = \frac{0,0345}{32025 \times 2,303 \times 10^{-3}} = 4,677 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

2.2.1.5.1.2 Moment-Courbure plastique

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{6,79 \times 10^{-4}}{0,35 * 0,375} = 5,17 \times 10^{-3}$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{3,39 \times 10^{-4}}{0,35 * 0,375} = 2,58 \times 10^{-3}$$

$$k = \sqrt{2n\left(\rho + \frac{\rho'd'}{d}\right) + n^2(\rho + \rho')^2 - n(\rho + \rho')}$$

$$k = \sqrt{30\left(5,17 \times 10^{-3} + \frac{2,58 \times 10^{-3} \times 0,025}{0,375}\right) + 15^2(5,17 \times 10^{-3} + 2,58 \times 10^{-3})^2 - 15(5,17 \times 10^{-3} + 2,58 \times 10^{-3})} = 0,3$$

$$f_s' = \frac{kd - d'}{d - kd} f_s = \frac{0,30 \times 0,375 - 0,025}{0,375 - 0,30 \times 0,375} \times 360 = 120 \text{ MPa}$$

$$M_y = A_s f_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) + A_s' f_s' \left(d' - \frac{kd}{3}\right)$$

$$M_y = 6,79 \times 10^{-4} \times 360 \left(0,375 - \frac{0,30 \times 0,375}{3} \right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 120 \left(0,025 - \frac{0,30 \times 0,375}{3} \right)$$

$$M_y = 0,08199 \text{ MN.m}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{0,01}{0,375 - 0,30 \times 0,375} = 0,03809$$

2.2.1.5.1.3 Moment-Courbure ultime

$$c = \frac{A_s f_y - A_s' f_s'}{\eta f_c b \lambda} = \frac{6,79 \times 10^{-4} \times 360 - 3,39 \times 10^{-4} \times 120}{1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8} = 0,0162$$

$$M_u = \eta f_c c b \lambda \left(d - \frac{\lambda c}{2} \right) + A_s' f_s' (d - d')$$

$$M_u = 1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8 \times 0,0162 \left(0,375 - \frac{0,8 \times 0,0162}{2} \right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 120 (0,375 - 0,025)$$

$$M_U = 0,08912 \text{ MN.m}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cmax}}{c} = \frac{0,035}{0,0162} = 0,216$$

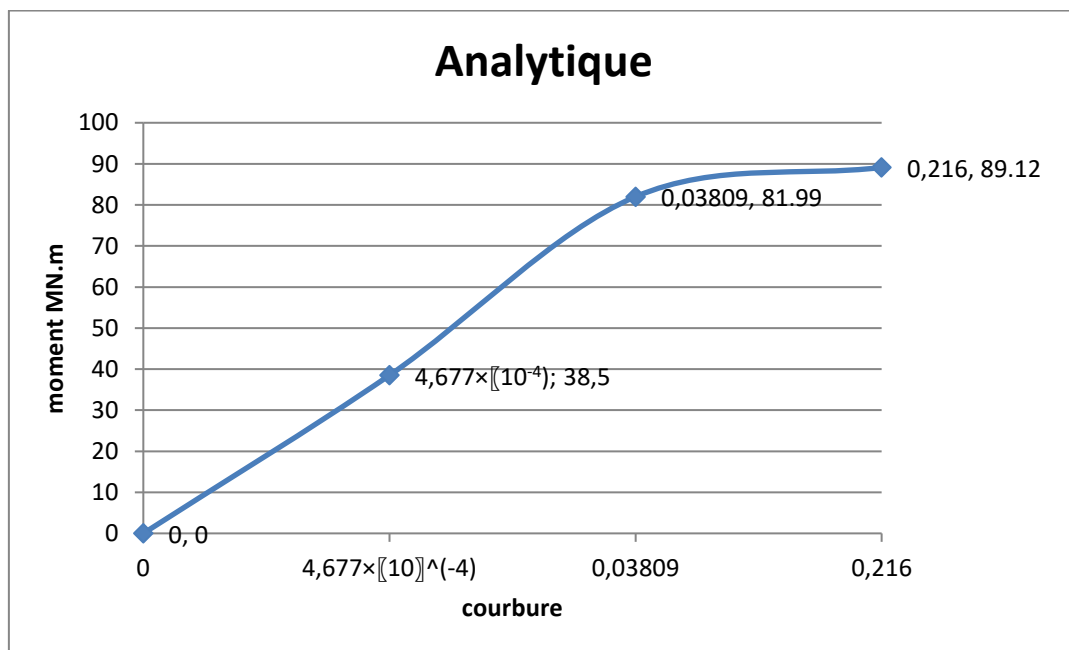
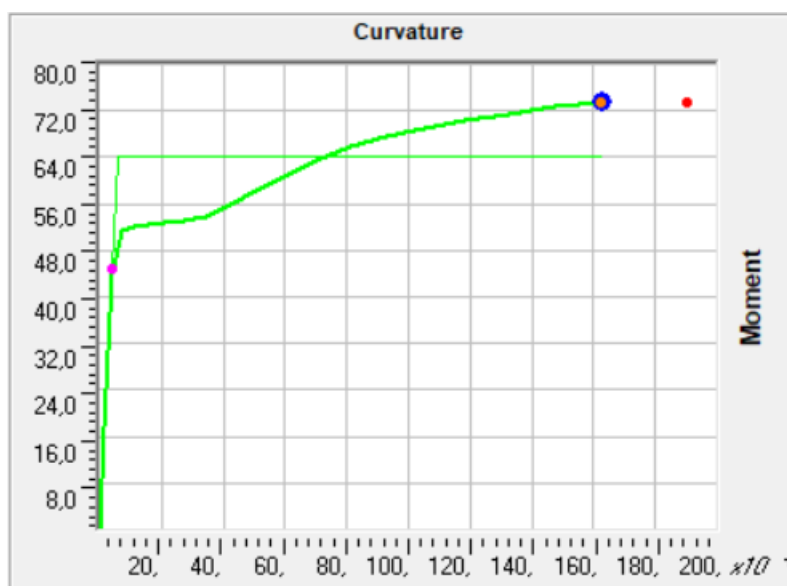
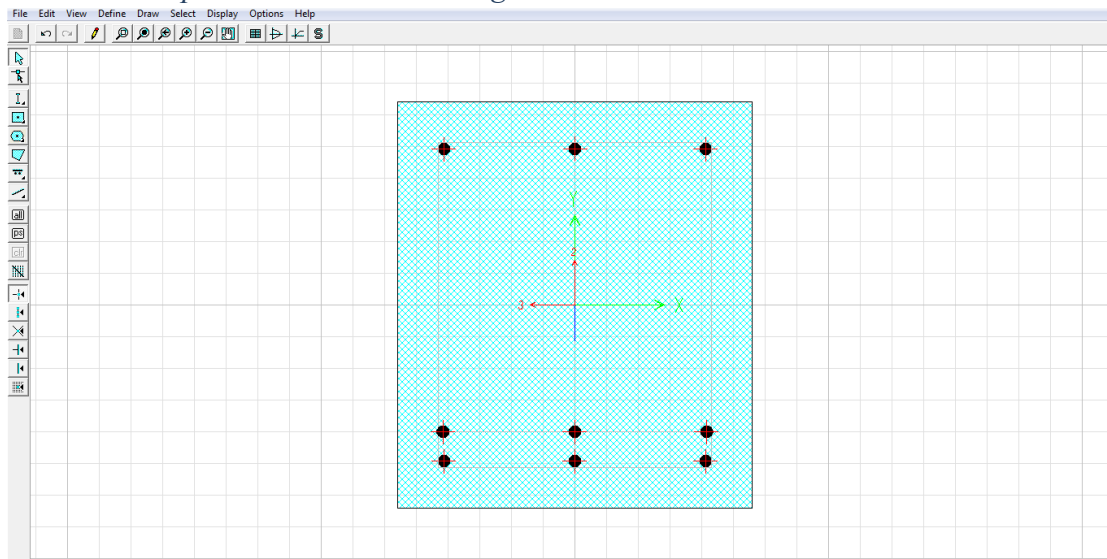


Figure 12: Résultat moment courbure analytique

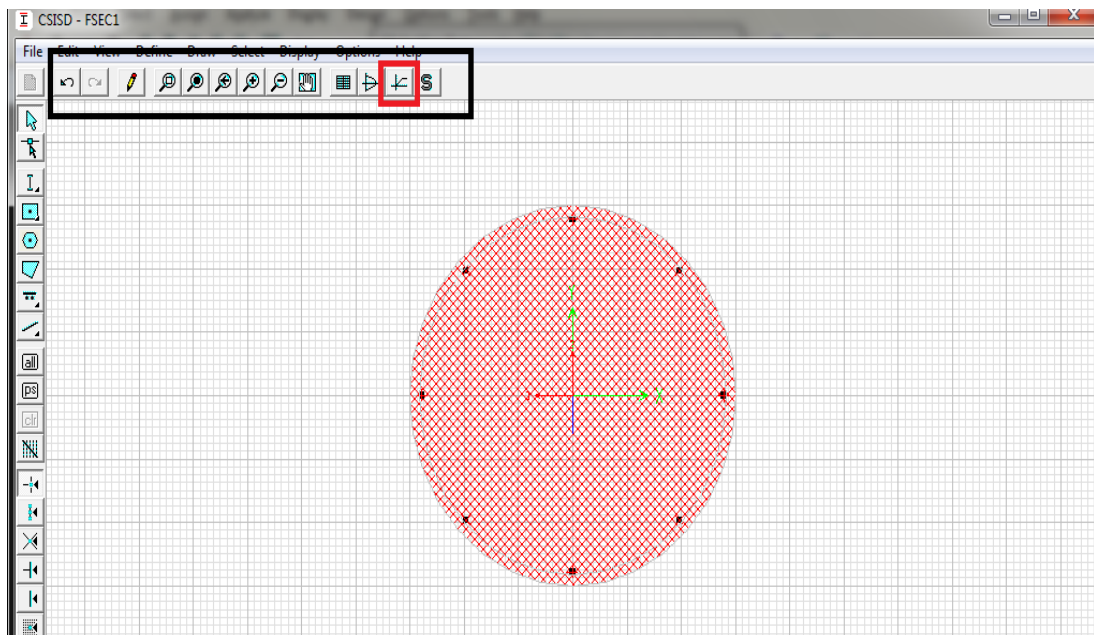
2.2.1.5.2 Numériquement (SAP2000)

2.2.1.5.2.1 Exemple d'une section rectangulaire

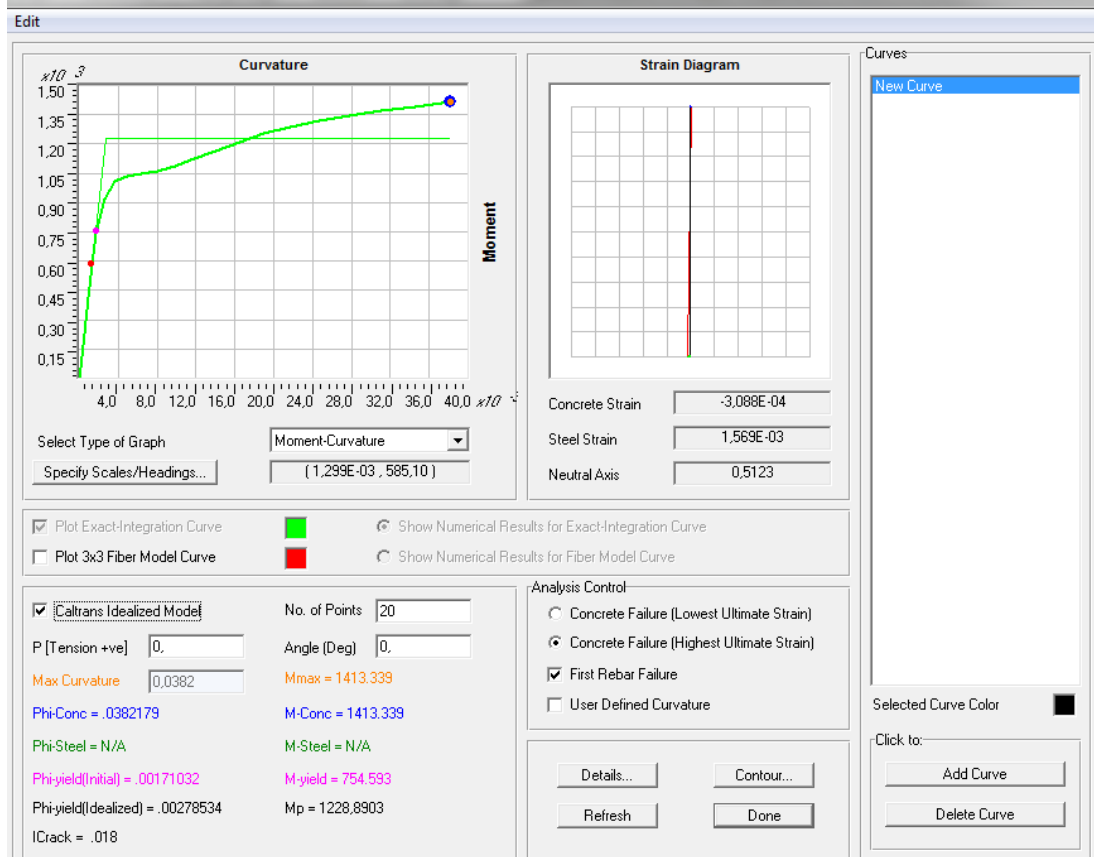


2.2.1.5.2.2 Exemple section circulaire :

De 8T25 de ferrailage et du D=1,5 du diamètre



Moment Curvature Curve (Limits: P(comp.) = -42692.952, P(ten.) = 1624.957)



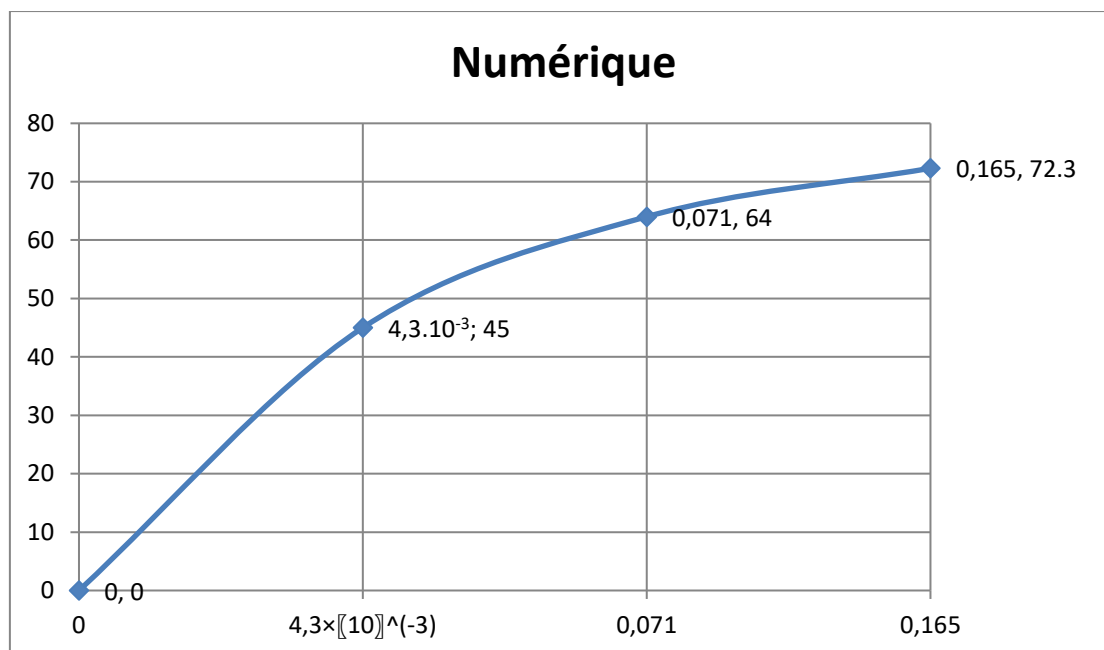


Figure 13: résultat moment (MN.m) courbure numérique obtenu par le sap 2000 pour la section rectangulaire

2.2.1.5.3 Comparaison des deux résultats :

Le tableau 1 présente une comparaison entre les deux résultats

Tableau 1: les résultats des moments courbure analytique et numérique

Comparaison Moment- Courbure											
Analytique						Numérique					
M_e	ϕ_e	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u	M_e	ϕ_e	M_y	ϕ_y	M_u	ϕ_u
34,5	$4,67 \times 10^{-4}$	81,9	0,038	89,1	0,216	45	0,0043	64	0,071	72,3	0,165

2.2.1.6 Remarques :

Cette partie a permis de rappeler la théorie simplifiée associée au calcul des lois moment-courbure pour des sections en béton armé rectangulaires comprenant ou non des aciers de compression.

Les exemples fournis permettent de comprendre le fonctionnement de la théorie simplifiée, et de la valider par rapport à des calculs itératifs détaillés prenant en compte le comportement non linéaire du béton et de l'acier.

L'intérêt de la méthode simplifiée est de permettre de prendre en compte le confinement du béton, ce qui permet d'augmenter sensiblement la ductilité.

2.2.2 L'influence de la force normale sur le moment plastique :

2.2.2.1 Introduction :

Dans cette partie il sera discuté, dans quelle mesure l'ampleur du moment M_p est modifiée, sous l'influence d'une force normale N agissant sur la même section.

2.2.2.2 Section rectangulaire :

Reformulons d'abord la limite de la phase élastique

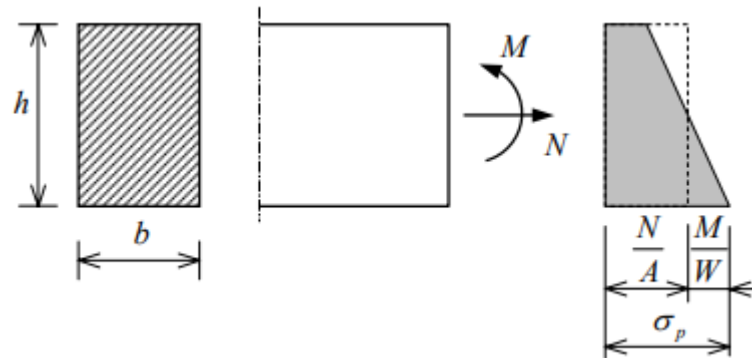


Figure 14: Force et moment de flexion sur une section rectangulaire

$$\frac{N}{A} + \frac{M}{W} = \sigma_p$$

Cette relation peut également s'écrire:

$$\frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_e} = 1 \quad N_p = A\sigma_p \quad M_e = W\sigma_p$$

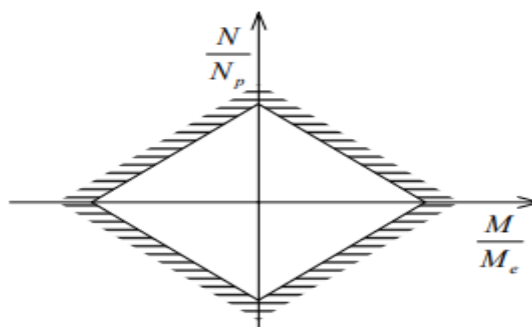


Figure 15: Contour de rendement pour état limite élastique

La relation :

$$\frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_e} = 1 \quad N_p = A\sigma_p \quad M_e = W\sigma_p$$

Peut être représentée graphiquement par un contour d'élasticité comme illustré à la Fig15 Après avoir atteint la limite d'élasticité dans la fibre extrême, la répartition des contraintes change (figure 16).

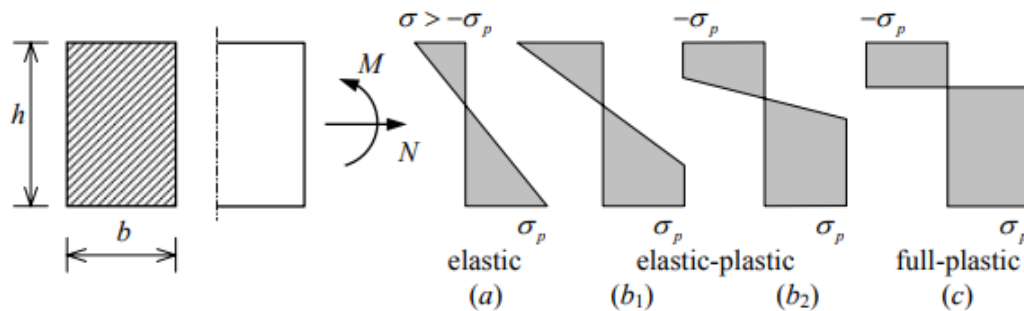


Figure 16 : État élastique, élastique-plastique et entièrement plastique

Pour le calcul du moment et de la force normale en état de rupture, il est pratique de diviser le diagramme des contraintes de la figure 16 en deux parties, comme indiqué sur la figure 17.

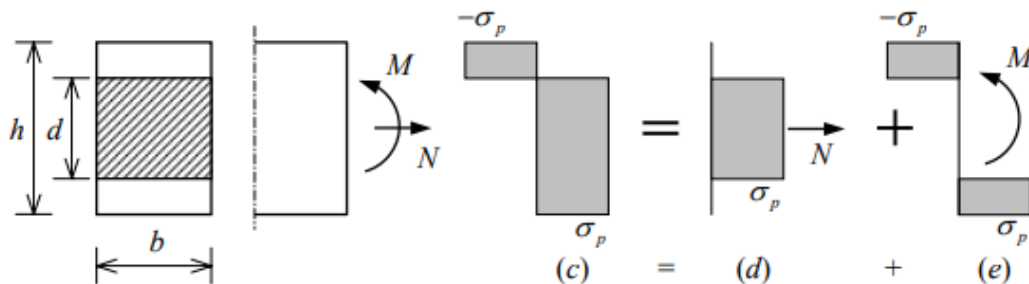


Figure 17: Modèle de séparation des contributions de force et de moment

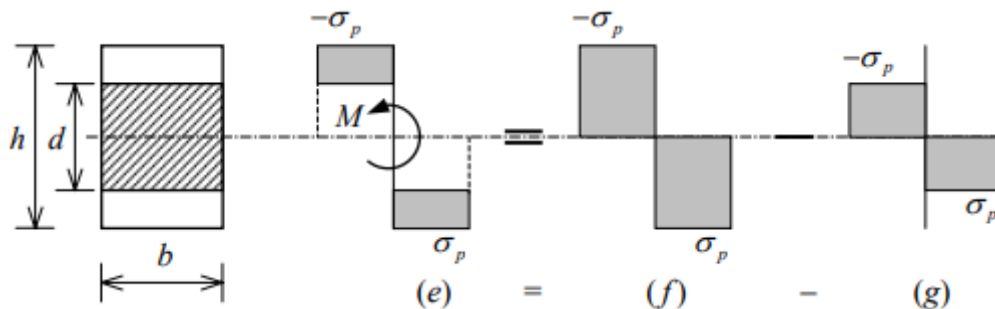


Figure 18: Modèle pour le traitement du moment

Les contraintes restantes dans le reste de la section fournissent un pur moment de flexion.

Les contraintes sont réparties de manière à ce que la force normale soit transmise à travers les fibres, qui sont situées autour de la ligne neutre, tandis que le moment est fourni par les fibres extrêmes efficaces. Pour le calcul de M, le modèle fictif de la Fig18 est utilisé.

Les limites des combinaisons plastiques (N, M) peuvent être calculées par $N = bd \sigma_p$ et $N_p = bh \sigma_p$

$$\frac{N}{N_p} = \frac{bd \sigma_p}{bh \sigma_p} = \frac{d}{h}$$

Comme $M = bh^2 \frac{\sigma_p}{4} - bd^2 \frac{\sigma_p}{4}$ et $M_p = bh^2 \frac{\sigma_p}{4}$ on constate que:

$$\frac{M}{M_p} = \frac{\frac{1}{4}bh^2\sigma_p - \frac{1}{4}bd^2\sigma_p}{\frac{1}{4}bh^2\sigma_p} = 1 - \frac{d^2}{h^2}$$

La combinaison de :

$$\frac{N}{N_p} = \frac{bd \sigma_p}{bh \sigma_p} = \frac{d}{h}$$

et de :

$$\frac{M}{M_p} = \frac{\frac{1}{4}bh^2\sigma_p - \frac{1}{4}bd^2\sigma_p}{\frac{1}{4}bh^2\sigma_p} = 1 - \frac{d^2}{h^2}$$

Conduit alors à:

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

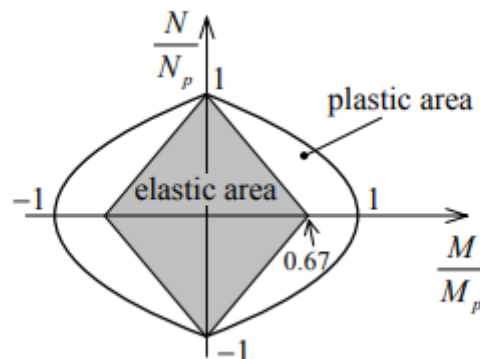


Figure 19: Contours d'élasticité des zones élastiques et plastiques

Cette relation forme le contour élastique-plastique, comme illustré à la Fig19 À titre de comparaison, le contour élastique selon la relation :

$$\frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_e} = 1 \quad N_p = A\sigma_p \quad M_e = W\sigma_p$$

Est tracé à l'intérieur. En raison du terme quadratique $(N / N_p)^2$, les petites forces normales n'ont que peu d'impact sur le moment entièrement plastique.

2.2.2.3 Le diagramme moment-courbure en présence d'une force normale :

Dans cette section, il est expliqué comment le diagramme moment-courbure est affecté par une force normale N.

Les diagrammes obtenus sont souvent indiqués comme des diagrammes M-N-k. Ces diagrammes sont utilisés par exemple pour l'évaluation des propriétés de résistance et de déformation des colonnes soumises à la flexion et à la compression.

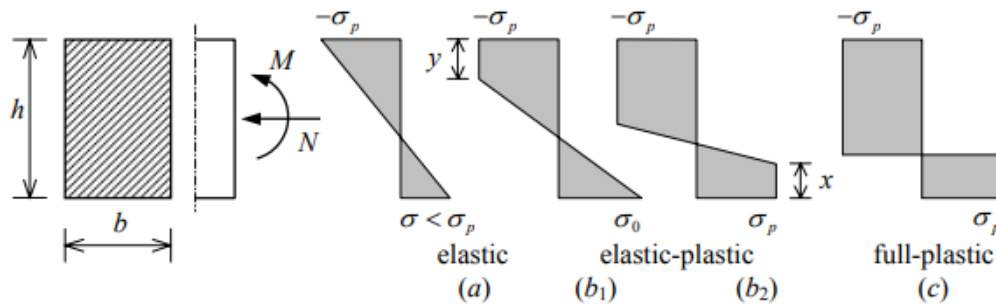


Figure 20: Force de compression et moment de flexion normaux sur une section rectangulaire

Pour la phase élastique, nous avons:

$$\kappa = \frac{M}{EI} \quad \text{or} \quad \frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{M}{M_e}$$

La fin de la phase élastique est atteinte si :

$$\frac{N}{N_p} + \frac{M}{M_e} = 1$$

Pour l'étape élasto-plastique, deux étapes doivent être envisagées :

2.2.2.3.1 Seule la zone de compression cède (Fig20) :

$$N = \sigma_p b h - \frac{(\sigma_p + \sigma_0)}{2} b (h - y)$$

$$M = \frac{1}{12}(\sigma_p + \sigma_0)b(h-y)^2 + \frac{1}{4}(\sigma_p + \sigma_0)by(h-y)$$

$$\kappa = \frac{(\sigma_p + \sigma_0)}{E(h-y)}$$

Ou :

$$\frac{N}{N_p} = \frac{1}{2}[(1+y') - \sigma'(1-y')]$$

$$\frac{M}{M_e} = \frac{1}{2}(1+\sigma')(1-y')(1+2y')$$

$$\frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{1+\sigma'}{2(1-y')}$$

Ou : $y' = \frac{y}{h}$, $\sigma' = \frac{\sigma_0}{\sigma_p}$, $N_p = bh\sigma_p$, $M_e = \frac{1}{6}bh^2\sigma_p$ et $\kappa_e = \frac{2\sigma_p}{EH}$

A partir de ces équations, les variables σ' et y' peuvent être éliminées, conduisant à :

$$\frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{4(1 - N/N_p)^3}{[3(1 - N/N_p) - M/M_e]^2}$$

L'équation est valable tant qu'un seul côté de la section donne (la Figure 20). Au moment où le côté inférieur commence à céder, $\sigma_0 = \sigma_p$ et $\sigma' = 1$

$$\frac{N}{N_p} = \frac{1}{2}[(1+y') - \sigma'(1-y')]$$

et :

$$\frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{1+\sigma'}{2(1-y')}$$

Ce qui donne la condition suivante:

$$\left. \begin{array}{l} \frac{N}{N_p} = y' \\ \frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{1}{1-y'} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{1}{1-N/N_p}$$

2.2.2.3.2 Les zones de compression et de tension cèdent (Fig20) :

$$N = \sigma_p b(y-x)$$

$$M = \frac{1}{6} \sigma_p b(h-x-y)^2 + \sigma_p b y \left(\frac{h}{2} - \frac{y}{2} \right) + \sigma_p b x \left(\frac{h}{2} - \frac{x}{2} \right)$$

$$\kappa = \frac{2\sigma_p}{E(h-x-y)}$$

Ou :

$$\frac{N}{N_p} = y' - x'$$

$$\frac{M}{M_e} = 1 + x' + y' + 2x'y' - 2x'^2 - 2y'^2$$

$$\frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{1}{1-x'-y'}$$

Ou : $X' = \frac{x}{h}$ et $y' = \frac{y}{h}$

De ces formules :

$$\frac{N}{N_p} = y' - x' \quad \frac{M}{M_e} = 1 + x' + y' + 2x'y' - 2x'^2 - 2y'^2 \quad \frac{\kappa}{\kappa_e} = \frac{1}{1-x'-y'}$$

Les variables X' et y' peuvent être éliminées, conduisant à :

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 \right] - \frac{1}{2 \left(\kappa / \kappa_e \right)^2}$$

À titre d'illustration, les courbes M-N-K complètes sont présentées sur la Fig21. La valeur maximale de $\frac{M}{M_p}$ est obtenue pour une courbure infiniment grande donc pour $\frac{\kappa}{\kappa_e}$ à l'infinie ou :

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 \right] - \frac{1}{2 \left(\kappa / \kappa_e \right)^2}$$

On a :

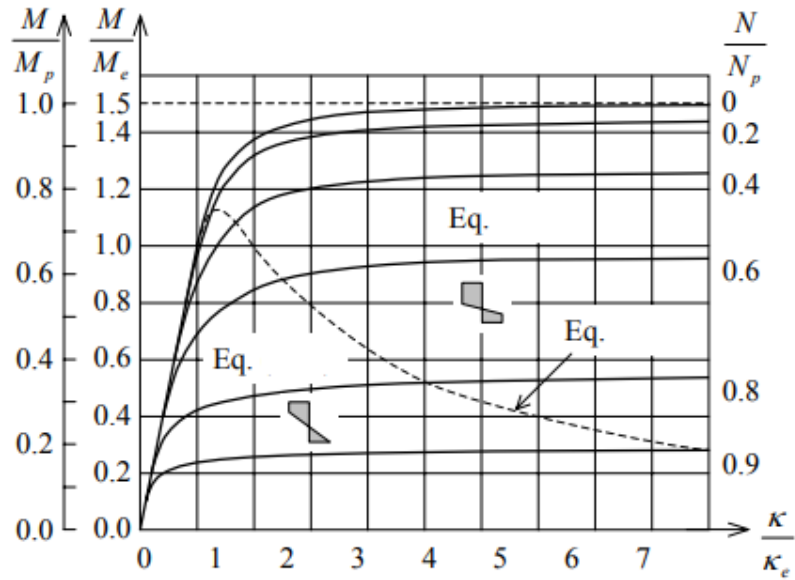


Figure 21: Coupe transversale rectangulaire

$$\frac{M}{M_e} = \frac{3}{2} \left[1 - \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 \right] \rightarrow \frac{2}{3} \frac{M}{M_e} + \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 = 1 \quad \text{or} \quad \frac{M}{M_p} + \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 = 1$$

2.2.2.4 Conclusion :

L'effet de la force normal sur une section rectangulaire va réduire la capacité du moment de la section (capacité du moment plastique) et par conséquent la charge d'effondrement plastique de la structure.

chapitre 3 Calcule plastique des éléments de structures

3.1 L'analyse push-over :

L'analyse push-over est une procédure statique non-linéaire dans laquelle la structure subit des charges latérales suivant un certain modèle prédéfini en augmentant l'intensité des charges jusqu'à ce que les modes de ruine commencent à apparaître. L'analyse push-over s'indique comme variante au calcul basé sur une analyse élastique linéaire utilisant le coefficient de comportement dans les cas où on suspecte que la plastification prématurée d'un élément conduit à sous-estimer fortement la capacité réelle de la structure.

Les résultats de cette analyse sont représentés sous forme de courbe qui relie l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement du sommet de la structure.

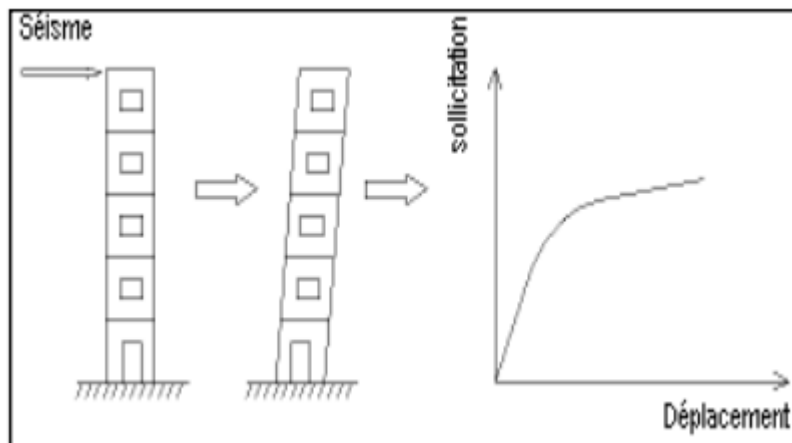


Figure 22:Signification physique de la courbe de capacité

3.1.1 **Objectif :**

L'objectif de la présente section est d'effectuer un calcul de poussée progressif PUSHOVER pour établir la courbe de capacité du portique analytiquement (Fig23 et Fig24).

3.1.2 Détermination analytique de la courbe de capacité :

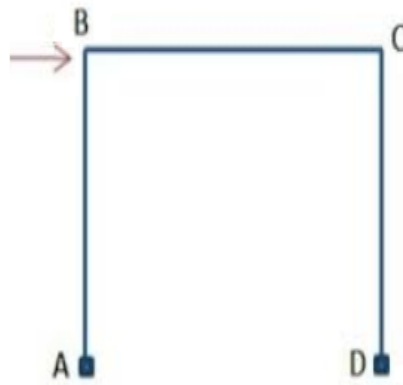


Figure 23 Portique Auto-stable

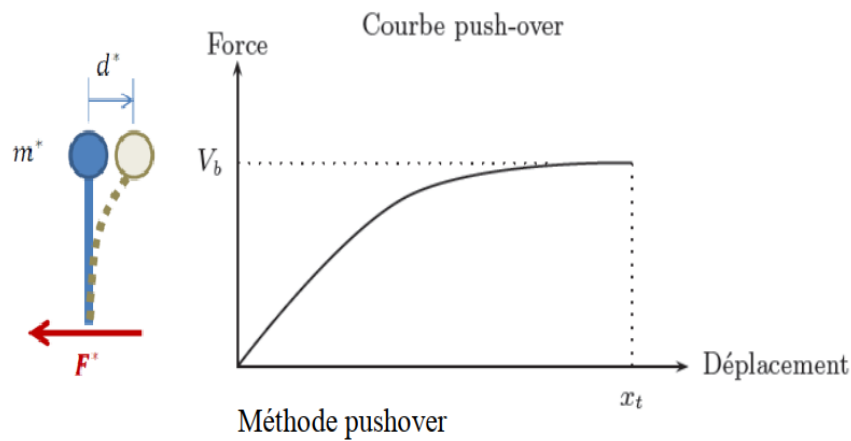


Figure 24:Diagramme (courbe) de Capacité

Le Portique est hyperstatique degré 3 nombres des rotules $3+1=4$, Avec $M_p=25$

3.1.2.1 Calcul des forces :

$$M_A = \frac{5FL}{16} + \frac{3F}{8} \cdot L - F \cdot L$$

$$M_A = -\frac{5FL}{16} \rightarrow M_A = -\frac{15F}{16}$$

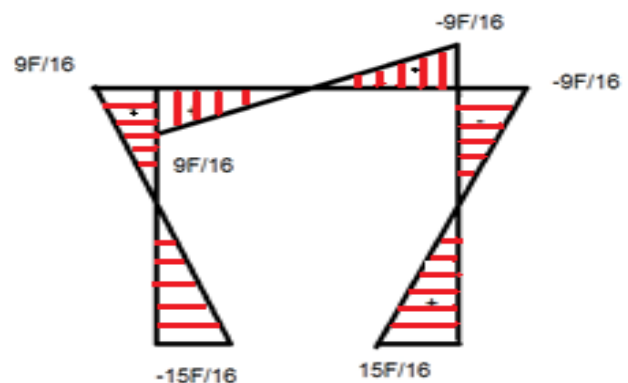
$$M_B = \frac{3FL}{8} - \frac{F}{2} \cdot L + \frac{5FL}{16}$$

$$M_B = \frac{3FL}{8} \rightarrow M_B = \frac{9F}{16}$$

$$M_C = -\frac{FL}{2} + \frac{5FL}{16} = -\frac{3FL}{16} \rightarrow M_C = -\frac{9F}{16}$$

$$M_D = \frac{5FL}{16} \rightarrow M_D = \frac{15F}{16}$$

$$|M_A| = |M_D| > |M_C| = |M_B|$$



$$M_A = -4M_p \rightarrow -\frac{15F}{16} = -4M_p$$

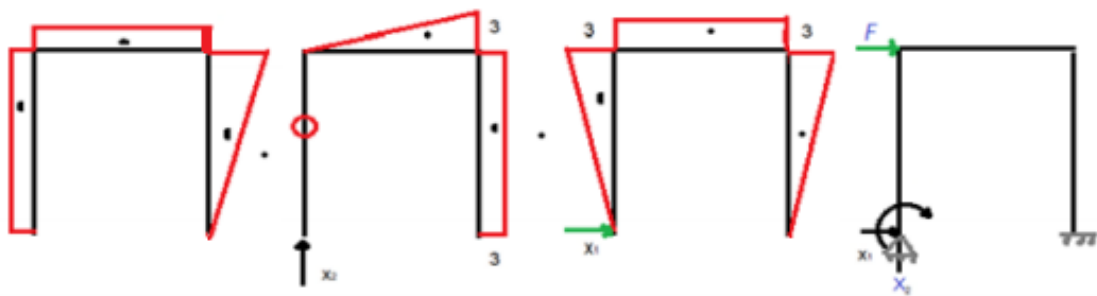
$$F_1 = \frac{64M_p}{15}$$

$$F_1 = 4,26M_p$$

$$M_D = 4M_p$$

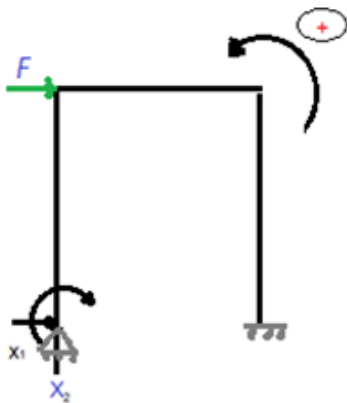
$$4M_p = \frac{15F}{16}$$

$$F = \frac{64M_p}{15}$$



$$\mathcal{Z}_{11} \cdot X_1 + \mathcal{Z}_{12} \cdot X_2 + \Delta P_{10} = 0$$

$$\mathcal{Z}_{21} \cdot X_1 + \mathcal{Z}_{22} \cdot X_2 + \Delta P_{20} = 0$$



$$\mathcal{Z}_{11} = \frac{1}{3} + \frac{1}{2EI} (3 * 3 * 3) + \frac{1}{EI} (3 * 3 * 3) + \frac{1}{2EI} * \frac{1}{3} (3 * 3 * 3)$$

$$\mathfrak{Z}_{11} = \frac{4}{3EI} L^3$$

$$\mathfrak{Z}_{12} = -\frac{5}{6EI} L^3$$

$$\mathfrak{Z}_{22} = -\frac{7}{6EI} L^3$$

$$\Delta P_{10} = \frac{1}{EI} * (-4M_p * 3 * 3) + \frac{1}{EI} (-M_p * 3 * 3) + \frac{1}{EI} * (3F - 4M_p * 3 * 3)$$

$$\Delta P_{10} = \frac{-9Mp}{EI} L^2 + \frac{LF}{EI}$$

$$\Delta P_{20} = 0 + \frac{1}{EI} * (-M_p * 3 * 3) + \frac{1}{EI} * (3F - 4M_p * 3 * 3)$$

$$\Delta P_{20} = \frac{-5Mp}{EI} L^2 + \frac{LF}{EI}$$

$$\frac{5L^3}{3EI} X_1 - \frac{5L^3}{6EI} X_2 = \frac{9MpL^2}{EI} - \frac{LF}{EI}$$

$$\frac{5L^3}{6EI} X_1 + \frac{4L^3}{3EI} X_2 = \frac{10MpL^2}{2EI} - \frac{LF}{EI}$$

$$\begin{cases} X_2 = -0,32M_p - 0,7 F \\ X_1 = 2,45M_p - 0,36 F \end{cases}$$

$$M_A = -4M_p$$

$$M_B = X_1 * 3 - 4M_p$$

$$M_B = -1,02M_p - 0,03F - 3M_p \rightarrow M_B = 3,35M_p - 1,08F$$

$$M_C = -X_2 * 3 + X_1 * 3 - 4M_p$$

$$M_C = 8,31M_p + 1,02F - 4M_p$$

$$M_C = 4,31M_p + 1,02F$$

$$M_D = -X_2 * 3 - 4M_p - 3F$$

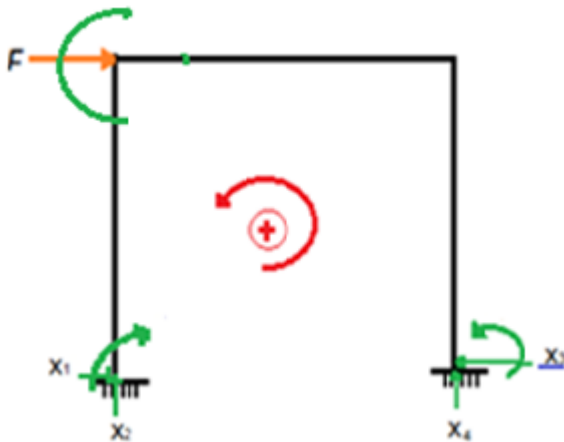
$$M_D = 0,96M_p + 2,1F - 4M_p - 3F$$

$$M_D = -3,04M_p - 0,9F$$

On a:

$$M_D = 4M_P \text{ donc } -4M_P - 3,04M_P = 0,9F$$

$$F_2 = 7,72M_P$$



$$\sum F_v = 0 \rightarrow X_2 + X_4 = 0$$

$$X_4 = -X_2$$

$$X_4 = 0,32M_P - 0,7 F$$

$$\sum F_H = 0$$

$$X_1 - X_3 + F = 0 \rightarrow X_3 = X_1 + F$$

$$\rightarrow X_3 = 2,45M_P + 0,64F$$

$$M_A = -4M_P - F \cdot 3 + X_4 \cdot 3 - 4M_P$$

$$M_A = 0,96M_P - 0,9F$$

$$M_B = 4M_P + X_4 \cdot 3 - X_3 \cdot 3$$

$$M_B = -2,39M_P + 0,18F$$

$$M_C = 4M_P - X_3 \cdot 3$$

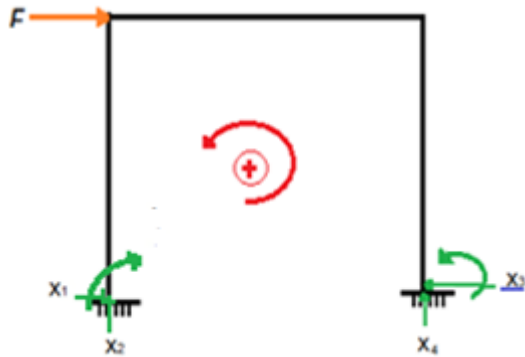
$$M_C = -3,35M_P - 1,92F$$

$$M_D = 4M_P$$

On a :

$$M_B = -M_P \text{ donc } -2,39M_P + 0,18F = -M_P$$

$$F_3 = 7.82M_P$$



$$M_A = -4M_P - M_P - F \cdot 3 - X_4 \cdot 3 - 4M_P$$

$$M_A = -9,96M_P - 5,1 F$$

$$M_B = X_4 \cdot 3 - X_3 \cdot 3 - 4M_P - M_P$$

$$M_B = -11,39M_P - 0,18 F$$

$$M_C = -X_3 \cdot 3 - 4M_P - X_2 \cdot 3 - X_1 \cdot 3 - 4M_P$$

$$M_C = 13,74M_P + 1,26F$$

$$M_D = -4M_P$$

On a :

$$M_C = M_P \text{ donc}$$

$$13,74M_P + 1,26F = M_P$$

Donc $F = 10,1M_P$

3.1.2.2 La COURBE DE CAPACITE :

La figure ci-dessous représente la courbe de capacité analytique

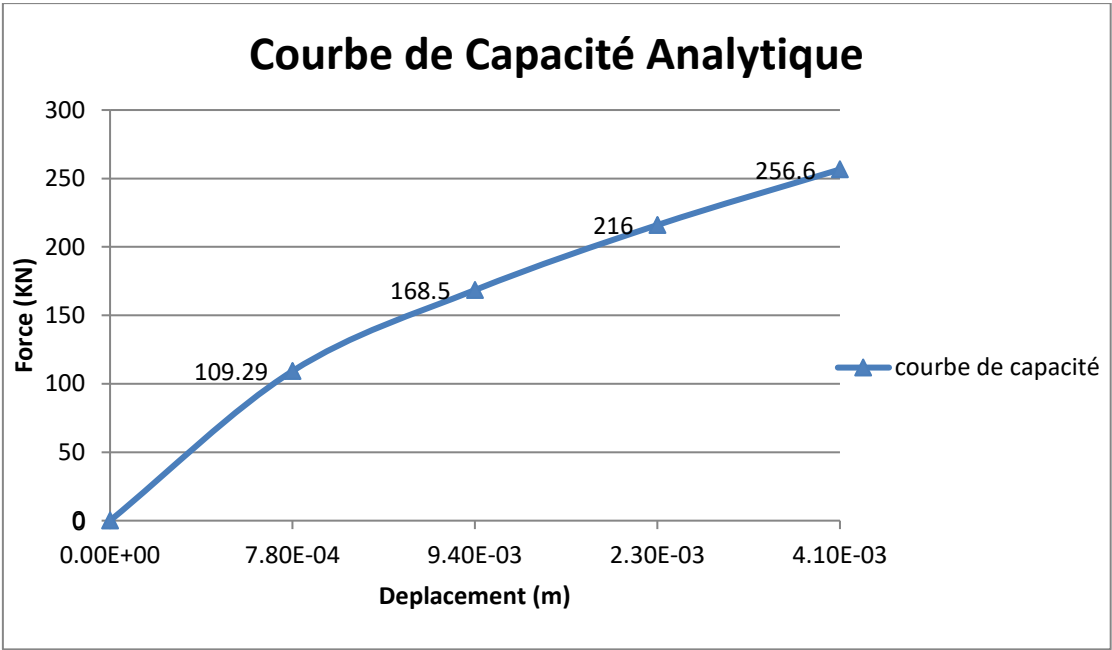


Figure 25 Courbe de capacité analytique

3.1.3 La courbe de capacité numérique (SAP):

3.1.3.1 Étapes de push-over par le SAP2000

Les figures suivantes représentent les étapes à suivre pour obtenir la courbe de capacité numérique

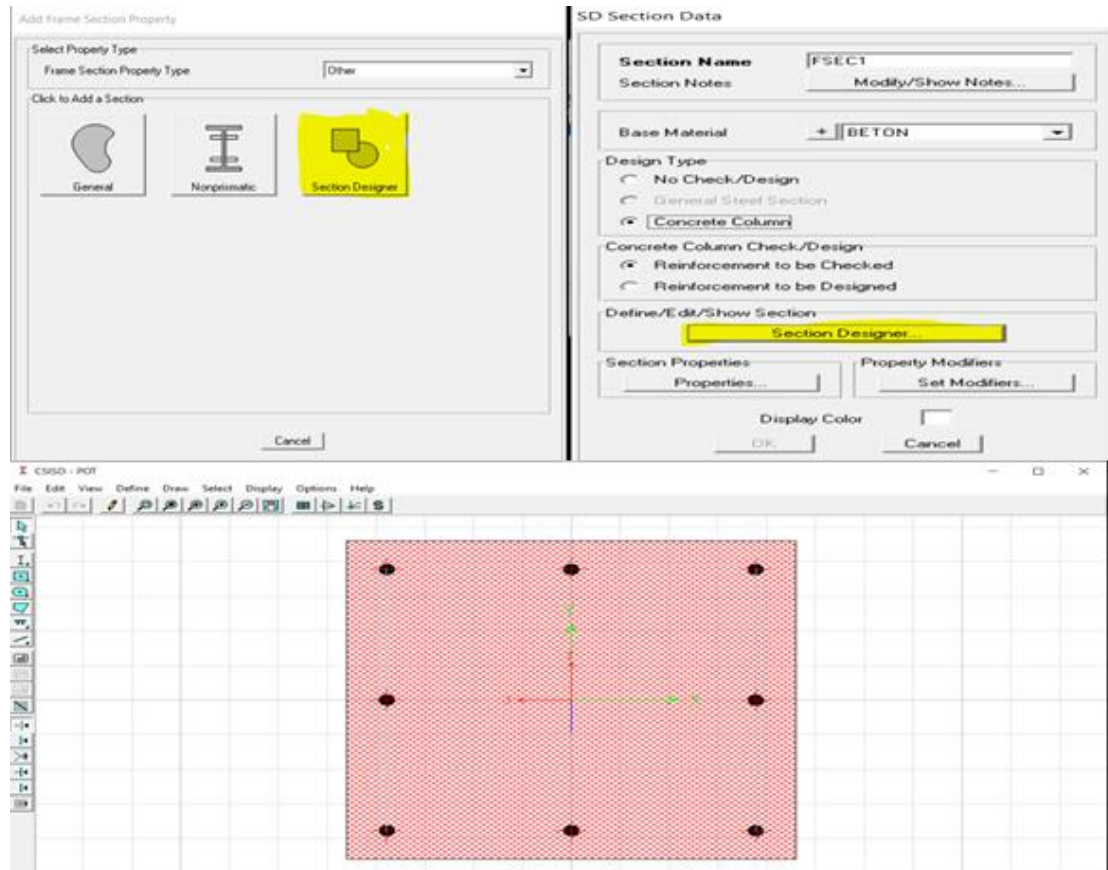


Figure 26: Affectation du ferrailage calculé à l'élément

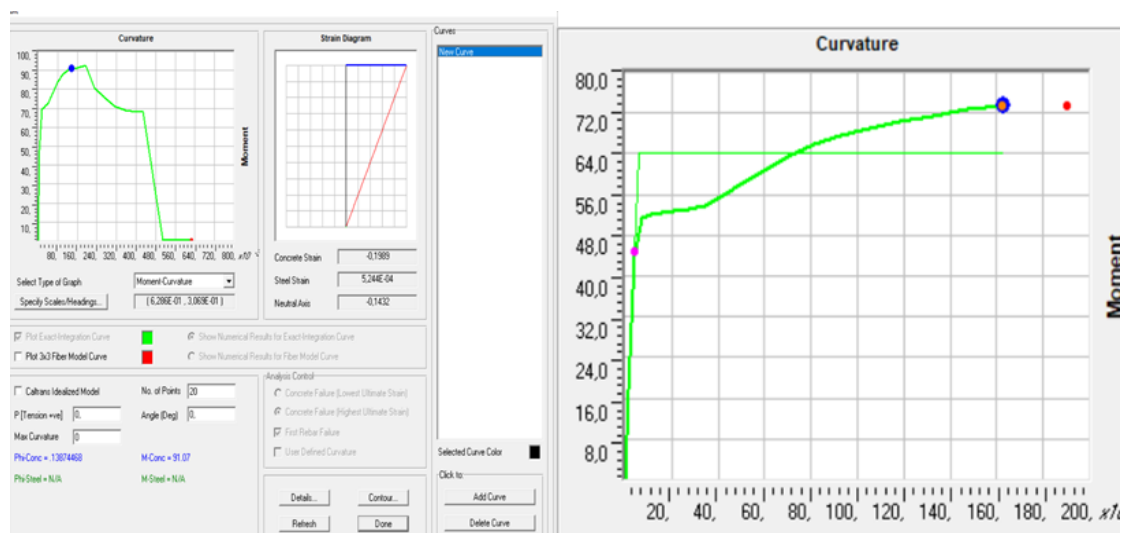


Figure 27: Courbe moment-courbure obtenue à partir du SAP2000

Frame Hinge Property Data for FH1 - Moment M3

Edit

Displacement Control Parameters

Point	Moment/SF	Curvature/SF
E-	-0,2	-0,025
D-	-0,2	-0,015
C-	-1,3	-0,015
B-	-1	0
A	0	0
B	1,	0,
C	1,3	0,015
D	0,2	0,015
E	0,2	0,025

☒ Symmetric

Type

☐ Moment - Rotation

☒ Moment - Curvature

Hinge Length

☒ Relative Length

Load Carrying Capacity Beyond Point E

☒ Drops To Zero

☐ Is Extrapolated

Scaling for Moment and Curvature

☒ Use Yield Moment Moment SF

☐ Use Yield Curvature Curvature

(Steel Objects Only)

Acceptance Criteria (Plastic Curvature/SF)

☒ Immediate Occupancy

☐ Life Safety

☐ Collapse Prevention

☐ Show Acceptance Criteria on Plot

OK Cancel

Figure 28:Les propriétés de la rotule plastique

SAP2000 v14.0.0 Advanced - HCN 1 compil

File Edit View Define Bridge Draw Select Assign Analyze Display Design Options Tools

3-D View

Define Load Cases

Load Case Name	Load Case Type
DEAD	Nonlinear Static
MODAL	Modal
Push	Nonlinear Static

Click to:

Add New Load Case...

Add Copy of Load Case...

Modify/Show Load Case...

Delete Load Case

Display Load Cases

Show Load Case Tree...

OK Cancel

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name Set Del Name

Notes

Load Case Type Design...

Initial Conditions

☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☐ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	LX	-1
Accel	LY	1

Add

Modify

Delete

Other Parameters

Load Application Modify/Show...

Results Saved Modify/Show...

Nonlinear Parameters Modify/Show...

OK Cancel

Figure 29:Les caractéristiques de cas de charge de Push-over

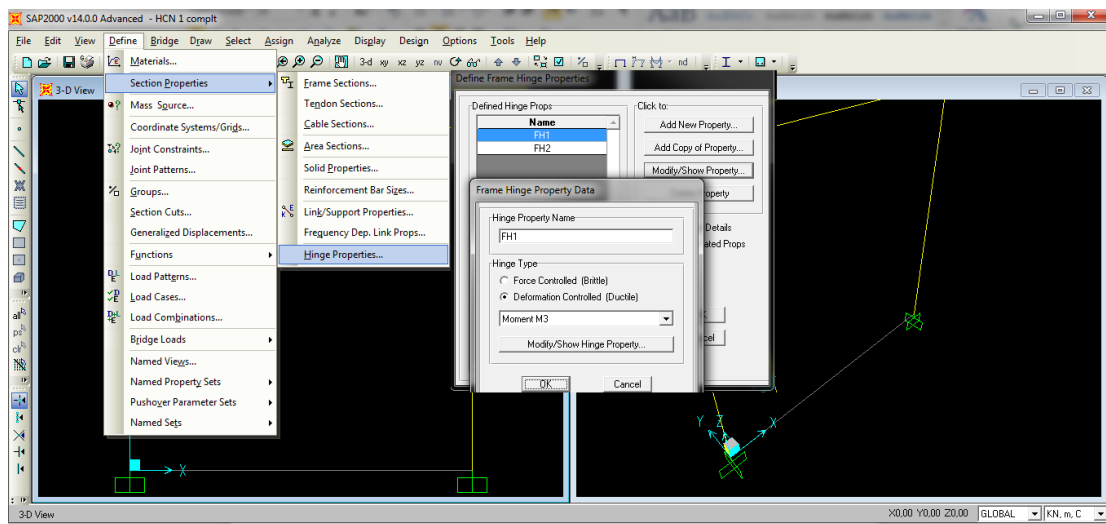


Figure 30:Création des rotules

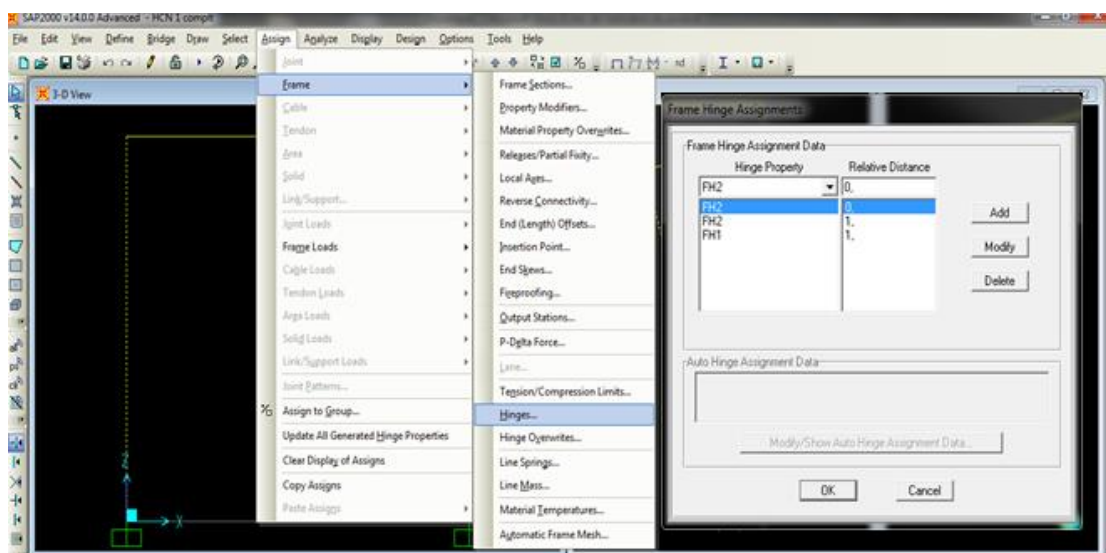


Figure 31:Affectation des rotules aux éléments poteau

3.1.3.2 Les résultats obtenus de la courbe de capacité

La courbe de capacité numérique est donnée sur la figure 32.

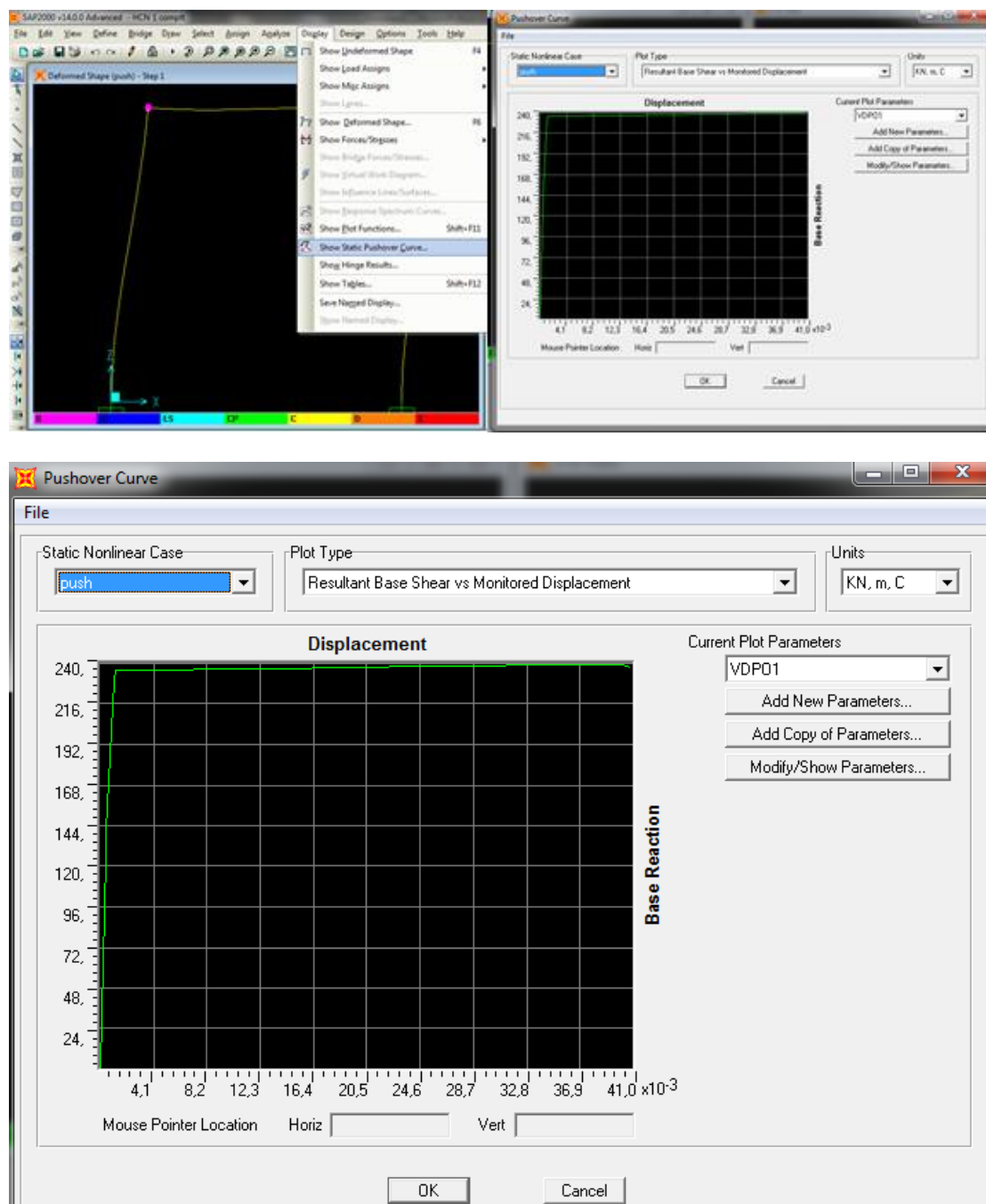


Figure 32: Courbe de capacité numérique par le SAP

3.1.4 Comparaison des deux résultats :

La figure suivante représente la comparaison entre les résultats analytiques et numériques.

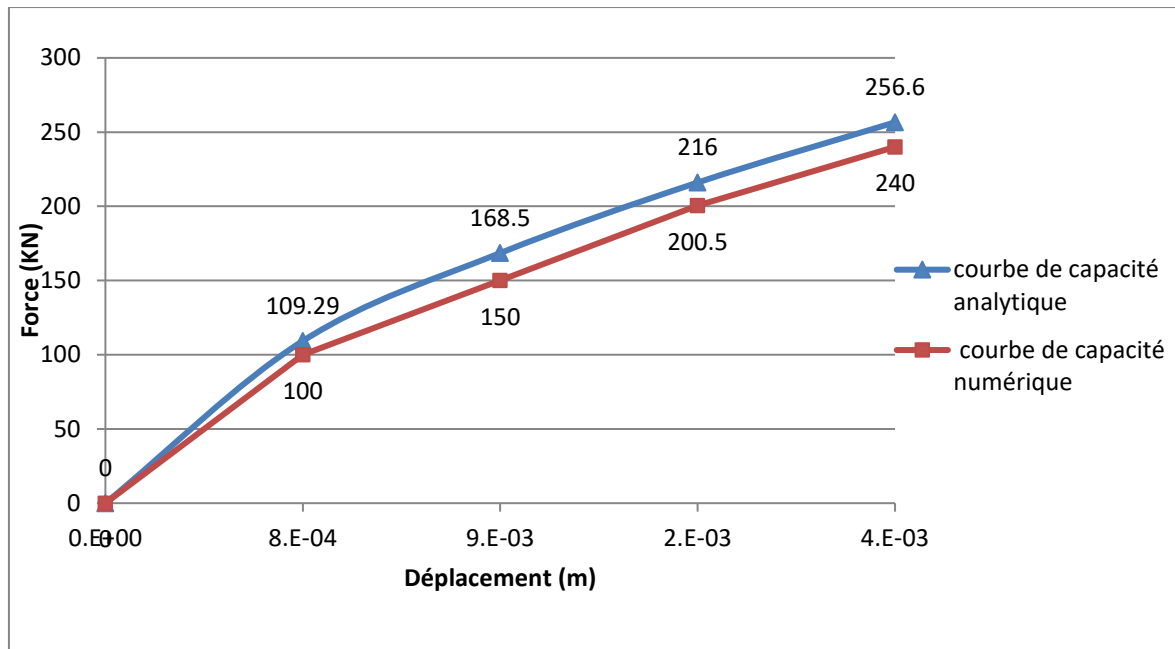


Figure 33 Comparaison des deux courbes

3.1.5 Remarques :

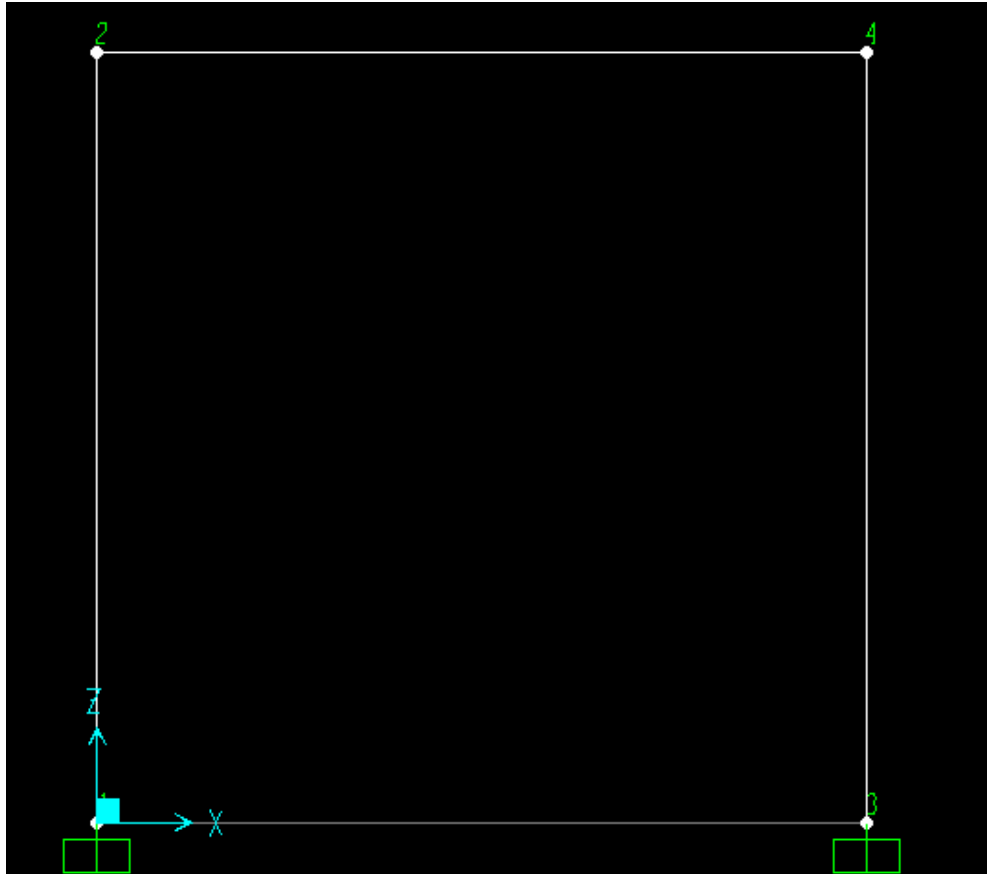
L'analyse statique non linéaire en poussée progressive exécutée sur les portiques auto-stable nous a permis de faire sortir les constatations suivantes :

- Les caractéristiques géométriques et mécaniques de la structure que nous avons introduite dans les lois moment-courbure ont une grande influence sur la courbe de capacité, la rigidité et la performance de la structure.
- cette analyse offre la possibilité d'estimer la capacité sismique d'une structure à travers un calcul statique équivalent.
- Elle permet aussi de suivre le mécanisme et la progression des rotules plastiques dans les structures.

3.2 Calcul de la rotation plastique :

3.2.1 Présentation du portique :

Il s'agit d'un modèle 2D portique auto stable en béton armé d'une hauteur de 3m avec une poutre de 3m ,Les poteaux sont de section $(35 \times 40) \text{ cm}^2$ et la poutre est de section $(35 \times 40) \text{ cm}^2$



3.2.2 Les rotules plastiques

Une courbe force-déplacement ou moment-rotation est définie (pour chaque degré de liberté) lorsque l'on assigne une rotule plastique à un élément linéaire. Cette courbe composée de 5 points A-B-C-D-E représentent le comportement avant et après plastification de l'élément.

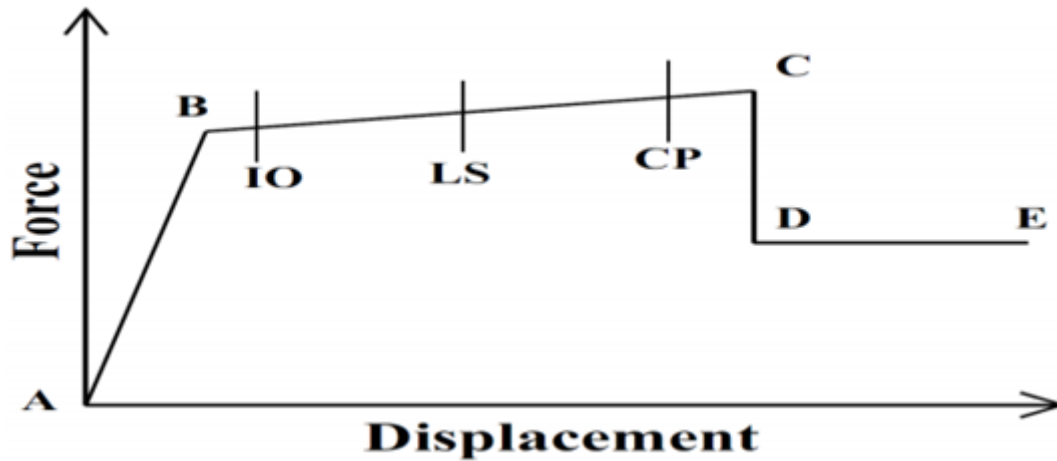


Figure 34: courbe de déformation plastique

Le point A : L'origine ;

Le point B : L'initiation de la plastification (formation de la rotule plastique) ;

Le point C : La capacité ultime ;

Le point D : La résistance résiduelle ;

Le point E : La ruine totale ;

Après le point E, il est possible de faire chuter la charge à zéro ou bien d'extrapoler la courbe.

3.2.3 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC 8 :

Courbe de plastification $\phi_y = 0,03809 \text{ m}^{-1}$

Le moment de plastification $M_y = 81,99 \text{ kN.m}$

Courbure ultime $\phi_u = 0,216 \text{ m}^{-1}$

Moment ultime $M_u = 89,12 \text{ kN.m}$

$$f_c = f_{c28} = 28$$

$$f_y = 360 \text{ MPa}$$

$$f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$L_p = a_{st}(0.08L_v + 0.022 f_y d_{bl})$$

$$\alpha_{st} = \begin{cases} 0,8 & \text{pour les aciers d'armatures avec } \left(\frac{f_t}{f_s}\right) < 1,15 \\ 1 & \text{pour les aciers d'armatures avec } \left(\frac{f_t}{f_s}\right) > 1,15 \end{cases}$$

$$L_p = 0,8(0,08L + 0,022 f_y d)$$

$$L_p = 0,8(0,08(3000) + 0,022(360)(12)) = 0,26\text{m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,216 - 0,03809) 0,26 \left(1 - \frac{0,26}{2 \times 3}\right)$$

$$\theta_{p,u} = 0,0442 \text{ rad}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 L_p}{L_v}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,03809 \frac{0,26}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 * 0,26}{3}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,00968 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,00968 + 0,0442$$

$$\theta_u = 0,0538 \text{ rad}$$

θ_u , θ_p et θ_y sont respectivement les rotations ultime, plastique et élastique ;

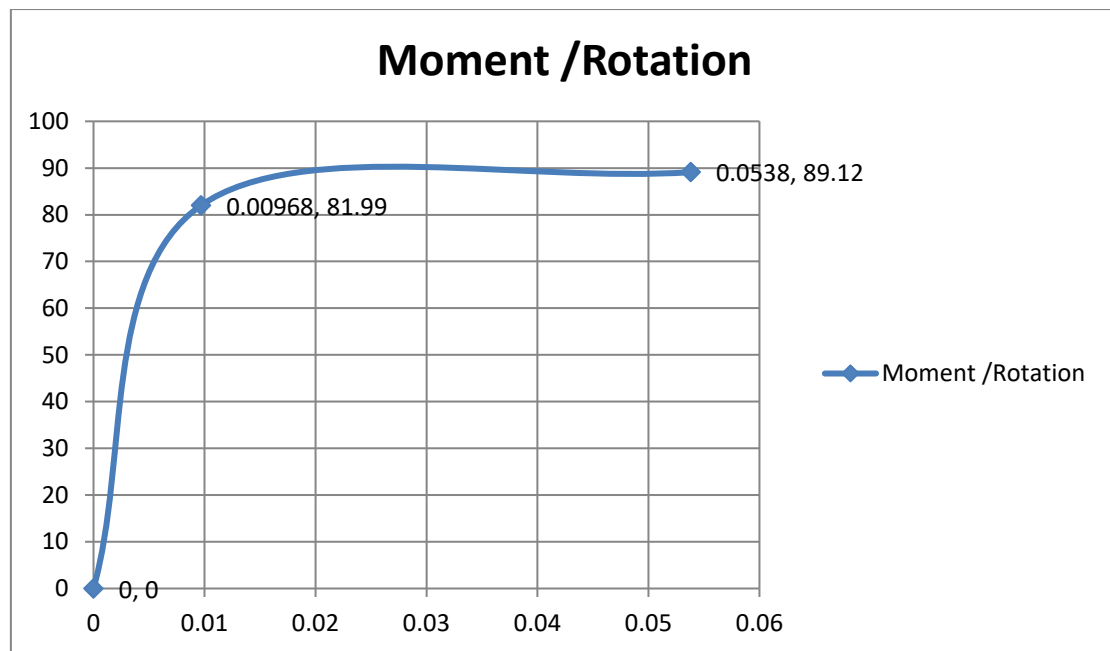


Figure 35:résultat de la rotation plastique

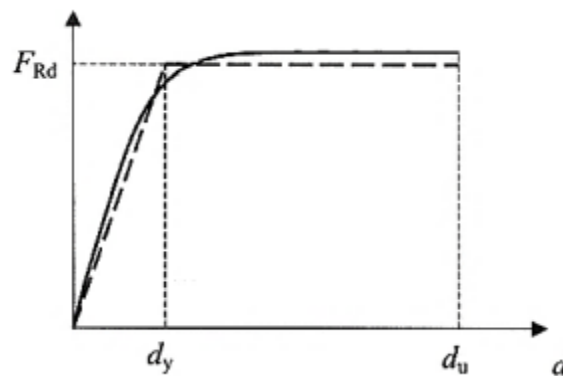


Figure 36:bi-linéarisation de la courbe de déplacement

L'approximation bilinéaire est caractérisée par deux points :

- La plastification nominale (F_y , d_y)
- La rupture (F_u , d_u)

$$d_y = \theta_y \frac{H^2}{3}$$

$$d_y = 0,00968 \frac{3^2}{3}$$

$$d_y = 0,029m$$

$$d_u = d_y + (\phi_u - \phi_y) L_p (H - 0,5 L_p)$$

$$d_u = 0,029 + (0,216 - 0,03809) 0,26 (3 - 0,5 * 0,26)$$

$$d_u = 0,16 \text{ m}$$

3.2.4 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC2 2 :

$$X_u = n \frac{(A_{st} + A_{sc})}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{2b(dA_{st} + d'A_{sc})}{n(A_{st} + A_{sc})^2}} - 1 \right)$$

$$A_{st} = 6T12 = 6,79 \text{ cm}^2$$

$$A_{sc} = 3T12 = 3,39 \text{ cm}^2$$

$$h = 0,4 \text{ m}$$

$$b = 0,35 \text{ m}$$

$$X_u = 15 \frac{(6,79 \cdot 10^{-4} + 3,39 \cdot 10^{-4})}{0,35} \left(\sqrt{1 + \frac{2b(0,375 \cdot 6,79 \cdot 10^{-4} + 0,04 \cdot 3,39 \cdot 10^{-4})}{15(6,79 \cdot 10^{-4} + 3,39 \cdot 10^{-4})^2}} - 1 \right)$$

$$X_u = 0,11 \text{ m}$$

$$\frac{x_u}{d} = \frac{0,11}{0,375} = 0,29 \text{ m}$$

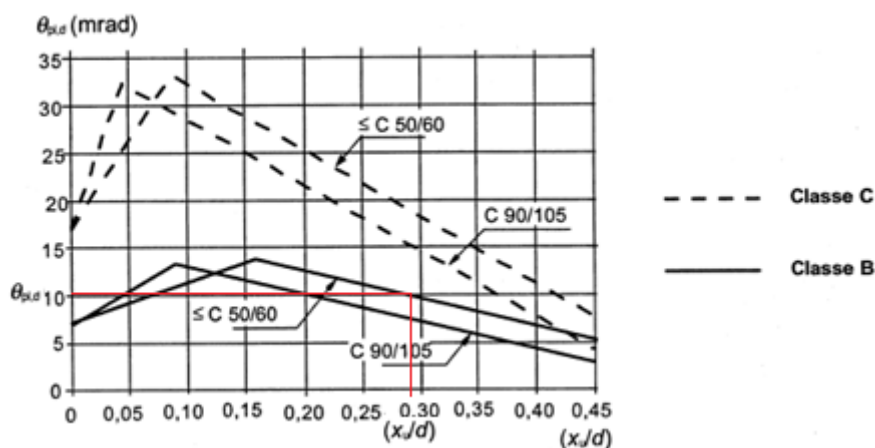
Dans le Model Code 78 :

$$\theta_{pl} = \frac{0,004}{x_u/d} = \frac{0,004}{0,29} = 0,0137 \text{ rad}$$

$X_u/d = 0,29$, classe B, C50/60

Dans les zones de rotule plastique, il convient de limiter x_u/d à 0,30 pour des bétons de classe de résistance inférieure ou égale à C50/60, et à 0,23 pour des bétons de classe de résistance supérieure ou égale à C55/67.

On projection X_u/d au diagramme sur



$$\theta_{pld} = 11 \text{ Mrad} = 0,011 \text{ rad}$$

Les valeurs pour les classes de résistance C 55/67 à C 90/105 peuvent être interpolées. Les valeurs s'appliquent pour un élancement vis-à-vis de l'effort tranchant $\lambda = 3,0$. Pour des valeurs différentes de l'élancement, il convient de multiplier $\theta_{pl,d}$ par k_λ :

$$k_\lambda = \sqrt{\lambda/3} = 1$$

$$\theta_{pl} = \theta_{pld} * k_\lambda = 0,011 * 1 = 0,011 \text{ rad}$$

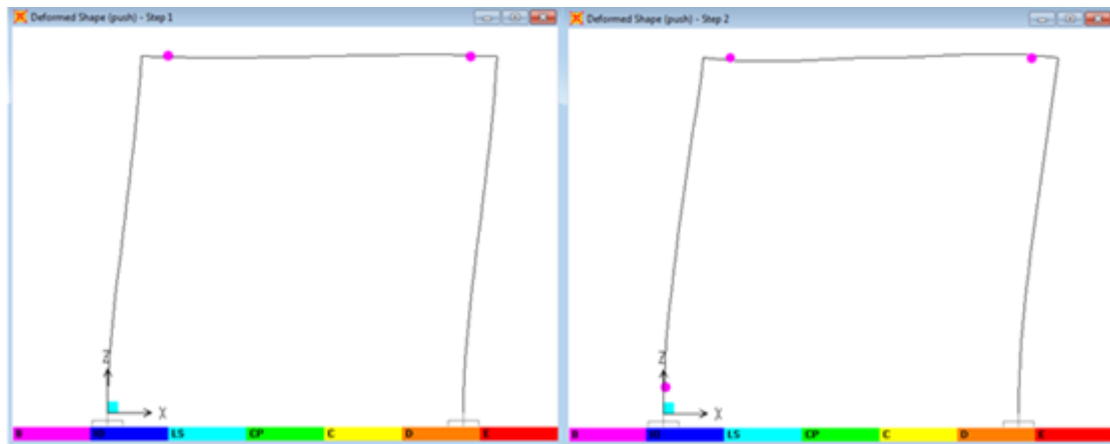
3.2.5 Capacité de rotation des rotules plastiques par l'utilisation du SAP2000 :

3.2.5.1 Mécanisme de ruine et distribution des rotules plastiques :

Tableau 2: Les résultats d'analyse push-over

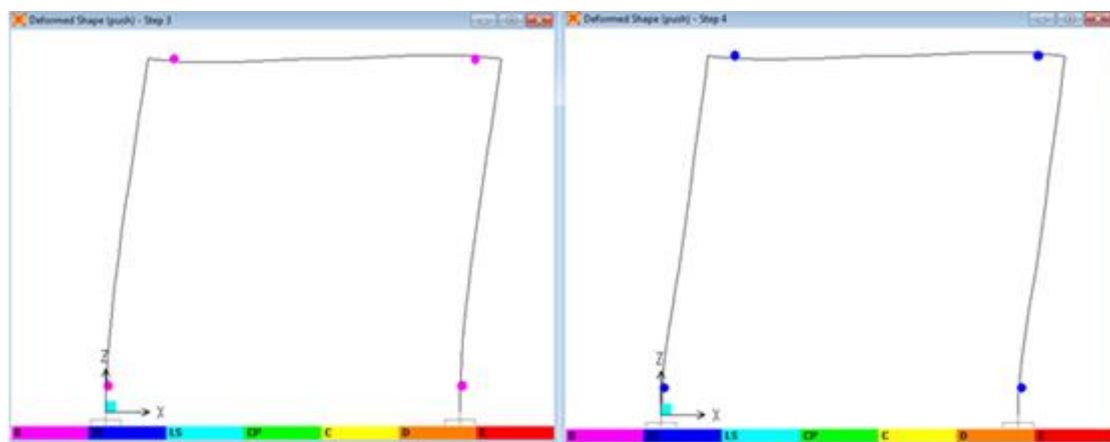
Step	Displacement m	Base Force KN	AtoB	BtoD	IDtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	0,000014	0,000	4	0	0	0	0	0	0	0	4
1	0,000284	92,577	2	2	0	0	0	0	0	0	4
2	0,001129	207,780	1	3	0	0	0	0	0	0	4
3	0,001181	211,139	0	4	0	0	0	0	0	0	4
4	0,013181	216,811	0	0	4	0	0	0	0	0	4
5	0,025181	222,483	0	0	2	2	0	0	0	0	4
6	0,026980	223,333	0	0	2	0	0	2	0	0	4
7	0,036959	173,477	0	0	2	0	0	0	1	1	4
8	0,039162	173,637	0	0	0	2	0	0	0	2	4
9	0,039163	175,857	0	0	0	2	0	0	0	2	4
10	0,045963	176,350	0	0	0	1	0	1	0	2	4
11	0,221720	140,502	0	0	0	0	0	0	0	4	4
12	0,233720	140,503	0	0	0	0	0	0	0	4	4
13	0,245720	140,505	0	0	0	0	0	0	0	4	4
14	0,257720	140,506	0	0	0	0	0	0	0	4	4
15	0,269720	140,507	0	0	0	0	0	0	0	4	4
16	0,281720	140,508	0	0	0	0	0	0	0	4	4
17	0,293720	140,509	0	0	0	0	0	0	0	4	4
18	0,305720	140,510	0	0	0	0	0	0	0	4	4
19	0,305748	140,510	0	0	0	0	0	0	0	4	4

Les figures suivantes montrent le mécanisme de ruine ainsi que l'ordre d'apparition des rotules plastique d'après l'analyse effectuée sur le portique étudié. Les résultats sont aussi détaillés dans le Tableau 2.



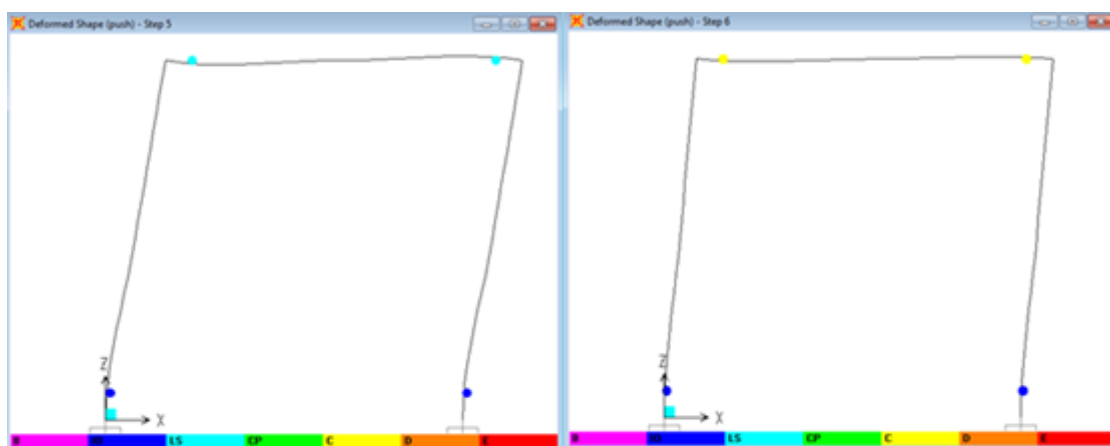
Step1

step2



Step3

step4



Step5

step6

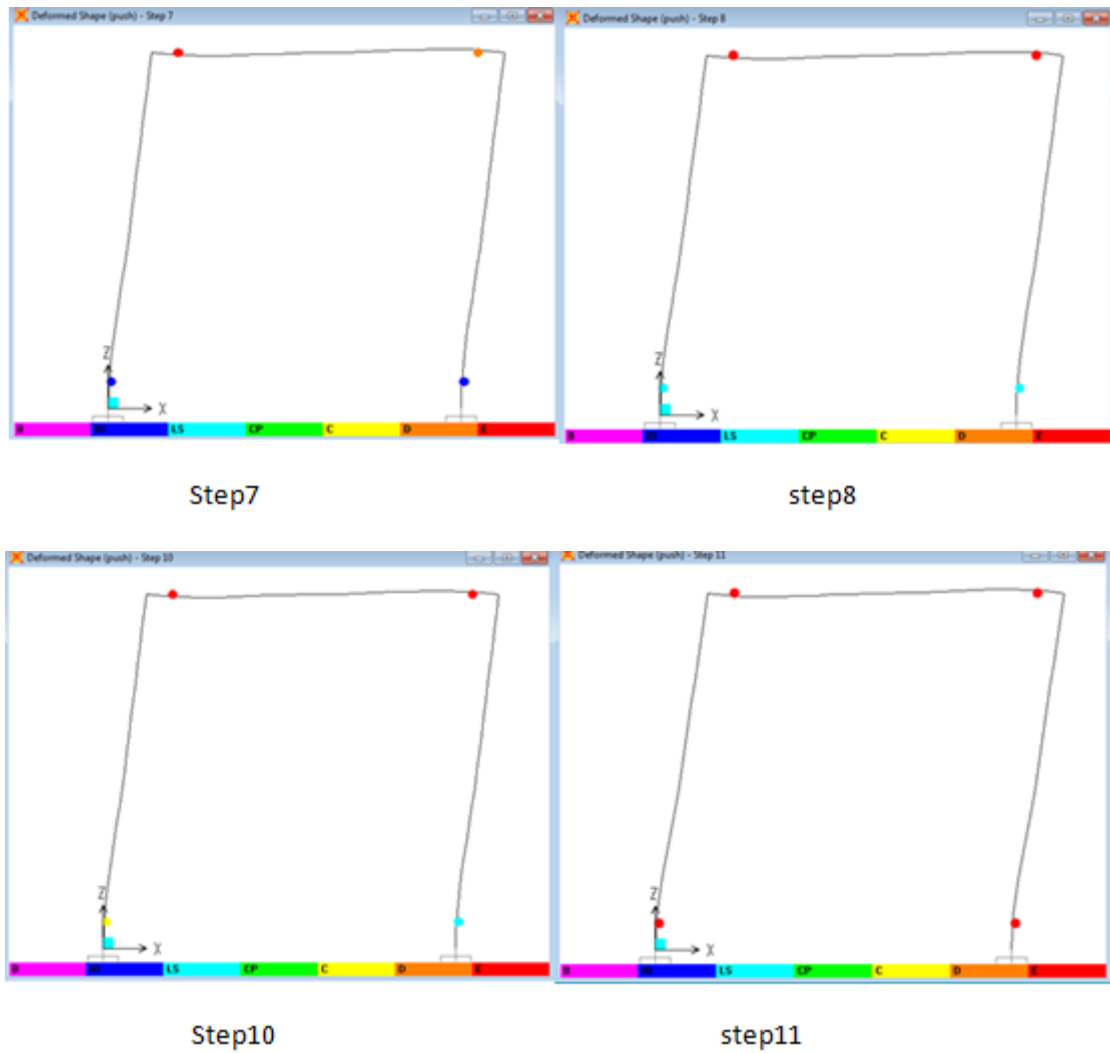


Figure 37: Étapes d'apparition des rotules dans le portique

3.2.6 Comparaison des valeurs des rotations limites :

Les valeurs de rotations maximales sont comparées avec celles de l'EC2 et de l'EC8. Elles sont supérieures à celle de l'EC2, mais inférieures à celles de l'EC8.

Tableau 3:représente les résultats des rotations limite

	Valeur SAP (rad)	EC2 (rad)	EC8 (rad)
Rotule 1	0,0441	0,011	0,0538
Rotule 2	0,0153	0,011	0,0538
Rotule 3	0,0154	0,011	0,0538
Rotule 4	0,0441	0,011	0,0538

3.2.7 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé la méthode d'analyse globale plastique. Cette analyse est un outil puissant et très utile. Elle permet aux ingénieurs d'exploiter la richesse de la conception (en termes de ductilité, hyperstatiques...). Dans la suite de ce travail, on va appliquer cette méthode d'analyse sur un bâtiment (R+4).

chapitre 4 Analyse plastique d'une structure (bâtiment en béton armé)

4.1 Introduction :

Il s'agit d'analyser le comportement d'une structure par la méthode statique non linéaire, et de calculer les valeurs de rotation des rotules et les comparer à la valeur des euro-codes EC2 et EC8, Pour cela nous avons utilisé le SAP2000 pour le calcul statique non linéaire.

4.1.1 Présentation de la structure :

Dans le présent projet, on a procédé à l'étude d'un bâtiment à usage d'habitation composé de R+4 de 208,84 m² de surface. Le bâtiment est situé dans la daïra de Ghazaouat de la commune de Souahlia de la Wilaya de Tlemcen.

En utilisant le logiciel SAP2000 version 14.0.0 un modèle en élément finis du bâtiment en 3D a été établi (Fig38)

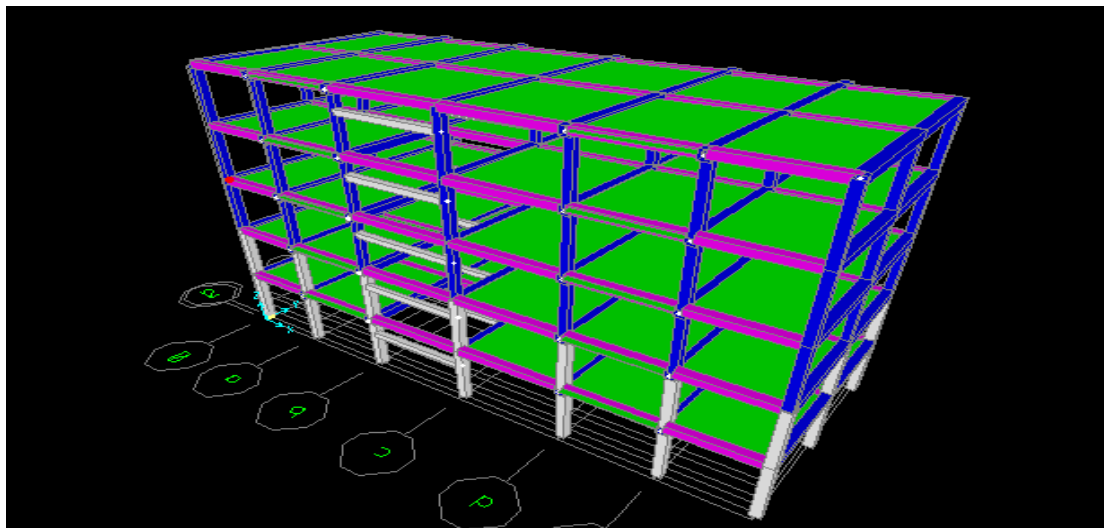


Figure 38:Modèle en éléments finis en 3D de la structure

4.1.2 Caractéristiques géométriques de la structure :

La largeur de structure dans le plan	9,2 m
La longueur de structure dans le plan	22,7 m
Hauteur totale de structure	15,3 m
Hauteur d'étage courante	3,06 m

4.2 Calcule de la descente de charge :

4.2.1 Plancher terrasse inaccessible

4.2.1.1 Charge permanente (G) :

Tableau 4:charge permanente pour plancher terrasse inaccessible

N°=	Matériaux	Epaisseur (m)	Le poids volumique (KN/m3)	Charge permanente (KN/m²)
1	Protection gravillon	0,05	17	0,85
2	étanchéité multicouche	0,02	6	0,12
3	Mortier de pose	0,02	20	0,4
4	Forme de pente	0,04	22	0.88
5	Isolation thermique	0,04	16	0.64
6	Plancher	(0,16+0,05)	13.61	2,86
				5.75

4.2.1.2 Charge d'exploitation (Q) :

$$Q= 1 \text{ KN/m}^2$$

4.2.2 Plancher étage courant

4.2.2.1 Charge permanente (G) :

Tableau 5:charge permanente pour plancher étage courant

N°=	Matériaux	Epaisseur (m)	Le poids volumique (KN/m3)	Charge permanente (KN/m²)
1	Carrelage	0,02	22	0,44

2	Mortier de pose	0,02	20	0,4
4	Plancher	/	/	3,1
5	Enduits en plâtre	0,02	10	0,2
6	Cloison intérieur	/	/	1
				$\Sigma G = 5,14$

4.2.2.2 Charge d'exploitation (Q) :

$Q = 1,50 \text{ KN/m}^2$

4.2.3 Maçonnerie

4.2.3.1 Mur extérieur :

4.2.3.1.1 Charge permanente (G) :

Tableau 6: charge permanente pour mure extérieure

N°=	Matériaux	Epaisseur (m)	Le poids volumique (KN/m ³)	Charge permanente (KN/m ²)
1	Enduit extérieur en ciment	0,02	18	0,36
2	Brique creuse	0,15	/	1,3
3	Brique creuse	0,1	/	0,9
4	Enduit intérieur en plâtre	0,02	10	0,2
				$\Sigma G = 2,76$

4.2.3.2 Mur de séparation

4.2.3.2.1 Charge permanente (G) :

Tableau 7:charge permanente pour mur de séparation

N°=	Matériaux	Epaisseur (m)	Le poids volumique (KN/m3)	Charge permanente (KN/m²)
1	Enduit intérieur en plâtre	0,02	10	0,2
2	Brique creuse	0,10	9	0,9
3	Enduit extérieur en plâtre	0,02	10	0,2
				$\Sigma G = 1,3$

Tableau 8:ferrailages des éléments structuraux

Type des poutres	ferrailage des poutres							
	Ast calculer cm²				Ast choisis cm²			
	Appui		travée		appui		travée	
	Ast	Asc	Ast	Asc	Ast	Asc	Ast	Asc
Poutre principal	4,829	/	6,887	/	5T14=7,7	3T12=3,39	5T14=7,7	3T12=3,39
Poutre secondaire	3,581	/	4,326	/	6T12=6,79	3T12=3,39	6T12=6,79	3T12=3,39
Poutre palier	4.1	/	4.5	/	4T12=4.52	3T12=3,39	4T12=4.52	3T12=3,39
ferrailage des poteaux								
Type des poteaux	A _{min}	A _{calculer}	Ferrailage longitudinal		Ferrailage transversal			
			Section (cm²)	choix	t (cm)	t' (cm)	At	
Poteau type 1	8,575	-12,49	9,03	8T12	7,5	17,5	Ø8	
Poteau type 2	6,3	-8,90	9,03	8T12	7,5	17,5	Ø8	

4.3 Pré dimensionnement des éléments structuraux :

4.3.1 Déterminer la hauteur du plancher :

$$h_t \geq \frac{L}{22,5} \rightarrow h_t \geq \frac{430}{22,5} \rightarrow h_t \geq 19.11 \text{ cm} \rightarrow \text{On prend : } h_t = 21 \text{ cm (16 + 5) cm}$$

Alors on prend la hauteur du plancher 21 cm (16 + 5) cm

16 cm (corps creux). 5cm (Dalle de compression).

4.3.2 Les poteaux :

$$i_{\min} = \frac{a}{2\sqrt{3}} \quad , \quad \lambda = \frac{l_f}{i_{\min}} = 35 \quad , \quad a = \frac{2\sqrt{3}l_f}{\lambda}$$

$$l_0 = 3.37 \text{ m}$$

$l_f = 0.7 l_0$ (construction plusieurs niveaux)

$$l_f = 0.7 l_0 = 0.7 \times 3.37 = 2.359 \text{ m}$$

$$a = \frac{2\sqrt{3}l_f}{\lambda} = \frac{2\sqrt{3} \times 2.359}{35} = 23.35 \text{ cm} \quad \text{On prend } a = b = 35 \text{ cm}$$

Vérifier condition RPA

$$\min(a, b) \geq 25 \text{ cm} \rightarrow a = 35 \text{ cm} \rightarrow c.v$$

$$\min(a, b) \geq \frac{h}{20} \rightarrow a = 35 \text{ cm} \geq 16.85 \text{ cm} \rightarrow c.v$$

$$\frac{1}{4} \leq \frac{a}{b} \leq 4 \rightarrow 0.25 \leq 1 \leq 4 \rightarrow c.v$$

$$N_u = S \times q_u \times n = 9.189 \times 18.92 \times 5 = 869.279 \text{ KN}$$

$$q_u = 1.35G + 1.5Q = 9.189 \text{ KN/m}^2$$

n : nombre d'étage (plancher).

$$f_{c28} = 25 \text{ mpa}$$

$$\frac{N_u}{f_{c28} \times B} = \frac{0.869279}{25 \times 0.35^2} = 0.28 \leq 0.3 \rightarrow c.v$$

4.3.3 Les poutres

4.3.3.1 Poutres principales :

$$L = 445 \text{ cm}$$

$$\frac{l}{15} \leq h \leq \frac{l}{10} \rightarrow \frac{445}{15} \leq h \leq \frac{445}{10} \rightarrow 29.67 \leq h \leq 44.5$$

On prend $h = 40 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$

Vérifier condition RPA

$$b \geq 20 \text{ cm} \rightarrow c.v$$

$$h \geq 30 \text{ cm} \rightarrow c.v$$

$$\frac{h}{b} = 1.14 \leq 4 \rightarrow c.v$$

4.3.3.2 Poutres secondaires :

L= 425 cm

$$\frac{l}{15} \leq h \leq \frac{l}{10} \rightarrow \frac{425}{15} \leq h \leq \frac{425}{10} \rightarrow 28.33 \leq h \leq 42.5$$

On prend $h = 35 \text{ cm}$, $b = 35 \text{ cm}$

Vérifier condition RPA

$$b \geq 20 \text{ cm} \rightarrow c.v$$

$$h \geq 30 \text{ cm} \rightarrow c.v$$

$$\frac{h}{b} = 1 \leq 4 \rightarrow c.v$$

4.3.4 Poutrelles :

b : Largeur de la poutrelle

b₀ : Largeur de la nervure

h_t : Hauteur de la nervure = 21 cm

L : la plus grande Longueur de poutrelle =425cm

h_0 : Hauteur de la dalle de compression = 5 cm

4.3.4.1 Largeur de la nervure (b_0) :

4.3.4.2 Selon la B.A.E.L 91 :

$$0,4 \times h_t \leq b_0 \leq 0,8 \times h_t$$

$$0,4 \times 0,21 \leq b_0 \leq 0,8 \times 0,21$$

$$0,084 \leq b_0 \leq 0,168 \text{ m}$$

$$8,4 \leq b_0 \leq 16,8 \text{ cm} \rightarrow b_0 = 12 \text{ cm}$$

4.3.4.3 Largeur de la poutrelle (b) :

Selon la B.A.E.L 9

$$b_1 = \min \left(\frac{L-b}{2}; \frac{L}{10}; 6 \times h_0 \leq b \leq 8 \times h_0 \right)$$

$$b_1 = \min \left(\frac{65-12}{2}; \frac{400}{10}; 6 \times 5 \leq b \leq 8 \times 5 \right)$$

$$b_1 = \min (26,5 ; 40 ; 30 \leq b \leq 40) = 26,5$$

$$b = 2b_1 + b_0$$

$$b = 2 \times 26,5 + 12 = 65 \text{ cm}$$

4.3.4.4 Vérification :

$$h_t \geq \frac{L}{22,5} \rightarrow h_t \geq \frac{400}{22,5} \rightarrow h_t \geq 17,77 \rightarrow 20 \geq 17,77 \text{ cm} \rightarrow \text{c.v}$$

Tableau 9: dimensionnement des éléments structuraux

Niveau	Poteaux	Poutres principales	Poutres secondaires
RDC	35×35	40×35	35×35
1 ^{er} étage	35×35	40×35	35×35
2 ^{ème} étage	30×30	40×35	35×35

3 ^{eme} étage	30×30	40×35	35×35
4 ^{eme} étage	30×30	40×35	35×35

4.4 Détermination de la courbe de capacité:

4.4.1 Les éléments résistants

4.4.1.1 L'analyse Push Over:

L'analyse push over peut être exécutée directement par un programme de calcul qui peut modéliser le comportement non linéaire des éléments de la structure intervenant dans la résistance aux charges latérales.

4.4.1.1.1 Exécution de l'analyse push over par SAP 2000 :

En utilisant le ferrailage des éléments poteaux poutres calculées, le comportement non linéaire a été déterminé pour les différents éléments et affecté au modèle de la structure établie. Le comportement non linéaire se traduit par l'introduction des rotules plastiques au niveau des sections susceptibles de se plastifier. Les différentes étapes de modélisation non linéaire par rotule plastique sont données par la suite, On présente un exemple d'un poteau du RDC :

- Affectation du ferrailage calculé à l'élément
- Affichage de la loi de comportement Moment-courbure de la section ferrillée et extraction la courbe bilinéaire
- Détermination des rotules plastiques. On note qu'on a deux types, les rotules affectées aux poutres sont de type flexion (M3) tandis que celles affectées aux poteaux tiennent en compte du couplage entre l'effort normal et les moments de flexion (P-M2-M3) .
- Affectation des lois de comportement bilinéaire aux rotules plastiques, cette étape peut être soit faite automatiquement par le SAP2000 ou bien manuellement.
- Affectation des rotules plastiques aux éléments poteaux et poutres

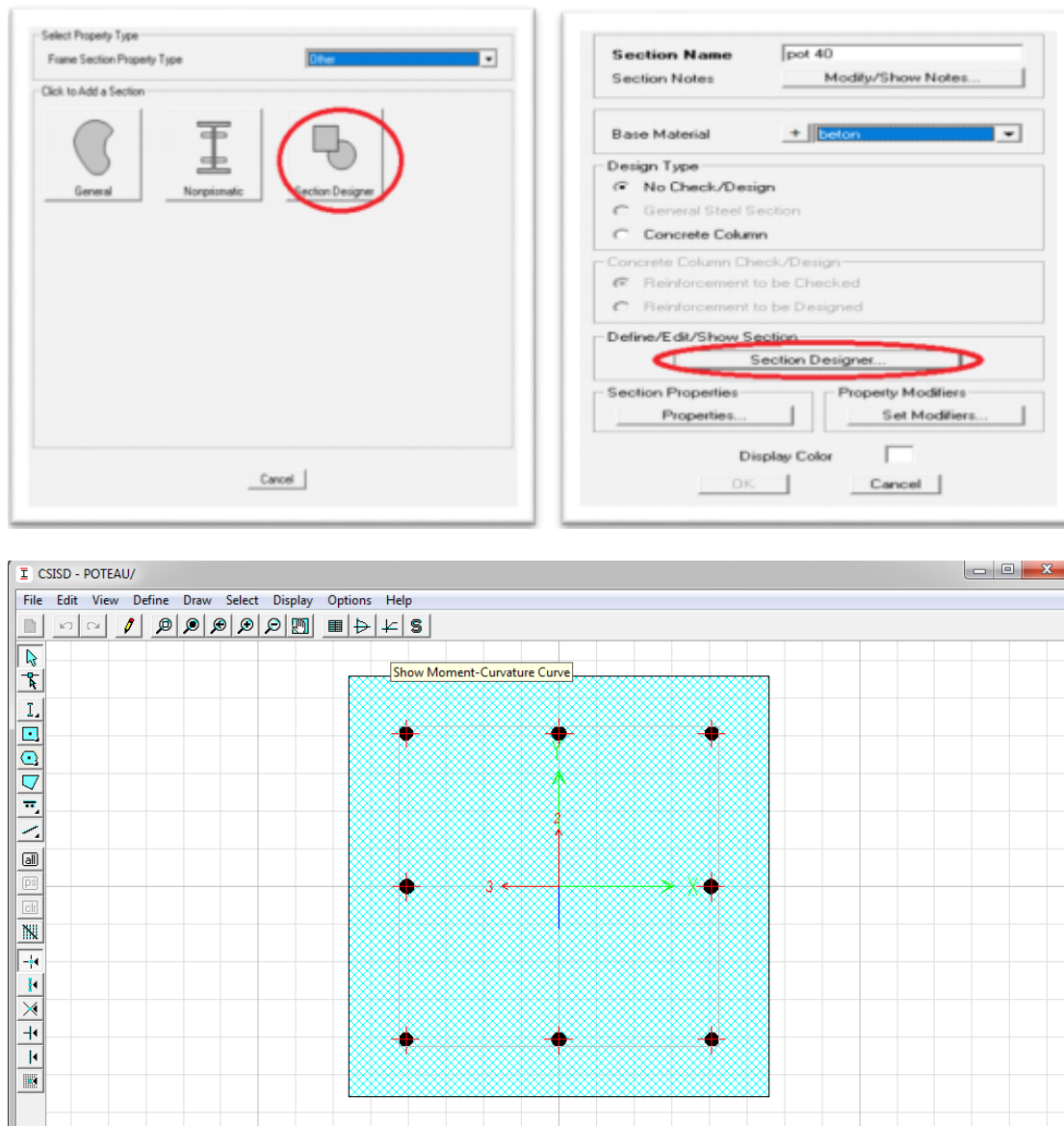


Figure 39: Affectation du ferrailage calculé à l'élément

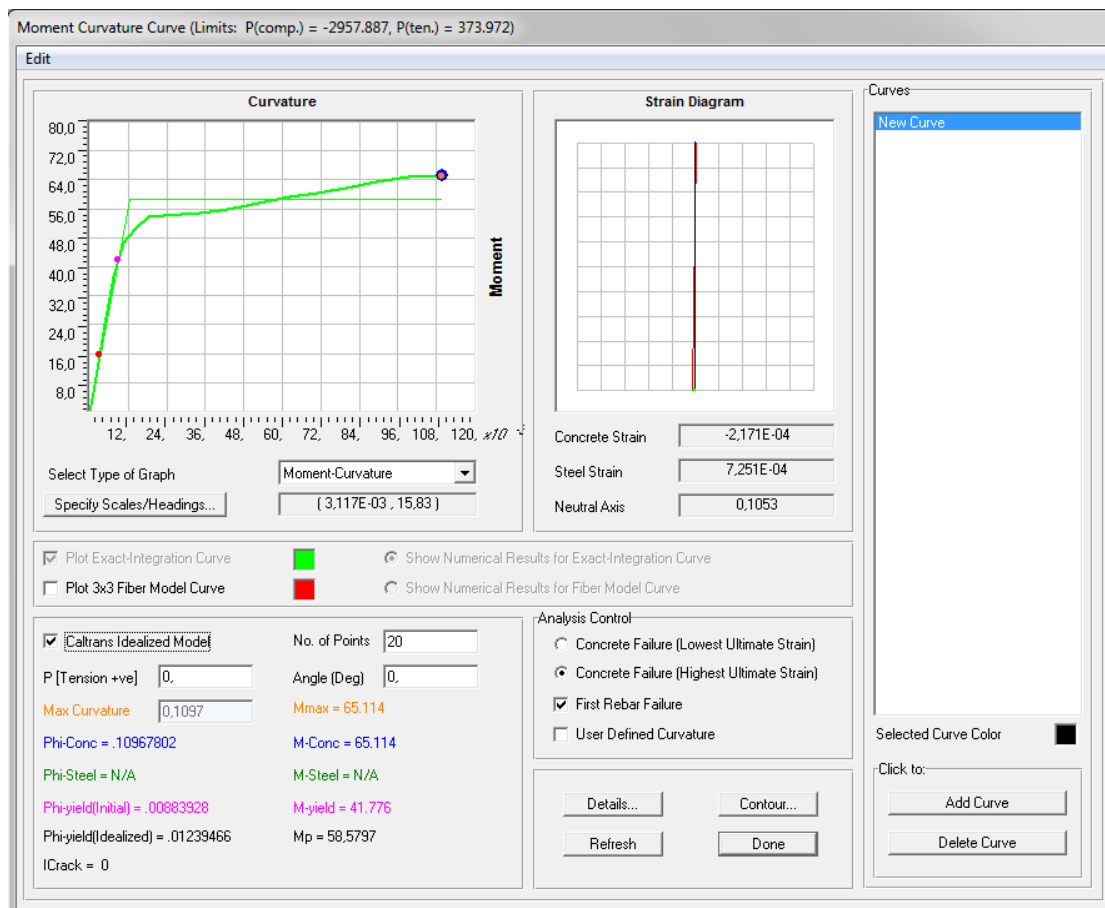
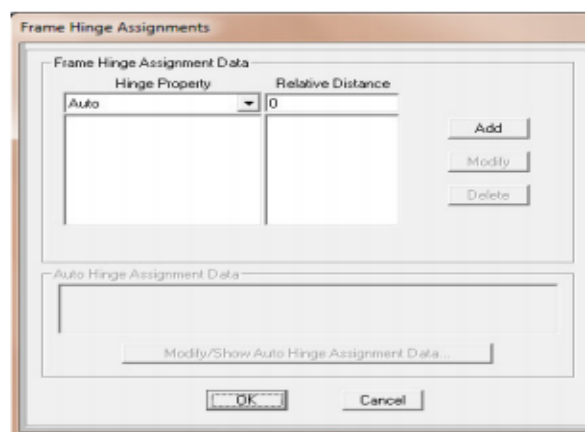


Figure 40: Loi de comportement non linéaire du poteau du RDC

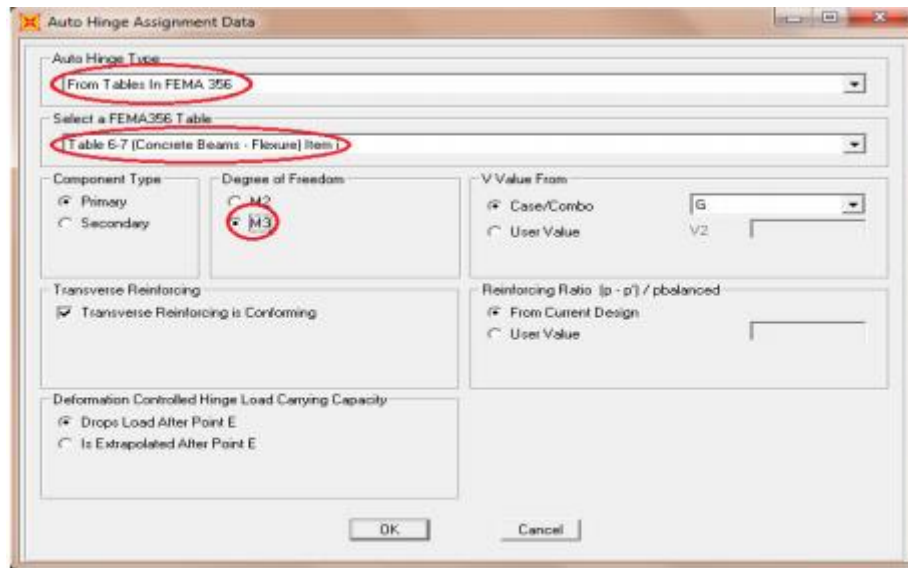
Les 3 étapes suivantes ont pour but la définition des rotules plastiques dans les poteaux et les poutres :

1^{ère} étape :

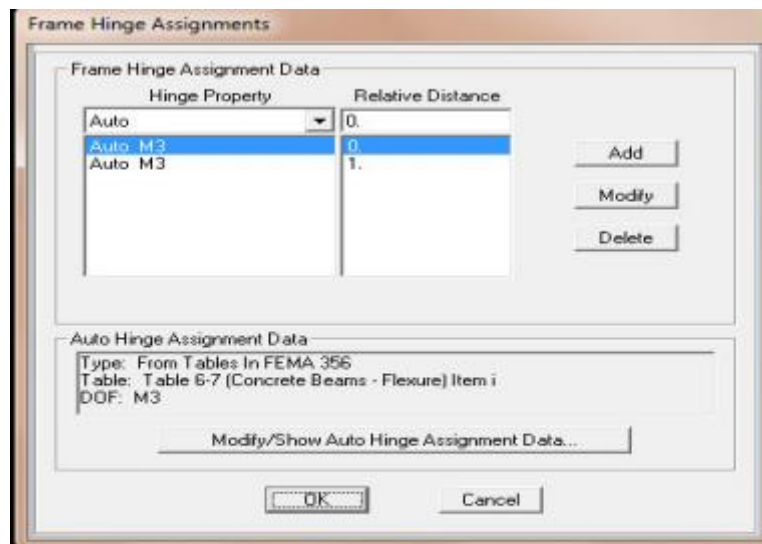
Sélectionner toutes les poutres, puis utiliser **Assign Frame Hinges...** Comme indiqué ci-dessous :



(a)



(b)



(c)

(a) ; (b) et (c) sont les boîtes de dialogue pour affectation des rotules aux poutres

2^{ème} étape :

Sélectionner tous les poteaux, puis cocher les cases comme indiqué dans les boîtes de dialogues ci-après.

Frame Hinge Assignments

Frame Hinge Assignment Data

Hinge Property	Relative Distance
Auto	0

Add
Modify
Delete

Auto Hinge Assignment Data

Modify/Show Auto Hinge Assignment Data

OK Cancel

(a)

Auto Hinge Assignment Data

Auto Hinge Type
From Tables in FEMA 356

Select a FEMA356 Table
Table 6-8 (Concrete Columns - Flexure) Item i

Component Type
☒ Primary
☐ Secondary

Degree of Freedom
☐ M2
☐ M3
☐ M2-M3
☐ P-M2
☐ P-M3
☒ P-M2-M3

P and V Values From
☒ Case/Combo
☐ User Value

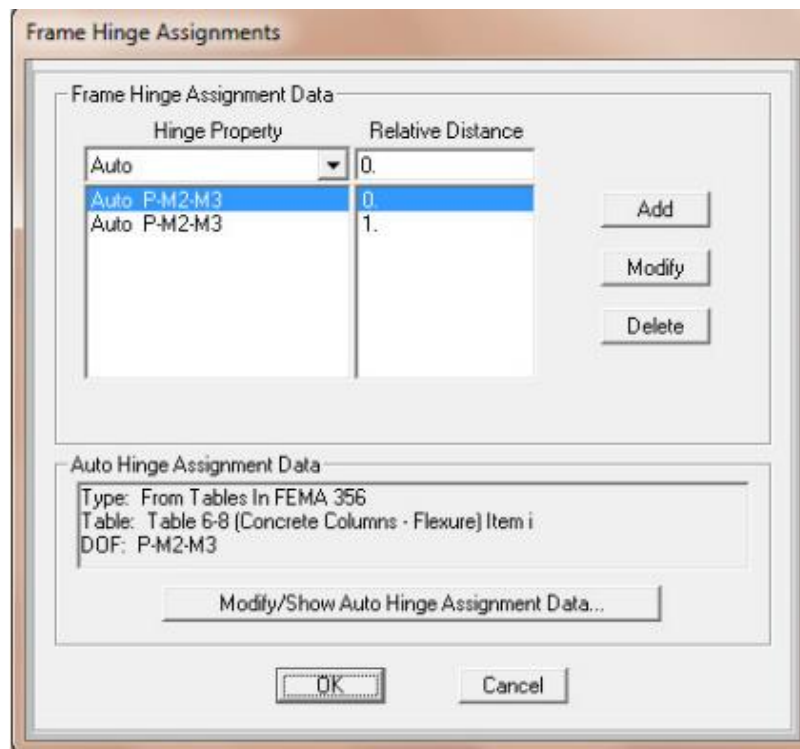
V2
V3

Transverse Reinforcing
☒ Transverse Reinforcing is Conforming

Deformation Controlled Hinge Load Carrying Capacity
☒ Drops Load After Point E
☐ Is Extrapolated After Point E

OK Cancel

(b)



(c)

(a); (b) et (c) sont les boîtes de dialogue pour affectation des rotules aux poteaux

3^{ème} étape :

Sélectionner toute la structure puis : **Assign Frame Hinge Overwrites...**

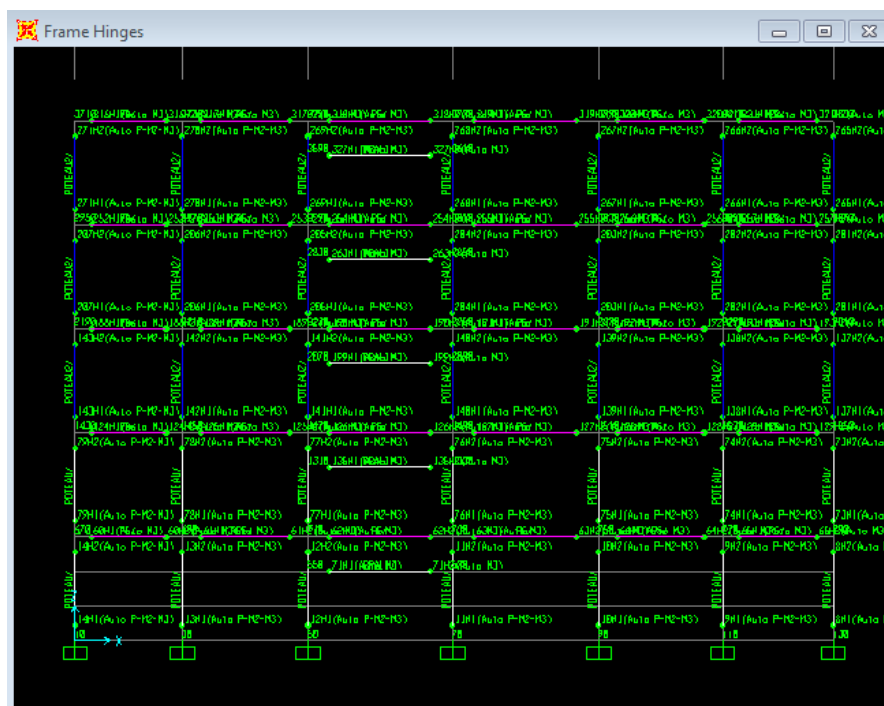


Figure 41: Déclaration des rotules plastique

Les voiles: si les structures contiennent des voiles donc

Le SAP 2000 permet d'introduire les rotules plastiques seulement aux éléments frames. Pour les éléments de type Shell il fournit un élément non-linéaire de type (Shell – Layered / Non-linéaire) qui permet de modéliser le comportement non-linéaire. Les étapes de modélisation sont les suivantes:

1. Définir l'élément non linéaire de type (Shell – Layered / Non-linéaire)

2. Affectation de la non-linéarité et attribution du ferrailage de voile

3. Définir les différentes couches avec leurs matériaux et comportement



Figure 42: Définition de l'élément non linéaire de type (Shell – Layered / Nonlinéaire)

Concrete Shell Section Quick Start Parameters

Section Name:

Rebar Layers: ☐ One Layer ☒ Two Layers

Units:

Material Data And Concrete Thickness

Concrete Material:

Rebar Material:

Concrete Thickness:

In-Plane Element Component Behavior

☒ S11 Nonlinear

☐ S22 Nonlinear

☐ S12 Nonlinear

Out-of-Plane Element Component Behavior

☐ Same as In-Plane

☒ Linear

Rebar Size, Spacing and Clear Cover

☐ Size and Spacing Is the Same For All Rebar

Top Bars - Direction 1: @ Cover:

Top Bars - Direction 2: @ Cover:

Bottom Bars - Direction 1: @ Cover:

Bottom Bars - Direction 2: @ Cover:

Shell Section Elevation View

Top

Bottom

☒ Show Elevation 1-3 ☐ Show Elevation 2-3

Shell Section Plan View

☒ Top ☐ Bot

OK Cancel

Figure 43: Affectation de la non-linéarité et attribution du ferrailage

Shell Section Layer Definition

Layer Definition Data

Layer Name	Distance	Thickness	Type	Num Int. Points	Material	Material Angle	Material S11	Material S22	Material S12
ConcM	0.	0.15	Membrane	1	concrete	0.	Nonlinear	Linear	Linear
TopBar2M	0.043	0.00077	Membrane	1	steel	90.	Linear	Inactive	Linear
BotBar2M	-0.043	0.00077	Membrane	1	steel	90.	Linear	Inactive	Linear
ConcP	0.	0.15	Plate	2	concrete	0.	Linear	Linear	Linear

Quick Start

Add Insert Modify Delete

☐ Highlight Selected Layer

Transparency Control

Section Name:

Order Layers By Distance

Calculated Layer Information

Number of Layers:

Total Section Thickness:

Sum of Layer Overlaps:

Sum of Gaps Between Layers:

OK Cancel

Activert

Figure 44: Définition des couches

4^{eme} étape :

Définie les charges non linéaires : **Défine Load Cases...** grav (charge de gravité)

Définition de l'analyse statique non linéaire sous charges gravitaires : Cette étape consiste à définir les charges gravitaires dans le domaine non linéaire en considérant la combinaison **G+0.2Q**

Modify/Show Load Case...

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: grav Set Def Name Modify/Show...

Load Case Type: Static Design...

Initial Conditions:

- ☒ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State
- ☐ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Modal Load Case: All Modal Loads Applied Use Modes from Case MODAL

Loads Applied:

Load Type	Load Name	Scale Factor
Load Pattern	G	1
Load Pattern	G	1
Load Pattern	Q	0.2

Add Modify Delete

Other Parameters:

Load Application: Full Load Modify/Show...

Results Saved: Final State Only Modify/Show...

Nonlinear Parameters: Default Modify/Show...

Analysis Type:

- ☐ Linear
- ☒ Nonlinear
- ☐ Nonlinear Staged Construction

Geometric Nonlinearity Parameters:

- ☒ None
- ☐ P-Delta
- ☐ P-Delta plus Large Displacements

OK Cancel

(a)

Pour le sens Y-Y:

Add New Load Case...

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions:

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type:

☐ Linear

☒ Nonlinear

☐ Nonlinear Staged Construction

Modal Load Case:

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Geometric Nonlinearity Parameters:

☒ None

☐ P-Delta

☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UY	-1.
Accel	UY	-1.

Other Parameters:

Load Application:

Results Saved:

Nonlinear Parameters:

(b)

Load application Modify/Show..

Load Application Control for Nonlinear Static Analysis

Load Application Control:

☐ Full Load

☒ Displacement Control

Control Displacement:

☒ Use Conjugate Displacement

☐ Use Monitored Displacement

Load to a Monitored Displacement Magnitude of

Monitored Displacement:

☒ DOF at Joint

☐ Generalized Displacement

(c)

Results Saved Modify/Show

Results Saved for Nonlinear Static Load Cases

Results Saved

☐ Final State Only ☒ Multiple States

For Each Stage

Minimum Number of Saved States

Maximum Number of Saved States

☒ Save positive Displacement Increments Only

(d)

Pour le sens X-X:

Load Case Data - Nonlinear Static

Load Case Name: Notes:

Load Case Type:

Initial Conditions

☐ Zero Initial Conditions - Start from Unstressed State

☒ Continue from State at End of Nonlinear Case

Important Note: Loads from this previous case are included in the current case

Analysis Type

☐ Linear

☒ Nonlinear

☐ Nonlinear Staged Construction

Modal Load Case

All Modal Loads Applied Use Modes from Case

Geometric Nonlinearity Parameters

☒ None

☐ P-Delta

☐ P-Delta plus Large Displacements

Loads Applied

Load Type	Load Name	Scale Factor
Accel	UX	-1.
Accel	UX	-1.

Other Parameters

Load Application:

Results Saved:

Nonlinear Parameters:

(e)

(a),(b),(c),(d) et (e) sont les boites de dialogue des définitions des charges non linéaires

5^{eme} étape :

Après avoir créé le chargement horizontal, on lance l'analyse :

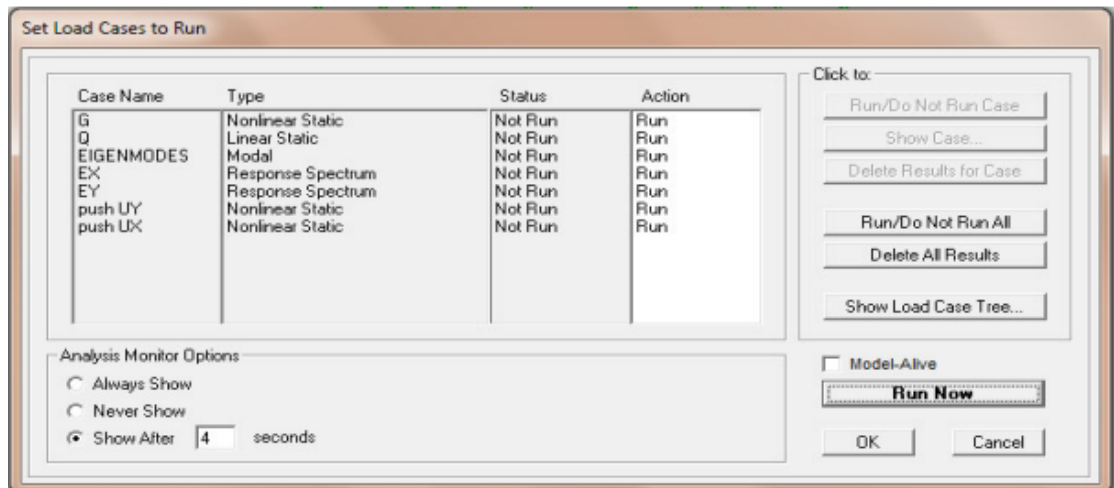


Figure 45:La boîte de dialogue de lancement l'analyse

4.4.1.1.2 Résultat de l'analyse push-over

4.4.1.1.2.1 La courbe push-over de la structure:

Le résultat principal de cette analyse est la courbe de capacité du bâtiment étudié. Cette courbe est la variation de l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement calculé au sommet de la structure. Les courbes de capacité obtenues dans les deux sens sont données sur les deux figures suivantes.

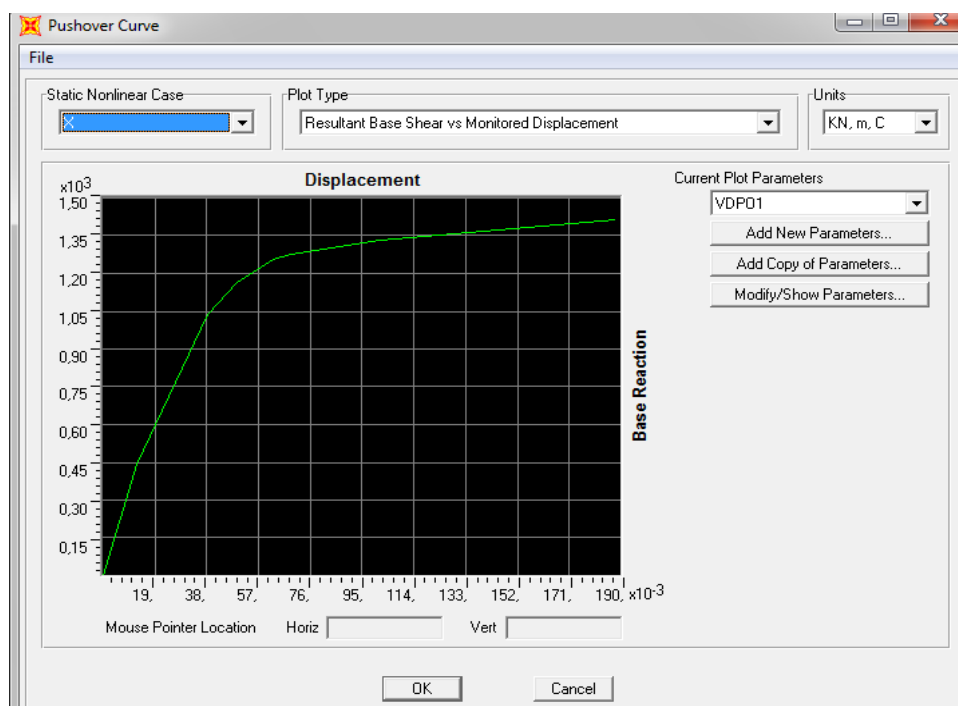


Figure 46: Courbes de capacité push-over dans le sens X_X

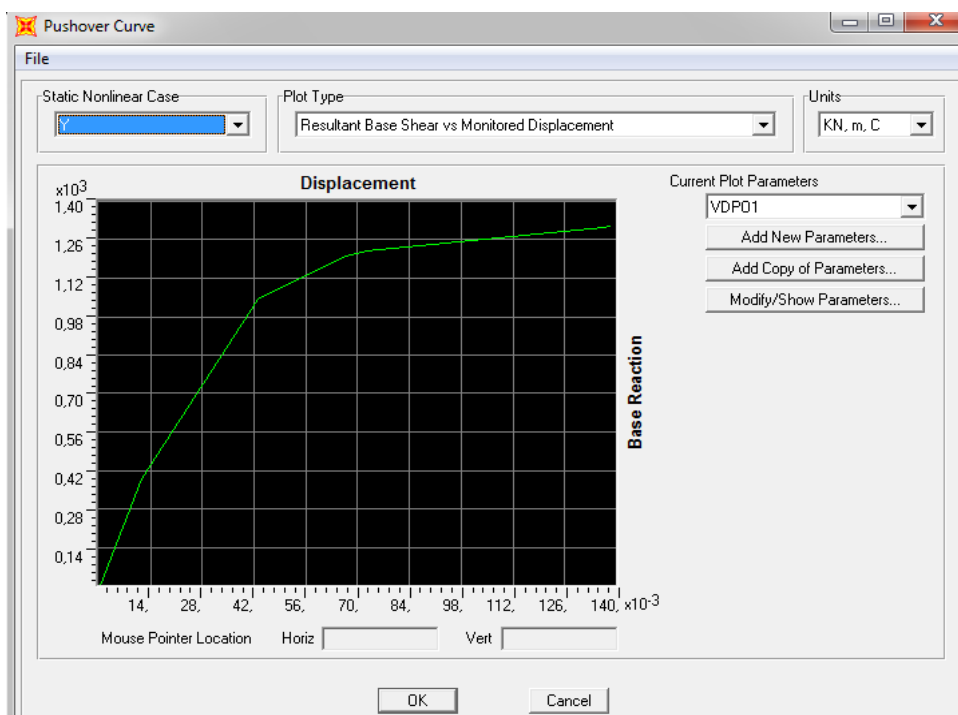


Figure 47: Courbes de capacité push-over dans le sens Y_Y

4.4.1.1.2.2 Développement des rotules plastiques par le logiciel SAP 2000:

Push over selon XX (dernier step)

Plan X-Z:

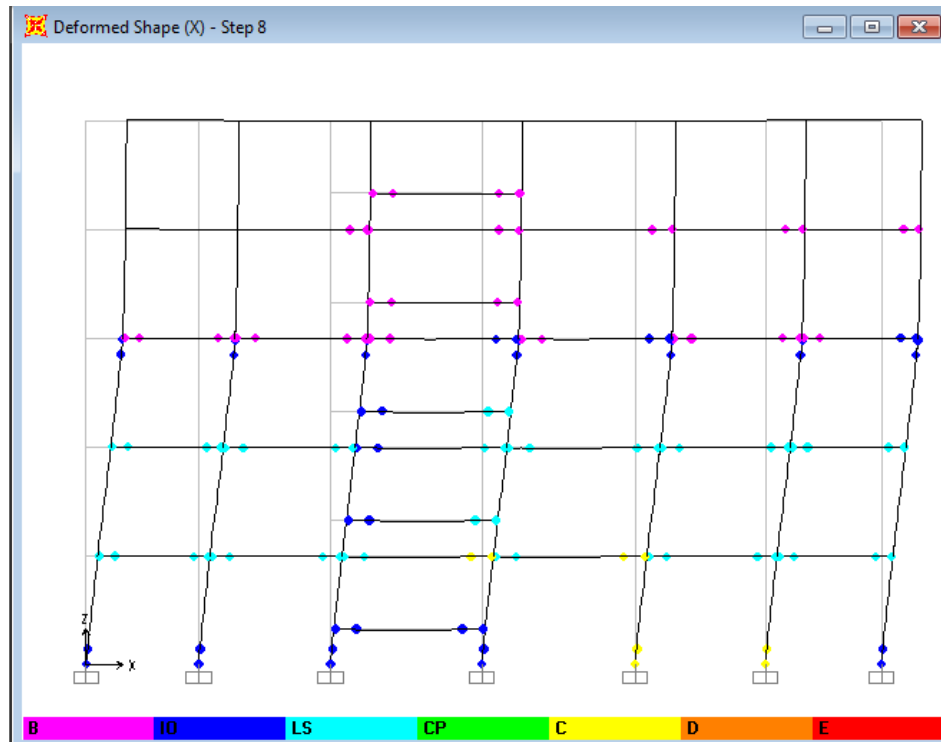


Figure 48: Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan X-Z

Plan Y-Z:

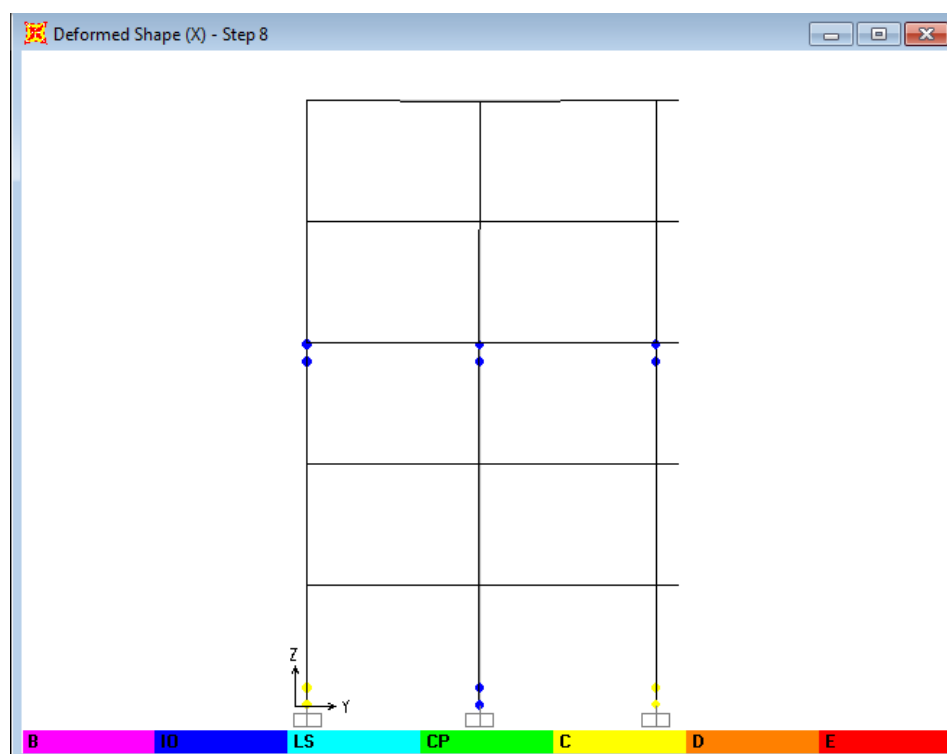


Figure 49:Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan Y-Z

Tableau 10:Développement des Rotules Plastiques selon push X-X

Step	Displacement	BaseForce	AtoB	BtoD	IOtoLS	LS toCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
	m	KN									
0	0,000053	0,000	620	20	0	0	0	0	0	0	640
1	0,012067	441,079	618	22	0	0	0	0	0	0	640
2	0,038336	1036,313	548	92	0	0	0	0	0	0	640
3	0,049157	1165,966	521	119	0	0	0	0	0	0	640
4	0,062302	1255,052	498	109	33	0	0	0	0	0	640
5	0,068717	1277,679	487	115	38	0	0	0	0	0	640
6	0,101676	1333,621	460	85	95	0	0	0	0	0	640
7	0,187938	1411,223	453	52	61	68	0	6	0	0	640
8	0,187994	1411,240	453	52	58	68	0	9	0	0	640

Push over selon Y-Y (dernier step)

Plan X_Z :

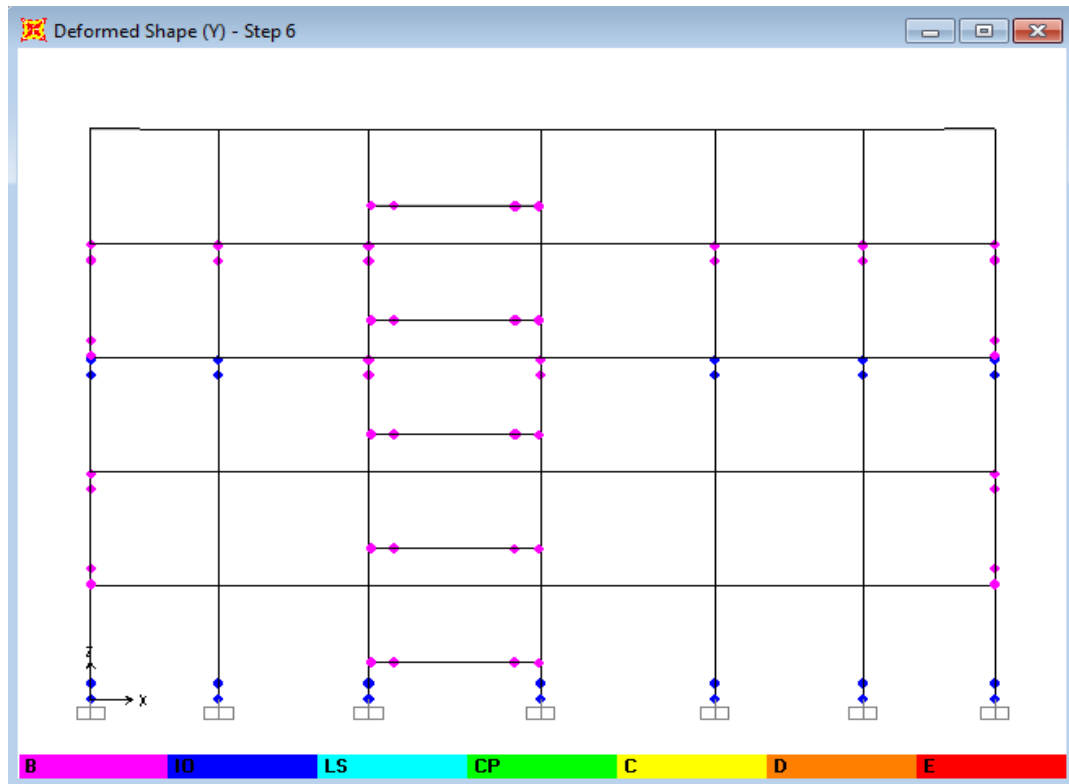


Figure 50:Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan X-Z

Plan Y_Z :

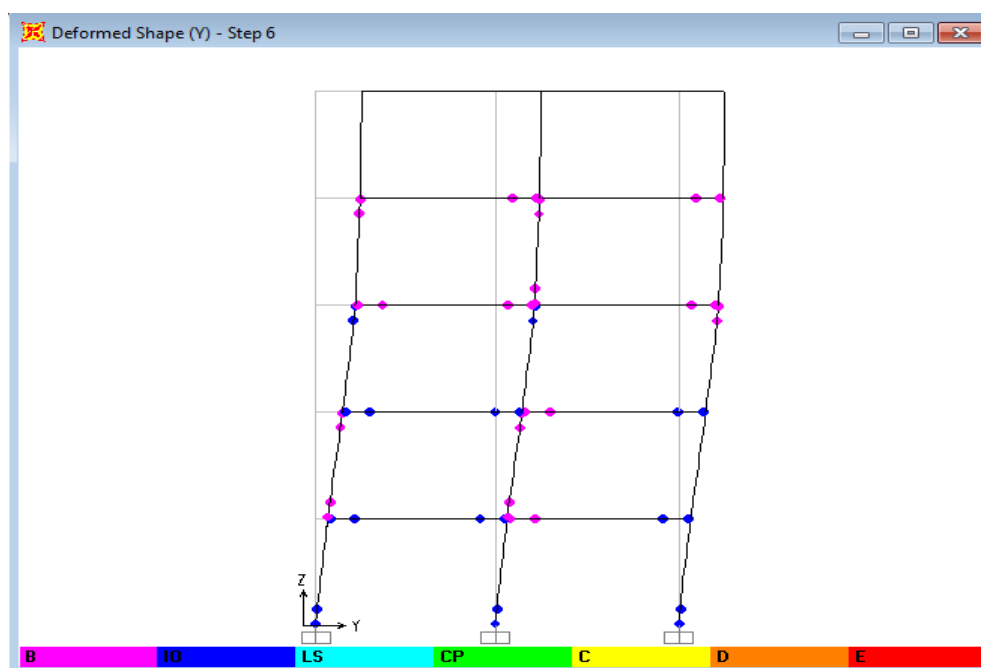


Figure 51: Développement des rotules plastiques obtenues par SAP2000 Plan Y-Z

Tableau 11: Développement des Rotules Plastiques selon push Y-Y

Step	Displacement m	Base Force KN	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	0,000387	0,000	620	20	0	0	0	0	0	0	640
1	0,011656	387,471	619	21	0	0	0	0	0	0	640
2	0,043126	1045,887	558	82	0	0	0	0	0	0	640
3	0,066763	1199,245	519	121	0	0	0	0	0	0	640
4	0,072184	1218,341	507	133	0	0	0	0	0	0	640
5	0,136478	1305,876	471	106	63	0	0	0	0	0	640
6	0,138685	1308,384	467	104	69	0	0	0	0	0	640

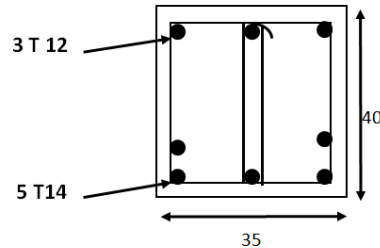
Les valeurs des rotations plastiques maximales sont données sur le tableau suivant. Ces valeurs seront comparées à celle de l'EC2 et l'EC8 dans la section suivante.

Tableau 12: Valeurs de rotations plastiques tirées du logiciel (SAP2000)

Les éléments de structure	Les rotations plastiques (rad)	
	X-X	Y-Y
Poutre principal		0,0149
Poutre secondaire	0,02	
Poutre palier	0,0232	0,000564
Poteau type1	0,0148	0,000442
Poteau type2	0,0105	0,000507

4.5 Calcul Analytique des moments-courbure des éléments de bâtiment :

4.5.1 Poutre principale :



$$h=0,4\text{m} \quad b= 0,35 \text{ m} \quad , \quad e= 0,025 \text{ m} \quad , \quad f_{c28} = 28 \text{ MPa} \quad , \quad f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$E_c = 1,05 E_{cm}$$

$$E_{cm} = 30500 \text{ MPa} \quad , \quad E_c = 32025 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} \quad , \quad f_y = 360 \text{ MPa}$$

4.5.1.1 Moment-Courbure élastique :

$$A_g = bh + (n - 1)(A_s + A_s')$$

$$A_s' = 3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad A_s = 7,7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = 0,35 \times 0,4 + (15 - 1)(7,7 \times 10^{-4} + 3,39 \times 10^{-4}) = 0,1555 \text{ m}^2$$

$$y_g = \frac{bh \frac{h}{2} + A_s (n - 1)d + A_s' (n - 1)d'}{A_g}$$

$$y_g = \frac{0,35 \times 0,4 \frac{0,4}{2} + 7,7 \times 10^{-4} (15 - 1)0,36 + 3,39 \times 10^{-4} (15 - 1)0,04}{0,1555}$$

$$= 0,206 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh\left(\frac{h}{2} - y_g\right)^2 + (n - 1)A_s(d - y_g)^2 + (n - 1)A_s'(y_g - d')^2$$

$$I_g = \frac{0,35 \times 0,4^3}{12} + 0,35 \times 0,4 \left(\frac{0,4}{2} - 0,206\right)^2$$

$$+ (15 - 1)7,7 \times 10^{-4} (0,36 - 0,206)^2$$

$$+ (15 - 1)3,39 \times 10^{-4} (0,206 - 0,04)^2 = 2,258 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$M_e = \frac{f_t I_g}{d_g} = \frac{3 \times 2,258 \times 10^{-3}}{0,206} = 0,033 \text{ MN.m}$$

$$\phi_e = \frac{M_e}{E_c I_g} = \frac{0,033}{32025 \times 2,258 \times 10^{-3}} = 4,563 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

4.5.1.2 Moment-Courbure plastique :

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{7,7 \times 10^{-4}}{0,35 \times 0,4} = 5,5 \times 10^{-3} \quad \rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{3,39 \times 10^{-4}}{0,35 \times 0,4} = 2,42 \times 10^{-3}$$

$$k = \sqrt{2n \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) + n^2 (\rho + \rho')^2 - n(\rho + \rho')}$$

$$k = \sqrt{30 \left(5,5 \times 10^{-3} + \frac{2,42 \times 10^{-3} \times 0,04}{0,36} \right) + 15^2 (5,5 \times 10^{-3} + 2,42 \times 10^{-3})^2 - 15(5,5 \times 10^{-3} + 2,42 \times 10^{-3})} = 0,314$$

$$f_s' = \frac{kd - d'}{d - kd} f_s = \frac{0,314 \times 0,36 - 0,04}{0,36 - 0,314 \times 0,36} \times 360 = 106,472 \text{ MPa}$$

$$M_y = A_s f_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) + A_s' f_s' \left(d' - \frac{kd}{3} \right)$$

$$M_y = 7,7 \times 10^{-4} \times 360 \left(0,36 - \frac{0,314 \times 0,36}{3} \right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 106,472 \left(0,04 - \frac{0,314 \times 0,36}{3} \right)$$

$$M_y = 0,08943 \text{ MN.m}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{0,01}{0,36 - 0,314 \times 0,36} = 0,0405 \text{ m}^{-1}$$

4.5.1.3 Moment-Courbure ultime :

$$c = \frac{A_s f_y - A_s' f_s'}{\eta f_c b \lambda} = \frac{7,7 \times 10^{-4} \times 360 - 3,39 \times 10^{-4} \times 106,472}{1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8} = 0,0192$$

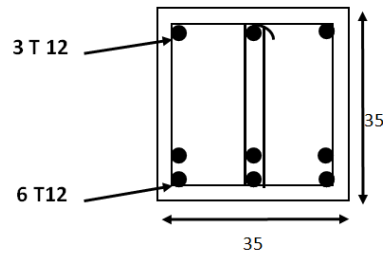
$$M_u = \eta f_c b \lambda \left(d - \frac{\lambda c}{2} \right) + A_s' f_s' (d - d')$$

$$M_u = 1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8 \times 0,0192 \left(0,36 - \frac{0,8 \times 0,0192}{2} \right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 106,472 (0,36 - 0,04)$$

$$M_U = 0,0964 \text{ MN.m}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cmax}}{c} = \frac{0,0035}{0,0192} = 0,182 \text{ m}^{-1}$$

4.5.2 Poutre secondaire :



$$h=b= 0,35 \text{ m} \quad , \quad e= 0,025 \text{ m} \quad , \quad f_{c28} = 28 \text{ MPa} \quad , \quad f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$Ec = 1,05 Ecm$$

$$Ecm = 30500 \text{ MPa} \quad , \quad Ec = 32025 \text{ MPa}$$

$$Es = 200000 \text{ MPa} \quad , \quad f_y = 360 \text{ MPa}$$

4.5.2.1 Moment-Courbure élastique :

$$A_g = bh + (n - 1)(A_s + A_s')$$

$$A_s' = 3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad A_s = 6,79 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = 0,35^2 + (15 - 1)(6,79 \times 10^{-4} + 3,39 \times 10^{-4}) = 0,1367 \text{ m}^2$$

$$y_g = \frac{bh \frac{h}{2} + A_s (n - 1)d + A_s' (n - 1)d'}{A_g}$$

$$y_g = \frac{0,35^2 \frac{0,35}{2} + 6,79 \times 10^{-4} (15 - 1)0,325 + 3,39 \times 10^{-4} (15 - 1)0,025}{0,1367}$$

$$= 0,18 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh \left(\frac{h}{2} - y_g \right)^2 + (n - 1)A_s (d - y_g)^2 + (n - 1)A_s' (y_g - d')^2$$

$$I_g = \frac{0,35^4}{12} + 0,35^2 \left(\frac{0,35}{2} - 0,18 \right)^2 + (15 - 1)6,79 \times 10^{-4} (0,325 - 0,18)^2$$

$$+ (15 - 1)3,39 \times 10^{-4} (0,18 - 0,025)^2 = 1,567 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$M_e = \frac{f_t I_g}{d_g} = \frac{3 \times 1,567 \times 10^{-3}}{0,18} = 0,026 \text{ MN.m}$$

$$\phi_e = \frac{M_e}{E_c I_g} = \frac{0,026}{32025 \times 1,567 \times 10^{-3}} = 5,181 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

4.5.2.2 Moment-Courbure plastique :

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{6,79 \times 10^{-4}}{0,35^2} = 5,54 \times 10^{-3}$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{3,39 \times 10^{-4}}{0,35^2} = 2,77 \times 10^{-3}$$

$$k = \sqrt{2n\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right) + n^2(\rho + \rho')^2 - n(\rho + \rho')}$$

$$k = \sqrt{30\left(5,54 \times 10^{-3} + \frac{2,77 \times 10^{-3} \times 0,025}{0,325}\right) + 15^2(5,54 \times 10^{-3} + 2,77 \times 10^{-3})^2 - 15(5,54 \times 10^{-3} + 2,77 \times 10^{-3})} = 0,31$$

$$f_s' = \frac{kd - d'}{d - kd} f_s = \frac{0,31 \times 0,325 - 0,025}{0,325 - 0,31 \times 0,325} \times 360 = 121,605 \text{ MPa}$$

$$M_y = A_s f_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) + A_s' f_s' \left(d' - \frac{kd}{3}\right)$$

$$M_y = 6,79 \times 10^{-4} \times 360 \left(0,325 - \frac{0,31 \times 0,325}{3}\right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 121,605 \left(0,025 - \frac{0,31 \times 0,325}{3}\right)$$

$$M_y = 0,07088 \text{ MN.m}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{0,01}{0,325 - 0,31 \times 0,325} = 0,0446 \text{ m}^{-1}$$

4.5.2.3 Moment-Courbure ultime :

$$c = \frac{A_s f_y - A_s' f_s'}{\eta f_c b \lambda} = \frac{6,79 \times 10^{-4} \times 360 - 3,39 \times 10^{-4} \times 121,605}{1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8} = 0,0162$$

$$M_u = \eta f_c c b \lambda \left(d - \frac{\lambda c}{2}\right) + A_s' f_s' (d - d')$$

$$M_u = 1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8 \times 0,0162 \left(0,325 - \frac{0,8 \times 0,0162}{2}\right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 121,605 (0,325 - 0,025)$$

$$M_u = 0,07709 \text{ MN.m}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cmax}}{c} = \frac{0,035}{0,0162} = 0,216 \text{ m}^{-1}$$

4.5.3 Poutre palier :

$$h = 0,3 \text{ m} \quad b = 0,25 \text{ m} \quad , \quad e = 0,025 \text{ m} \quad , \quad f_{c28} = 28 \text{ MPa} \quad , \quad f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$E_c = 1,05 E_{cm}$$

$$E_{cm} = 30500 \text{ MPa} \quad , \quad E_c = 32025 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} \quad , \quad f_y = 360 \text{ MPa}$$

4.5.3.1 Moment-Courbure élastique :

$$A_g = bh + (n - 1)(A_s + A_s')$$

$$A_s' = 2,26 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad A_s = 2,26 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = 0,3 * 0,25 + (15 - 1)(2,26 \times 10^{-4} + 2,26 \times 10^{-4}) = 0,0813 \text{ m}^2$$

$$y_g = \frac{bh \frac{h}{2} + A_s(n - 1)d + A_s'^{(n-1)}d'}{A_g}$$

$$y_g = \frac{0,3 * 0,25 \frac{0,3}{2} + 2,26 \times 10^{-4}(15 - 1)0,275 + 2,26 \times 10^{-4}(15 - 1)0,03}{0,0813}$$

$$= 0,15 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh\left(\frac{h}{2} - y_g\right)^2 + (n - 1)A_s(d - y_g)^2 + (n - 1)A_s'(y_g - d')^2$$

$$I_g = \frac{0,3^3 * 0,25}{12} + 0,25 * 0,3 \left(\frac{0,3}{2} - 0,15\right)^2$$

$$+ (15 - 1)2,26 \times 10^{-4}(0,275 - 0,15)^2$$

$$+ (15 - 1)2,26 \times 10^{-4}(0,15 - 0,03)^2 = 0,657 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$M_e = \frac{f_t I_g}{d_g} = \frac{3 \times 0,657 \times 10^{-3}}{0,15} = 0,01314 \text{ MN.m}$$

$$\phi_e = \frac{M_e}{E_c I_g} = \frac{0,01314}{32025 \times 0,657 \times 10^{-3}} = 6,24 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

4.5.3.2 Moment-Courbure plastique :

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{2,26 \times 10^{-4}}{0,25 * 0,275} = 3,28 \times 10^{-3}$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{2,26 \times 10^{-4}}{0,25 * 0,275} = 3,28 \times 10^{-3}$$

$$k = \sqrt{2n\left(\rho + \frac{\rho'd'}{d}\right) + n^2(\rho + \rho')^2 - n(\rho + \rho')}$$

$$k = \sqrt{30 \left(3,28 \times 10^{-3} + \frac{3,28 \times 10^{-3} \times 0,03}{0,275} \right) + 15^2 (3,28 \times 10^{-3} + 3,28 \times 10^{-3})^2 - 15(3,28 \times 10^{-3} + 3,28 \times 10^{-3})} = 0,246$$

$$f'_s = \frac{kd - d'}{d - kd} f_s = \frac{0,246 \times 0,275 - 0,03}{0,275 - 0,246 \times 0,275} \times 360 = 65,36 \text{ MPa}$$

$$M_y = A_s f_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) + A'_s f'_s \left(d' - \frac{kd}{3} \right)$$

$$M_y = 2,26 \times 10^{-4} \times 360 \left(0,275 - \frac{0,246 \times 0,275}{3} \right) + 2,26 \times 10^{-4} \times 65,36 \left(0,03 - \frac{0,246 \times 0,275}{3} \right)$$

$$M_y = 0,0206 \text{ MN.m}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{0,01}{0,275 - 0,246 \times 0,275} = 0,0482 \text{ m-1}$$

4.5.3.3 Moment-Courbure ultime :

$$c = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s}{\eta f_c b \lambda} = \frac{2,26 \times 10^{-4} \times 360 - 2,26 \times 10^{-4} \times 65,36}{1,6 \times 28 \times 0,25 \times 0,8} = 7,43 \times 10^{-3}$$

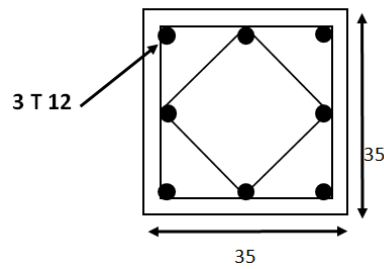
$$M_u = \eta f_c c b \lambda \left(d - \frac{\lambda c}{2} \right) + A'_s f'_s (d - d')$$

$$M_u = 1,6 \times 28 \times 0,25 \times 0,8 \times 7,43 \times 10^{-3} \left(0,275 - \frac{0,8 \times 7,43 \times 10^{-3}}{2} \right) + 2,26 \times 10^{-4} \times 65,36 (0,275 - 0,03)$$

$$M_U = 0,0217 \text{ MN.m}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cmax}}{c} = \frac{0,0035}{7,43 \times 10^{-3}} = 0,47 \text{ m-1}$$

4.5.4 Poteau type 1 :



$$h=b= 0,35 \text{ m} \quad , \quad e= 0,025 \text{ m} \quad , \quad f_{c28} = 28 \text{ MPa} \quad , \quad f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$E_c = 1,05 E_{cm}$$

$$E_{cm} = 30500 \text{ MPa} \quad , \quad E_c = 32025 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} \quad , \quad f_y = 360 \text{ MPa}$$

4.5.4.1 Moment-Courbure élastique :

$$A_g = bh + (n - 1)(A_s + A_s')$$

$$A_s' = 3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad A_s = 5,65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = 0,35^2 + (15 - 1)(5,65 \times 10^{-4} + 3,39 \times 10^{-4}) = 0,1351 \text{ m}^2$$

$$y_g = \frac{bh \frac{h}{2} + A_s(n - 1)d + A_s'^{(n-1)}d'}{A_g}$$

$$y_g = \frac{0,35^2 \frac{0,35}{2} + 5,65 \times 10^{-4}(15 - 1)0,315 + 3,39 \times 10^{-4}(15 - 1)0,035}{0,1351}$$

$$= 0,178 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh\left(\frac{h}{2} - y_g\right)^2 + (n - 1)A_s(d - y_g)^2 + (n - 1)A_s'(y_g - d')^2$$

$$I_g = \frac{0,35^4}{12} + 0,35^2 \left(\frac{0,35}{2} - 0,178\right)^2 + (15 - 1)5,65 \times 10^{-4}(0,315 - 0,178)^2$$

$$+ (15 - 1)3,39 \times 10^{-4}(0,178 - 0,035)^2 = 1,497 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$M_e = \frac{f_t I_g}{d_g} = \frac{3 \times 1,497 \times 10^{-3}}{0,178} = 0,025 \text{ MN.m}$$

$$\phi_e = \frac{M_e}{E_c I_g} = \frac{0,025}{32025 \times 1,497 \times 10^{-3}} = 5,215 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

4.5.4.2 Moment-Courbure plastique :

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{5,65 \times 10^{-4}}{0,35^2} = 4,61 \times 10^{-3}$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{3,39 \times 10^{-4}}{0,35^2} = 2,77 \times 10^{-3}$$

$$k = \sqrt{2n \left(\rho + \frac{\rho' d'}{d} \right) + n^2 (\rho + \rho')^2 - n(\rho + \rho')}$$

$$k = \sqrt{30 \left(4,61 \times 10^{-3} + \frac{2,77 \times 10^{-3} \times 0,035}{0,315} \right) + 15^2 (4,61 \times 10^{-3} + 2,77 \times 10^{-3})^2 - 15(4,61 \times 10^{-3} + 2,77 \times 10^{-3})} = 0,289$$

$$f_s' = \frac{kd - d'}{d - kd} f_s = \frac{0,289 \times 0,315 - 0,035}{0,315 - 0,289 \times 0,315} \times 360 = 90,07 \text{ MPa}$$

$$M_y = A_s f_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) + A_s' f_s' \left(d' - \frac{kd}{3} \right)$$

$$M_y = 5,65 \times 10^{-4} \times 360 \left(0,315 - \frac{0,289 \times 0,315}{3} \right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 90,07 \left(0,035 - \frac{0,289 \times 0,315}{3} \right)$$

$$M_y = 0,058 \text{ MN.m}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{0,01}{0,315 - 0,289 \times 0,315} = 0,0446 \text{ m-1}$$

4.5.4.3 Moment-Courbure ultime :

$$c = \frac{A_s f_y - A_s' f_s'}{\eta f_c b \lambda} = \frac{5,65 \times 10^{-4} \times 360 - 3,39 \times 10^{-4} \times 90,07}{1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8} = 0,0138$$

$$M_u = \eta f_c c b \lambda \left(d - \frac{\lambda c}{2} \right) + A_s' f_s' (d - d')$$

$$M_u = 1,6 \times 28 \times 0,35 \times 0,8 \times 0,0138 \left(0,315 - \frac{0,8 \times 0,0138}{2} \right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 90,07 (0,315 - 0,035)$$

$$M_u = 0,0621 \text{ MN.m}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cmax}}{c} = \frac{0,0035}{0,0138} = 0,254 \text{ m-1}$$

4.5.5 Poteau type 2 :

$$h=b= 0,3 \text{ m} \quad , \quad e= 0,025 \text{ m} \quad , \quad f_{c28} = 28 \text{ MPa} \quad , \quad f_t = 3 \text{ MPa}$$

$$E_c = 1,05 E_{cm}$$

$$E_{cm} = 30500 \text{ MPa} \quad , \quad E_c = 32025 \text{ MPa}$$

$$E_s = 200000 \text{ MPa} \quad , \quad f_y = 360 \text{ MPa}$$

4.5.5.1 Moment-Courbure élastique :

$$A_g = bh + (n - 1)(A_s + A_s')$$

$$A_s' = 3,39 \times 10^{-4} \text{ m}^2 \quad A_s = 5,65 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$A_g = 0,3^2 + (15 - 1)(5,65 \times 10^{-4} + 3,39 \times 10^{-4}) = 0,1026 \text{ m}^2$$

$$y_g = \frac{bh \frac{h}{2} + A_s(n - 1)d + A_s'^{(n-1)}d'}{A_g}$$

$$y_g = \frac{0,3^2 \frac{0,3}{2} + 5,65 \times 10^{-4}(15 - 1)0,27 + 3,39 \times 10^{-4}(15 - 1)0,03}{0,1026}$$

$$= 0,154 \text{ m}$$

$$I_g = \frac{bh^3}{12} + bh\left(\frac{h}{2} - y_g\right)^2 + (n - 1)A_s(d - y_g)^2 + (n - 1)A_s'(y_g - d')^2$$

$$I_g = \frac{0,3^4}{12} + 0,3^2 \left(\frac{0,3}{2} - 0,154\right)^2 + (15 - 1)5,65 \times 10^{-4}(0,27 - 0,154)^2$$

$$+ (15 - 1)3,39 \times 10^{-4}(0,154 - 0,03)^2 = 0,855 \times 10^{-3} \text{ m}^4$$

$$M_e = \frac{f_t I_g}{d_g} = \frac{3 \times 0,855 \times 10^{-3}}{0,154} = 0,0167 \text{ MN.m}$$

$$\phi_e = \frac{M_e}{E_c I_g} = \frac{0,025}{32025 \times 0,855 \times 10^{-3}} = 9,13 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$$

4.5.5.2 Moment-Courbure plastique :

$$\rho = \frac{A_s}{bd} = \frac{5,65 \times 10^{-4}}{0,35^2} = 4,61 \times 10^{-3}$$

$$= 2,77 \times 10^{-3}$$

$$\rho' = \frac{A_s'}{bd} = \frac{3,39 \times 10^{-4}}{0,35^2}$$

$$k = \sqrt{2n\left(\rho + \frac{\rho' d'}{d}\right) + n^2(\rho + \rho')^2 - n(\rho + \rho')}$$

$$k = \sqrt{30\left(4,61 \times 10^{-3} + \frac{2,77 \times 10^{-3} \times 0,03}{0,27}\right) + 15^2(4,61 \times 10^{-3} + 2,77 \times 10^{-3})^2 - 15(4,61 \times 10^{-3} + 2,77 \times 10^{-3})} = 0,289$$

$$f'_s = \frac{kd - d'}{d - kd} f_s = \frac{0,289 \times 0,27 - 0,03}{0,27 - 0,289 \times 0,27} \times 360 = 90,07 \text{ MPa}$$

$$M_y = A_s f_s \left(d - \frac{kd}{3}\right) + A'_s f'_s \left(d' - \frac{kd}{3}\right)$$

$$M_y = 5,65 \times 10^{-4} \times 360 \left(0,27 - \frac{0,289 \times 0,27}{3}\right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 90,07 \left(0,03 - \frac{0,289 \times 0,27}{3}\right)$$

$$M_y = 0,0513 \text{ MN.m}$$

$$\phi_y = \frac{\varepsilon_y}{d - kd} = \frac{0,01}{0,27 - 0,289 \times 0,27} = 0,0521 \text{ m}^{-1}$$

4.5.5.3 Moment-Courbure ultime :

$$c = \frac{A_s f_y - A'_s f'_s}{\eta f_c b \lambda} = \frac{5,65 \times 10^{-4} \times 360 - 3,39 \times 10^{-4} \times 90,07}{1,6 \times 28 \times 0,3 \times 0,8} = 0,0161$$

$$M_u = \eta f_c c b \lambda \left(d - \frac{\lambda c}{2}\right) + A'_s f'_s (d - d')$$

$$M_u = 1,6 \times 28 \times 0,3 \times 0,8 \times 0,0161 \left(0,27 - \frac{0,8 \times 0,0161}{2}\right) + 3,39 \times 10^{-4} \times 90,07 (0,27 - 0,03)$$

$$M_U = 0,053 \text{ MN.m}$$

$$\phi_u = \frac{\varepsilon_{cmax}}{c} = \frac{0,0035}{0,0161} = 0,217 \text{ m}^{-1}$$

Les valeurs trouvées sont résumées dans le tableau suivant

Tableau 13: résultat des moment-courbure

Moment –courbure	$M_e(\text{MN.m})$	$\phi_e(\text{m}^{-1})$	$M_y(\text{MN.m})$	$\phi_y(\text{m}^{-1})$	$M_U(\text{MN.m})$	$\phi_u(\text{m}^{-1})$
Poutre principale	0,033	$4,563 \times 10^{-4}$	0,08943	0,0405	0,0964	0,182

Poutre secondaire	0,026	$5,181 \times 10^{-4}$	0,07088	0,0446	0,07709	0,216
Poutre palier	0,01314	$6,24 \times 10^{-4}$	0,0206	0,0482	0,0217	0,47
Poteau type 1	0,025	$5,215 \times 10^{-4}$	0,058	0,0446	0,0621	0,254
Poteau type 2	0,0167	$9,13 \times 10^{-4}$	0,0589	0,0521	0,0529	0,217

4.6 Calcul de rotation des rotules plastiques :

4.6.1 Capacité de rotation des rotules plastiques selon EC8

4.6.1.1 Poutre principal

Tableau 14:caractéristique de la poutre principale (moment-courbure, longueur de la travée)

Travée	Lv(m)	$M_e(\text{KN.m})$	$\phi_e(m^{-1})$	$M_y(\text{KN.m})$	$\phi_y(m^{-1})$	$M_u(\text{KN.m})$	$\phi_u(m^{-1})$
Travée1	4,35	33,1	$4,563 \times 10^{-4}$	89,43	0,0405	96,4	0,182
Travée2	4,45						

$$L_p = a_{st}(0.08L_v + 0.022 f_y d_{bl})$$

Travée 1:

$$L_p = 0,8(0,08(4350) + 0,022(360)(14)) = \mathbf{0,36m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,182 - 0,0405) 0,36\left(1 - \frac{0,36}{2 \times 4,35}\right)$$

$$\theta_{p,u} = \mathbf{0,0488 \text{ rad}}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5L_p}{L_v}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0405 \frac{0,36}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 \times 0,36}{4,35}\right)\right)$$

$$\theta_y = \mathbf{0,0142 \text{ rad}}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,0142 + 0,0488$$

$$\theta_u = \mathbf{0,063 \text{ rad}}$$

Travé2:

$$L_p = 0,8(0,08(4450) + 0,022(360)(14)) = 0,37\text{m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,182 - 0,0405) 0,37\left(1 - \frac{0,37}{2 \times 4,45}\right)$$

$$\theta_{p,u} = 0,0501 \text{ rad}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5L_p}{Lv}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0405 \frac{0,37}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 \times 0,37}{4,45}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0146 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,0146 + 0,0501$$

$$\theta_u = 0,0647 \text{ rad}$$

Tableau 15: Résultat de calcul pour poutre principale

Poutre principale	Lp(m)	θ_y (rad)	θ_u (rad)
Travé1	0,36	0,0142	0,063
Travé2	0,37	0,0146	0,0647

4.6.1.2 Poutre secondaire :**Tableau 16: caractéristique de la poutre secondaire (moment-courbure, longueur de la travée)**

Travée	Lv(m)	M_e (KN.m)	ϕ_e (m^{-1})	M_y (KN.m)	ϕ_y (m^{-1})	M_u (KN.m)	ϕ_u (m^{-1})
Travé1	3,15	26	$5,181 \times 10^{-4}$	70,88	0,0446	77,09	0,216
Travé2	3,7						
Travé3	4,25						
Travé4	4,3						
Travé5	3,65						
Travé6	3,25						

Travé1

$$L_p = 0,8(0,08(3150) + 0,022(360)(12)) = 0,27\text{m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,216 - 0,0446) 0,27\left(1 - \frac{0,27}{2 \times 3,15}\right)$$

$$\theta_{p,u} = 0,0442 \text{ rad}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5L_p}{Lv}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0446 \frac{0,27}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 \times 0,27}{3,15}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0117 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,0117 + 0,0442$$

$$\theta_u = 0,0559 \text{ rad}$$

Tableau 17: Résultat de calcul pour poutre secondaire

Poutre secondaire	$L_p(\text{m})$	$\theta_y(\text{rad})$	$\theta_u(\text{rad})$
Travé1	0,27	0,0117	0,0559
Travé2	0,31	0,01353	0,0644
Travé3	0,34	0,0148	0,0707
Travé4	0,35	0,0152	0,0727
Travé5	0,30	0,0131	0,0624
Travé6	0,28	0,0122	0,0581

4.6.1.3 Poutre palier :

Tableau 18: caractéristique de la poutre palier (moment-courbure, longueur de la travée)

Travée	$L_v(\text{m})$	$M_e(\text{KN.m})$	$\phi_e(\text{m}^{-1})$	$M_y(\text{KN.m})$	$\phi_y(\text{m}^{-1})$	$M_u(\text{KN.m})$	$\phi_u(\text{m}^{-1})$
Travé1	4,25	13,14	$6,24 \times 10^{-4}$	20,6	0,0482	21,7	0,47

$$L_p = 0,8(0,08(4250) + 0,022(360)(12)) = 0,34\text{m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,47 - 0,0482) 0,34 \left(1 - \frac{0,34}{2 \times 4,25}\right)$$

$$\theta_{p,u} = 0,1376 \text{ rad}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 L_p}{L_v}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0482 \frac{0,34}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 \times 0,34}{4,25}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,016 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,016 + 0,1376$$

$$\theta_u = 0,1536 \text{ rad}$$

Tableau 19: Résultat de calcul pour poutre palier

Poutre palier	Lp(m)	θ_y (rad)	θ_u (rad)
Travé1	0,34	0,016	0,1536

4.6.1.4 Poteau type 1 :

Tableau 20: caractéristique du poteau 1 (moment-courbure, longueur de la travée)

Travée	Lv(m)	M_e (KN.m)	ϕ_e (m^{-1})	M_y (KN.m)	ϕ_y (m^{-1})	M_u (KN.m)	ϕ_u (m^{-1})
Travé1	3,06	25	$5,215 \times 10^{-4}$	58	0,0446	62,1	0,254

$$L_p = 0,8(0,08(3060) + 0,022(360)(12)) = 0,27 \text{ m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y) L_p \left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,254 - 0,0446) 0,27 \left(1 - \frac{0,27}{2 \times 3,06}\right)$$

$$\theta_{p,u} = 0,054 \text{ rad}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 L_p}{L_v}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0446 \frac{0,27}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 \times 0,27}{3,06}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0117 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,0117 + 0,054$$

$$\theta_u = 0,0657 \text{ rad}$$

Tableau 21:Résultat de calcul pour poteau type1

Poteau type 1	Lp(m)	$\theta_y(\text{rad})$	$\theta_u(\text{rad})$
Travé1	0,27	0,0117	0,0657

4.6.1.5 Poteau type 2 :

Tableau 22:caractéristique du poteau type2 (moment-courbure, longueur de la travée)

Travée	Lv(m)	$M_e(\text{KN.m})$	$\phi_e(m^{-1})$	$M_y(\text{KN.m})$	$\phi_y(m^{-1})$	$M_U(\text{KN.m})$	$\phi_u(m^{-1})$
Travé1	3,06	16,7	$9,13 \times 10^{-4}$	51,3	0,0521	53	0,217

$$L_p = 0,8(0,08(3060) + 0,022(360)(12)) = 0,27\text{m}$$

$$\theta_{p,u} = (\phi_u - \phi_y)L_p\left(1 - \frac{L_p}{2L}\right)$$

$$\theta_{p,u} = (0,217 - 0,0521) 0,27 \left(1 - \frac{0,27}{2 \times 3,06}\right)$$

$$\theta_{p,u} = 0,0425 \text{ rad}$$

$$\theta_y = \phi_y \frac{L_p}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5L_p}{Lv}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0521 \frac{0,27}{2} \left(1 + \left(1 - \frac{0,5 \times 0,27}{3,06}\right)\right)$$

$$\theta_y = 0,0137 \text{ rad}$$

$$\theta_u = \theta_y + \theta_{p,u}$$

$$\theta_u = 0,0137 + 0,0425$$

$$\theta_u = 0,0562 \text{ rad}$$

Tableau 23:Résultat de calcul pour poteau type2

Poteau type 2	Lp(m)	$\theta_y(\text{rad})$	$\theta_u(\text{rad})$
Travé1	0,27	0,0137	0,0562

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des valeurs

Tableau 24: les valeurs de rotation des rotules plastiques de toute la structure avec l'EC8

Les éléments structurent	Travée	Lp(m)	$\theta_y(\text{rad})$	$\theta_u(\text{rad})$
Poutre principale	Travé1	0,360	0,0142	0,063
	Travé2	0,37	0,0146	0,0647
Poutre secondaire	Travé1	0,27	0,0117	0,0559
	Travé2	0,31	0,01353	0,0644
	Travé3	0,34	0,0148	0,0707
	Travé4	0,35	0,0152	0,0727
	Travé5	0,30	0,0131	0,0624
	Travé6	0,28	0,0122	0,0581
Poutre palier	Travé1	0,34	0,016	0,1536
Poteau type 1	Travé1	0,27	0,0117	0,0657
Poteau type 2	Travé1	0,27	0,0137	0,0562

4.6.2 Capacité de rotation des rotules plastiques selon l'EC2 :

4.6.2.1 Poutre principale :

$$X_u = n \frac{(A_{st} + A_{sc})}{b} \left(\sqrt{1 + \frac{2b(dA_{st} + d'A_{sc})}{n(A_{st} + A_{sc})^2}} - 1 \right)$$

$$A_{st} = 5T14 = 7,7 \text{ cm}^2$$

$$A_{sc} = 3T12 = 3,39 \text{ cm}^2$$

$$h = 0,4 \text{ m}$$

$$b = 0,35 \text{ m}$$

$$X_u = 15 \frac{(7,7 \cdot 10^{-4} + 3,39 \cdot 10^{-4})}{0,35} \left(\sqrt{1 + \frac{2b(0,375 \cdot 7,7 \cdot 10^{-4} + 0,04 \cdot 3,39 \cdot 10^{-4})}{15(7,7 \cdot 10^{-4} + 3,39 \cdot 10^{-4})^2}} - 1 \right)$$

$$X_u = 0,12 \text{ m}$$

$$\frac{x_u}{d} = \frac{0,12}{0,375} = 0,32 \text{ m}$$

Dans le Model Code 78 :

$$\theta_{pl} = \frac{0,004}{x_u/d} = \frac{0,004}{0,32} = \mathbf{0,0125 \text{ rad}}$$

$$X_u/d = 0,32$$

, classe B, C50/60

Dans la région des rotules plastiques, il convient pour x_u/d de ne pas excéder 0,45 pour des bétons de classe de résistance inférieure ou égale à C50/60, et à 0,23 pour des bétons de classe de résistance supérieure ou égale à C55/67.

On projection X_u/d au diagramme sur

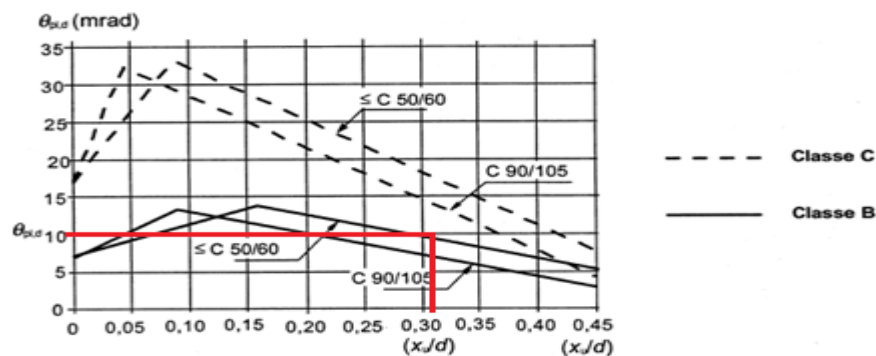


Figure 52:Projection du X_u/d sur le diagramme de Valeur de base de la capacité rotation admissible

$$\theta_{pld} = 11 \text{ Mrad} = \mathbf{0,011 \text{ rad}}$$

Le tableau suivant récapitule l'ensemble des valeurs trouvées par l'EC2

Tableau 25:les valeurs de capacité de rotation des rotules plastiques de toute la structure avec le EC2

Les éléments	$X_u(m)$	$X_u/d(m)$	$\theta_{pld} \text{ (rad)}$
Poutre principal	0,12	0,32	0,010
Poutre secondaire	0,11	0,29	0,011
Poutre palier	0,067	0,24	0,013
Poteau type 1	0,10	0,30	0,011
Poteau type 2	0,091	0,33	0,009

4.7 Comparaison des valeurs des rotations plastiques des rotules entre EC2, EC8, et calcule numérique :

Le tableau ci-après donne une comparaison entre les valeurs de rotations plastiques calculées numériquement et celles données par la réglementation EC2 et EC8.

Tableau 26: comparaison des valeurs des rotations plastiques des rotules entre EC2, EC8, et calcule sap

Les éléments	EC2 (rad)	EC8 (rad)	Logiciel (sap2000) X-X	Logiciel (sap2000) y-y
poutres principales	0,010	0,0647		0,0149
Poutre secondaire	0,011	0,0727	0,02	
Poutre palier	0,013	0,1536	0,0232	0,000564
Poteau type1	0,011	0,0657	0,0148	0,000442
Poteau type2	0,009	0,0562	0,0105	0,000507

4.8 Conclusion :

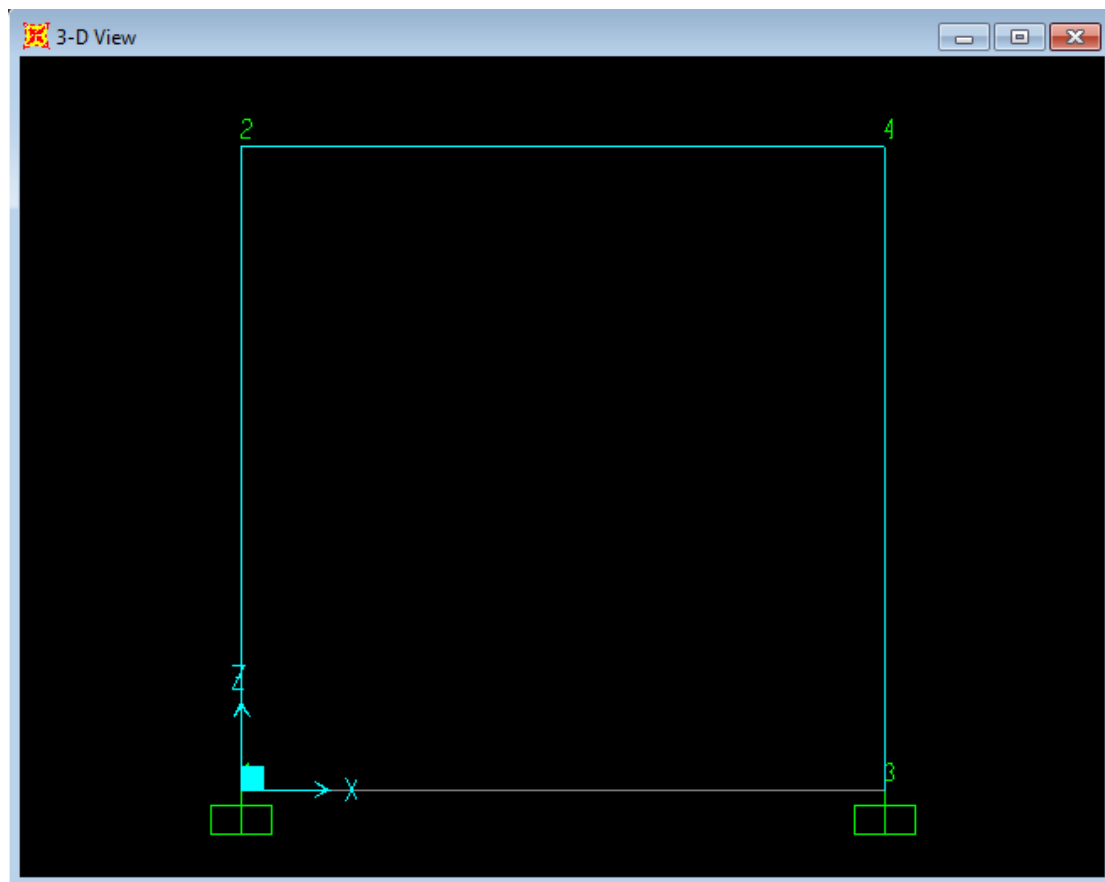
Dans ce chapitre, un calcul statique non linéaire (PUSHOVER) a été fait pour le bâtiment étudié. Cette analyse permet d'évaluer le comportement plastique des rotules de cette structure à travers l'estimation des efforts et des déplacements susceptibles d'être atteints sous les actions des charges. On a utilisé le SAP 2000 pour la détermination de la courbe de capacité où toutes les étapes ont été illustrées. Cette courbe de capacité est la représentation de la réponse de la structure dans le domaine plastique. Réglementairement, le calcul plastique est obligatoire pour les structures classiques. Contrairement au calcul statique, le dimensionnement sismique plastique doit être accompagné de vérification des valeurs des rotations plastique. Une rotule plastique ne doit pas présenter une rotation excessive. L'EC8 et L'EC2 fournissent des formules de vérifications. Ces formules ont été critiquées dans le travail de thèse de Mr Nouali.

chapitre 5 Analyse plastique avec contrôle de la dissipation

Dans ce qui suit, nous allons réaliser une analyse plastique globale (Push-Over) tout en contrôlant la dissipation plastique. Dans la première partie, un portique 2D est choisi pour la simulation. L'objectif est de voir si le contrôle de la dissipation plastique influence la courbe de capacité. La deuxième partie est consacrée à un portique à plusieurs étages représentant une file d'un bâtiment.

5.1 Contrôle des rotations plastiques sur portique:

Il s'agit d'un portique auto stable en béton armé d'une hauteur de 3m avec une poutre de 3m. Les poteaux sont de section $(35 \times 35) \text{ cm}^2$ et la poutre est de section $(35 \times 35) \text{ cm}^2$



Après l'analyse plastique, les valeurs des rotations plastiques maximales obtenues au niveau des quatre rotules sont données sur le tableau suivant :

Tableau 27: Comparaison des valeurs des rotations plastique des rotules entre EC2, EC8, et calcule Sap

	Valeur SAP (rad)	EC2 (rad)	EC8 (rad)
Rotule 1	0,0118	0,011	0,0538
Rotule 2	0,0118	0,011	0,0538
Rotule 3	0,0118	0,011	0,0538
Rotule 4	0,0118	0,011	0,0538

5.1.1 Ordre d'apparition des rotules :

L'ordre d'apparition des rotules est donné par les figures suivantes

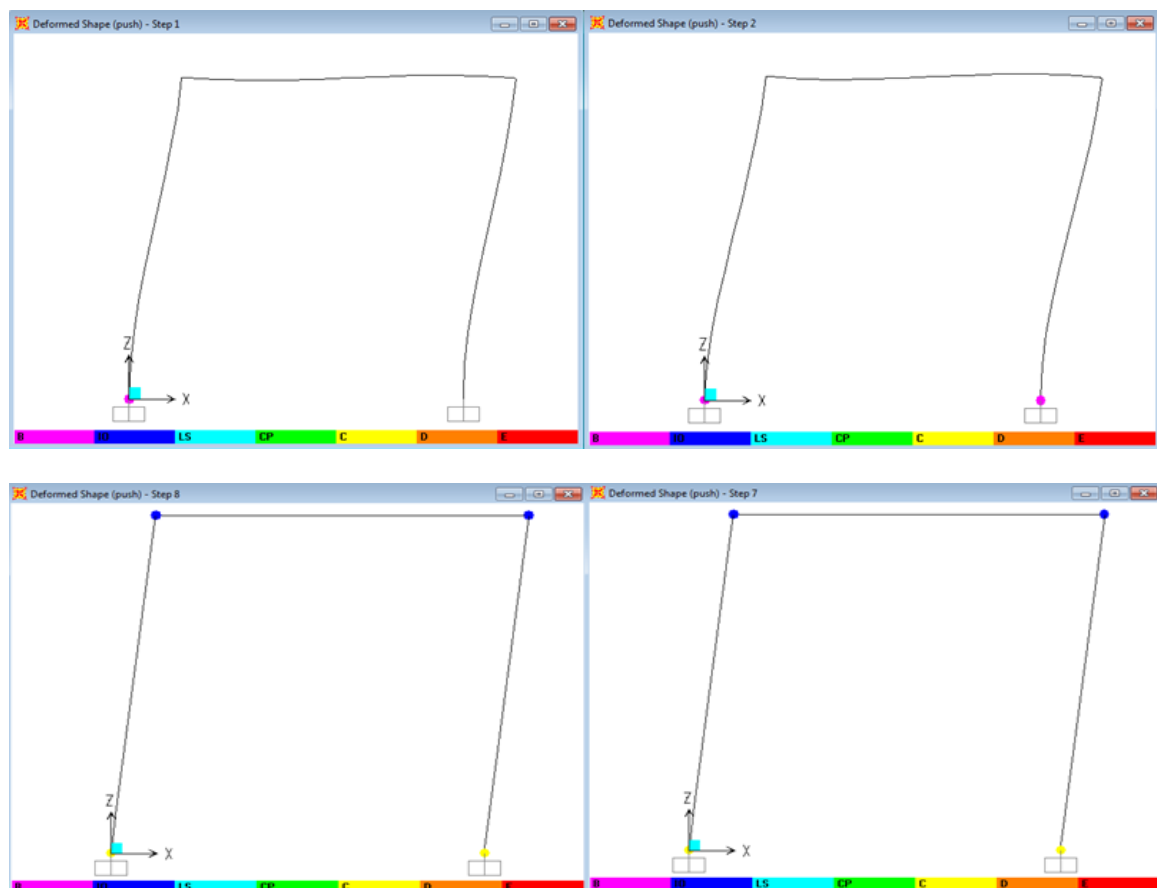


Figure 53 Ordre d'apparition des rotules

5.1.2 La courbe de capacité obtenue par le SAP :

La courbe de capacité est illustrée sur la figure suivante. Cette courbe est obtenue sans contrôler la dissipation. Cad, les rotations plastiques obtenues sont libres. Aucune limite n'est appliquée sur les valeurs.

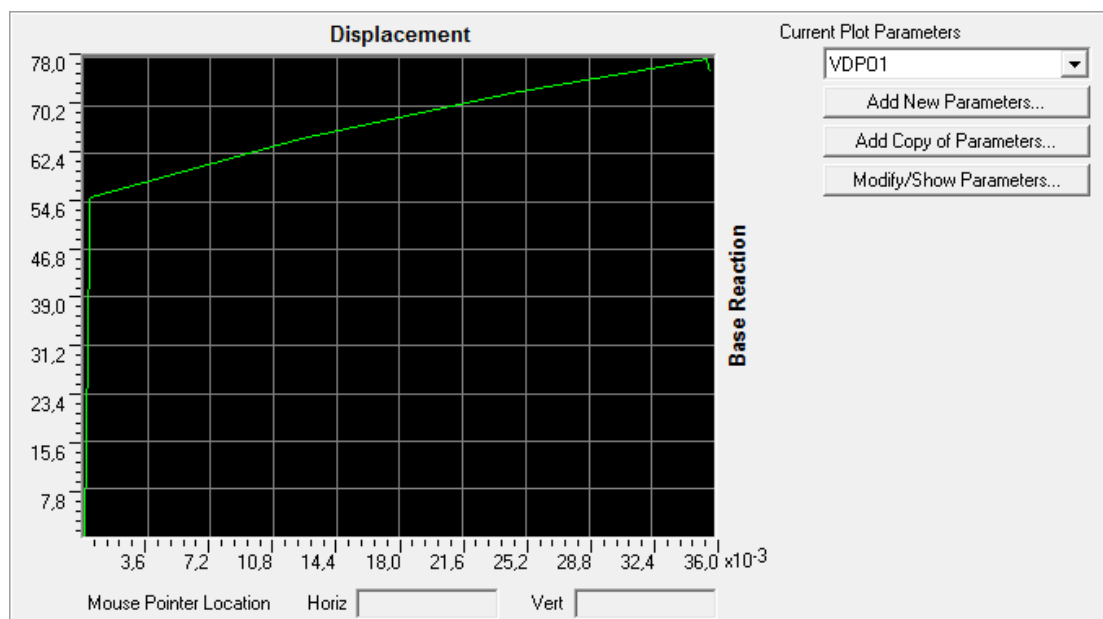


Figure 54 Courbe de Capacité du portique

Les valeurs de cette courbe sont données sur le tableau suivant

Tableau 28: courbe de capacité (push-over) du portique

Step	Displacement m	Base Force KN	AtoB	BtoD	DtoLS	LS to CP	CP to C	C to D	D to E	Beyond E	Total
0	0.000020	0.000	4	0	0	0	0	0	0	0	4
1	0.000236	48.373	3	1	0	0	0	0	0	0	4
2	0.000275	53.343	2	2	0	0	0	0	0	0	4
3	0.000302	54.833	1	3	0	0	0	0	0	0	4
4	0.000328	55.367	0	4	0	0	0	0	0	0	4
5	0.012328	64.673	0	2	2	0	0	0	0	0	4
6	0.024328	72.100	0	2	0	2	0	0	0	0	4
7	0.035525	77.687	0	0	2	0	0	2	0	0	4
8	0.035724	75.528	0	0	2	0	0	2	0	0	4

5.1.3 Contrôle de la dissipation :

5.1.3.1 Les diagrammes des déplacements en fonction de la rotation des 4 rotules :

5.1.3.1.1 Contrôle par l'EC2 et l'EC8 :

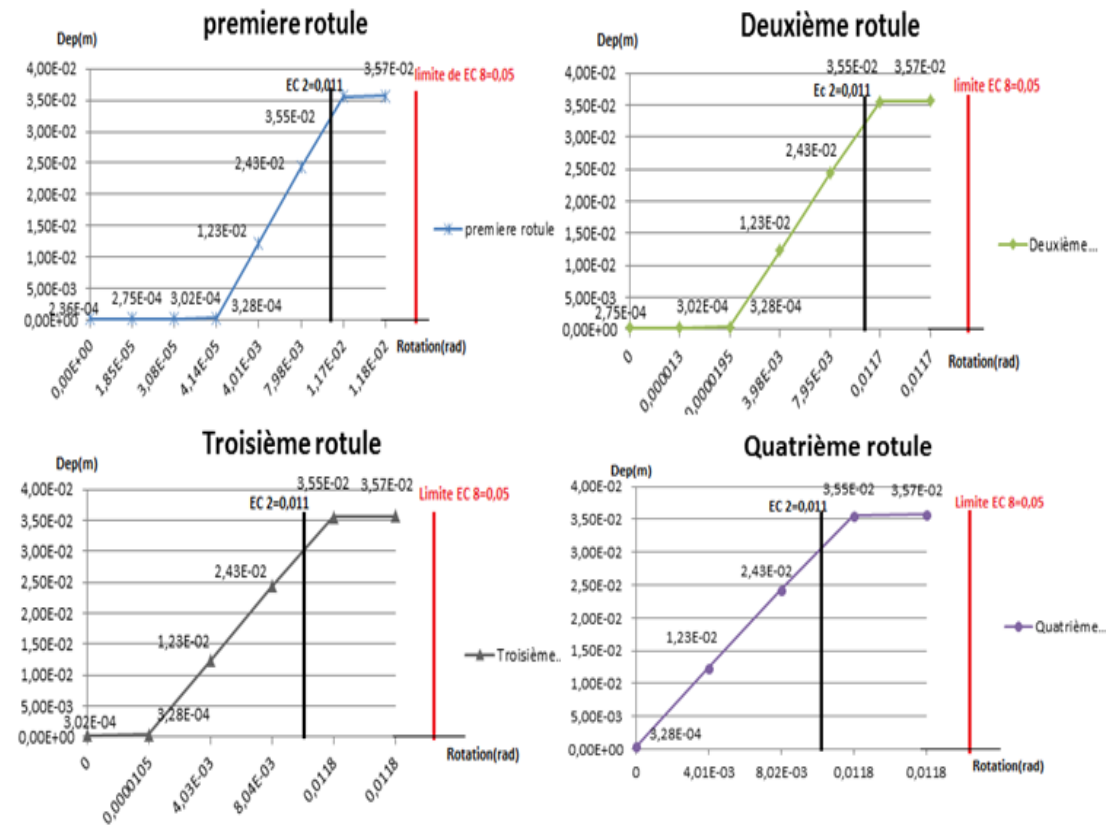


Figure 55 Valeurs de rotations plastiques des quatre rotules et comparaison avec les valeurs limites des ECs

Remarque : la rotation limite des 4 rotules n'atteint pas la valeur de rotation de l'euro-code 8 (la courbe de capacité reste la même), mais elle dépasse la valeur de l'euro-code 2 au step7 (la courbe de capacité s'arrête au step7)

5.1.3.2 Courbe de capacité contrôlée:

5.1.3.2.1 Par l'euro-code 8 :

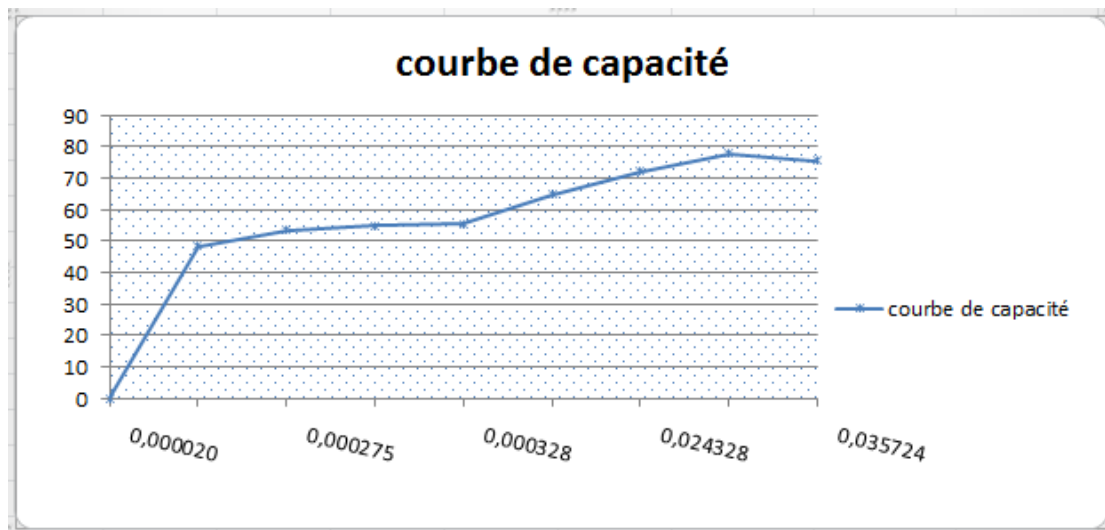


Figure 56 Courbe de capacité avec contrôle avec l'EC8

5.1.3.2.2 Par l'euro-code 2 :

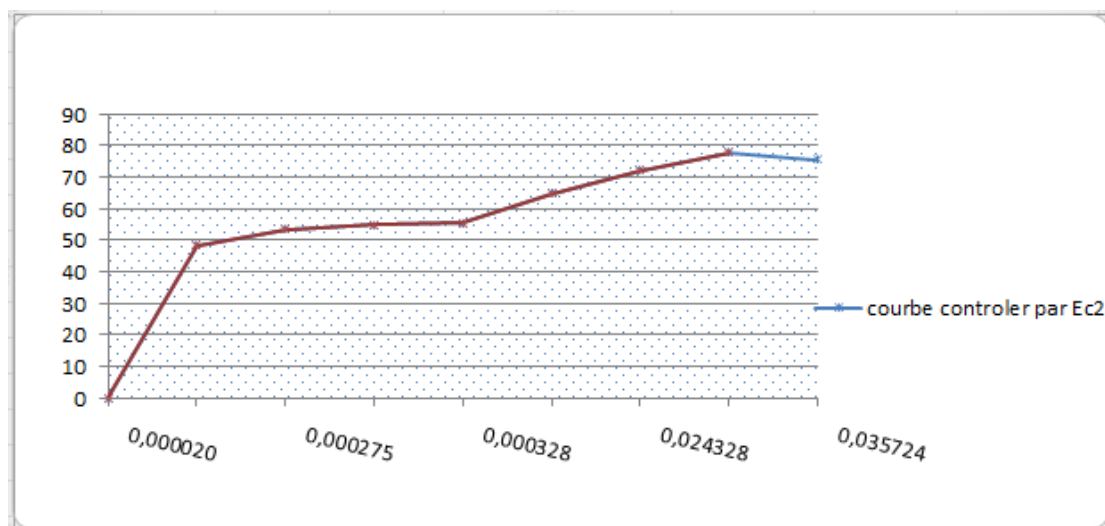


Figure 57 Courbe de capacité avec contrôle avec l'EC2

5.1.4 Conclusion :

Le contrôle de la rotation limite par l'EC2 sur le portique étudié affecte notre courbe de capacité obtenue (la limite de rotation maximale dépasse la limite l'EC2) par contre par rapport à la limite l'EC8 la courbe n'est pas modifiée (la limite de rotation maximale ne dépasse pas la limite d'euro-code 8).

Le portique étudié est d'un degré d'hyperstaticité faible ce qui ne permet pas de voir une grande différence entre une analyse avec et sans contrôle. Dans ce qui suit, nous étudierons une file d'un bâtiment avec un degré d'hyperstaticité élevé.

5.2 Portique avec un degré d'hyperstaticté élevé:

La figure suivante présente le portique multi-étages. Le degré d'hyperstaticité élevé permet d'appréhender l'influence de la limitation des rotules plastiques sur la dissipation.

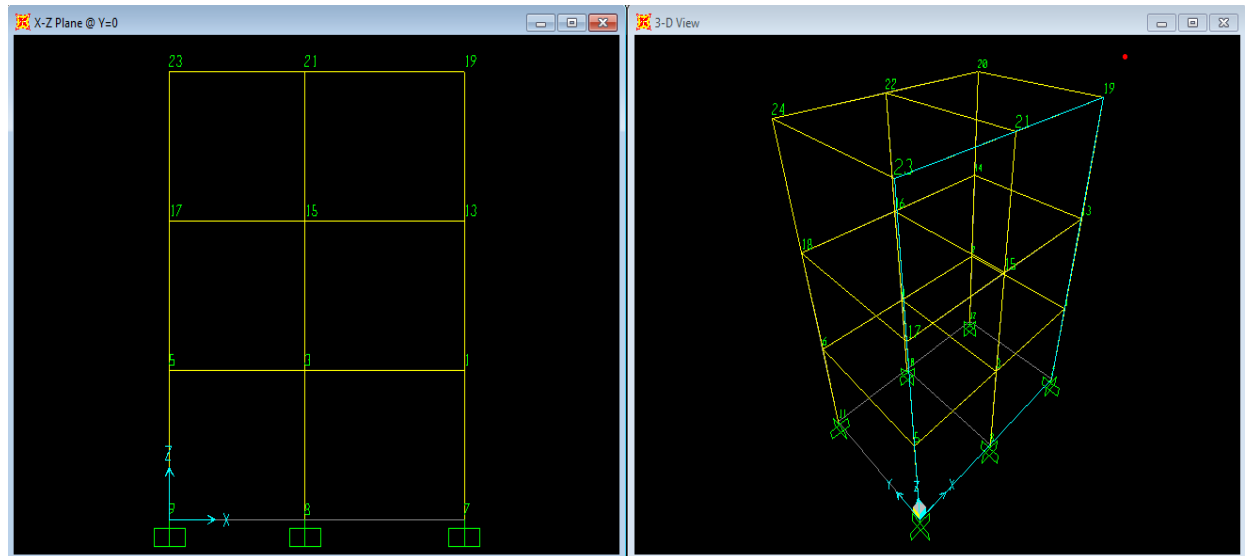


Figure 58 Portique multi-étages

5.2.1 Formulation des rotules par rapport au step :

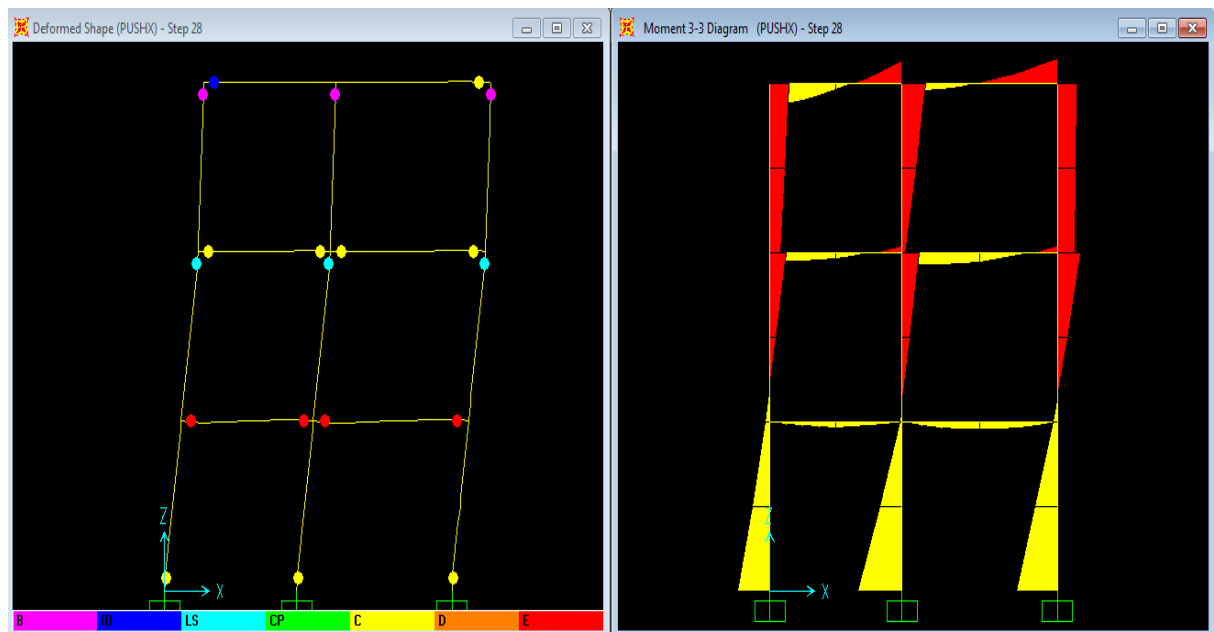


Figure 59 Rotules plastiques

5.2.2 Resultat des rotations limites calculés :

Les valeurs des rotations plastiques limites données par l'EC2 et l'EC8 des poutres et des poteaux sont données par

Les éléments	EC2 (rad)	EC8 (rad)
poutres principales	0,010	0,064
Poutre secondaire	0,011	0,0559
Poteau type1	0,011	0,065
Poteau type2	0,009	0,056

Notre contrôle est basé sur la courbe de FEMA suivante

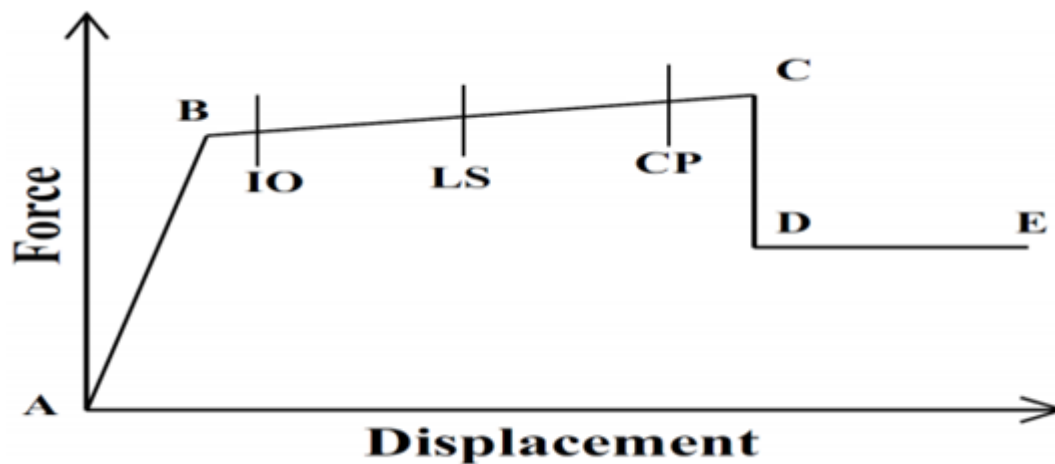


Figure 60: courbe de FEMA

Le point A : L'origine ;

Le point B : L'initiation de la plastification (formation de la rotule plastique) ;

Le point C : La capacité ultime ;

Le point D : La résistance résiduelle ;

Le point E : La ruine totale ;

Après le point E, il est possible de faire chuter la charge à zéro ou bien d'extrapoler la courbe.

5.2.3 La courbe de push-over avec et sans contrôle:

La courbe de capacité obtenue est représentée sur la figure suivante

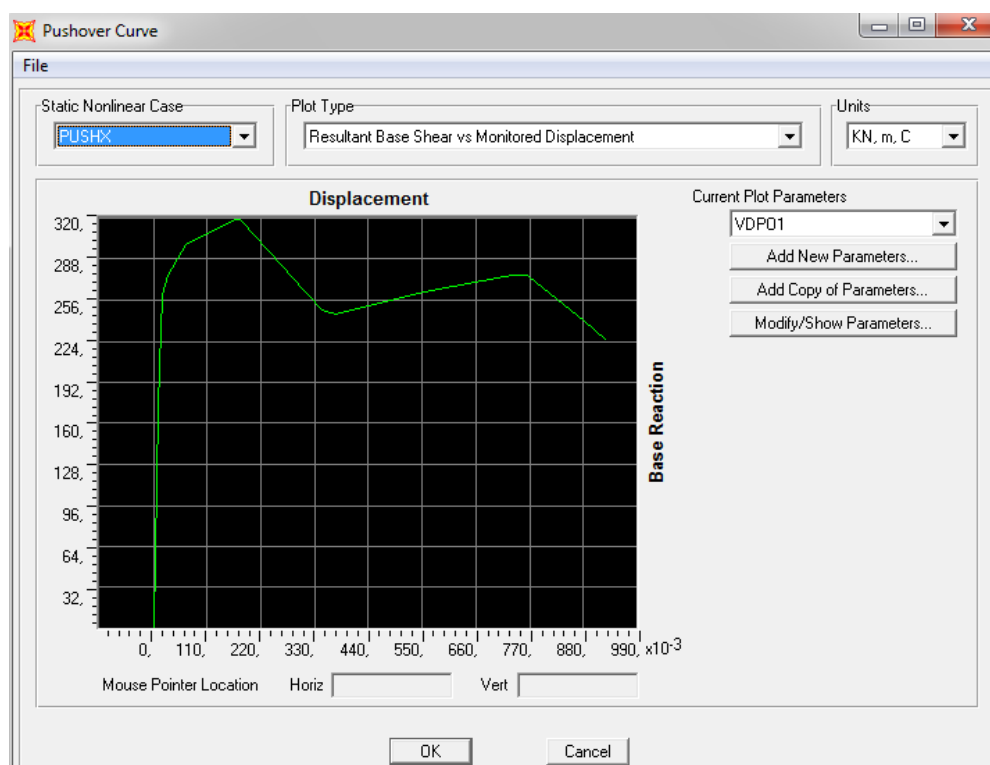


Figure 61 Courbe de capacité

Et les valeurs sont données dans le tableau suivant

Tableau 29:push-over par rapport à la ruine de la première rotule

Step	Displacement m	BaseForce KN	AtoB	BtoD	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0.000013	0.000	78	0	0	0	0	0	0	0	78
1	0.009333	172.148	76	2	0	0	0	0	0	0	78
2	0.014249	232.907	68	10	0	0	0	0	0	0	78
3	0.017462	257.528	62	16	0	0	0	0	0	0	78
4	0.018171	260.320	60	18	0	0	0	0	0	0	78
5	0.029396	275.478	56	22	0	0	0	0	0	0	78
6	0.066780	299.414	48	30	0	0	0	0	0	0	78
7	0.166780	318.706	48	10	12	6	0	2	0	0	78
8	0.174187	319.029	48	10	12	4	0	4	0	0	78
9	0.176620	318.733	48	10	12	2	0	6	0	0	78
10	0.181306	317.431	48	10	12	0	0	8	0	0	78
11	0.287646	271.871	48	10	12	0	0	8	0	0	78
12	0.307313	263.331	48	10	12	0	0	6	2	0	78
13	0.319775	259.746	48	10	12	0	0	4	0	4	78
14	0.328188	256.059	48	10	12	0	0	2	2	4	78
15	0.328188	256.059	48	10	12	0	0	2	0	6	78
16	0.337130	252.134	48	10	12	0	0	0	2	6	78
17	0.337130	252.134	48	10	12	0	0	0	0	8	78
18	0.342757	249.661	48	10	12	0	0	0	0	8	78
19	0.349962	247.595	48	10	12	0	0	0	0	8	78
20	0.364223	245.698	48	10	12	0	0	0	0	8	78
21	0.372690	245.585	48	10	12	0	0	0	0	8	78
22	0.556395	262.530	42	8	14	6	0	0	0	8	78
23	0.656395	269.769	42	8	6	14	0	0	0	8	78
24	0.733589	275.057	40	8	2	14	4	2	0	8	78
25	0.762853	275.087	40	8	2	10	6	4	0	8	78
26	0.768492	274.518	40	8	2	8	6	6	0	8	78

La première rotule atteint la ruine au **step 12** donc la courbe push-over sera arrêtée à ce stade. La figure suivante présente les deux courbes de capacité avec et sans contrôle.

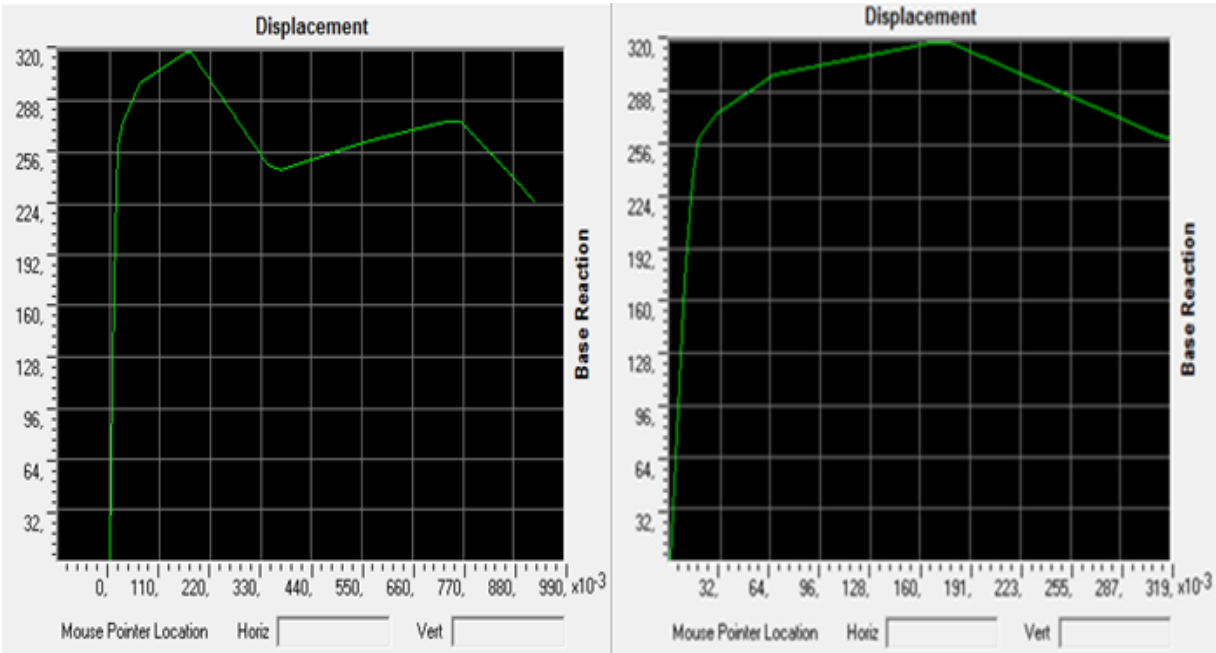


Figure 62: Comparaison entre la courbe de capacité son et avec contrôle

5.2.4 Résultats de rotation limites des rotules donnés par le SAP :

Les tableaux suivants donnent les valeurs des rotations limites obtenues par le SAP. Le contrôle a été réalisé en comparant les valeurs limites des rotules avec celles fournis par la courbe moment-rotation fournie par le FEMA. Le premier tableau donne des informations sur toutes les rotules. Les deux derniers tableaux donnent séparément les rotules ayant dépassé les valeurs limites et les rotules qui peuvent dissiper encore.

Tableau 30 Informations sur les rotules plastiques

TABLE: Frame Hinge States											
StepType	AssignHinge	GenHinge	RelDist	AbsDist	U3Plastic	R3Plastic	HingeState	HingeStatus			
Text	Text	Text	Unitle	m	m	Radiar	Text	Text			
Min	Auto M3	5H2	1	3,7	0	-0,059412	>E	>CP			VRAI
Max	Auto M3	6H1	0	0	0	0,055301	>E	>CP			FAUX
Min	Auto M3	6H2	1	3,15	0	-0,055335	>E	>CP			FAUX
Max	Auto M3	7H1	0	0	0	0,059468	>E	>CP			VRAI
Min	Auto M3	7H2	1	3,7	0	-0,059412	>E	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	8H1	0	0	0	0,124877	C to D	>CP	0,065		VRAI
Max	FH1POT35	9H1	0	0	0	0,12464	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	10H1	0	0	0	0,125722	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	11H1	0	0	0	0,12464	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	12H1	0	0	0	0,125722	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	13H1	0	0	0	0,124877	C to D	>CP			VRAI
Max	Auto M3	17H1	0	0	0	0,04576	C to D	>CP			FAUX
Min	Auto M3	17H2	1	3,15	0	-0,045892	C to D	>CP			FAUX
Max	Auto M3	18H1	0	0	0	0,045565	C to D	>CP			FAUX
Min	Auto M3	18H2	1	3,7	0	-0,049566	C to D	>CP			FAUX
Max	Auto M3	19H1	0	0	0	0,04576	C to D	>CP			FAUX
Min	Auto M3	19H2	1	3,15	0	-0,045892	C to D	>CP			FAUX
Max	Auto M3	20H1	0	0	0	0,045565	C to D	>CP			FAUX
Min	Auto M3	20H2	1	3,7	0	-0,049566	C to D	>CP			FAUX
Min	FH1POT35	21H2	1	3,06	0	-0,079894	A to B	A to IO	-0,065		VRAI
Min	FH1POT35	22H2	1	3,06	0	-0,082611	A to B	A to IO			VRAI
Min	FH1POT35	23H2	1	3,06	0	-0,082113	A to B	A to IO			VRAI

Tableau 31 Rotules plastiques ayant dépassé les valeurs limites

TABLE: Frame Hinge States											
StepType	AssignHinge	GenHinge	RelDist	AbsDist	U3Plastic	R3Plastic	HingeState	HingeStatus			
Text	Text	Text	Unitle	m	m	Radiar	Text	Text			
Max	Auto M3	5H1	0	0	0	0,059468	>E	>CP			VRAI
Min	Auto M3	5H2	1	3,7	0	-0,059412	>E	>CP			VRAI
Max	Auto M3	7H1	0	0	0	0,059468	>E	>CP			VRAI
Min	Auto M3	7H2	1	3,7	0	-0,059412	>E	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	8H1	0	0	0	0,124877	C to D	>CP	0,065		VRAI
Max	FH1POT35	9H1	0	0	0	0,12464	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	10H1	0	0	0	0,125722	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	11H1	0	0	0	0,12464	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	12H1	0	0	0	0,125722	C to D	>CP			VRAI
Max	FH1POT35	13H1	0	0	0	0,124877	C to D	>CP			VRAI
Min	FH1POT35	21H2	1	3,06	0	-0,079894	A to B	A to IO	-0,065		VRAI
Min	FH1POT35	22H2	1	3,06	0	-0,082611	A to B	A to IO			VRAI
Min	FH1POT35	23H2	1	3,06	0	-0,082113	A to B	A to IO			VRAI
Min	FH1POT35	24H2	1	3,06	0	-0,082611	A to B	A to IO			VRAI
Min	FH1POT35	25H2	1	3,06	0	-0,082113	A to B	A to IO			VRAI
Min	FH1POT35	26H2	1	3,06	0	-0,079894	A to B	A to IO			VRAI

Tableau 32 Rotules plastiques qui peuvent dissiper davantage

TABLE: Frame Hinge States									
StepType	AssignHinge	GenHinge	RelDist	AbsDist	U3Plastic	R3Plastic	HingeState	HingeStatus	
Text	Text	Text	Unitless	m	m	Radian	Text	Text	
Max	Auto M3	4H1	0	0	0	0,055301	>E	>CP	0,0559
Min	Auto M3	4H2	1	3,15	0	-0,055335	>E	>CP	-0,0559
Max	Auto M3	6H1	0	0	0	0,055301	>E	>CP	
Min	Auto M3	6H2	1	3,15	0	-0,055335	>E	>CP	
Max	Auto M3	17H1	0	0	0	0,04576	C to D	>CP	
Min	Auto M3	17H2	1	3,15	0	-0,045892	C to D	>CP	
Max	Auto M3	18H1	0	0	0	0,045565	C to D	>CP	
Min	Auto M3	18H2	1	3,7	0	-0,049566	C to D	>CP	
Max	Auto M3	19H1	0	0	0	0,04576	C to D	>CP	
Min	Auto M3	19H2	1	3,15	0	-0,045892	C to D	>CP	
Max	Auto M3	20H1	0	0	0	0,045565	C to D	>CP	
Min	Auto M3	20H2	1	3,7	0	-0,049566	C to D	>CP	
Max	Auto M3	30H1	0	0	0	0,012933	B to C	IO to LS	
Min	Auto M3	31H2	1	3,7	0	-0,025	C to D	>CP	
Max	Auto M3	32H1	0	0	0	0,012933	B to C	IO to LS	
Min	Auto M3	33H2	1	3,7	0	-0,025	C to D	>CP	
Min	FH2POT30	34H2	1	3,06	0	-0,011804	A to B	A to IO	-0,056
Min	FH2POT30	35H2	1	3,06	0	-0,038206	A to B	A to IO	
Min	FH2POT30	36H2	1	3,06	0	-0,024559	A to B	A to IO	
Min	FH2POT30	37H2	1	3,06	0	-0,038206	A to B	A to IO	
Min	FH2POT30	38H2	1	3,06	0	-0,024559	A to B	A to IO	
Min	FH2POT30	39H2	1	3,06	0	-0,011804	A to B	A to IO	

5.2.5 Courbe de capacité contrôlée par L'EC8 :

Le deuxième contrôle sera réalisé en utilisant les valeurs de l'EC8. Le tableau suivant présente le tableau des valeurs des rotations. Au step 20, une des rotules dépasse la valeur limite donnée par l'EC8. Ainsi la courbe de capacité est arrêtée à cet instant.

Tableau 33: Résultats du push-over par rapport à la limite de l'EC8

Step	Displacement m	BaseForce KN	AtoB	BtoD	IOtoLS	LSstoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE	Total
0	-0,000013	0,000	78	0	0	0	0	0	0	0	78
1	0,009333	172,148	76	2	0	0	0	0	0	0	78
2	0,014249	232,907	68	10	0	0	0	0	0	0	78
3	0,017462	257,528	62	16	0	0	0	0	0	0	78
4	0,018171	260,320	60	18	0	0	0	0	0	0	78
5	0,029396	275,478	56	22	0	0	0	0	0	0	78
6	0,066780	299,414	48	30	0	0	0	0	0	0	78
7	0,166780	318,706	48	10	12	6	0	2	0	0	78
8	0,174187	319,029	48	10	12	4	0	4	0	0	78
9	0,176620	318,733	48	10	12	2	0	6	0	0	78
10	0,181306	317,431	48	10	12	0	0	8	0	0	78
11	0,287646	271,871	48	10	12	0	0	8	0	0	78
12	0,307313	263,331	48	10	12	0	0	6	2	0	78
13	0,319775	259,746	48	10	12	0	0	4	0	4	78
14	0,328188	256,059	48	10	12	0	0	2	2	4	78
15	0,328188	256,059	48	10	12	0	0	2	0	6	78
16	0,337130	252,134	48	10	12	0	0	0	2	6	78
17	0,337130	252,134	48	10	12	0	0	0	0	8	78
18	0,342757	249,661	48	10	12	0	0	0	0	8	78
19	0,349962	247,595	48	10	12	0	0	0	0	8	78
20	0,364223	245,698	48	10	12	0	0	0	0	8	78
21	0,372690	245,585	48	10	12	0	0	0	0	8	78
22	0,556395	262,530	42	8	14	6	0	0	0	8	78
23	0,656395	269,769	42	8	6	14	0	0	0	8	78
24	0,733589	275,057	40	8	2	14	4	2	0	8	78
25	0,762853	275,087	40	8	2	10	6	4	0	8	78
26	0,768492	274,518	40	8	2	8	6	6	0	8	78
27	0,882951	239,863	40	6	2	8	2	12	0	8	78
28	0,928813	224,412	40	6	2	6	0	16	0	8	78

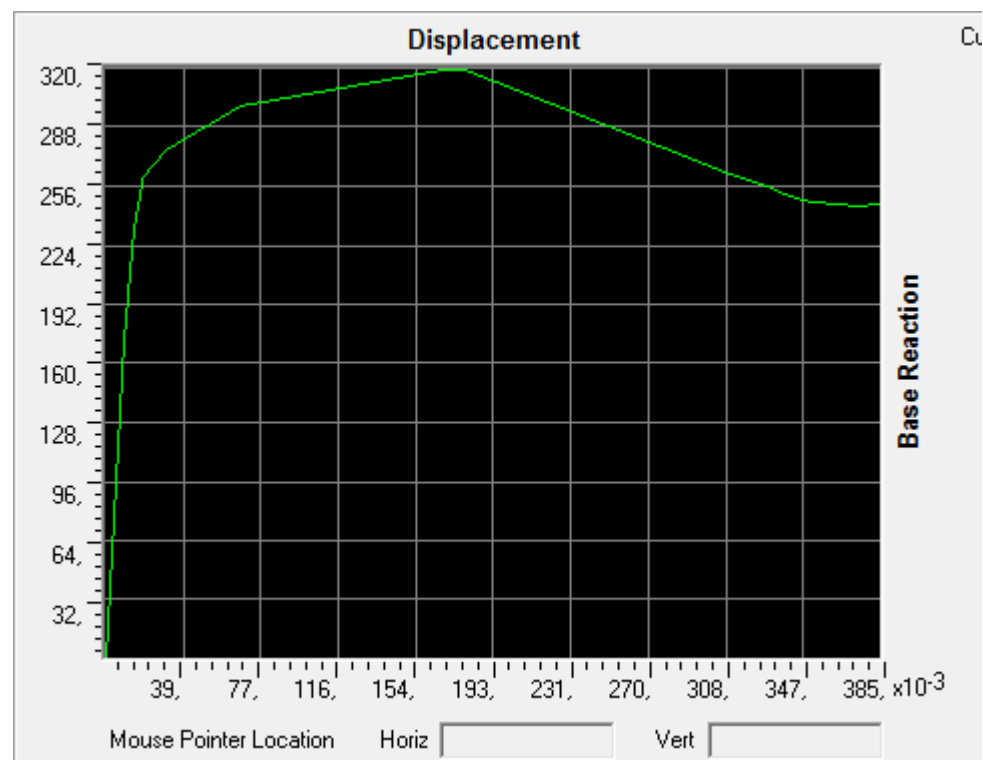


Figure 63 Courbe de capacité sans contrôle

La figure ci-dessous donne une comparaison entre les deux courbes, sans et avec contrôle. Contrairement au portique traité dans la première partie, l'hyperstaticité élevée permet d'appréhender l'influence du contrôle sur la courbe de capacité

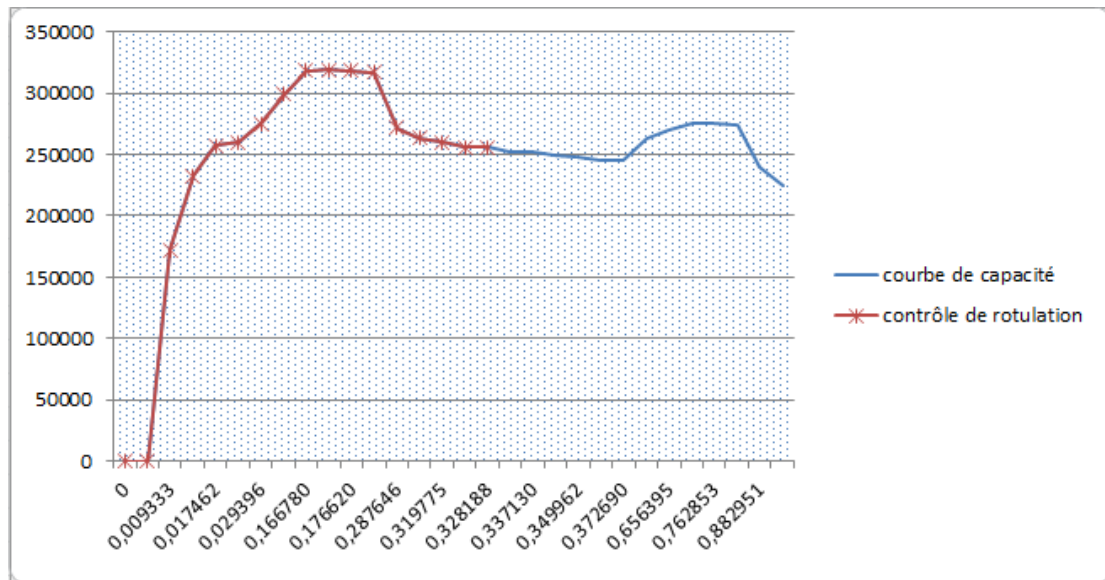


Figure 64 Comparaison Courbe de capacité sans et avec contrôle

5.2.6 Calcule de la ductilité :

Pour appréhender l'influence du type de contrôle (avec le SAP ou avec l'EC8), les valeurs de ductilité de déplacement sont données ci-après. Les valeurs sont tirées des deux courbes de capacité avec et sans contrôle.

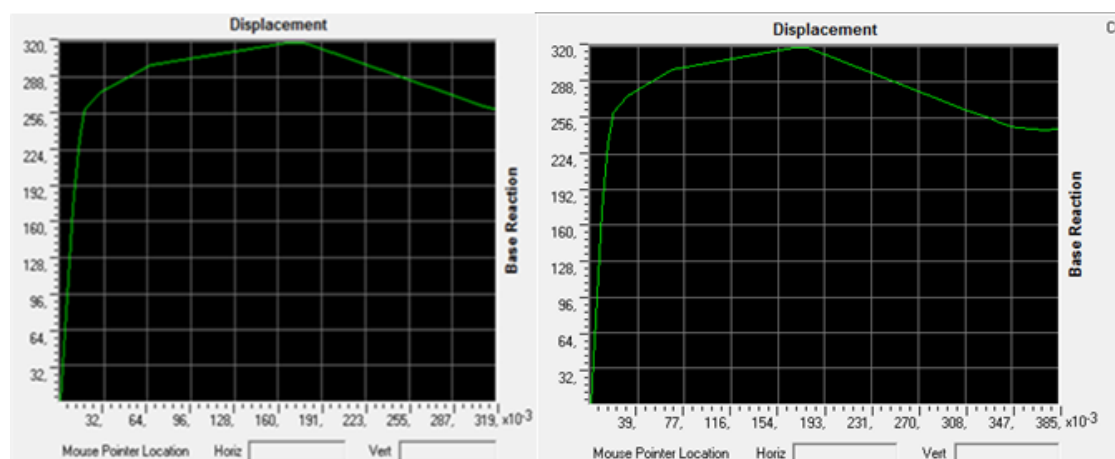


Figure 65 Courbes de capacité : Contrôle avec le SAP et contrôle avec l'EC8.

5.2.6.1 Ductilité avec contrôle avec le SAP :

$$\delta = \frac{\delta_u}{\delta_e} \rightarrow \delta = \frac{0,307}{0,0182} \rightarrow \delta = 16,91$$

5.2.6.2 Ductilité avec contrôle avec l'EC8 :

$$\delta = \frac{\delta_u}{\delta_e} \rightarrow \delta = \frac{0,364}{0,0182} \rightarrow \delta = 19,78$$

5.3 Conclusions

Les ruines partielles sont constituées de « beam mechanism ». Les rotules sont censées se développer au niveau des poutres et non des poteaux ce qui facilite l'opération de réhabilitation (recréation du poteau et replâtrage des zones endommagées).

Le contrôle des valeurs limites des rotations des rotules plastiques force l'arrêt des courbes de capacité à un stade prématuré. Généralement ce contrôle n'est jamais fait, or expérimentalement, il a été prouvé que les rotules n'ont pas de rotations infinies.

Conclusions générales et perspectives

L'évolution actuelle que connaît le domaine de génie civil, en termes d'analyse et de calcul a permis le développement de méthodes et de concepts pour la réalisation des ouvrages avec des nouvelles formes plus esthétique, moderne, stable, et confortable.

En Algérie, le calcul statique plastique n'est pas encore considéré. L'ingénieur est obligé de suivre la réglementation qui exige un dimensionnement élastique. Pour le calcul parasismique, la non-linéarité est introduite via des coefficients de comportement. De ce point de vue, la réglementation européenne est plus développée.

L'objectif scientifique de ce travail était d'utiliser l'analyse plastique en introduisant une nouvelle notion de contrôle de la dissipation plastique.

L'analyse plastique à l'échelle globale est réalisée via l'introduction de la non-linéarité matérielle au niveau des rotules. Cette non-linéarité est introduite par des lois moment-courbure ou moments-rotations. L'expérimentation montre qu'une rotule plastique une fois formée ne peut pas produire une cinématique de rotation infinie. De ce fait, une fois une valeur limite est dépassée, l'effondrement de cette rotule affectera directement le comportement global (courbe de capacité). Cependant, les logiciels de calcul ne font jamais la vérification de dépassement des rotations des rotules plastiques. Dans ce travail, nous avons proposé d'évaluer l'influence du contrôle plastique sur le comportement global. Le contrôle plastique est basé sur la comparaison des rotations des rotules avec les valeurs limites données par la réglementation. Les résultats trouvés montrent que ne pas considérer le contrôle plastique peut s'avérer dangereux pour le dimensionnement plastique.

Outre l'aspect scientifique, ce projet de fin d'études nous a permis de développer notre autonomie et d'apprendre le sens de l'organisation, de la responsabilité et du travail collectif. Nous avons posé une pierre dans ce vaste domaine. Espérant que ce travail sera utile pour des travaux futurs.

Bibliographie :

- [1]. **Bouchaïr, A.** Calcul plastique des structures. Constantine : s.n, 2009. Vol. 2.
- [2]. **Nouali, Abdelhafid.** Influence des effets d'échelles sur la réponse sismique non linéaire des structures et des ouvrages en béton armé. Tlemcen : s.n., 2017.
- [3]. **Dar kebira, Mohammed el arbi.** Etude technique et analyse non linéaire d'un bâtiment R+8 en béton armé. Tlemcen : s.n., 2018.
- [4]. **Bader, Rached.** Comportement de structures en portiques après la rupture d'un poteau de base. Algerie : s.n., 2009.
- [5]. **BOUKHLOUF. B, CHARI .A.H,** " Analyse élasto-plastique des structures planes par la méthode des rotules plastiques". Thèse de Magister. Université de Batna. Algérie.
- [6]. **BOUSSAFEL S.** "Analyse plastique d'éléments structuraux rectilignes en béton armé et en charpente métallique - Etude comparative". Thèse de Magister. Université de Constantine. Algérie(2003).
- [7]. **BOUKELOUA SMAIL,** "ETUDE DES MECANISMES DE RUINE POUR DES STRUCTURES MULTI-ETAGEES " Thèse de Magister. Université de Skikda Algérie(2008).
- [8]. **RANIA SOUICI,** "contribution à l'analyse élasto-plastique des structures formes en poutres"" Thèse de Magister. Université de Badji Mokhtar Annaba(2010).
- [9]. **Belkhouche. K, Belhadi. M**"Analyse à la rupture des ponts en béton armé à l'échelle semi-globale" Thèse de Master UNIVERSITE ABOUBEKR BELKAID – TLEMEN (2016).
- [10]. **Mohammed Matallah, Abdelhafid Nouali.** "Un modèle global pour la prise en compte des effets d'échelles sur la capacité de rotation des éléments en béton armé": Etude comparative avec l'euro-code 8. 2016