

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI

- TIZI OUZOU -

Faculté du Génie de la construction
Département de Génie Civil

MÉMOIRE DE MAGISTER

Spécialité : *génie civil*
Option : *structures et matériaux*

Présenté par :

Ourida HELLAL

THÈME

***ETUDE DU FACTEUR DE COMPORTEMENT Q DES
STRUCTURES EN ACIER
A CONTREVENTEMENT EXCENTRE***

Devant la commission d'examen :

Mr Naceur Eddine HANNACHI	Professeur - UMMTO	<i>Président</i>
Mr Ali BOUHERAOUA	Maître de conférences - UMMTO	<i>Rapporteur</i>
Mr Kamel AIT TAHAR	Professeur – UMMTO	<i>Examineur</i>
Mr Mohand HAMIZI	Maître de Conférences - UMMTO	<i>Examineur</i>
Mr Mounir NAILI	Maître de recherche - CGS	<i>Examineur</i>

Soutenu le : 25 /02 / 2010

Remerciements

« Al hamdou lillah » je remercie Dieu de m'avoir donné le courage et la patience.

Je tiens tout d'abord à remercier monsieur BOUHERAOUA Ali qui a eu la gentillesse d'accepter d'assurer le suivi de ce mémoire de magister. Son enthousiasme, sa ténacité et surtout sa rigueur dans le travail ont énormément contribué à l'aboutissement de ce mémoire. Qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude.

Je tiens profondément à remercier Monsieur MECHICHE Mohamed, dont les conseils puisés dans une grande expérience et une compétence certaine ont été utiles et ont m'aider à mener à terme ce projet.

Je remercie aussi Monsieur NAILI Mounir qui a toujours pris le temps de me donner les explications dont j'avais besoin pour avancer.

Je souhaite également exprimer ma gratitude aux membres du jury qui me feront l'honneur d'examiner et d'évaluer ce travail et d'y apporter leurs remarques constructives.

Je tiens particulièrement à remercier Tarik SFAKSI pour l'aide qu'il m'a apportée et pour la patience qu'il a montrée à mon égard durant toute cette période, ses encouragements et surtout son soutien moral.

Enfin, je remercie le personnel de la bibliothèque de Génie Civil et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce mémoire.

Mademoiselle ***Ourida HELLAL***

Sommaire

Première partie

Chapitre I - NOTIONS SUR LE CALCUL PLASTIQUE

I - 1- INTRODUCTION	3
I - 2- FLEXTION PLASTIQUE	4-11
I -3- NOTIONS DE ROTULE PLASTIQUE	11-13
I - 4- FACTEURS AFFECTANT LA VALEUR DU MOMENT PLASTIQUE	14-21
I - 5- CONCLUSION	22

Chapitre II- INTERET DU CALCUL PLASTIQUE

II - 1- INTRODUCTION	23
II -2- CONCEPTION DES STRUCTURES EN PLASTICITE	23-24
II -3- BENEFICE EN RESISTANCE DU A LA PLASTIFICATION	25-29
II- 4- DOMAINE D'APPLICATION DU CALCUL EN PLASTICITE	29-30
II -5- METHODES DE CALCUL EN PLASTICITE	30
II - 6- CONCLUSION	31

Chapitre III- DISSIPATION D'ENERGIE SISMIQUE COURBE HYSTERITIQUE

III- 1- INTRODUCTION	32
III-2- LOIS DE COMPORTEMENT	32-34
III -3- QUALITES DU MATERIAU ACIER	34-37
III -4- PARAMETRE UTILES POUR UN PROJET PARASISMIQUE	38-41
III -5- CONCLUSION	41

Deuxième partie

Chapitre IV- STRUCTURES ETUDIEES

IV- 1- INTRODUCTION	42-44
IV -2- CHARGEMENT POUR UNE ETUDE STATIQUE	44
IV -3- CHARGEMENT POUR L'ETUDE SISMIQUE	45
IV -4- PRE-DIMENSIONNEMENT DES ELEMENTS	45
IV -5- DIMENSIONNEMENT DE LA ZONE ACTIVE	46
IV -6- CONDUITE DE L'ETUDE	47-50

IV -7- RECHERCHE DU NOMBRE DE ROTULES PLASTIQUES QUI RENDENT LA STRUCTURE MECANISME	50-52
IV – 8- CONCLUSION	53
Chapitre V- RESULTATS DE L'ETUDE	
V -1- RESULTATS DE L'ETUDE NUMERIQUE	54-73
V – 2- CONCLUSION	74
Chapitre VI- INTERPRETATION DES RESULTATS	
VI-1- VALEUR DU COEFFICIENT DE COMPORTEMENT TROUVEES	75
VI- 2- DUCTILITE LOCALES REQUISES	75-76
VI-3- PROPOSITION DE COURBES DE DISTRIBUTION DE DUCTILITES	76-79
VI-4- SEQUENCE D'APPARITION DE ROTULES	79-82
Chapitre VII- CONCLUSION ET PERSPECTIVES	
VII- 1- CONCLUSION	83-84
VII- 2- PERSPECTIVES	84
ANNEXES	
I - REPONSE DYNAMIQUE	85-89
II – FICHER DONNES	90-97
BIBLIOGRAPHIE	98-101

INTRODUCTION

L'étude des structures soumises aux actions sismiques revêt un caractère important dans les pays à forte sismicité. Les secousses telluriques survenues en Algérie (CHLEF 10 -10 -80, CANSTANTINE 27-10-85, CHENOUA 29-10-89, BOUMERDES 21-05-2003) nous confirment hélas que des vies humaines sont exposées a ce fléau. C'est pour cette raison que des efforts d'investigations en vue de :

- Recherche de nouvelles conceptions.
- Elaboration de procédés performants de calcul prenant en compte ce phénomène naturel.

Par ailleurs, il est connu que les efforts sismiques induits dans les constructions sont évalués à l'aide de codes réglementaires.

L'observation à postériori des dommages qui leur sont causés montrent que ces dernières reprennent des efforts beaucoup plus grands que ceux pour lesquels elles ont été conçues.

L'explication de cet écart réside en grande partie dans le mécanisme de dissipation d'énergie transmise dans le séisme par le biais des déformations inélastiques des structures. Particulièrement, le coefficient de comportement global de la structure q (R dans le code Algérien), [12] tient compte de ce phénomène de dissipation puisque lui-même dépend :

- De la ductilité de la structure.
- Du type de structure.
- De la qualité des joints.
- Du degré d'amortissement.

L'objet du présent travail est de donner une méthode d'évaluation du coefficient de comportement global q , ainsi que la relation qui le lie aux ductilités locale μ_i et globale μ_Δ des structures contreventés par excentrement sismique.

Cette étude est présentée en deux parties :

1^{er} partie

Nous nous sommes intéressés à donner les principes généraux de la plasticité, notamment :

- Notions sur le calcul plastique
- Intérêt du calcul plastique
- Dissipation d'énergie – Courbes hystérétiques

2^{ème} partie

Elle concerne la définition, le pré dimensionnement et la présentation du logiciel de calcul non linéaire utilisé : DRAIN2D.

De même, on présente les résultats, l'interprétation et la conclusion de l'étude.

PREMIERE PARTIE

Chapitre I

NOTIONS SUR LE CALCUL PLASTIQUE**I.1 INTRODUCTION**

La loi de Hooke qui illustre le comportement élastique d'un matériau a connu un grand nombre de recherches depuis 1822, notamment par l'utilisation de la méthode des éléments finis (MEF) qui permet de résoudre dans le domaine linéaire les problèmes les plus complexes.

Cependant, au-delà du domaine linéaire, cette loi ne représente pas le comportement d'un matériau. Selon le dimensionnement élastique, la ruine survient dès qu'en un point on atteint la contrainte $f = f_y$. Ce critère néglige la possibilité d'adaptation plastique du matériau, voire de la structure, qui, d'ailleurs, est très important d'après les observations pratiques.

La théorie de la plasticité dont les premiers progrès datent de 1925 est basée sur le modèle du corps élasto-plastique qui correspond au diagramme de la figure I.1. Cependant les essais ont montré qu'aucun matériau ne suit rigoureusement ce diagramme. La théorie de l'analyse limite est la partie de la théorie de la plasticité qui donne la méthode nécessaire pour calculer les charges limites.

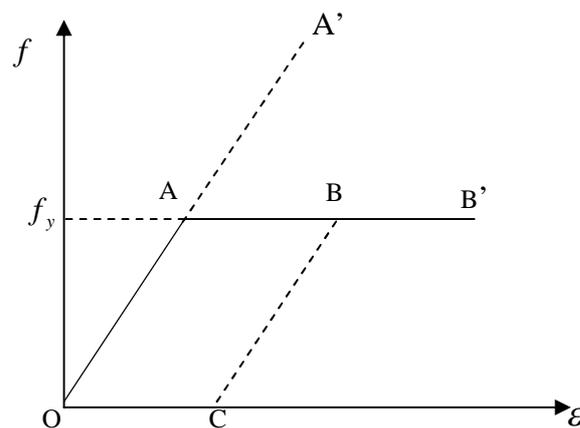


Figure I.1 Courbe de comportement élasto-plastique

I-2 FLEXTION PLASTIQUE

I.2.1 Généralités

Toutes les théories de la flexion ont une hypothèse en commun, celle de Bernoulli, selon laquelle les sections droites de la poutre restent, après déformation, planes et normales à l'axe incurvé de la poutre.

Cette hypothèse reste valable dans le domaine élasto-plastique à condition que les déformations plastiques soient continues et ne présentent pas de directions privilégiées.

Il en résulte que la dilatation ε d'une fibre de la section droite est proportionnelle à la distance y entre cette fibre et l'axe neutre de la section, inversement proportionnelle au rayon de courbure « r », soit :

$$\varepsilon = \frac{y}{r} = y \cdot x \quad (\text{I.1})$$

Avec : $x = \frac{1}{r}$

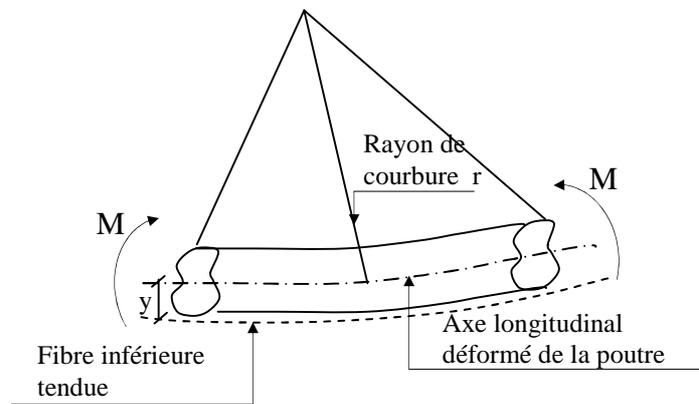


Figure I.2 Flexion plastique d'une poutre

I.2.2 Flexion plastique d'une poutre à section doublement symétrique [27]

1. Dans le domaine élastique, les formules fondamentales de la théorie de la flexion élastique sont :

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon &= \frac{y}{r} = x \cdot y \\ f &= E \cdot \varepsilon = E \cdot \frac{y}{r} \\ x &= \frac{1}{r} = \frac{\varepsilon}{y} = \frac{M}{EI} \\ f &= \frac{M \cdot y}{I} \\ f_{\max} &= \frac{M}{w} \end{aligned} \right\} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

y : Distance d'une fibre à l'axe neutre.

f, ε : Contrainte et déformation dans la fibre d'ordonnée y .

$w = \frac{I}{V}$: Module de flexion.

$\chi = \frac{1}{r}$: Courbure de l'axe de la pièce.

2. Le moment élastique M_e se produit à l'instant où la contrainte dans les fibres extrêmes atteint la limite élastique f_r du métal (figure I.3b). Il vaut :

$$M_e = f_r \cdot w \tag{I.3}$$

La courbure correspondante est la courbure maximale élastique :

$$\chi_e = \frac{M_e}{EI} \tag{I.4}$$

Elle est liée à la dilatation des fibres extrêmes $\varepsilon_r = \frac{f_r}{E}$ par la loi de Bernoulli :

$$\chi_e = \frac{2\varepsilon_r}{h} \tag{I.5}$$

3. Si l'on dépasse le moment M_e , les fibres supérieures et inférieures de la poutre se plastifient, au fur et à mesure que le moment augmente. Les zones plastifiées se propagent vers l'axe de la pièce comme le montrent les figures I.3c, I.3d et I.3e.

a. Diagramme des contraintes

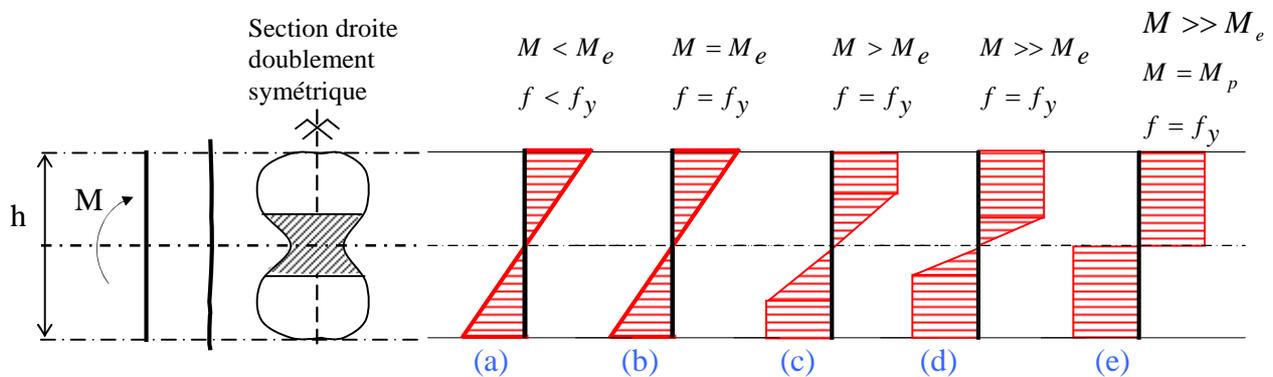


Figure I.3 Diagramme du moment courbure d'une poutre en flexion

b. Diagramme des déformations

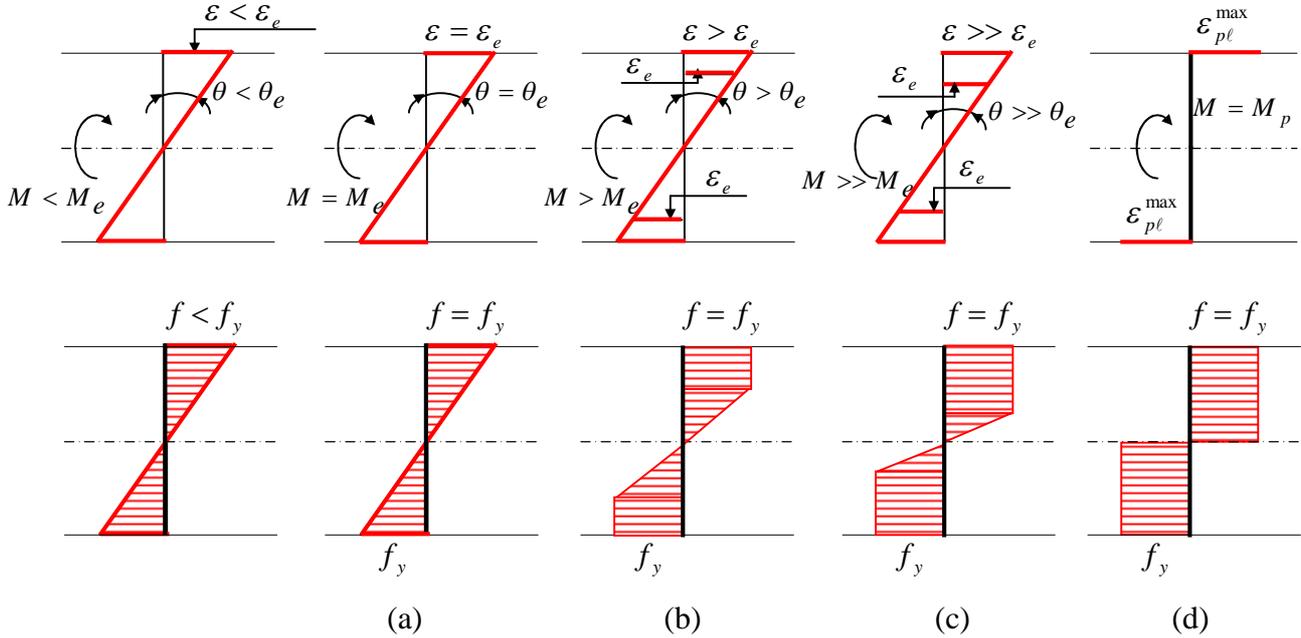


Figure I.4 Diagramme des déformations et contraintes

La distribution des contraintes f doit toujours répondre aux conditions d'équilibre $\int_A f \cdot dA = 0$.

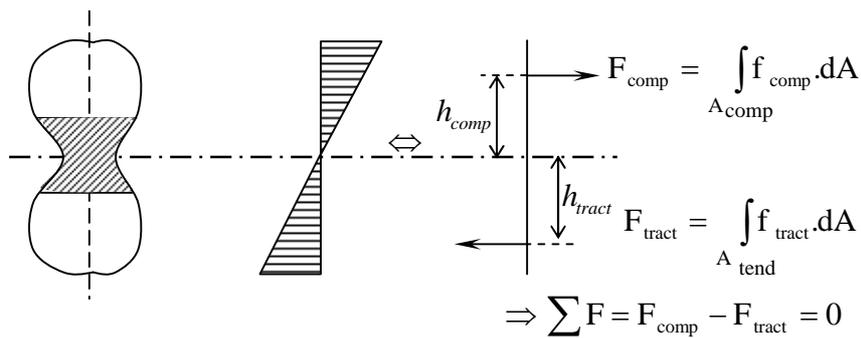


Figure I.5 Diagramme des forces compression - traction

Etant données la symétrie de la section droite et celle du diagramme (f, ϵ) en traction et en compression, cette condition exige que l'axe neutre reste à mi-hauteur de la section droite.

La courbure de la pièce $\chi (> \chi_e)$ reste toujours liée à une distance y de l'interface élastique -plastique à l'axe neutre par la relation de Bernoulli.

$$x = \frac{\varepsilon_r}{y} \quad (\text{I.6})$$

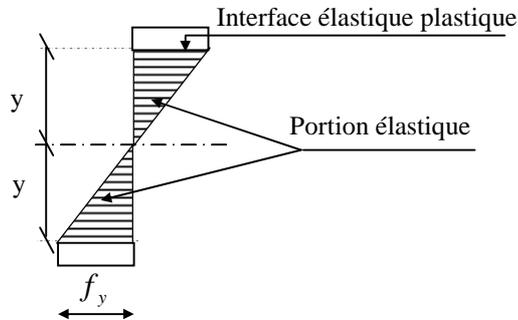


Figure I.6 Distribution des contraintes sur la hauteur de la section droite

En éliminant ε_r entre les égalités (I.5) et (I.6), on trouve la proportion :

$$\frac{2y}{h} = \frac{\chi_e}{\chi} \quad (\text{I.7})$$

Celle-ci montre que la hauteur de la portion centrale élastique diminue en raison inverse de la courbure de l'axe.

Théoriquement, pour une courbure infinie, $y = 0$, on tend vers la distribution bi rectangulaire de contraintes représentée par la figure I.4d. Le moment fléchissant correspondant est le plus grand moment que peut supporter la poutre ; il porte le nom « moment plastique ultime » ou « moment plastique », désigné par la notation M_p .

Comme M_p est visiblement proportionnel à f_r , on peut toujours poser :

$$M_p = f_r \cdot Z \quad (\text{I.8})$$

Avec :

Z : Module plastique.

La notion du moment plastique est une idéalisation ; d'une part, la courbure ne peut jamais dépasser $\frac{h}{2}$ et qu'ainsi il subsiste toujours une mince zone médiane élastique et d'autre part, les contraintes dans les fibres extrêmes finissent par dépasser le palier et entrer dans la zone des grandes déformations. Cependant, pour l'acier doux, au moment où le point

représentatif (f, ε) atteint l'extrémité du palier, les dilatations des fibres extrêmes valent en moyenne 13 fois la dilatation maximale élastique $13\varepsilon_e$ (Figure I.7).

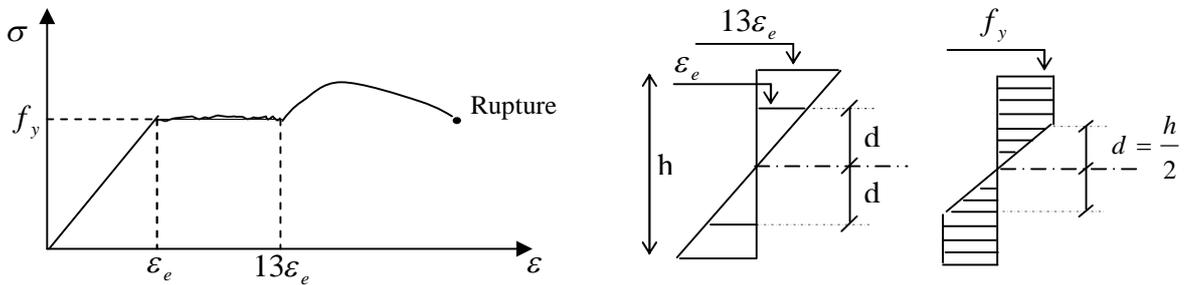


Figure I.7 Diagramme contrainte – déformation du métal

Et le moment correspondant ne diffère pas de M_p que de 2%, c'est-à-dire une différence négligeable [27].

I.2.3 Etablissement de la loi moment-courbure ($M - \chi$) d'une pièce fléchie [27]

L'équilibre des forces intérieures « $f \cdot dA$ » et le moment extérieur « M » s'expriment par :

$$M = \int f_y \cdot dA \tag{I.9}$$

On divise le diagramme trapézoïdal des contraintes en trois parties (figure I.8).

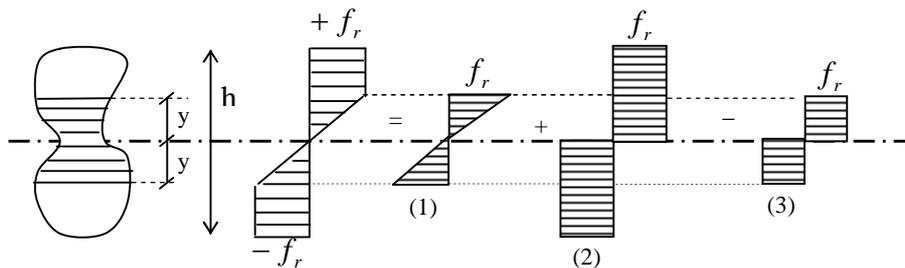


Figure I.8 Diagramme trapézoïdal des contraintes

L'équation d'équilibre du moment associé à ce diagramme bi-trapézoïdale sous la forme suivante :

$$M_{eq} = M_1 + M_2 - M_3$$

$$M_{eq} = f_r \cdot w_e + f_r \cdot Z - f_r \cdot Z_e \quad (I.10)$$

Avec :

w_e : Module de flexion (élastique) de la portion intérieure élastique

Z : Module plastique de la section entière

Z_e : Module plastique droite qui est en fait élastique.

La formule (I.9) s'écrit : $M_p = f_r \cdot \int_A |y| \cdot dA$.

D'autre part, par définition, $M_p = f_r \cdot Z$ (I.8).

D'où :

$$Z = \int_A |y| \cdot dA = 2S_y \quad (I.11)$$

Le module plastique est égal à deux fois le moment statique de la moitié de la section droite par rapport à l'axe symétrique horizontal.

En tenant compte de (I.8), on peut mettre l'égalité (I.10) sous la forme :

$$\frac{M}{M_e} = \frac{M_p}{M_e} \left[1 - \frac{Z_e - w_e}{Z} \right] \quad (I.12)$$

Pour une forme de section droite donnée, les quantités Z_e et w_e ne dépendent que de la hauteur relative $\frac{2 \cdot y}{h}$ de la zone médiane de la section restée élastique (figure I.5).

D'autre part, on a vu la loi de Bernoulli donnait : $\frac{2y}{h} = \frac{\chi_e}{\chi}$.

On peut donc écrire la relation (I.12) sous la forme :

$$\frac{M}{M_e} = \frac{M_p}{M_e} \left[1 - f\left(\frac{\chi_e}{\chi}\right) \right] \quad (I.13)$$

Ce qui permet de construire, pour chaque forme de section droite, un diagramme non dimensionnel montrant comment varie le moment réduit $\frac{M}{M_e}$ en fonction de la courbure réduite $\frac{\chi}{\chi_e}$ que montre la figure (I-9) pour divers types de profils.

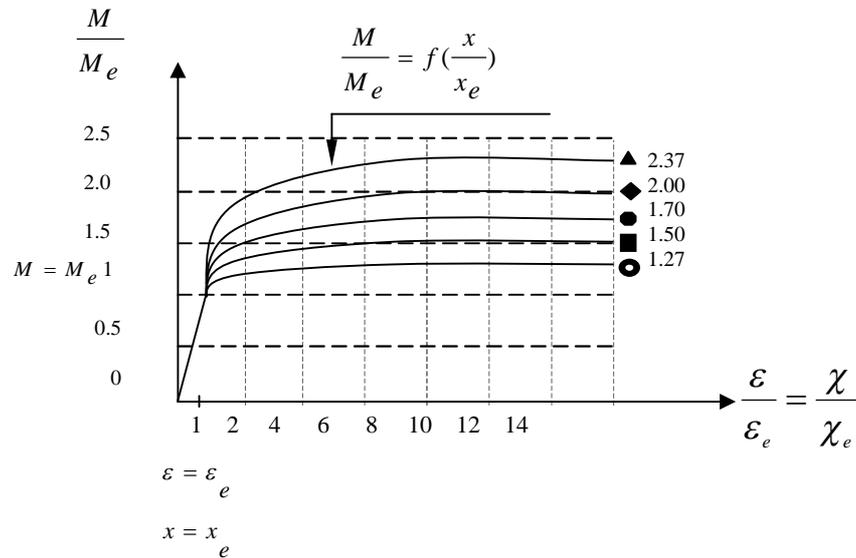


Figure I.9 Diagramme non dimensionnel du moment réduit $\frac{M}{M_e}$ en fonction de la courbure réduite $\frac{\chi}{\chi_e}$

Quand le moment tend vers le moment plastique et la distribution des contraintes vers la distribution bi rectangulaire, la courbure de la barre tend vers l'infini, et la fonction $f(\frac{\chi}{\chi_0})$ tend vers zéro. La courbe $\frac{M}{M_p} = F(\frac{\chi}{\chi_0})$ devient asymptotique à l'horizontale « $\frac{M_p}{M_e}$ ».

Le rapport $\alpha = \frac{M_p}{M_e}$ est appelé facteur de forme de la section considérée.

$$\alpha = \frac{M_p}{M_e} = \frac{Z}{w} \tag{I.14}$$

Le facteur de forme « α » mesure le bénéfice en résistance de section dû à la plastification.

La contrainte dans les fibres extrêmes ne pouvant dépasser « f_r », le bénéfice dû à la plastification provient uniquement des moments intérieurs supplémentaires dus à la plastification des fibres proches de l'axe neutre.

I.3 NOTION DE ROTULE PLASTIQUE

La théorie de la flexion pure exposée précédemment peut s'appliquer avec une très bonne approximation à des poutres sollicitées en flexion simple sous l'effet de forces transversales.

Dans le domaine plastique, l'effort tranchant a une influence très faible sur la valeur du moment plastique ultime, tant qu'il ne dépasse pas une certaine valeur limite pour laquelle l'âme du profil se plastifie avant les semelles [27].

La théorie peut même s'appliquer au cas des colonnes comprimées et fléchies, pour autant que l'effort normal reste une fraction suffisamment faible de l'effort normal plastique :

$$N_p = A \cdot f_r$$

On peut donc baser la théorie de la flexion plastique sur la constatation fondamentale suivante.

En première approximation, le moment fléchissant maximum qu'une barre quelconque d'une ossature à nœuds rigides en acier doux peut supporter est bien déterminé. Il est donné par la formule :

$$M_p = f_r \cdot Z$$

Où :

f_r : limite élastique apparente de l'acier utilisé

Z : module plastique de la section.

Ce moment peut provoquer dans la barre une courbure très grande qui est théoriquement infinie.

Considérant une poutre en double T sur deux appuis simples chargée d'une force concentrée P en son milieu (figure I.10a). Le diagramme des moments correspondants est illustré par la figure I.10b. Faisant croître la force P jusqu'à ce que le moment plastique M_p , les déformations plastiques s'étendent sur toute la zone où le moment dépasse le moment maximum élastique M_e (Figure I.10b).

Si le facteur de forme de la section vaut $\alpha = 1,14$, cette zone a pour longueur :

$$\Delta l = l \left(\frac{M_p - M_e}{M_p} \right) = 0,123 l$$

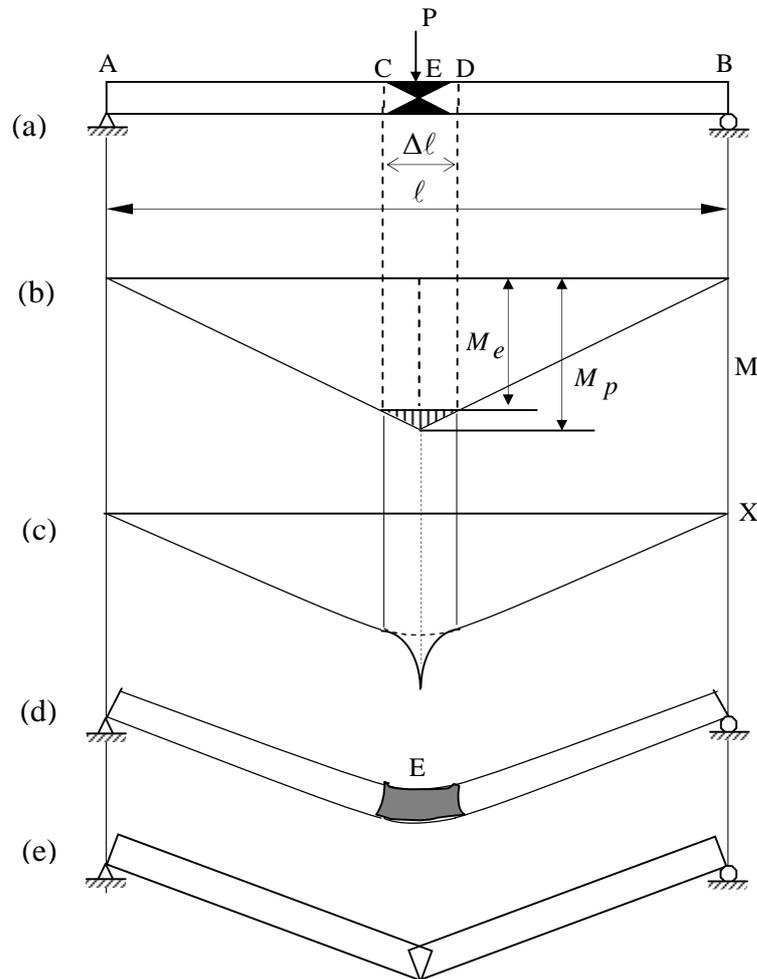


Figure I.10 Etape de formation de rotule plastique sous charge concentrée

Vue la forme du digramme moment-courbure (Figure I.9), la courbure reste très faible aux environs des extrémités C et D de la zone plastifiée ; par contre, aux environs du point E d’application de la charge, la courbure est extrêmement forte comme le montre la figure I.10c, de sorte que la poutre prend la déformée représentée sur la figure I.10d et que tout se passe à peu près comme si la poutre était formée de deux tronçons rigides articulés l’un sur l’autre au point E (figure I.10e).

Si la même poutre en double T é est chargée de forces uniformément réparties (figure I.11a), le diagramme des moments est parabolique (figure I.11b) et a pour expression :

$$M(x) = \frac{pl^2}{8} \left(1 - \frac{4x^2}{l^2} \right) .$$

Si l'intensité P des charges est telle que le moment maximum $\frac{P\ell^2}{8}$ vaut le moment plastique de la poutre, la plastification s'étend sur toute la zone où :

$$M = M_p \left(1 - \frac{4x^2}{\ell^2}\right) \geq M_e .$$

C'est-à-dire où :

$$1 - \frac{4x^2}{\ell^2} \geq \frac{1}{\alpha} .$$

Les extrémités de cette zone ont pour abscisses relatives $\frac{x}{\ell} = \mp \frac{1}{2} \sqrt{1 - \frac{1}{\alpha}}$.

Soit, pour $\alpha = 1.14$.

$$\frac{x}{\ell} = \pm 0,175 .$$

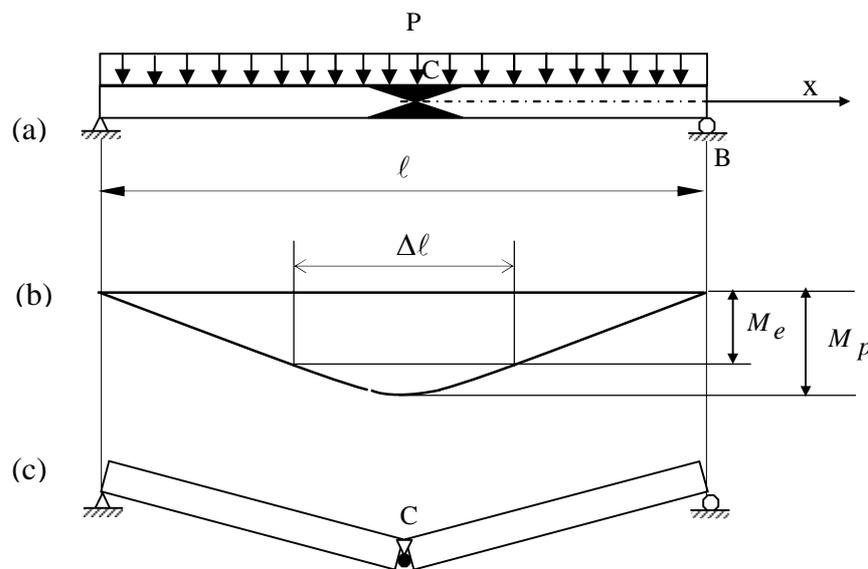


Figure I.11 Etapes de formation de rotule plastique sous charge uniformément répartie

Les zones des déformations importantes restent ici encore très localisées et on peut encore admettre que la poutre fortement déformée se compose de deux tronçons rigides articulés au point C.

Dans les deux cas envisagés ci-dessus, on peut dire que tout se passe comme s'il existait, dans la section où le moment est maximum, une rotule à frottement qui resterait rigide tant que $M < M_p$ et qui permettrait la rotation relative des deux tronçons de la poutre dès que le moment atteint sa valeur plastique M_p . Une telle rotule s'appelle rotule plastique.

I.4 FACTEURS AFFECTANT LA VALEUR DU MOMENT PLASTIQUE

La théorie plastique simple développée précédemment est basée sur le concept de rotule plastique, d'après lequel une rotation relative indéfinie de deux tronçons d'une poutre se produit lorsque le moment fléchissant dans la section séparant ces tronçons atteint la valeur du moment plastique supposée constante et tel que : $M_p = f_r \cdot Z (*)$.

Cette formule (*) est établie en supposant que la poutre était soumise à la flexion pure.

Dans ce qui suit, on étudiera les cas où la poutre est soumise à la flexion accompagnée d'effort normal et d'effort tranchant.

On aura à discuter de l'effet de N et V sur la valeur du moment plastique.

I.4.1 Effet de l'effort normal sur la valeur du moment plastique

1. Théorie générale : étude de la plastification d'une section ([10], [27])

Considérant une poutre possédant un plan de symétrie, fait d'un matériau élasto-plastique défini par la figure I.12, et soumise à la flexion plane composée dans son plan de symétrie.

Quand l'effort de traction excentrique N augmente, la répartition des contraintes normales dans l'étendue d'une section droite passe par les trois stades suivants :

1. Distribution élastique (figure I.13a).
2. Distribution élasto-plastique avec plastification d'un seul coté (figure I.13b).
3. Distribution élasto-plastique avec plastification des deux cotés (figure I.13c).

Elle tend vers le stade plastique ultime (figure I.13d) où le diagramme des contraintes est composé de deux rectangles inégaux.

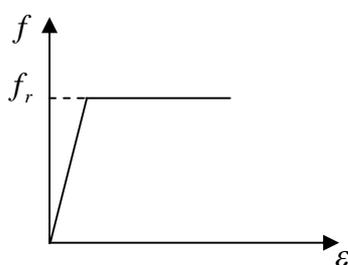


Figure I.12 courbe des contraintes en fonction de l'allongement

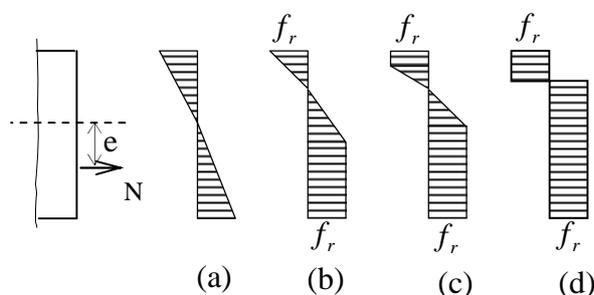


Figure I.13 Evolution des contraintes dans une section comprimée et fléchie

Pour une valeur donnée de l'effort normal N ou de l'excentricité e , on peut montrer que la courbure tend vers l'infini tandis que le moment tend asymptotiquement vers une valeur limite, désigné par M qui est caractérisé par le diagramme (d).

Pour l'étude de l'effet de l'effort normal sur la valeur de ce moment ultime, considérant une poutre dont la section droite présente deux axes de symétrie

En admettant que la section est entièrement plastifiée, on obtient la distribution des contraintes bi rectangulaire représenté à la figure I.14.

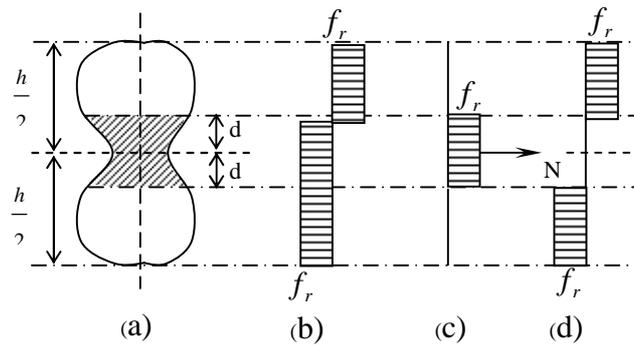


Figure I .14 Distribution des contraintes bi rectangulaire d'une section droite à deux axes de symétrie

Pour calculer l'effort normal et le moment fléchissant, on décompose le diagramme en deux parties (figure I.14c et I.14d), l'une s'étendant de part et d'autre de l'axe de symétrie sur une hauteur $2d$ et équilibrant l'effort normal, et l'autre de résultante nulle équilibrant le moment M .

Cette décomposition montre que le moment plastique de flexion pure M_p est réduite d'une quantité représentée par le moment plastique M_p^d de la portion centrale de la poutre dont la hauteur est $2d$.

$$M = M_p - M_p^d \quad (\text{I.14a})$$

Si A_d est l'aire de cette portion, on a, d'après la figure I.14c

$$N = f_r \cdot A_d \quad (\text{I.14b})$$

Si l'on se donne la valeur de l'effort normal, on peut en déduire A_d par la formule (I.14b) puis, en calculant M_p^d , en déduit la pente de la valeur du moment plastique.

$$N_p = f_r \cdot A \tag{1.15}$$

Pour lequel la section devient plastique en traction ou en tenant compte de (b), on peut écrire :

$$\frac{N}{N_p} = \frac{A_d}{A}.$$

D'après la théorie plastique :

$$M_p = Z \cdot f_r, \quad M_p^d = Z_d \cdot f_r \tag{I.14c}$$

Avec :

Z : module de flexion plastique de la section droite entière.

Z_d : Module de flexion plastique de l'aire A_d .

En divisant par M_p l'égalité (I.14a), et en tenant compte des expressions (I.14c), on obtient les relations suivantes :

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \frac{Z_d}{Z} \tag{1.16}$$

2. Application [27]

a. Section rectangulaire (courbe (a), figure I. 16)

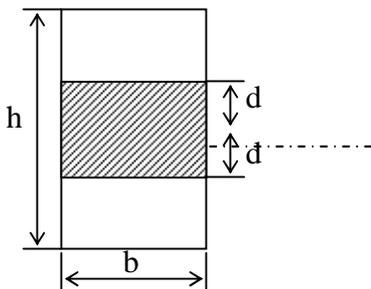


Figure I.15 Section rectangulaire

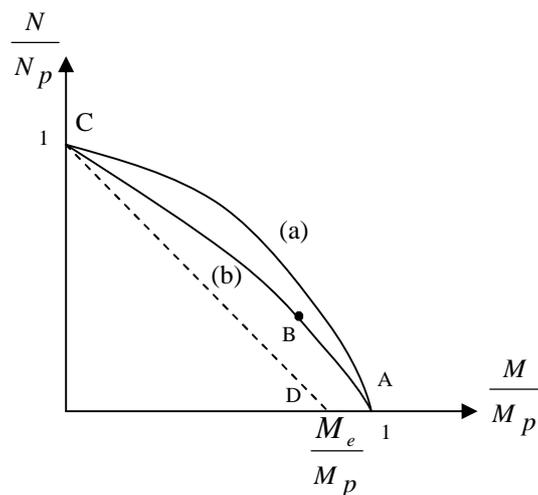


Figure I.16 Courbe d'interaction

On a dans ce cas :

$$\frac{N}{N_p} = \frac{2d}{h} \quad , \quad Z = \frac{bh^2}{4} \quad , \quad Z_d = bd^2$$

D'après (I.16) :
$$\frac{M}{M_p} = 1 - \frac{4d^2}{h^2}$$

En éliminant $\frac{d}{h}$ entre ces deux dernières équations, on trouve la relation :

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \left(\frac{N}{N_p} \right)^2 \tag{I.17}$$

Dans le système d'axe $\left(\frac{M}{M_p} , \frac{N}{N_p} \right)$, la relation (I.17) est représentée par une parabole à un axe horizontal courbe (a) (figure I.16).

b. Section en double Té fléchie autour de l'axe fort (courbe (b), figure I.15)

Considérons le profil comme formé de trois rectangles d'aires respectives :

$$\frac{A_f}{2} \quad , \quad A_w \quad , \quad \frac{A_f}{2} .$$

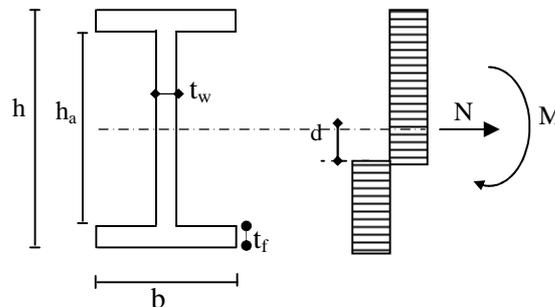


Figure I.17 Section en double té fléchie

- Si l'axe neutre passe par l'âme :

Le cas où la ligne des contraintes tombe dans l'âme. La figure (I.17) montre que ce cas est réalisé tant que :

$$\frac{N}{N_p} = \frac{2.d.a}{A} < \frac{A_w}{A}$$

$$Z_d = a.d^2 .$$

En introduisant cette expression dans la formule générale (I.16), on trouve :

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \left(\frac{N}{N_p} \right) \cdot \frac{A^2}{4.a.Z_y}, \text{ pour } \left(\frac{N}{N_p} < \frac{A_w}{A} \right) \quad (\text{I.18})$$

- Si l'axe neutre passe par l'une des semelles :

$$\text{Pour } \left(\frac{N}{N_p} \leq \frac{A_w}{A} \leq 1 \right)$$

$$\frac{M}{M_p} = \frac{A \cdot (1 - N/N_p) [h - [A \cdot (1 - N/N_p)]] / 2.d}{2.Z_y} \quad (\text{I.19})$$

La loi (I.18) correspond à la partie « AB » de la courbe (b) de la figure (I.16).

La partie « BC » de cette courbe correspond au cas où la ligne de contrainte nulle est dans la semelle.

On a également représenté en pointillé sur le diagramme, figure (I.16) la droite (CD) d'équation :

$$\frac{N}{A.f_r} + \frac{M}{f_r \cdot w} = 1 \quad (\text{I.20})$$

c. Section en double Té fléchie autour de son axe faible

- Si l'axe neutre est dans l'âme :

$$\frac{M}{M_p} = 1 - \frac{A^2 (N/N_p)^2}{4.h.Z_z} \quad (\text{Pour } 0 \leq \frac{N}{N_p} \leq \frac{a.h}{A}) \quad (\text{I.21})$$

- Si l'axe neutre est dans la semelle :

$$\frac{M}{M_p} = \frac{A^2}{8.d.Z_z} \left[\frac{4.b.t}{A} - \left(1 - \frac{N}{N_p} \right) \right] \left(1 - \frac{N}{N_p} \right). \quad (\text{Pour } \frac{a.h}{A} \leq \frac{N}{N_p} \leq 1) \quad (\text{I.22})$$

I.4.2 Effet de l'effort tranchant sur la valeur du moment plastique [10], [27]

Dans une poutre soumise à la flexion simple, le moment fléchissant est généralement variable d'une section à une autre. Il est par conséquent accompagné d'un effort tranchant qui

$$\text{est : } V = \frac{dM}{dx}$$

Le problème est donc de déterminer l'effet de l'effort tranchant sur la valeur du moment plastique.

Donc trouver une équation de la forme :

$$F\left(\frac{M}{M_p}, \frac{V}{V_p}\right) = 0$$

Evidemment la formule du chargement joue aussi un rôle sur la forme de l'interaction.

Le point général à considérer est la jonction âme - semelle de poutre en double T (figure I.18).

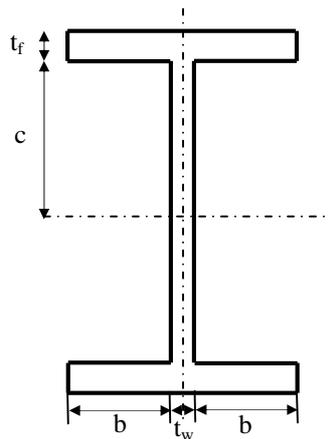


Figure I.18 Poutre en double T

Elle est traitée comme composée de :

- d'une âme rectangulaire $t_w \times 2c$;
- de quatre éléments de semelle $t_f \times b$ chacun ;
- de deux zones de jonction âme - semelle $t_f \times t_w$;

Dans la section d'encastrement :

$$\tau_r = f_r / \sqrt{3}, \text{ la limite d'élasticité du métal en cisaillement.}$$

On trouve :

$$w_p = (2.b + t_w)(2.c + t_f) + c^2 t_w. \quad (I.23)$$

$$M_p = [(2.b + t_w)(2.c + t_f).t_f + c^2.t_w]f_r \quad (I.24)$$

$$V_p = t_w.(2.c + t_f).\tau_r \quad (I.25)$$

$$\alpha = \frac{2.b.t_f}{c.t_w} ; \quad \beta = \frac{b}{c} ; \quad \gamma = \frac{t}{c} \quad (I.26)$$

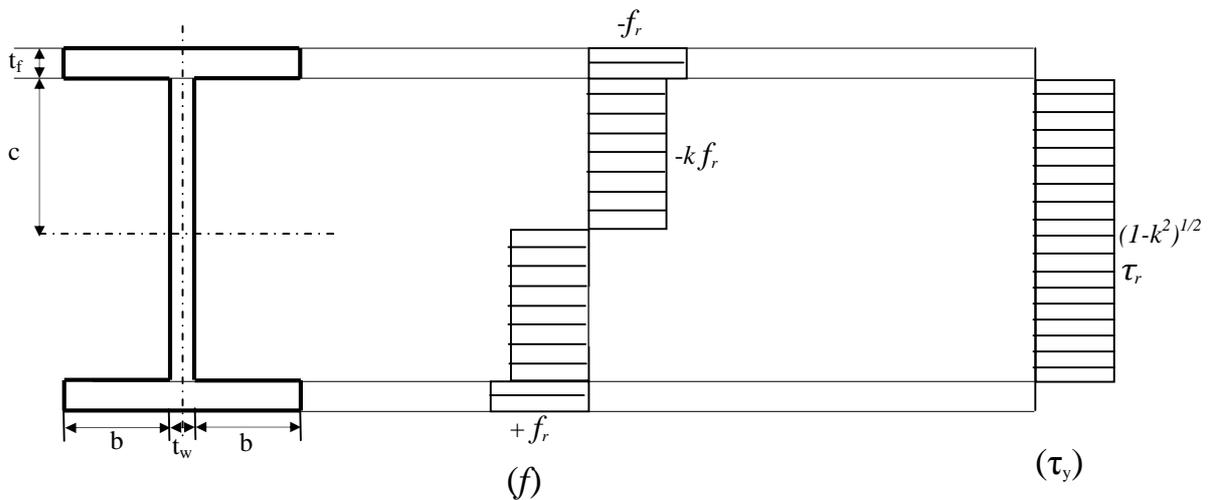


Figure I.19 Diagramme des contraintes sous l'effort tranchant

Dans l'âme :

$$f^2 = f_y^2 + \tau_{yz}^2$$

Le métal étant plastifié sur toute la hauteur de la section.

$$M = (2.b + t_w)(2.c + t_f).t_f.f_r + t_w.c^2.k.f_r. \quad (I.27)$$

$$V = 2.c.t_w(1 - k^2)^{1/2} \tau_r. \quad (I.28)$$

$$M_p = (2.b + t_w)(2.c + t_f).t_f.f_r + t_w.c^2.f_r \quad (I.29)$$

$$V = 2.c.t_w.\tau_r \quad (I.30)$$

D'où les rapports additionnels suivants:

$$m \equiv \frac{M}{M_p} = 1 + \frac{k-1}{1 + (2+\gamma)(\alpha+\gamma)} \quad (\text{I.31})$$

$$v \equiv \frac{V}{V_p} = (1 - k^2)^{1/2} \quad (\text{I.32})$$

Si on introduit le moment plastique des semelles seules :

$$M_0 = (2b + t_w)(2c + t_f)t_f \cdot f_r \quad (\text{I.33})$$

Et,

$$m_0 = \frac{M_0}{M_p} = \frac{(\alpha + \gamma)(2 + \gamma)}{1 + (\alpha + \gamma)(2 + \gamma)} \quad (\text{I.34})$$

Il s'en suit de I.33 :

$$1 + (\alpha + \gamma)(2 + \gamma) = \frac{1}{1 - m_0} \quad (\text{I.35})$$

I.34 va s'écrire aussi:

$$1 - k = \frac{1 - m}{1 - m_0} \quad (\text{I.36})$$

En éliminant le paramètre k entre (I.31) et (I.35), on aura :

$$v = \left\{ 1 - [1 - (1 - m)/(1 - m_0)]^2 \right\}^{1/2} \quad (\text{I.37})$$

Qui peut encore s'écrire :

$$\boxed{(1 - v^2)^{1/2} + \frac{1 - m}{1 - m_0} = 1} \quad (\text{I.38})$$

Remarque

Si $v = 0$, la formule donne $m = 1$, c'est-à-dire le plein moment plastique.

Si au contraire $v = 1$, c'est-à-dire que l'âme est modélisée pour résister à l'effort tranchant, on aura $m = 0$

I.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur ce qu'est le comportement d'une section particulièrement en acier. L'intérêt est que le comportement plastique révèle un gain de matière car la section se comporte jusqu'à atteinte de sa limite élastique dans toute son aire. Cet état limite donne lieu à une formation de rotule plastique. Ce phénomène est d'une grande importance dans les comportements cycliques.

Chapitre II

INTERET DU CALCUL PLASTIQUE**II.1 Introduction**

Dans le calcul en élasticité, un état limite admissible est un état pour lequel, sous les charges pondérées, un point de la structure atteint la limite admissible.

Dans le calcul en plasticité, un état limite admissible est un état pour lequel, sous les charges pondérées multipliées par un coefficient de sécurité donné, la structure atteint la ruine, c'est-à-dire devient hors usage.

II.2 Conception des structures en plasticité

Comparons la structure optimale obtenue par un calcul en élasticité avec la structure optimale obtenue par un calcul en plasticité.

II.2.1 Optimum absolu

Le domaine admissible pour les charges est défini différemment en élasticité et en plasticité [25].

Une structure optimale en élasticité est une structure pour laquelle, sous les charges pondérées, le moment dans chaque section est égal au moment élastique maximum dans cette section.

Pour obtenir une structure optimale absolue pour un calcul en plastique, on divise les éléments de la structure en un grand nombre de morceaux, de façon que chacun d'eux ait une sortie constante. A l'état ultime, toutes les sections de la nouvelle structure sont à leur limite de résistance.

II.2.2 Optimum réalisable

Cette structure de poids minimum absolu est en général formée de barres à inertie variant de façon complexe. Elle servant de réalisation très couteuse. On est donc amené à choisir une loi simple de variation d'inertie (en général à inertie constant) et à limiter le nombre de profils différent dans la même structure. Avec les conditions, les optima en élasticité et en plasticité sont différents.

Cependant, l'optimum en plasticité est moins pénalisant. En effet, grâce à l'adaptation plastique, les efforts se répartissent dans un grand nombre de sections, phénomène qui n'existe pas en élasticité.

Ainsi, pour une structure à S types de sections différentes, en dimensionnement élastique, S sections seront optimisées, c'est-à-dire, dans les S sections le moment est égal au moment élastique maximal.

Par contre, en dimensionnement plastique ($S+h$) sections seront optimisées, h étant le nombre d'hyperstaticité de la structure. A l'état de ruine ($S+h$) sections seront plastifiées.

Le dimensionnement plastique est donc plus proche de l'optimum absolu. Evidemment cet avantage est plus visible pour les structures hyperstatiques puisque $h = 0$ pour les structures isostatiques.

Sur l'exemple de la poutre suivante, examinant deux types de structures : isostatique et hyperstatique.

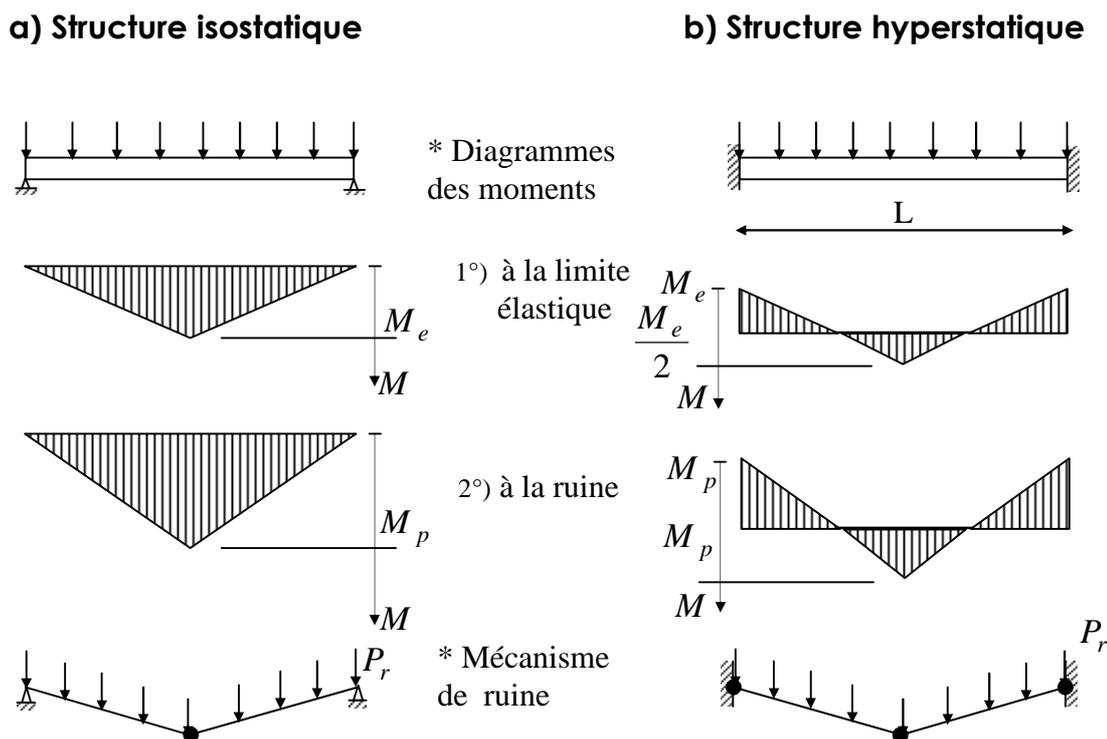


Figure II.1 Exemple de formation de rotules plastiques dans deux poutres isostatiques et hyperstatiques

II.3 Bénéfice en résistance dû à la plastification

Soit la structure représentée à la figure II.2 ci-dessous. Il s'agit d'une poutre bi-encastree uniformément chargée sur sa longueur [27].

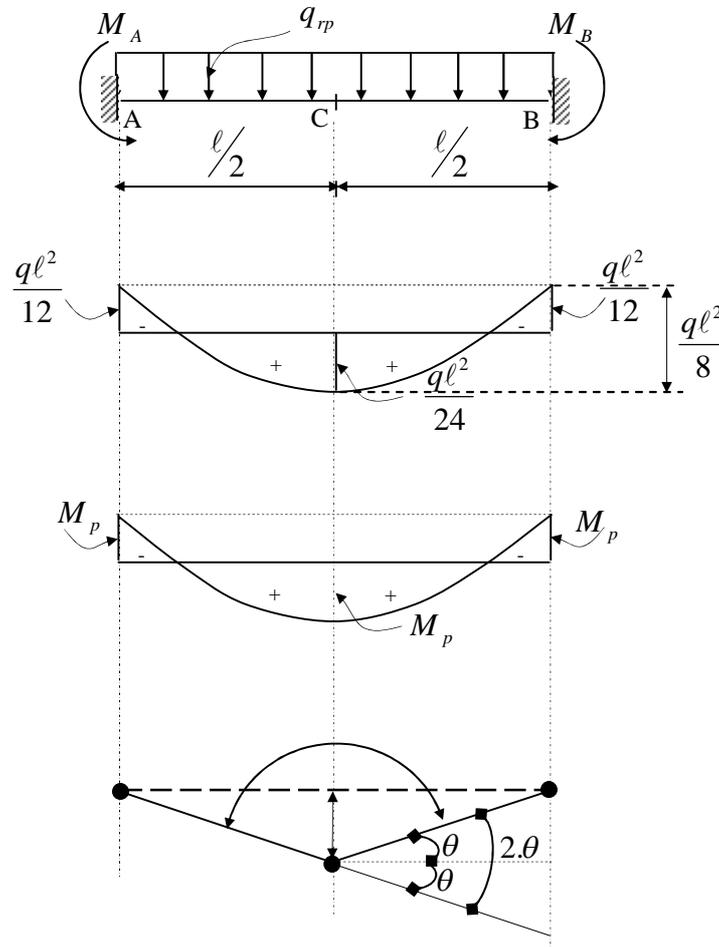


Figure II.2 Formation de rotules plastiques dans une poutre uniformément chargée

- dans le domaine élastique, les moments d'encastrement $M_A = M_B = \frac{q\ell^2}{12}$.
- l'expression du moment courant à une abscisse x de l'appui A s'écrit :

$$M(x) = \frac{q \cdot x \cdot (\ell - x)}{2} - \frac{q\ell^2}{12} \quad (\text{II.1})$$

Le moment maximum M_{\max} est atteint pour : $x = \frac{\ell}{2}$.

$$M_{\max} = \frac{q\ell^2}{24} \quad (\text{II.2})$$

La charge limite élastique :

$$|M_A| = |M_B| = \frac{q\ell^2}{12} = M_e \Rightarrow q_e = \frac{12.M_e}{\ell^2} \quad (\text{II.3})$$

Conformément au concept de rotule plastique exposé précédemment (chapitre I), la poutre se comporte élastiquement jusqu'à l'instant où les moments d'encastements M_A et M_B atteignent le moment plastique M_p , et formation de rotules plastiques en A et B (Figure II.2).

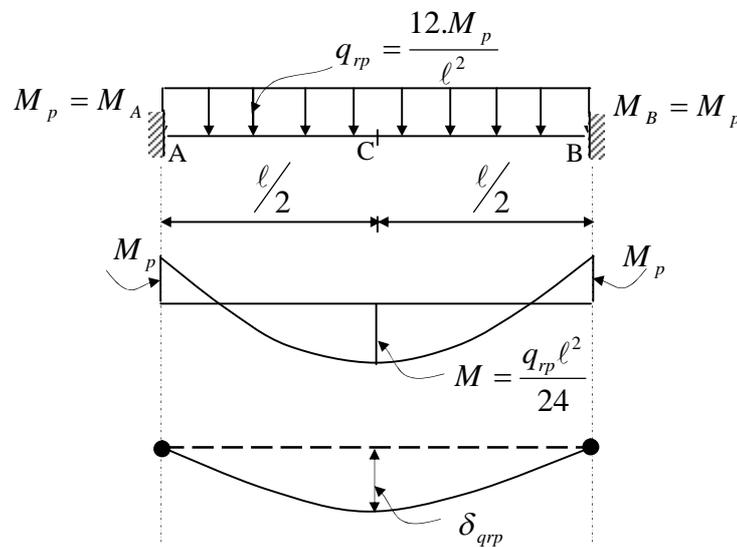


Figure II.3 Formation de deux rotules plastiques simultanément dans une poutre uniformément chargée

A ce moment la charge « q » vaut :

$$q_{rp} = \frac{12.M_p}{\ell^2} \quad (\text{II.4})$$

Avec : $q_{rp} = q_{\text{rotule..plastique}}$ la charge pour laquelle on a formation de deux rotules plastiques simultanément en A et en B (figure II.3)

La flèche δ_{qrp} vaut :

$$\delta_{qrp} = \frac{5.M_p.\ell^2}{32.E.I} \quad (\text{II.5})$$

Si on augmente la charge q au delà de la charge q_{rp} , les deux rotules plastiques formées en A et B tournent d'un certain angle θ , et les valeurs d'encastres en ces deux points ne changent pas ; elles restent égales à la valeur M_p . La poutre est devenue isostatique, l'hyperstaticité ayant disparu car $M_A = M_B = M_p$

Pour $q > q_{rp}$, le moment à mi portée $x = \frac{\ell}{2}$ devient :

$$M = \frac{q_{rp} \cdot \ell^2}{24} \quad (\text{II.6})$$

Le régime élasto-plastique de la poutre perdure jusqu'à ce que le moment à mi-portée de la poutre atteigne à son tour la valeur de M_p sous la charge limite plastique q_ℓ .

L'atteinte de la valeur M_p à mi-portée correspond à la formation de la troisième rotule plastique.

La formation de la troisième rotule annule l'isostaticité de la poutre et transforme celle-ci en un système astatique, c'est-à-dire, en un mécanisme articulé en trois points A, B et C (mécanisme de ruine).

La charge limite q_ℓ est donnée par :

$$M_{(x=\frac{\ell}{2})} = \frac{q\ell^2}{8} - M_p$$

$$q = q_\ell \Rightarrow M_x = M_p$$

d'où :

$$q_\ell = \frac{16 \cdot M_p}{\ell^2} \quad (\text{II.7})$$

▪ Réserve de résistance

L'analyse plastique qui vient d'être développée montre que les systèmes hyperstatiques ductiles soumis à la flexion possèdent une réserve de résistance dans le domaine plastique qui leur est propre.

Dans le cas actuel de la poutre encadrée chargée uniformément sur toute sa longueur par une charge répartie « q », cette réserve est de :

$$\Delta_q = \left(\frac{q_\ell - q_{rp}}{q_{rp}} \right) \times 100 = \left(\frac{\frac{(16-12).M_p}{\ell^2}}{\frac{12.M_p}{\ell^2}} \right) \times 100 = 33,3\% \Rightarrow q_\ell = 1,33.q_{rp}.$$

Ou bien : $q_\ell = q_{rp} + 0,33.q_{rp}$

$0,33.q_{rp}$: bénéfice de résistance ou réserve de résistance, sans compter la résistance supplémentaire due à l'écart entre q_{rp} et q_ℓ .

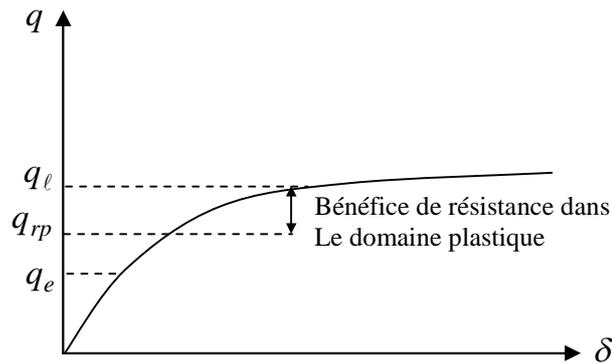


Figure II.4 Courbe illustrative du bénéfice de résistance

La réserve due à la plastification progressive des deux sections d'extrémité A et B de la poutre, qui est d'environ 14 % pour les profilées métalliques en double T, en particulier le profilé IPE.

$$\begin{aligned} \Delta_{q_{\text{profilée}}} &= \left(\frac{q_{rp} - q_\ell}{q_\ell} \right) \times 100 = \left(\frac{\frac{12.M_p}{\ell^2} - \frac{12M_\ell}{\ell^2}}{\frac{12.M_\ell}{\ell^2}} \right) \times 100 \\ &= \left(\frac{M_p - M_e}{M_e} \right) \times 100 \\ &= \left(\frac{M_p}{M_e} - 1 \right) \times 100 = (1,14 - 1) \times 100 = 14\% \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{D'où : } \Delta_{q_{\text{totale}}} &= \Delta_{q_{rp \rightarrow q_\ell}} + \Delta_{q_{q_\ell \rightarrow q_{rp}}} \\ &= 33\% + 14\% = 47\% \end{aligned}$$

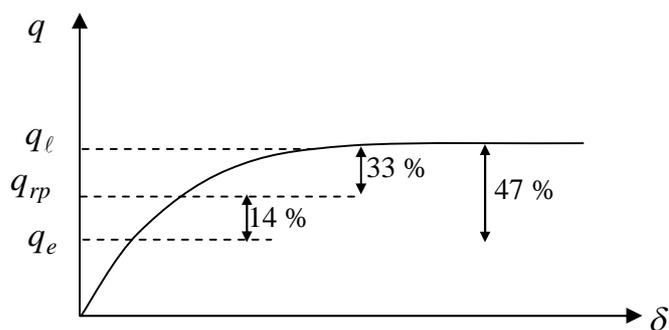


Figure II.5 Courbe illustrative du bénéfice de résistance en pourcentage

II.4 Domaine d'application du calcul en plasticité

En plasticité comme en élasticité les méthodes de calculs, ou bien les techniques qui permettent d'obtenir les sollicitations (effort normal, effort tranchant, moment de flexion, moment de torsion) dans les barres, connaissant les actions agissant sur la structure, sont plus au moins complexes suivant le cadre d'hypothèse dans lequel on se place.

Pour appliquer les recommandations de calcul en plasticité, il n'est pas nécessaire de recourir à des méthodes très élaborées et très coûteuses si l'on respecte un certain nombre de conditions données dans les recommandations et qui délimitent leur domaine de validité.

L'acier, la structure, les barres et les charges doivent présenter des caractéristiques afin d'entrer dans le domaine d'application des règles [10].

▪ L'acier

L'acier doit pouvoir être assimilé à un matériau élasto-plastique parfait. Il doit être ductile. Cette propriété permet une redistribution des efforts dans la structure. L'acier doit posséder une zone d'écrouissage ou de raffermissement en fin de palier de plasticité (figure II.6) même si le module d'écrouissage E_s est faible. L'écrouissage est nécessaire pour éviter que les déformations plastiques soient localisées sur une zone très limitée dans les barres.

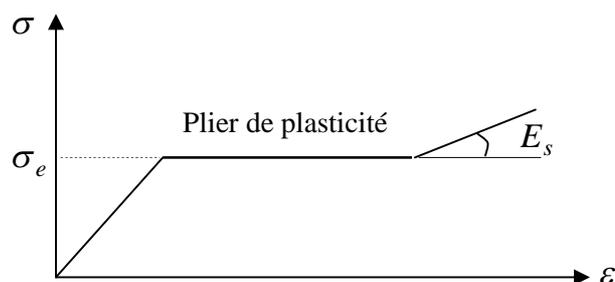


Figure II.6 Courbe de contraintes en fonction de l'allongement

▪ **La structure**

Les structures doivent être relativement rigides, ceci assure que les déformations plastiques nécessaires à leur adaptation ne soient pas trop importantes, ce qui, dans le cas contraire, risquerait de provoquer des voilements locaux, et aussi d'éviter les risques d'instabilité globale.

▪ **Les barres**

Les barres doivent être telles que dans les zones plastifiées les déformations nécessaires à l'adaptation de la structure puissent se produire sans que les barres ne perdent de résistance ; en particulier des phénomènes de voilement local ne doivent pas apparaître.

Pour se prémunir contre cette instabilité, des valeurs minimales sont imposées aux épaisseurs des composantes des sections (âme, semelle, raidisseur).

▪ **Les charges**

Les charges doivent agir dans le plan de la structure.

Lorsque les charges variables sont importantes par rapport aux charges fixées, il faut être plus prudent dans l'utilisation du calcul en plasticité. Deux phénomènes peuvent ce produire : le calcul de déformation et la fatigue plastique.

II.5 Méthodes de calcul en plasticité [25]

Un autre avantage de calcul en plasticité réside dans les méthodes de calcul elles-mêmes. En effet celles-ci peuvent être très simples pour un calcul manuel approché ou très automatisé pour un calcul sur ordinateur.

Parmi ces méthodes, la méthode statique, la méthode cinématique, le calcul par la programmation linéaire, la méthode pas à pas et la méthode par distribution de moments.

Pour un calcul normal, la méthode la plus efficace est la méthode cinématique ou méthode de mécanismes qui permet de calculer la charge de ruine ou de pré dimensionner une structure simple.

Si la structure est complexe, nous pouvons utiliser des méthodes faisant appel à la formulation linéaire, technique très efficaces sur ordinateur.

II.6 Conclusion

Ce chapitre montre l'amélioration qu'apporte le calcul plastique par rapport au calcul élastique. Notamment dans les structures hyperstatiques qui sont quasi fréquente dans les constructions a usage d'habitation ou autres équipements : administrations, écoles, hôpitaux.....etc.

Le phénomène de redistribution d'efforts joue un grand rôle dans le comportement des ces structures hyperstatiques.

Chapitre III

Dissipation d'énergie sismique – Courbes hystérétiques**III.1 Introduction**

En général, le calcul des structures sous actions sismiques se fait élastiquement pour des forces définies dans les codes de calcul.

Ces forces sont généralement plus faibles que les forces réelles susceptibles de se développer. Pourtant ces mêmes structures se tiennent bien pour peu que les dimensionnements soient adéquats [3]. Cette faculté est due au fait que les structures dissipent de l'énergie au moyen de déformations plastiques. Cette notion se retrouve dans les codes de calcul récents (Eurocode 8, RPA 2003, [8], [12]).

III.2 Lois de comportement [4]

La notion de déformation plastique se traduit dans un cycle de chargement alterné par les lois de comportement qui expriment la relation entre déformations et contraintes d'un matériau.

A cet égard on trouve dans la littérature a description de plusieurs types de lois de comportement.

III.2.1 Lois de comportement dans le domaine élastique

L'équation d'équilibre du mouvement d'un oscillateur de masse m est réalisée quand :
Figure III.1a.

$$m \cdot \ddot{x}_a(t) + c \cdot \dot{x}(t) + K[x(t)] = 0 \quad (\text{III.1})$$

(a) (b) (c)

Avec :

- a) Terme d'inertie
- b) Terme d'amortissement
- c) Terme de rigidité

Dans ce cas le terme de matrice de rigidité est constant dans le temps et la courbe régissant ce type de comportement est décrite dans la figure III.1b

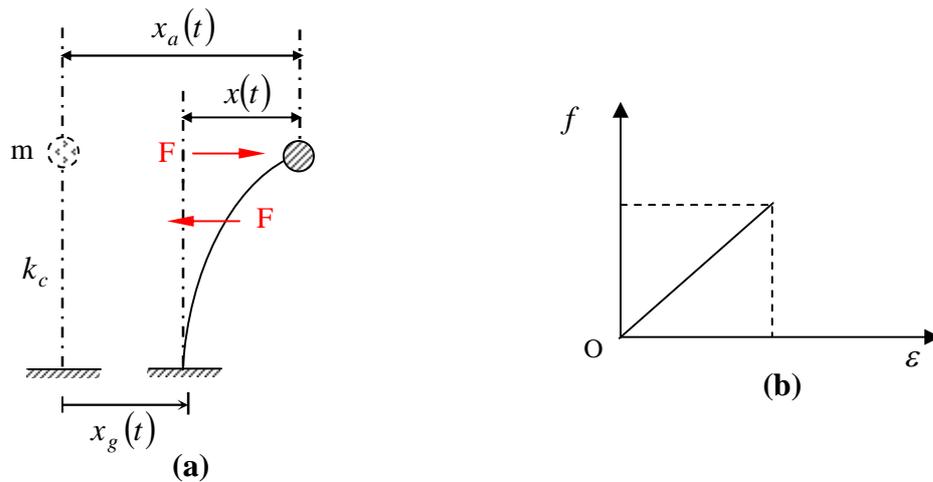


Figure III.1 Oscillateur à 1DDL

Dans la figure ci-dessus (figure III.1), on notera que :

$x(t)$: Déplacement relatif de la masse m .

$x_g(t)$: Déplacement du sol en fonction du temps.

$x_a(t)$: Déplacement absolu de la masse m , $x_a(t) = x_g(t) + x(t)$

III.2.2 Lois de comportement dans le domaine inélastique [14]

Dans ce type de comportement, la matrice de rigidité qui représente le terme de rappel est variable dans le temps. L'équation d'équilibre du mouvement du même oscillateur est décrite par l'équation III.2 :

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k(t) \cdot x(t) = -m \ddot{x}_g(t) \quad (\text{III.2})$$

Dans ce cas la littérature rapporte plusieurs types de courbes de lois de comportement. On y trouve :

- courbe non linéaire quelconque (figure III.2a),
- courbe élasto-plastique parfait (figure III.2b),
- courbe non linéaire avec écrouissage (figure III.2c),

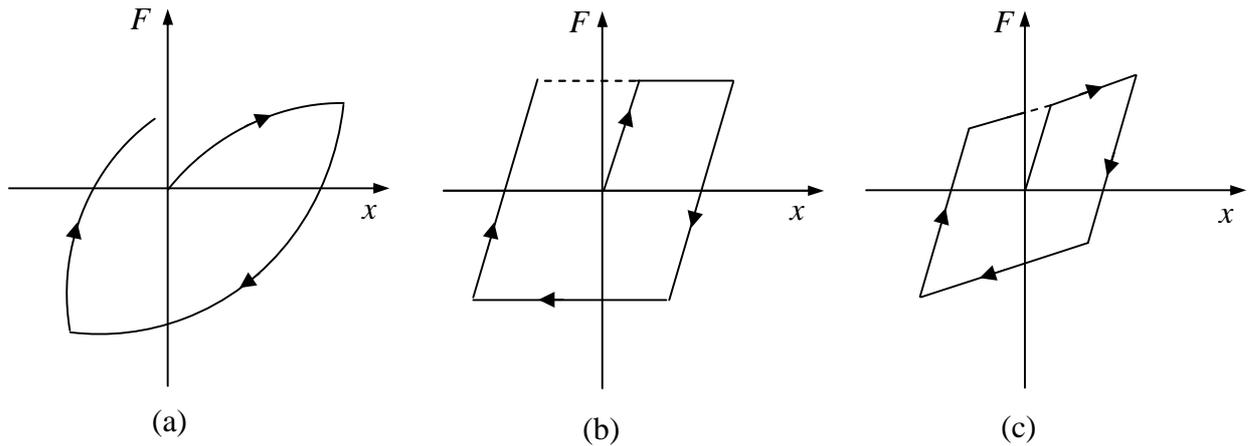


Figure III.2 Différentes courbes de comportement

Dans notre étude, on s'est basé sur la figure III.2c avec la fonction de la matrice de d'amortissement suivante : $[C] = \alpha[M] + \beta[K]$, [36].

III.3 Qualités du matériau acier [3]

On considère que le matériau acier répond à l'objectif décrit précédemment : faculté de se déformer plastiquement et sans rupture. Celui-ci est en effet caractérisé par:

- un allongement élastique maximal de 0,1 à 0,3%,
- un allongement correspondant à la charge de ruine de 7 à 10%,
- un allongement correspondant à la rupture de 15 à 20%,
- une contrainte de rupture qui vaut 1,2 à 1,5 fois la limite élastique [43] (figure III.3).

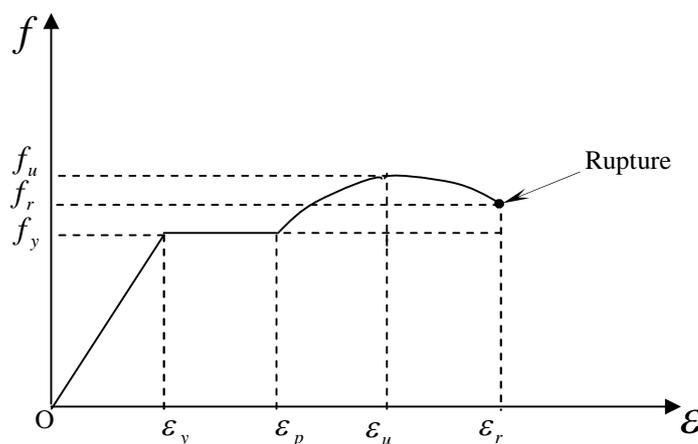


Figure III.3 Courbe de comportement de l'acier en traction

Ainsi dans le cas d'un joint dont le comportement est idéal élasto-plastique (figure III.4) ; l'énergie dissipée dans un cycle est :

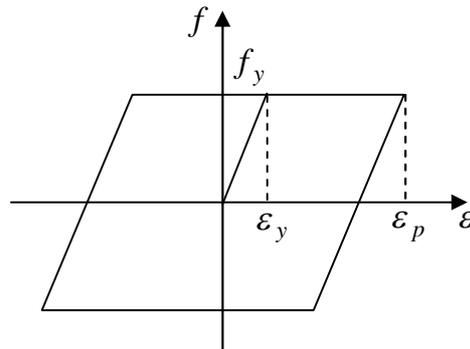


Figure III.4 Comportement d'un assemblage idéalement élasto-plastique

$$E_p = (E_p - E_y) \times f_y \times 4 = 4f_y(E_p - E_y)$$

$$E_e = \frac{1}{2} \times E_p \times f_y \times 2 = E_y \times 2$$

$$\frac{E_p}{E_e} = 4 \left[\frac{e_p}{e_y} - 1 \right]$$

Comme : $\frac{e_p}{e_y} = \frac{10}{0,3} = 33$

Alors : $\frac{E_p}{E_e} = 4.(33 - 1) = 4 \times 32 = 128$

Si on passe maintenant du comportement de l'assemblage idéalement élasto-plastique au comportement réel, on trouve une réduction de ce rapport. A cela il y a plusieurs raisons :

- instabilité des parois comprimées de section fléchies, (figure III.5),
- instabilité des éléments de structures par flambement ou voilement d'ensemble, figure (3-6),
- instabilité de l'ensemble de la structure (figure III.7),
- rupture fragile ou semi fragile (figure III.8),
- dégradation des courbes charge - déplacement résultant du caractère cyclique des actions appliquées (figure III.9),

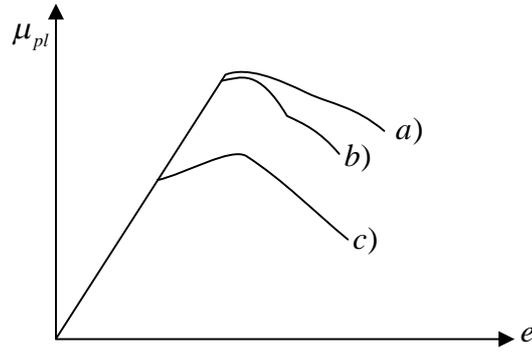


Figure III.5 Instabilité des parois comprimées $\frac{b}{t}$ en diminuant de a) à c)

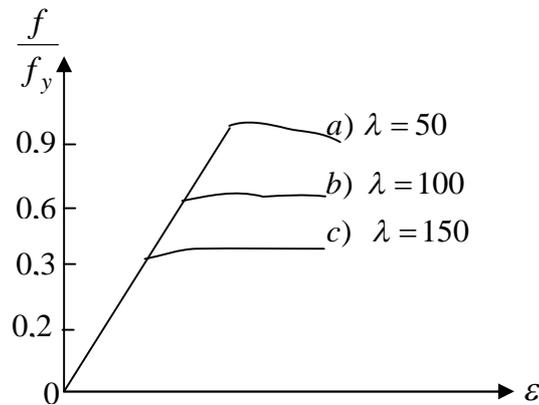


Figure III.6 Instabilité d'élément par flambement

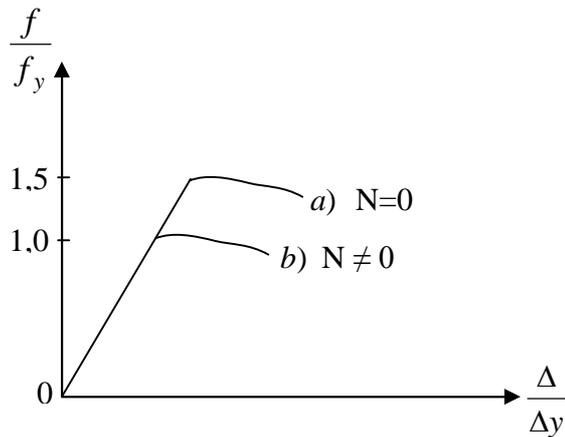


Figure III.7 Instabilité d'ensemble de la structure

Si les assemblages sont moins résistants que les barres qu'ils assemblent, on ne peut développer sa pleine capacité plastique de ces barres et profiter de leur caractéristique de ductilité. Le cas de diagonales tendues des contreventements en treillis en constitue un exemple (figure III.6).

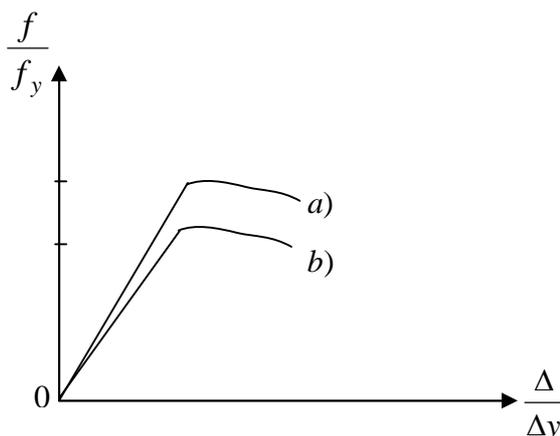


Figure III.8 Résistance d'assemblage : a) soudé, b) boulonné

Enfin, la répétition de cycles de chargement constitue une autre cause de dégradation progressive de la résistance de la structure (figure III.9).

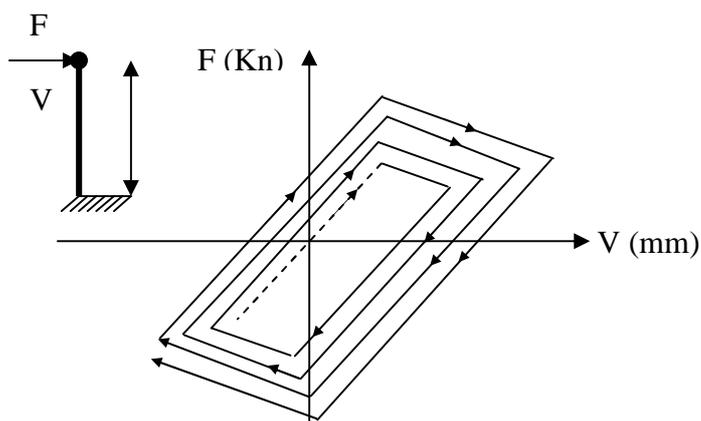


Figure III.9 Répétition de cycles de chargement

Tous ces phénomènes perturbateurs du comportement d'éléments de structures par rapport à un comportement élasto-plastique idéal ne sont pas faciles à quantifier.

A l'heure actuelle, pour contourner ces phénomènes perturbateurs, on impose dans les codes de calcul des règles de restriction, en particulier :

- $\frac{b}{t}$ des parois sont limitées à des valeurs faibles,
- les barres comprimées ne sont pas considérées comme dissipatives d'énergie,
- les effets du second ordre sont sévèrement limités,
- éviter toute rupture peu ductile des assemblages. Pour cela on donne une résistance aux assemblages 20 à 30% supérieure à celle des éléments assemblés.

III.4 Paramètres utiles pour un projet parasismique [3]

Depuis que les ingénieurs ont pris connaissance du problème de résistance des constructions aux actions sismiques, des essais de chargements cycliques quasi statiques de toutes sortes d'élément, voire de constructions entières ont été effectués.

Cependant, divers problèmes se posent dès lors qu'on veut effectuer des comparaisons entre ces essais.

Avant de discuter du choix d'une procédure expérimentale, il est nécessaire d'établir par quels paramètres, il conviendrait de caractériser les éléments de structures dans le contexte de l'action sismique.

On prend ici comme option de départ d'effectuer cette caractérisation en rapportant au comportement élasto - plastique idéal des comportements réels du type présenté à la figure III.10

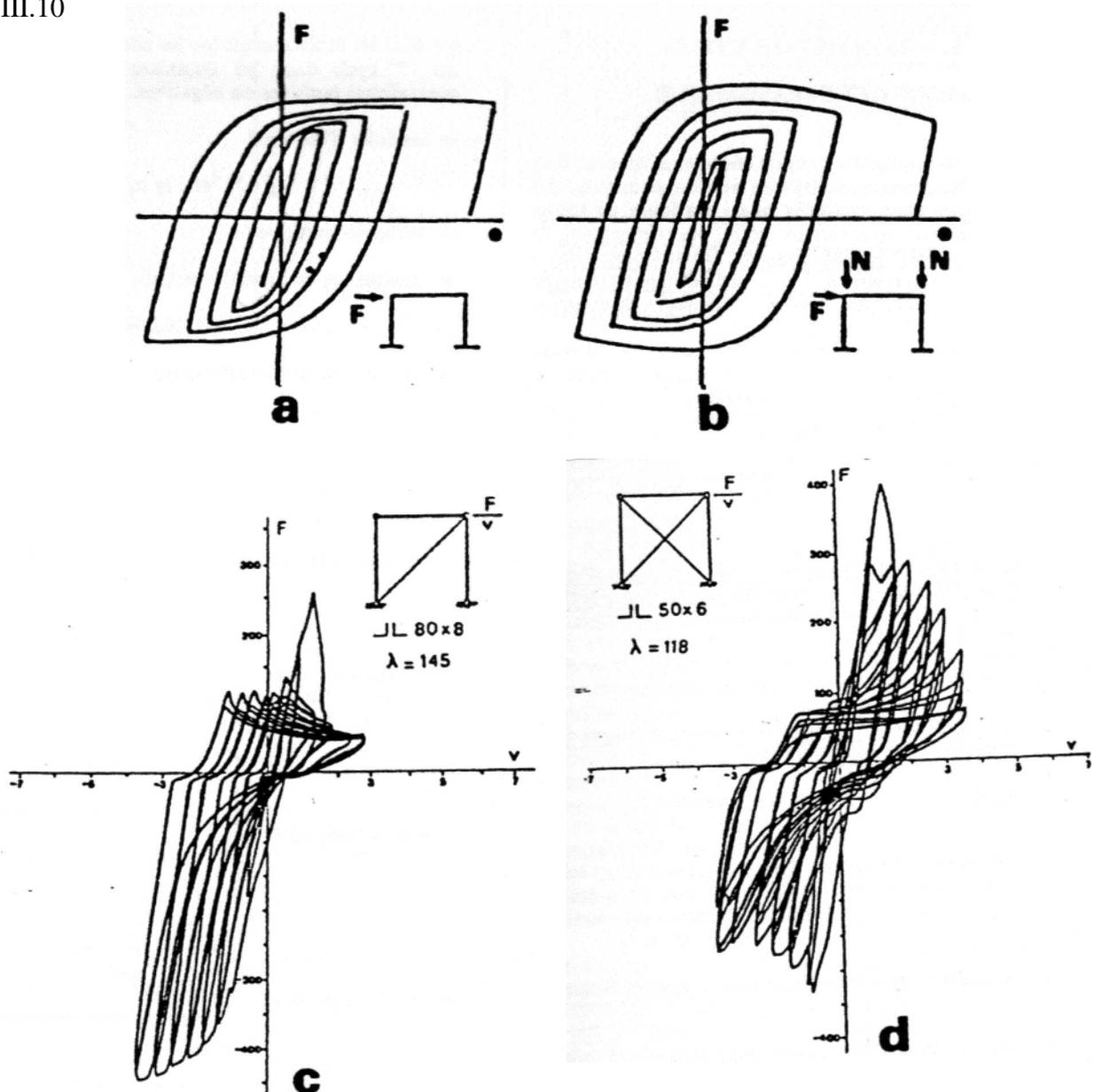


Figure III.10 Différents essais cycliques

Si on se réfère au $i^{\text{ème}}$ cycle du comportement sous action alternée d'un élément de construction idéalement élastique - parfaitement plastique, mais non symétrique dans sa réponse à des actions de signe contraire, les quantités suivantes sont définies de façon univoque (figure III.11).

- F_y^+ et F_y^- , maximums des forces (ou des contraintes),
- $\text{tg}\alpha_y^+$ et $\text{tg}\alpha_y^-$, modules d'élasticité,
- e_i^+ et e_i^- , maximums des déplacements (ou des allongements).

D'où:

$$e_y^+ = \frac{F_y^+}{\text{tg}\alpha_y^+} \quad \text{et} \quad e_y^- = \frac{F_y^-}{\text{tg}\alpha_y^-}$$

- $\mu_{pi}^+ = \frac{e_i^+}{e_y^+}$, $\mu_{pi}^- = \frac{e_i^-}{e_y^-}$: paramètre de ductilité partielle,

- $\mu_i^+ = \frac{\Delta e_i^+}{e_y^+}$, $\mu_i^- = \frac{\Delta e_i^-}{e_y^-}$: paramètre de ductilité totale,

avec :

- $\Delta e_i^+ = e_i^+ + (e_i^- - e_y^-)$: Déplacement maximums positifs,
- $\Delta e_i^- = e_i^- - (e_i^+ - e_y^+)$: Déplacement maximums négatif.

L'énergie dissipée dans le demi - cycle positif et dans le demi - cycle négatif sont :

- $E_i^+ = F_y^+ \cdot \Delta e_i^+$
- $E_i^- = F_y^- \cdot \Delta e_i^-$

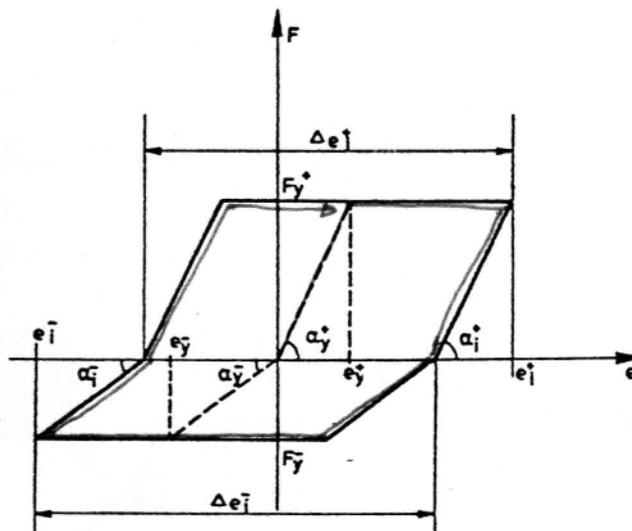


Figure III.11 Diagramme du chargement cyclique

Si on examine maintenant le comportement d'un élément de structure réel, il n'est jamais de type élastique parfaitement plastique et on rencontre immédiatement un problème pour définir les valeurs F_y^+ et F_y^- .

On pourrait envisager les définitions suivantes (figure III.12) :

- Première plastification équivalente à F_y (figure III.12a)
- Valeur maximale atteinte (figure III.12b)
- Valeur à laquelle correspond une déformation qui est un multiple défini de la déformation qui aurait été atteinte à ce niveau de force si l'élément testé avait présenté un comportement élastique. A la figure III.12c, on donne l'exemple où le multiple est 0,2
- Valeur à laquelle correspond un module tangent égal à une fraction fixée du module initial $tg\alpha_y$ (figure III.12d).

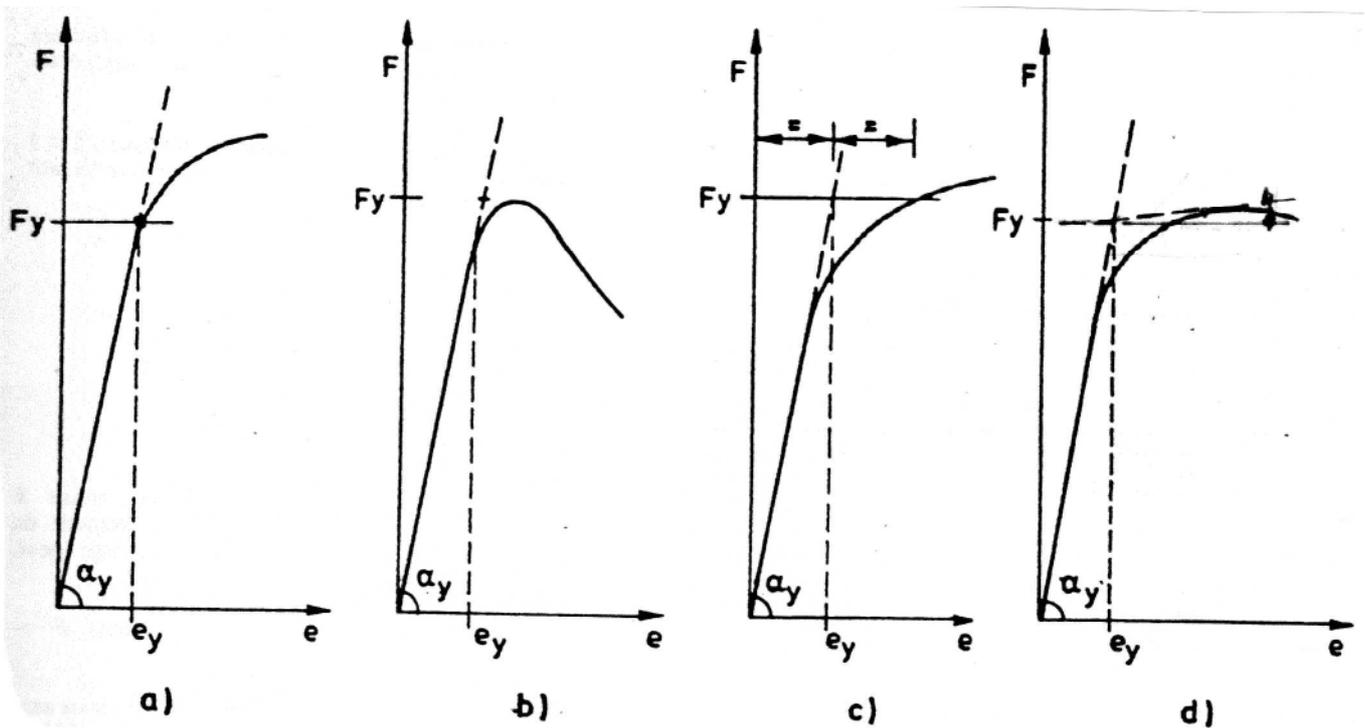


Figure III.12 Définition de la contrainte élastique F_y

Ces définitions appellent quelques commentaires :

- la définition a) ignore les ressources élasto - plastiques de l'élément de structure et peut conduire à une nette sous-estimation de la résistance utile,
- la définition b) présente un intérêt pour les barres comprimées, mais pas pour les éléments fléchis et les assemblages,
- la définition c) à l'inverse de b) s'applique aux éléments fléchis et les assemblages,
- la définition d) est appliquée pour tous les cas mais présente l'inconvénient de ne connaître F_y que lorsque la courbe (F, e) est connue.

III.5 Conclusion

On s'est intéressé ici à décrire les différentes lois de comportements que peut avoir un matériau aussi bien dans les domaines élastique que plastique. En fin de chapitre nous proposons une loi de comportement à écrouissage réduit qui nous a permis de faire fonctionner le programme Drain-2D utilisé.

DEUXIEME PARTIE

Chapitre IV

STRUCTURES ETUDIÉES**IV.1 Introduction**

Les éléments de contreventement étudiés sont déduits d'une structure plane d'un bâtiment dont la vue en plan est représentée sur la figure IV.1.

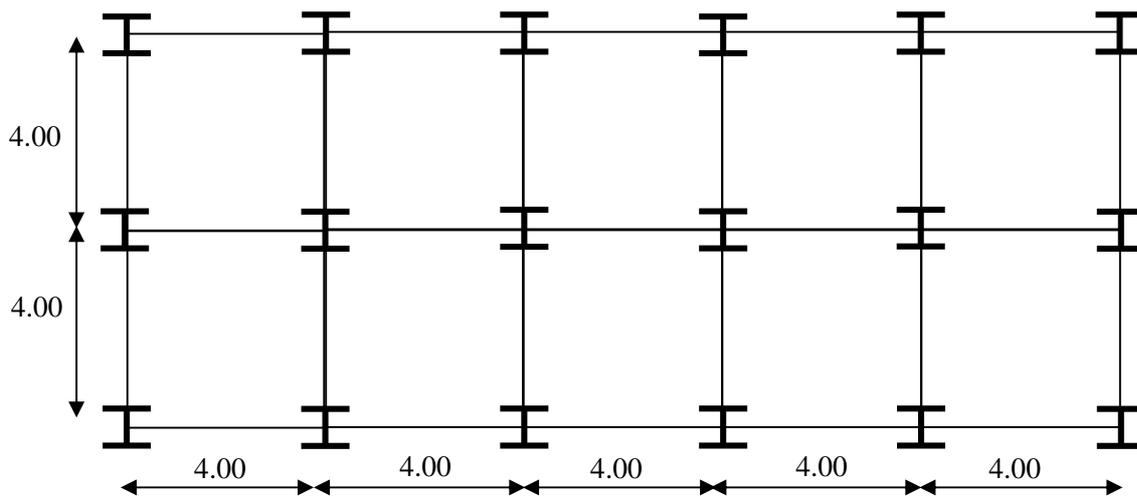


Figure IV.1 Vue en plan de la structure étudiée

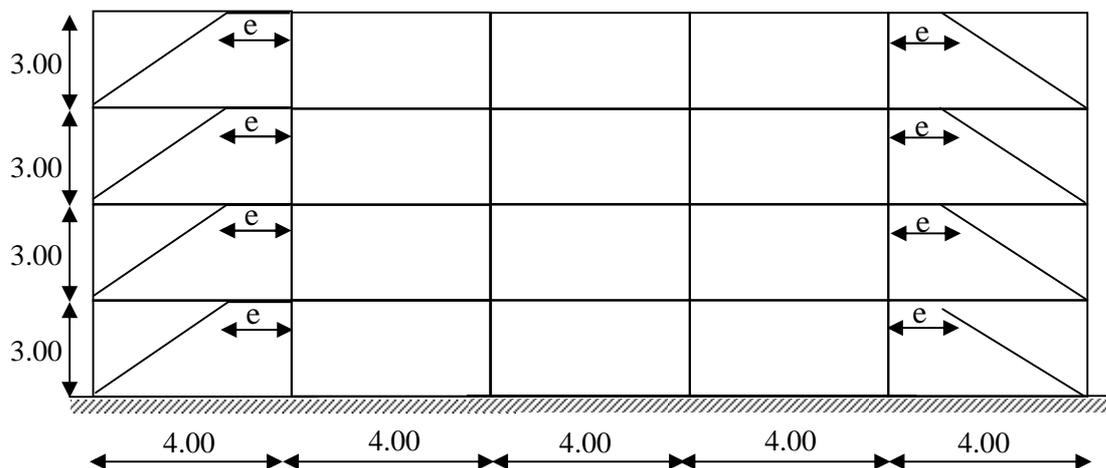


Figure IV.2 Vue en élévation de la structure étudiée

Ces éléments sont la travée de contreventement de 1, 2, 3, 4, 5, et 6 niveaux (figure IV.2). Ce sont des éléments de type « tronçon d'excentrement sismique » de portée e comme représentés sur les différentes figures.

Ils sont posés sur le long pan des structures respectives, car c'est dans ce plan que la faible inertie des portiques impose un dispositif de contreventement.

Nous avons retenu ces différents éléments pour pouvoir comparer l'étude avec celle déjà traitée ultérieurement pour un contreventement en X [45].

Ce type de contreventement est appelé contreventement à barres excentrées.

Il a la particularité de dissiper l'énergie transmise par l'action sismique par :

- plastification des diagonales par application d'efforts normaux,
- formation de rotules plastiques dans le tronçon d'excentrement par flexion et /ou par cisaillement.

Les degrés de liberté par nœud sont tous retenus, c'est-à-dire que chaque nœud peut se déplacer horizontalement, verticalement et tourner autour d'un axe perpendiculaire au plan de la structure.

Les lois de comportement du matériau sont celles représentées sur les figures IV.3a, IV.3b, IV.4a, IV.4b pour respectivement un élément en traction, compression, flexion avec effort normal et flexion seule.

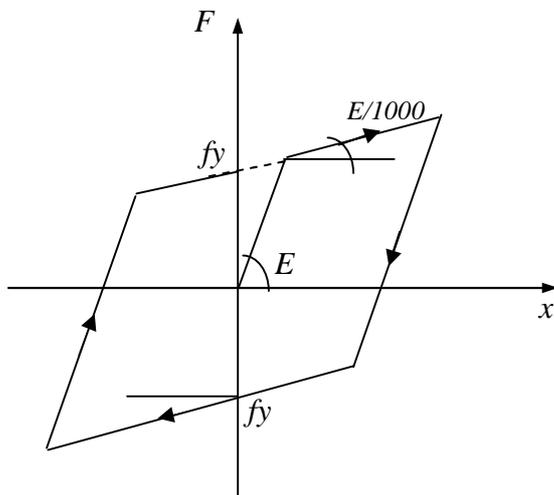


Figure IV.3a Loi de comportement en traction

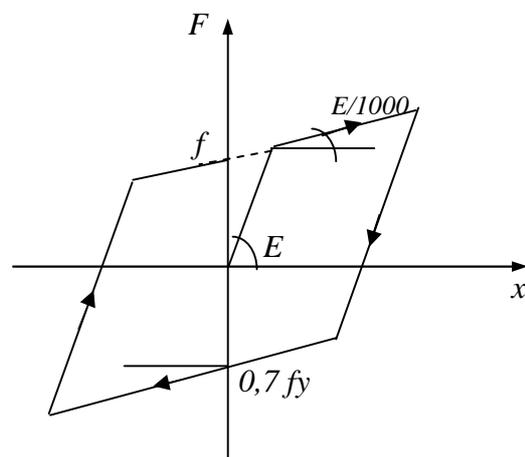


Figure IV.3b Loi de comportement en compression

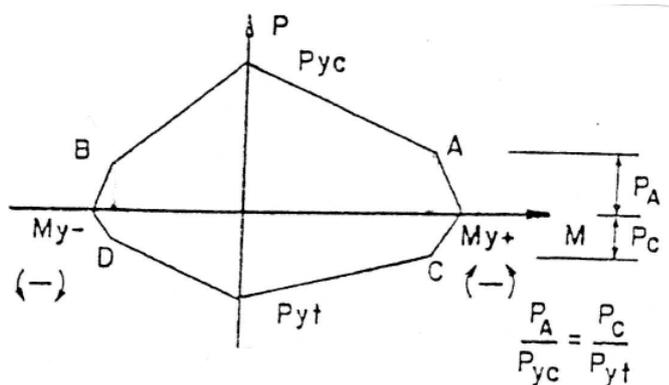


Figure IV.4a Courbe d'interaction élément poteau

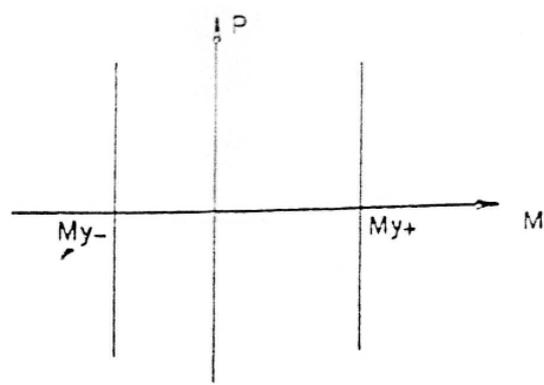


Figure IV.4b Courbe d'interaction élément tronçon d'excentrement

IV.2 Chargement pour une étude statique

Afin de faire un pré-dimensionnement des éléments composants le contreventement, une étude statique a été menée.

Celle-ci a donné les résultats suivants.

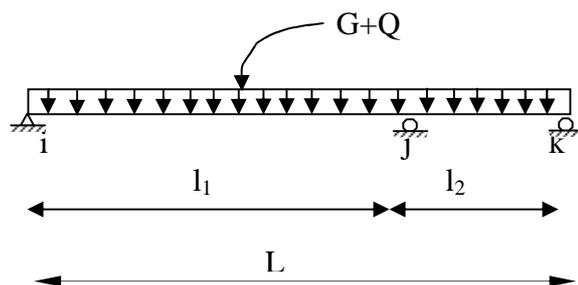


Tableau IV.1 Chargement aux nœuds

Niveaux	G (Kg/m ²)	Q (Kg/m ²)	G + Q (Kg/m ²)	G + Q (Kg/m ²) nœud i	G + Q (Kg/m ²) nœud j	G + Q (Kg/m ²) nœud k
Terrasse	539,00	100,00	639,00	4217,40	5112,00	894,60
Etage courant	517,00	150,00	667,00	4402,20	5336,00	933,80

N.B : Une dégression de charges est prise en compte par chaque structure.

IV.3 Chargement pour l'étude sismique

Les charges prises en compte pour le calcul sismique sont celles issues du poids propre et d'une fraction de la surcharge d'exploitation : $G + \beta Q$ (avec $\beta=1/5$).

Les valeurs sont consignées dans le tableau IV.2.

Tableau IV.2 Chargement aux nœuds

Niveaux	G (Kg/m ²)	Q (Kg/m ²)	G + β Q (Kg/m ²)	G + β Q (Kg/m ²) nœud i	G + β Q (Kg/m ²) nœud j	G + β Q (Kg/m ²) nœud k
Terrasse	539,00	100,00	559,00	3689,40	4472,00	782,60
Etage courant	517,00	150,00	547,00	3610,20	4376,00	765,80

IV.4 Pré-dimensionnement des éléments

Tableau IV.3 Eléments de structures

	Strc -1-	Strc -1'-	Strc -2-	Strc -3-	Strc -4-	Strc -5-
Colonnes	HEB 240	HEB 240	HEB 240	HEB 240	HEB 240	HEB 240
Poutres	IPE 240	IPE 240	IPE 240	IPE 240	IPE 240	IPE 240
Diagonales	UAP 250	UAP 250	UAP 250	UAP 250	UAP 250	UAP 250

Tableau IV.4 Caractéristiques des éléments

	A	I _y	I _z	W _{el, y}	W _{el, z}	W _{pl, y}	W _{pl, z}
HEB 240	106,0	11260 *10 ⁴	3923*10 ⁴	938,3*10 ³	326,9*10 ³	498,4*10 ³	1053*10 ³
IPE 240	39,10	3892*10 ⁴	283,6*10 ⁴	324,3*10 ³	47,27*10 ³	366,6*10 ³	73,92*10 ³
UAP 250	43,80	4136*10 ⁴	295,4*10 ⁴	330,9*10 ³	48,87*10 ³	391,8*10 ³	87,65*10 ³

IV.5 Dimensionnement de la zone active (tronçon d'excentrement)

Dans le dimensionnement du tronçon d'excentrement, il se présente deux cas [8].

1^{er} cas : $N_{pl} / N_{pl,Rd} \leq 0,15$ (IV.1)

1. On calcule :

$$M_{p,link} = f_y b t_f (d - t_f) \quad (IV.2)$$

$$V_{p,link} = (f_y / \sqrt{3}) t_w (d - t_f) \quad (IV.3)$$

2. On calcule :

$$e = M_{p,link} / V_{p,link} \quad (IV.4)$$

2^{ème} cas : $N_{pl} / N_{pl,Rd} \geq 0,15$

1. On calcule :

$$V_{p,link,r} = V_{p,link} \left[1 - (N_{Ed} / N_{pl,Rd})^2 \right]^{0,5} \quad (IV.5)$$

$$M_{p,link,r} = M_{p,link} \left[1 - (N_{Ed} / N_{pl,Rd}) \right] \quad (IV.6)$$

2. On calcule :

$$R = \left[(N_{Ed} \cdot t_w \cdot (d - 2t_f)) / (V_{Ed} \cdot A) \right]$$

Lorsque $R < 0,3$:

$$e = 1,6 M_{p,link} / V_{p,link} \quad (IV.7)$$

Lorsque $R > 0,3$:

$$e = (1,15 - 0,5R) 1,6 M_{p,link} / V_{p,link} \quad (IV.8)$$

On compare ensuite selon la conception du tronçon sismique.

Longueur du tronçon	« e »
Court	$e < e_s = 0,8(1 + \alpha) M_{p,link} / V_{p,link}$
Longs	$e > e_L = 1,5(1 + \alpha) M_{p,link} / V_{p,link}$
Intermédiaires	$e_s < e < e_L$

IV.6 Conduite de l'étude

IV.6.1 Procédure

Nous savons que la capacité qu'a un matériau ou une structure à s'allonger dans le domaine plastique sans rupture ni perte de résistance est définie par sa ductilité. On se référera si besoin est pour un examen plus complet de l'interprétation du diagramme réel de type « chargement - déplacement » à [3] et [14].

Dans la suite, on considère uniquement des éléments de structure dont la caractéristique sous action cyclique est du type définie aux figures IV.3 et IV.4. On donne au module d'écroutissage de l'acier une valeur non nulle pour des raisons de convergence du processus numérique.

IV.6.2 Logiciel de l'étude

Le logiciel utilisé est le programme DRAIN2D développé par G.H POWEL à l'université de BERKELEY (Californie [36]).

Il dispose des éléments suivants :

- a. Un élément poutre qui se plastifie par flexion.
- b. Un élément poutre colonne qui se plastifie par formation de rotules plastiques aux nœuds rigides.
- c. Un élément d'assemblage semi - rigide.
- d. Un élément de voile de cisaillement qui possède une rigidité à l'effort tranchant uniquement.
- e. Un élément barre qui se plastifie en traction et flambe élastiquement en compression (figure IV.3b)

Dans la présente étude, les éléments b) et e) sont utilisés.

IV.6.3 Action sismique

L'action sismique est définie par la composante NORD-SUD de l'accélération du séisme d'El Centro du 18 Mai 1940 figure IV.5.

Après un certain nombre d'analyses, on remarque que les maximas de déformations se situent pendant la période $0 \div 5, 10$ secondes. Cette constatation a permis de réduire considérablement les temps de calcul.

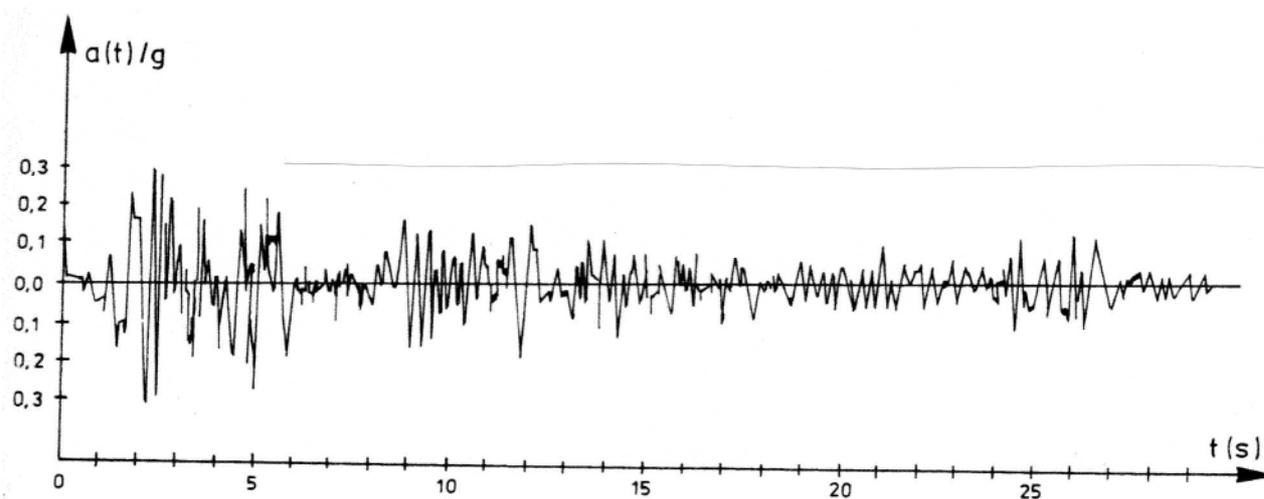


Figure IV.5 Accélérogramme d'El Centro

IV.6.4 Prise en compte de l'étude pour l'évaluation du facteur de comportement

Nous avons déjà signalé au paragraphe IV.1, la faculté qu'a le mode de contreventement proposé à dissiper l'énergie transmise par l'action sismique. Cette qualité est décrite dans la littérature par un coefficient appelé de comportement global de la structure. Chaque code de calcul le définit par une appellation propre au pays d'origine. Ainsi le règlement parasismique Algérien le définit par le coefficient « R » et l'Eurocode 8 par le coefficient « q ».

Au sens de l'Eurocode 8, partie 1.3, chapitre 3 [8], ce facteur est calculé de la manière suivante [5]

$$q = \frac{\lambda_{\max}}{\lambda_e} \quad (\text{IV.9})$$

λ_{\max} et λ_e sont définis comme suit :

- soit un accélérogramme $a(t)$ et une structure donnée à l'aide d'un programme de calcul non linéaire, on trouve par essais multiples λ_{\max} et λ_e ,
- sous $\lambda_e \times a(t)$, on trouve la limite élastique F_y en un point de la structure. La déformation correspondante est D_e ,
- sous $\lambda_{\max} \times a(t)$, on atteint une valeur « f » qui peut être la valeur de rupture ou une valeur jugée grande. La déformation correspondante est D_{\max} .

Cette déformée obtenue lors du calcul dynamique non linéaire est égale a la déformée maximale que l'on obtiendrait par un calcul dynamique linéaire effectué avec un accélérogramme $\lambda_{max} \times a(t)$ pour une structure de limite élastique égale à (Figure IV.6) :

$$q = \frac{\lambda_{max}}{\lambda_e} = q \times f_y \quad [6], [45], [52]$$

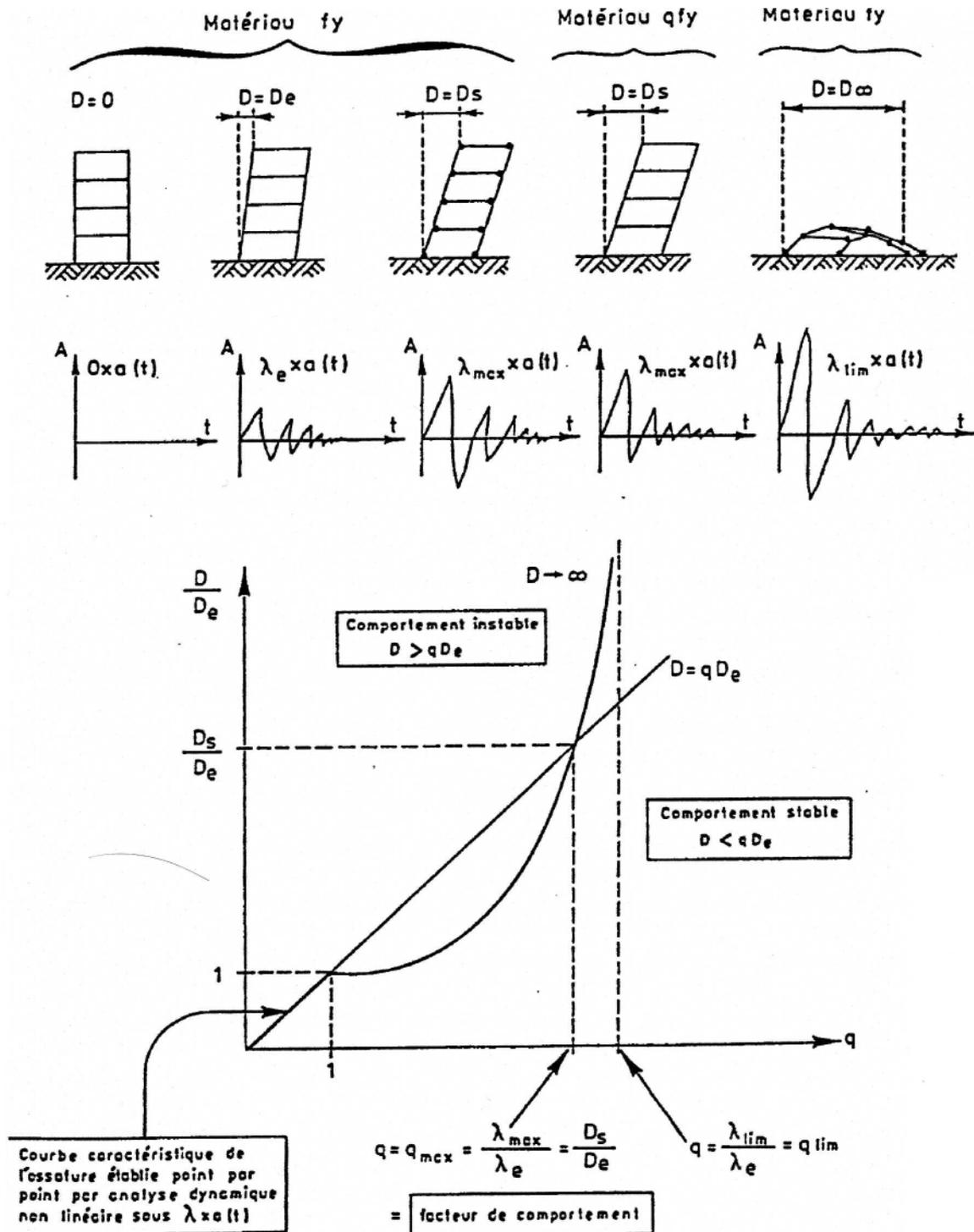


Figure IV.6 Procédure de calcul par DRAIN2D

Ce facteur q dépend :

- du système structural,
- de la durée de l'accélérogramme et de son contenu énergétique.

Les facteurs q peuvent donc en toute logique être différents pour deux structures identiques construites sur deux sites différents [52].

IV.7 Recherche du nombre de rotules plastiques qui rendent la structure mécanisme

Soit une structure (figure IV.7) à nœuds rigides :

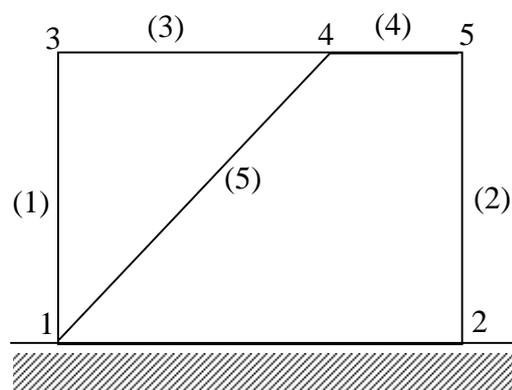


Figure IV.7 Structure 1 de l'étude

Appelons :

n : nombre de nœuds

b : nombre de barres

bc : nombre de barres coupées

bnc : nombre de barres non coupées

A : nombre d'appuis

C : nombre de coupures (dans les barres et aux nœuds)

Nous allons effectuer des coupures dans la structure hyperstatique afin d'obtenir une structure isostatique supportée par un seul appui. Nous serons amenés à supprimer tous les appuis sauf un, ceci pour tenir compte de l'hyperstaticité externe de la structure. Il faut en plus couper un certain nombre de barres pour tenir compte de l'hyperstaticité interne, soit bc .

Nous avons alors :

$$\text{Hyperstatique externe } C_1 = A - 1$$

$$bc = b - bnc$$

On remarque :

$$bnc = n - 1$$

$$C_2 = bc = b - n + 1$$

D'où le nombre total de coupure : $C = C_1 + C_2$

$$C = (A - 1) + b - (n + 1) = b - n + A$$

Nous savons que chaque coupure libère trois liaisons inconnues hyperstatiques. Le nombre total d'inconnues hyperstatiques est $h = 3 C$.

Ainsi le nombre de rotules plastiques qui rendent la structure mécanisme est égale à $m = h + 1$

Tableau IV.5 Nombre de rotules plastiques qui rendent la structure mécanisme

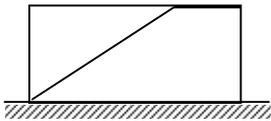
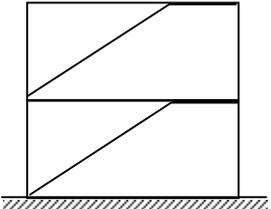
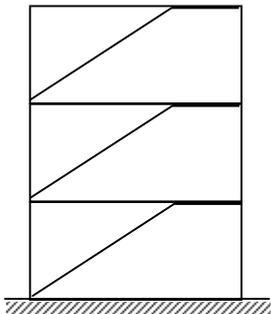
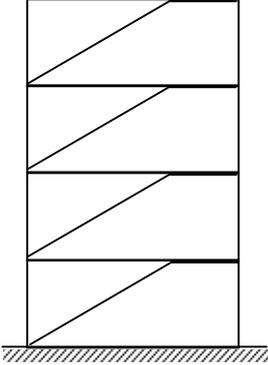
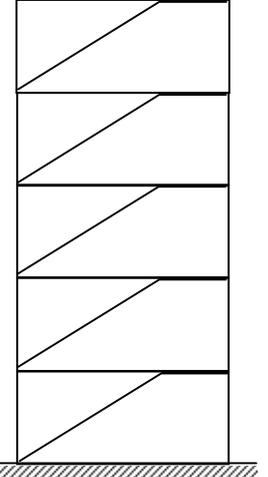
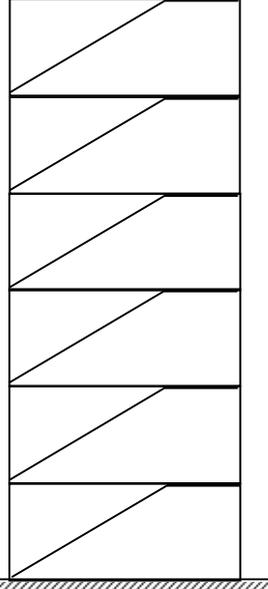
Structure	b	n	$C_1=A-1$	$C_2=b-n+1$	C	h	h+1
 Strc1	5	5	1	1	2	6	7
 Strc1'	10	7	1	4	5	15	16
 Strc2	15	11	1	5	6	18	19

Tableau IV.5 Nombre de rotules plastiques qui rendent la structure mécanisme (suite)

Structure	b	n	$C_1=A-1$	$C_2 = b-n+1$	C	h	h+1
 <p>Strc3</p>	20	14	1	7	8	24	25
 <p>Strc4</p>	25	17	1	8	9	27	28
 <p>Strc5</p>	30	20	1	11	12	36	37

IV.8 Conclusion

Nous avons défini d'abord les structures étudiées. Celle-ci présente l'avantage d'avoir le même nombre de niveaux et de travées que celles étudiées antérieurement : structures en portiques ; a des fins de comparaison.

Nous avons donné aussi le processus d'action sismique ainsi que les différentes lois de comportements que suivent les éléments de structure : diagonale, tronçon d'excentrement sismique et colonnes.

La fin du chapitre a consacré une méthode d'évaluation du facteur de comportement global de ces structures. Ce facteur est dénommé q pour l'Eurocode 8 et R pour le règlement parasismique Algérien.

Chapitre V

RESULTATS DE L'ETUDE**V.1 RESULTATS DE L'ETUDE NUMERIQUE**

Dans cette étude numérique, nous nous intéressons aux aspects suivants :

- valeurs de facteur de comportement q en fonction de la ductilité D/D_e de la structure (tableaux V.1, V.2 et figures V.1, V.2, V.3, V.4 et V.5),
- valeurs de la ductilité locale requise μ_i en fonction de q_i pour les colonnes, les diagonales et les tronçons d'excentrement (tableaux V.3, V.4 et figures V.6, V.7, V.8, V.9, V.10, V.11, V.12, et V.13),

La distribution de la ductilité requise μ_i en fonction de q_i pour les colonnes, les diagonales et les tronçons d'excentrement (tableau V.5 et figures V.14, V.15, V.16, V.17, V.18, V.19, V.20 et V.21).

Tableau V.1 Déplacement global, allongement en fonction de q

Structures	q _i	D		D/D _e		Poteaux				Diagonales				Tronçon d'excentrement			
						e		e/e _y		e		e/e _y		e		e/e _y	
		+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Strc -1'- λ _e =1,5	1	0,004	0,003	1,00	1,00	0,000	0,000	1,00	1,00	0,001	0,001	1,00	1,00	0,004	0,003	1	1,00
	1,75	0,025	0,016	6,25	5,33	0,002	0,001	-	-	0,013	0,020	12,00	20,00	0,025	0,016	6,25	5,33
	2	0,319	0,026	12,76	8,66	0,002	0,001	-	-	0,048	0,100	48,00	100,0	0,091	0,043	22,75	14,33
Strc -2- λ _e =1,28	1	0,008	0,007	1,00	1,00	0,001	0,001	1,00	1,00	0,001	0,001	1,00	1,00	0,008	0,007	1,00	1,00
	2	0,078	0,014	9,75	2,00	0,002	0,002	2,00	2,00	0,005	0,037	5,00	37,00	0,042	0,007	5,25	1,00
	3	0,150	0,022	18,75	3,14	0,002	0,002	2,00	2,00	0,005	0,063	5,00	63,00	0,086	0,017	10,75	2,43
	3,5	0,171	0,062	21,37	8,85	0,002	0,002	2,00	2,00	0,032	0,073	32,00	73,00	0,092	0,057	11,50	8,14
	4	0,766	0,168	95,75	24,00	0,001	0,003	1,00	3,00	0,185	0,546	185,0	546,0	0,766	0,168	95,75	24,00
Strc -3- λ _e =1,20	1	0,014	0,013	1,00	1,00	0,001	0,001	1,00	1,00	0,003	0,002	1,00	1,00	0,011	0,010	1,00	1,00
	2	0,022	0,021	1,57	1,75	0,002	0,002	2,00	2,00	0,005	0,003	1,66	1,50	0,012	0,013	1,09	1,30
	3	0,052	0,092	3,71	7,07	0,003	0,003	3,00	3,00	0,048	0,024	16,00	12,00	0,035	0,078	3,18	7,80
	4	0,062	0,151	4,92	11,61	0,003	0,003	3,00	3,00	0,060	0,030	20,00	13,50	0,053	0,143	4,81	14,30
	5	0,176	0,156	12,57	12,00	0,003	0,003	3,00	3,00	0,061	0,085	20,33	42,50	0,079	0,056	7,18	5,60
	5,83	0,257	0,233	18,35	17,92	0,003	0,003	3,00	3,00	0,089	0,118	29,66	59,00	0,178	0,129	16,18	12,90

Tableau V.2 Déplacement global, Allongement en fonction de q

Structures	q _i	D		D/D _e		Poteaux				Diagonales				Tronçon d'excentrement			
						e		e/e _y		e		e/e _y		e		e/e _y	
		+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Struc -4- λ _e =1,28	1	0,019	0,019	1,00	1,00	0,002	0,002	1,00	1,00	0,002	0,002	1,00	1,00	0,019	0,019	1,00	1,00
	2	0,036	0,042	1,89	2,21	0,004	0,004	2,00	2,00	0,007	0,005	3,50	2,50	0,017	0,020	0,94	1,05
	3	0,062	0,263	3,26	13,84	0,003	0,003	1,50	1,50	0,104	0,028	52,00	14,00	0,042	0,164	2,21	8,63
	4	0,286	0,049	15,05	2,57	0,004	0,004	2,00	2,00	0,015	0,129	7,50	64,50	0,224	0,025	11,78	1,31
	5	0,588	0,070	30,94	3,68	0,005	0,004	2,50	2,00	0,058	0,105	29,00	52,50	0,534	0,060	28,10	3,15
Struc -5- λ _e =1,12	1	0,033	0,049	1,00	1,00	0,003	0,002	1,00	1,00	0,008	0,010	1,00	1,00	0,033	0,050	1,00	1,00
	2	0,248	0,064	7,51	1,30	0,004	0,004	1,33	2,00	0,030	0,269	3,75	26,90	0,248	0,064	7,51	1,28
	3	0,121	0,259	3,66	5,28	0,005	0,005	1,66	2,50	0,072	0,019	9,00	1,90	0,039	0,128	1,18	2,56
	4	0,891	0,077	27,00	1,57	0,005	0,005	1,66	2,50	0,077	0,014	9,62	1,40	0,891	0,077	27,00	1,54
	5	0,869	0,065	26,33	1,97	0,006	0,004	2,00	2,00	0,047	0,331	5,87	33,10	0,869	0,065	26,33	1,30

Structure -1-

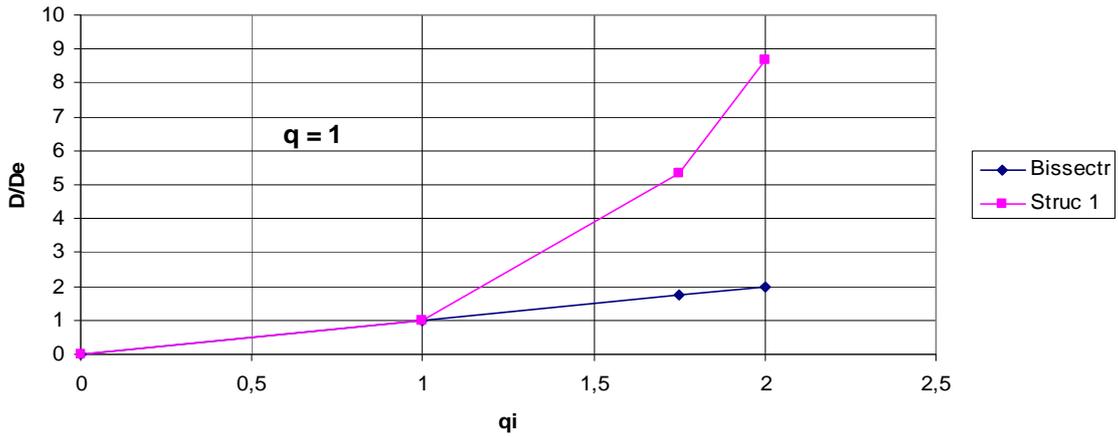


Figure V.1 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 1'

Structure -2-

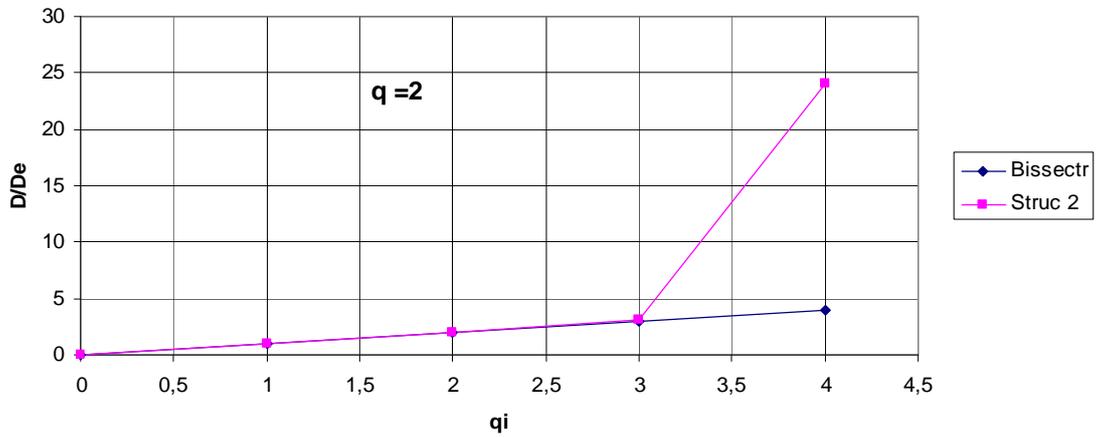


Figure V.2 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 2

Structure -3-

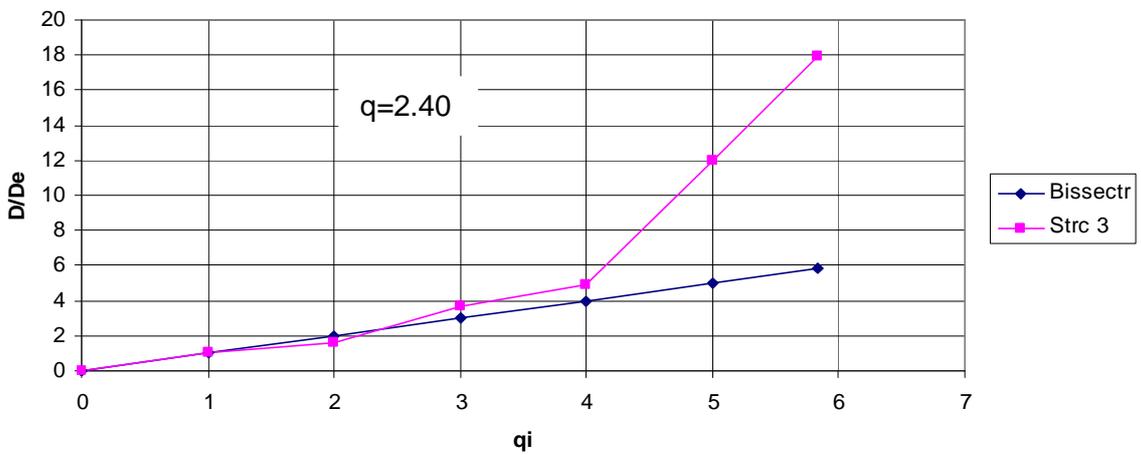


Figure V.3 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 3

Structure -4-

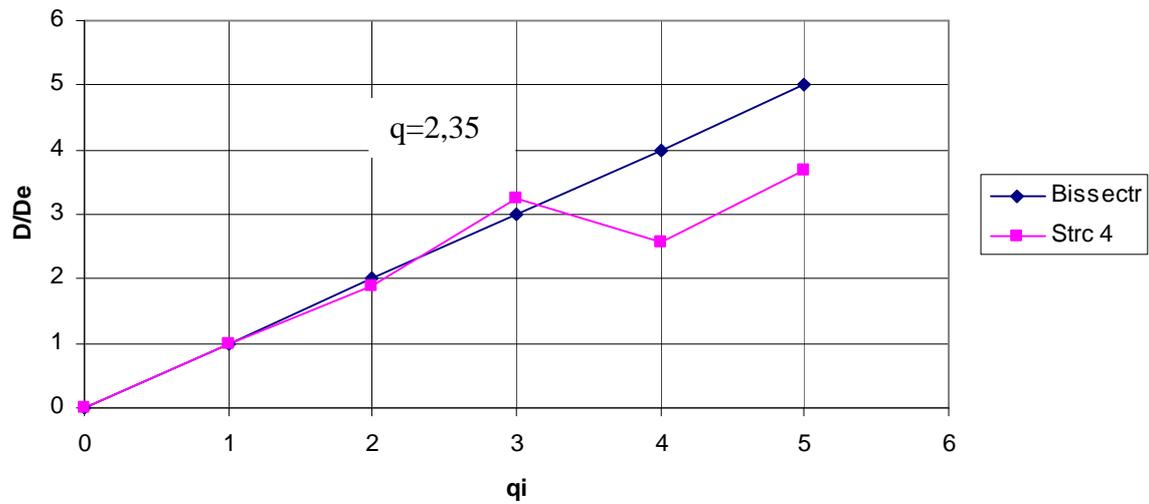


Figure V.4 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 4

Structure -5-

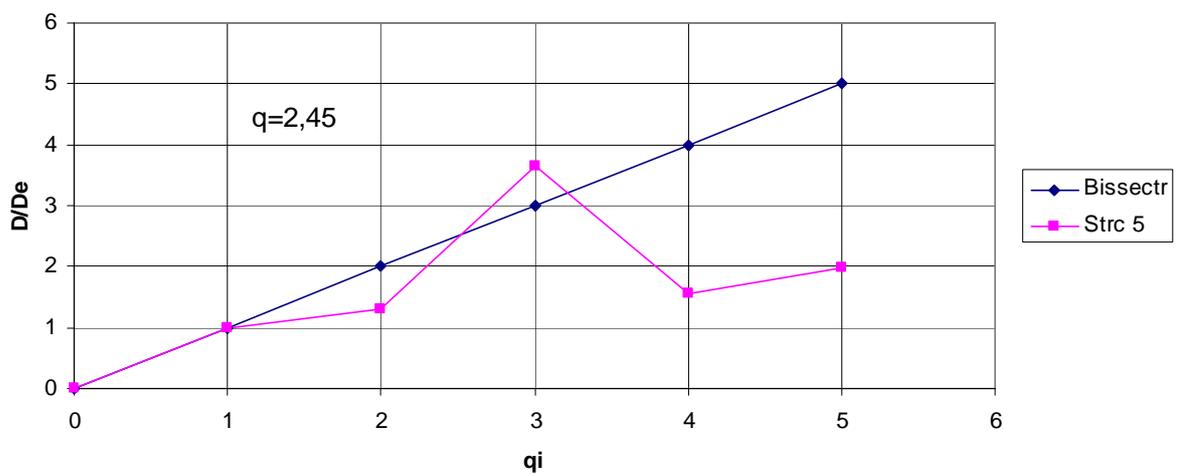


Figure V.5 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc5

Tableau V. 3 Ductilité locale correspondant à q

Structure	H _i	q _i	Poteau				Diagonale				Tronçon d'excentrement			
			θ		μ = θ / θ _e		e		μ = e/e _v		θ		μ = θ / θ _e	
			+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Strc – 2-	1	1	0,00106	0,00131	2,08	3,01	0,001	0,001	7,00	7,00	0,00061	0,00086	3,62	4,58
		2	0,00221	0,00394			0,007	0,007			0,00221	0,00394		
	2	1	0,00086	0,00087	3,62	7,69	0,001	0,001	4,00	18,00	0,00053	0,00063	5,86	10,62
2		0,00311	0,00669	0,004			0,018	0,00311			0,00669			
3	1	0,00072	0,00073	4,25	1,59	0,001	0,001	2,00	3,00	0,0027	0,00035	12,15	3,31	
	2	0,00306	0,00116			0,002	0,003			0,00328	0,00116			
Strc – 3-	1	1	0,00147	0,00148	2,87	4,12	0,002	0,001	2,50	13,00	0,00047	0,00043	6,47	15,58
		2,40	0,00423	0,00610			0,005	0,013			0,00304	0,00670		
	2	1	0,00121	0,00136	3,18	3,56	0,002	0,002	7,00	9,00	0,00081	0,00069	4,88	8,37
		2,40	0,00385	0,00485			0,014	0,018			0,00396	0,00578		
3	1	0,0109	0,00115	0,17	2,94	0,002	0,002	15,00	7,50	0,0062	0,00079	0,27	5,70	
	2,40	0,00190	0,00339			0,003	0,015			0,00168	0,00451			
4	1	0,00085	0,00104	2,01	1,88	0,001	0,002	3,00	15,00	0,00038	0,00047	5,07	1,85	
2,40	0,00171	0,00196	0,003			0,003	0,00193			0,00087				

Tableau V.4 Ductilité locale correspondant à q

Structure	H _i	q _i	Poteau				Diagonale				Tronçon d'excentrement			
			θ		μ = θ / θ _e		e		μ = e/e _y		θ		μ = θ / θ _e	
			+	-	+	-	+	-	+	-	+	-	+	-
Strc – 4-	1	1 2,35	0,00170 0,01584	0,00144 0,00647	9,32	4,49	0,002 0,043	0,002 0,006	21,50	3,00	0,00045 0,01552	0,00060 0,00827	34,48	13,78
	2	1 2,35	0,00145 0,00834	0,00141 0,01253	5,96	8,89	0,002 0,040	0,002 0,040	20,00	20,00	0,00074 0,00562	0,00087 0,01384	7,59	15,90
	3	1 2,35	0,00140 0,00246	0,00148 0,00724	1,75	4,89	0,002 0,004	0,002 0,040	2,00	20,00	0,00083 0,00244	0,00099 0,00750	2,94	7,57
	4	1 2,35	0,00097 0,00187	0,00111 0,00182	1,92	1,64	0,002 0,003	0,002 0,004	1,50	2,00	0,00074 0,00194	0,00093 0,00142	2,62	1,52
	5	1 2,35	0,00259 0,00463	0,00357 0,00695	1,78	1,94	0,002 0,004	0,002 0,003	2,00	1,50	0,00053 0,00087	0,00089 0,00126	1,64	1,41
Strc – 5-	1	1 2,45	0,00191 0,01579	0,00162 0,00498	8,26	3,07	0,002 0,052	0,002 0,007	26,00	3,50	0,00057 0,01582	0,00056 0,00355	27,75	6,34
	2	1 2,45	0,00179 0,00742	0,00144 0,00496	4,14	3,44	0,003 0,032	0,002 0,016	16,00	8,00	0,00108 0,00478	0,00083 0,00515	4,42	6,20
	3	1 2,45	0,00208 0,00345	0,00147 0,00411	1,66	2,79	0,003 0,005	0,002 0,017	1,66	8,50	0,00150 0,00246	0,00104 0,00440	1,64	4,23
	4	1 2,45	0,00189 0,00248	0,00121 0,00311	1,31	2,57	0,003 0,005	0,002 0,006	2,50	3,00	0,00107 0,00349	0,00163 0,00209	3,26	1,28
	5	1 2,45	0,01342 0,4083	0,00990 0,02122	30,42	2,14	0,004 0,032	0,006 0,006	8,00	1,00	0,00546 0,02246	0,00440 0,00998	4,11	2,27
	6	1 2,45	0,01142 0,03704	0,00839 0,01767	3,24	2,11	0,008 0,016	0,010 0,030	2,00	3,00	0,01491 0,04305	0,01095 0,02334	2,88	2,13

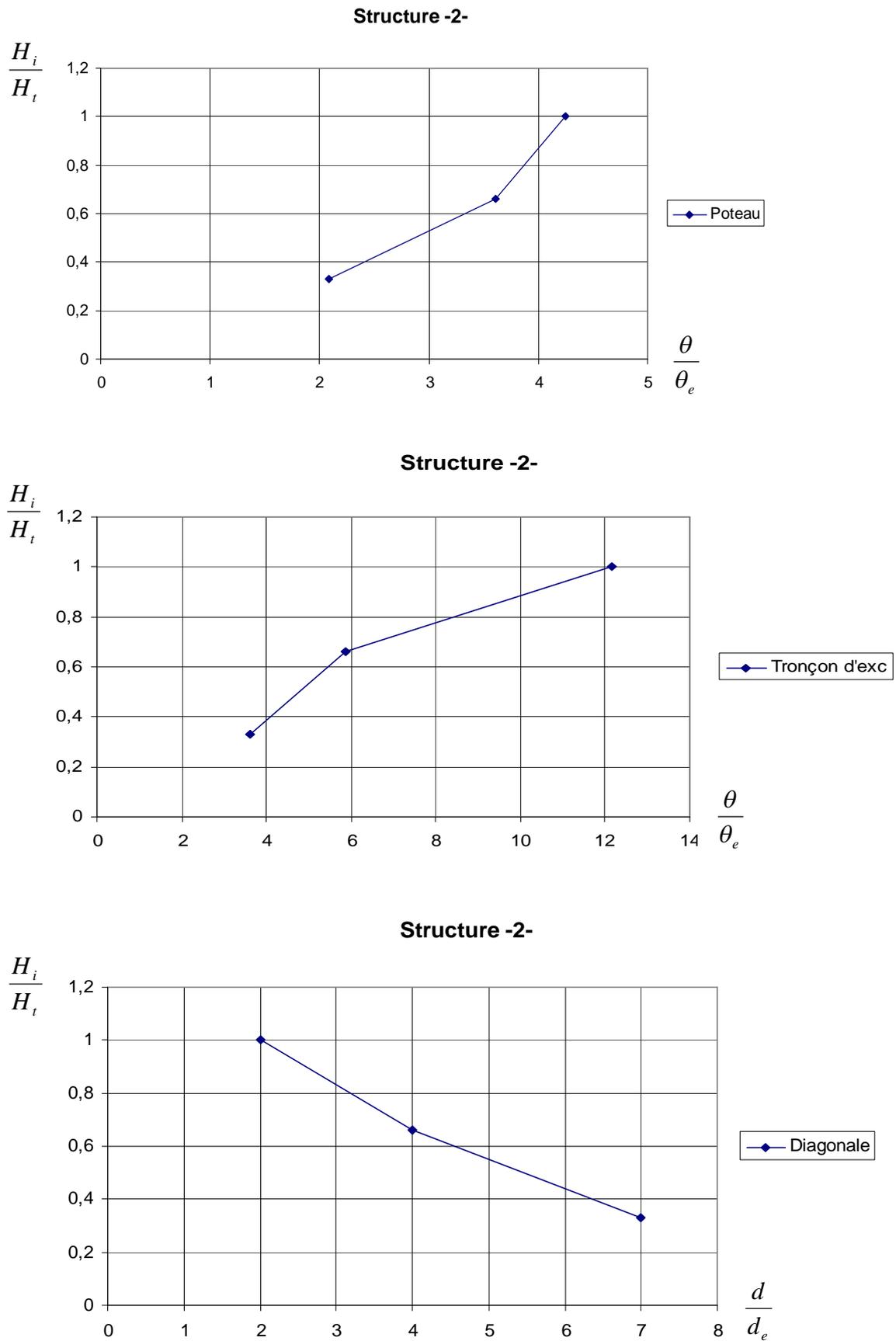
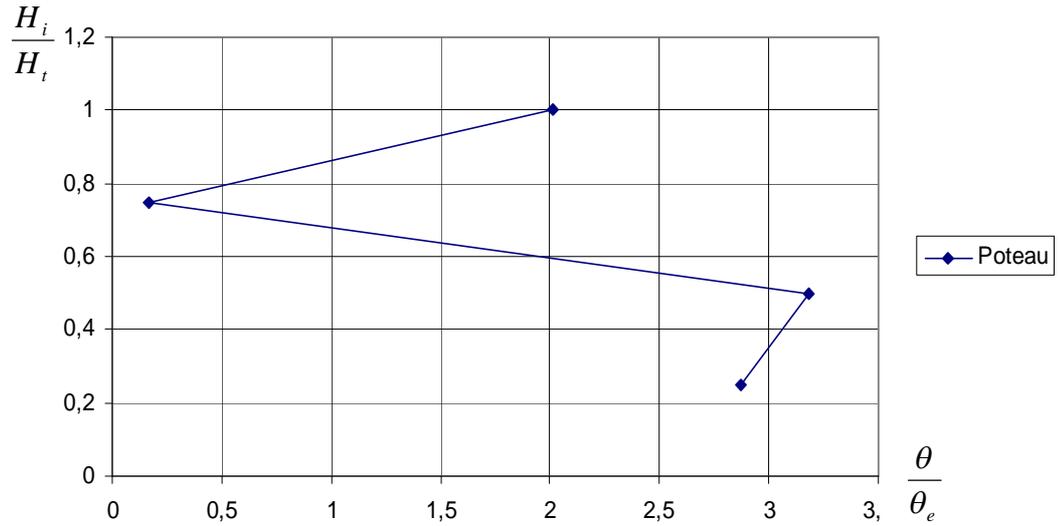
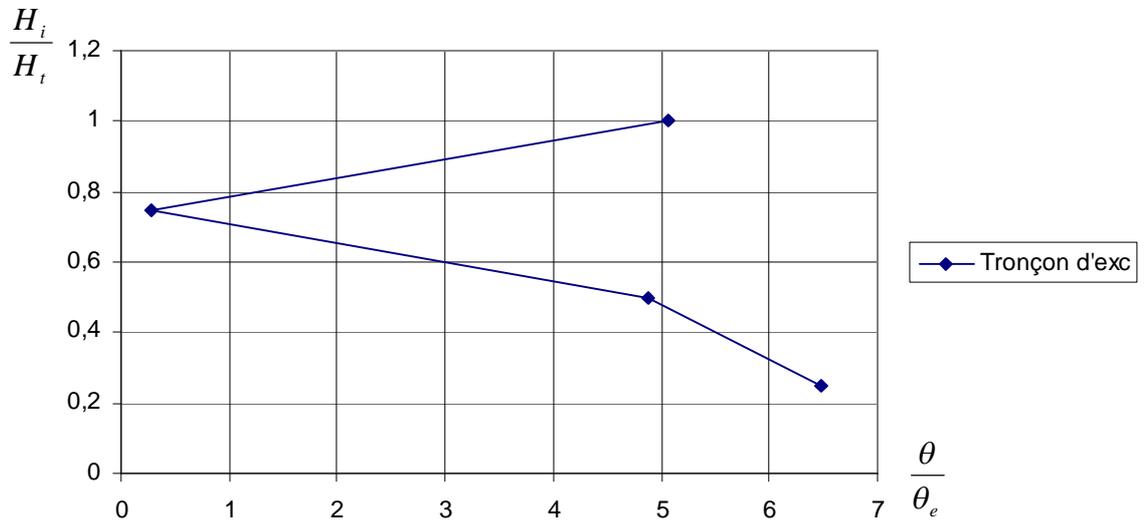


Figure V.6 Distribution de la ductilité locale Strc 2

Structure -3-



Structure -3-



Structure -3-

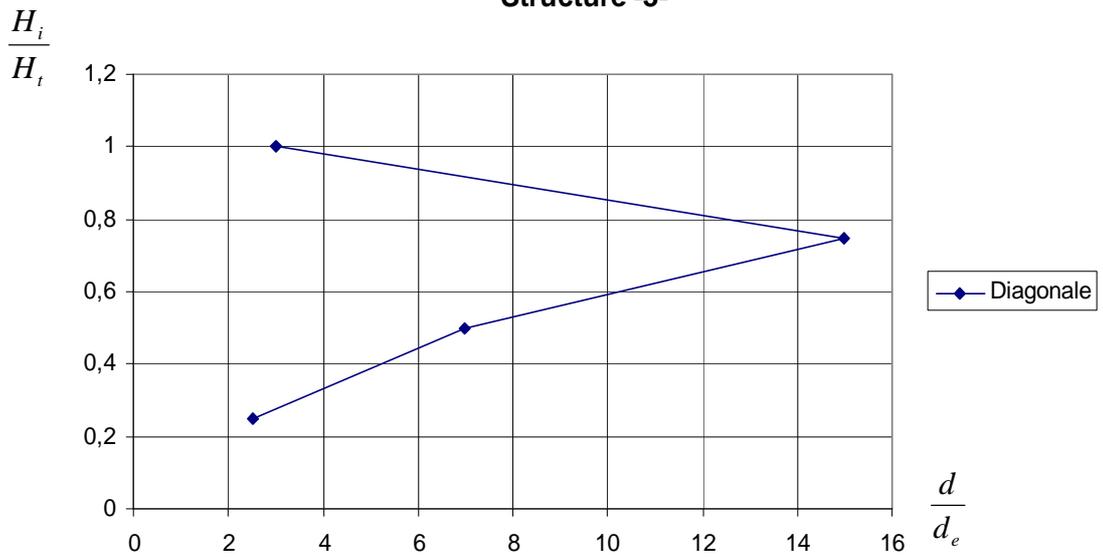


Figure V.7 Distribution de la ductilité locale Strc 3

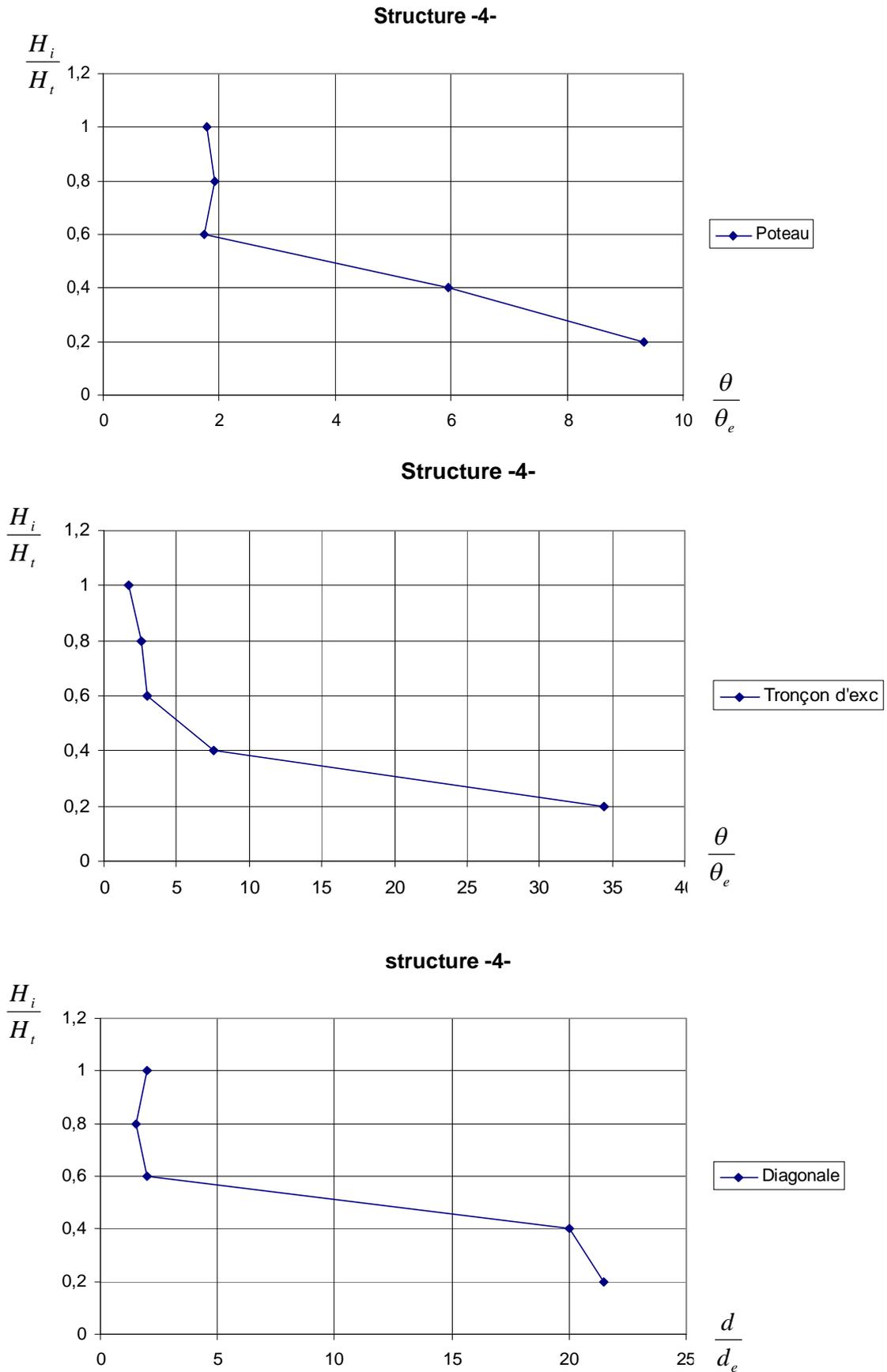
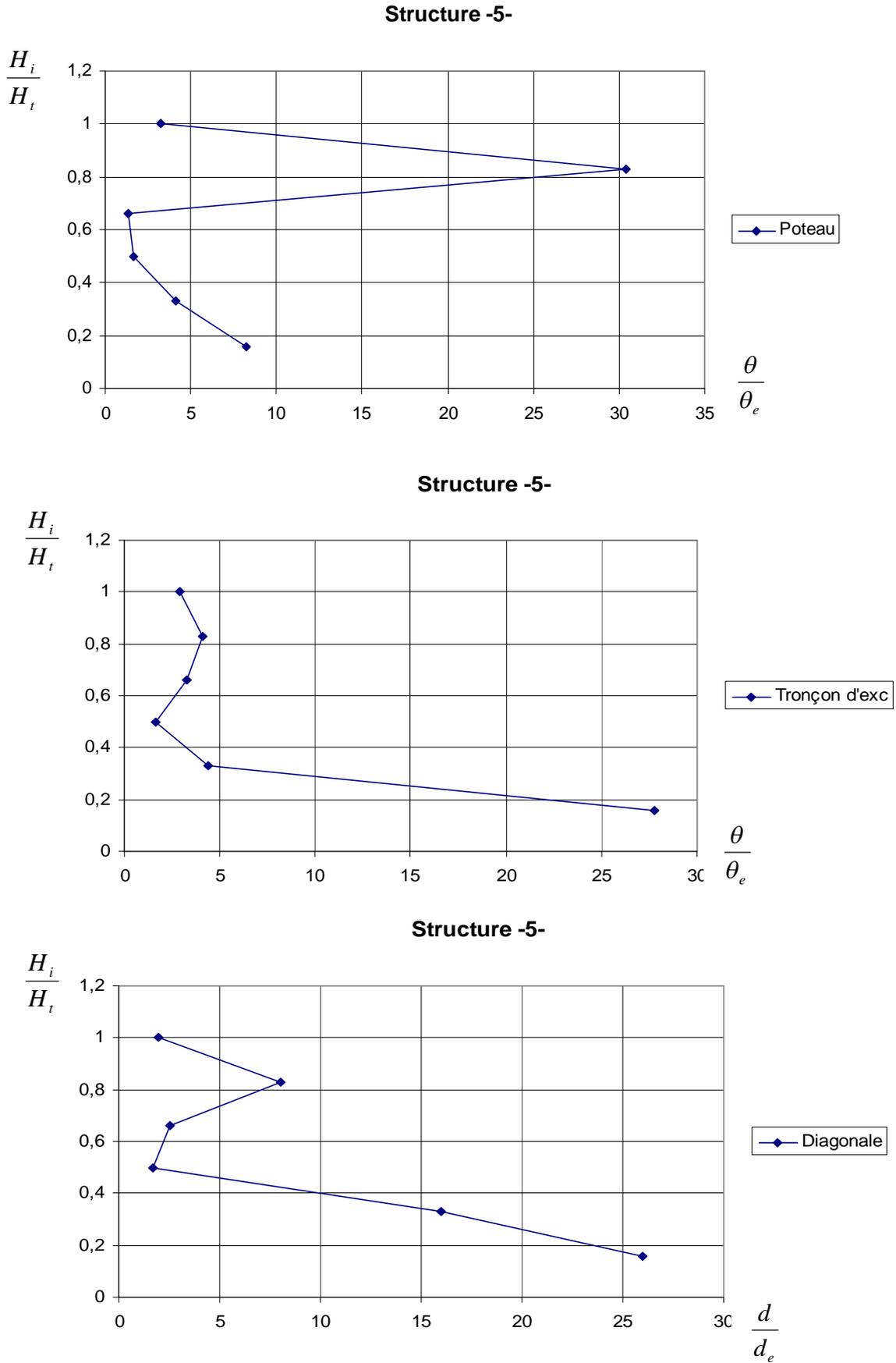


Figure V.8 Distribution de la ductilité locale Strc 4



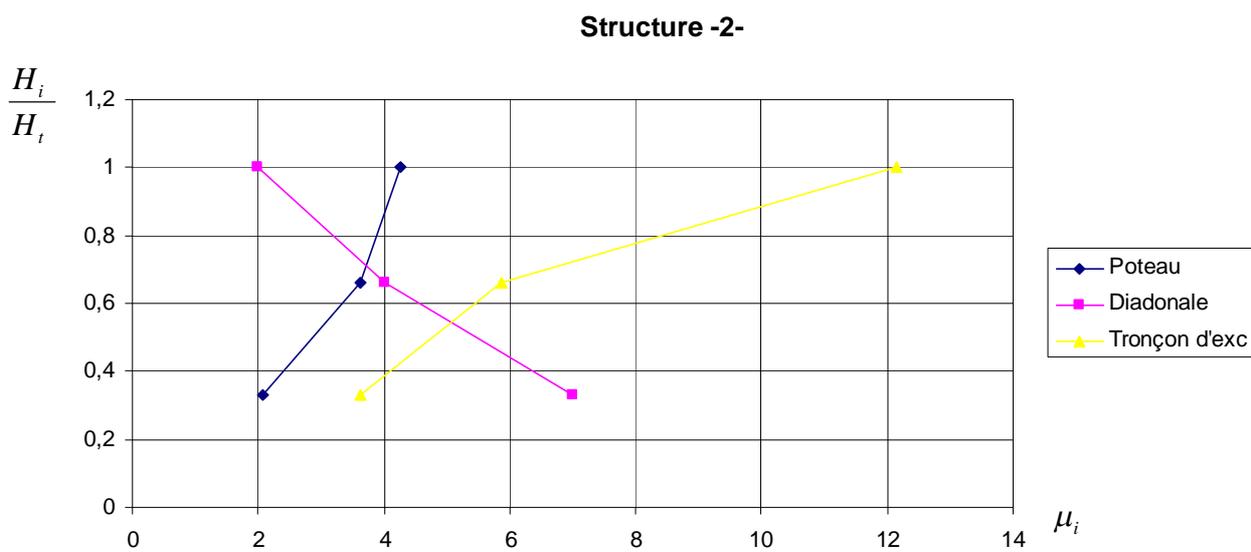


Figure V.10 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 2

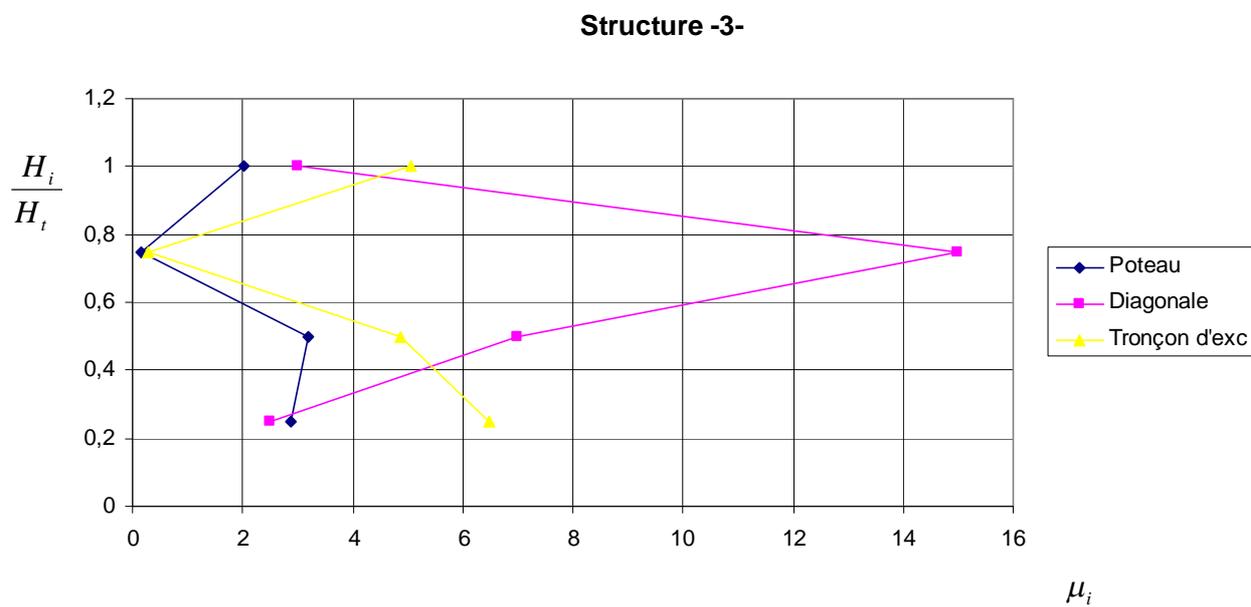


Figure V.11 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 3

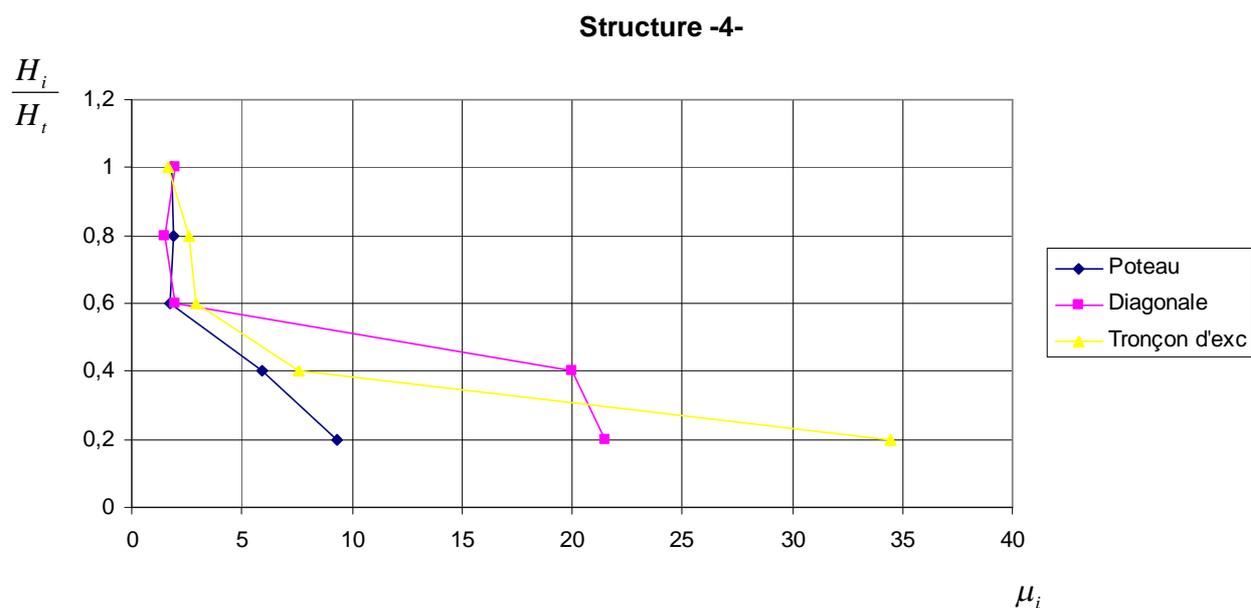


Figure V.12 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 4

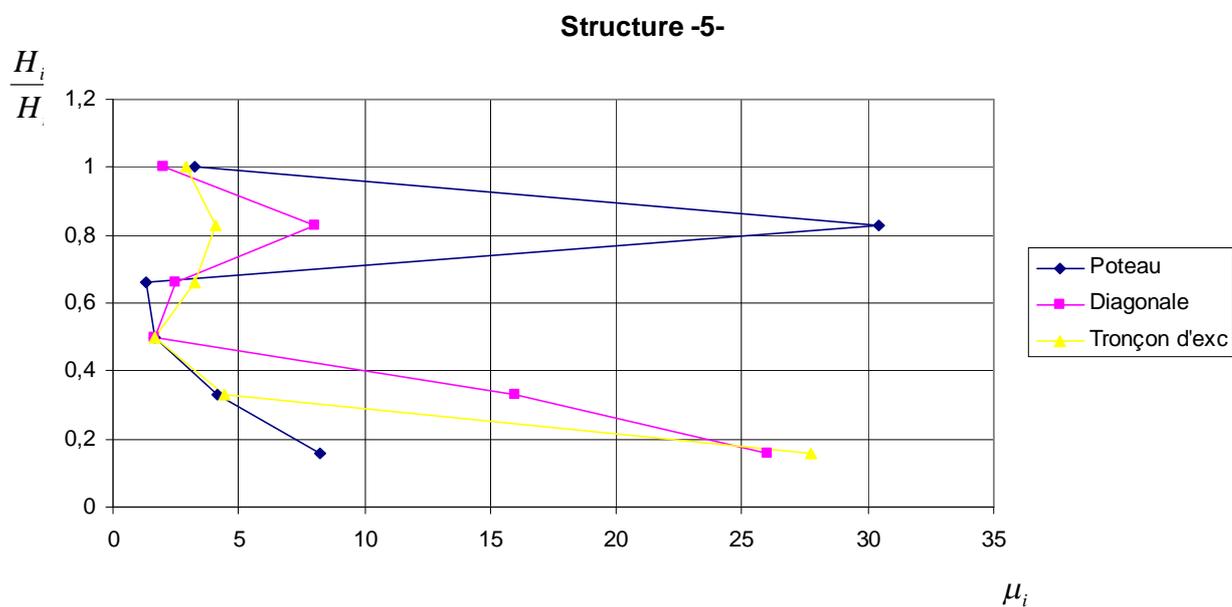


Figure V.13 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 5

Tableau V.5 Distribution de la ductilité locale requise μ dans les poteaux, les diagonales et les tronçons d'excentrement

	$\frac{H_i - H_1}{H_t - H_1}$	$\mu = \frac{\theta}{\theta_e}$		$\mu = \frac{D}{D_e}$
		Poteau	Tronçon d'excentrement	Diagonale
Strc -2-	1,00	4,25	12,15	2,00
	0,50	3,62	5,86	4,00
	0,00	2,08	6,62	7,00
Strc -3-	1,00	2,01	5,07	3,00
	0,66	0,17	0,27	15,00
	0,33	3,18	4,88	7,00
	0,00	2,87	6,47	2,50
Strc -4-	1,00	1,78	1,64	2,00
	0,75	1,92	2,62	1,50
	0,50	1,75	2,94	2,00
	0,25	5,96	7,59	20,00
	0,00	9,32	34,48	21,50
Strc -5-	1,00	3,24	2,88	2,00
	0,80	30,42	4,11	8,00
	0,60	1,31	3,26	2,50
	0,40	1,66	1,64	1,66
	0,20	4,14	4,42	16,00
	0,00	8,26	27,75	26,00

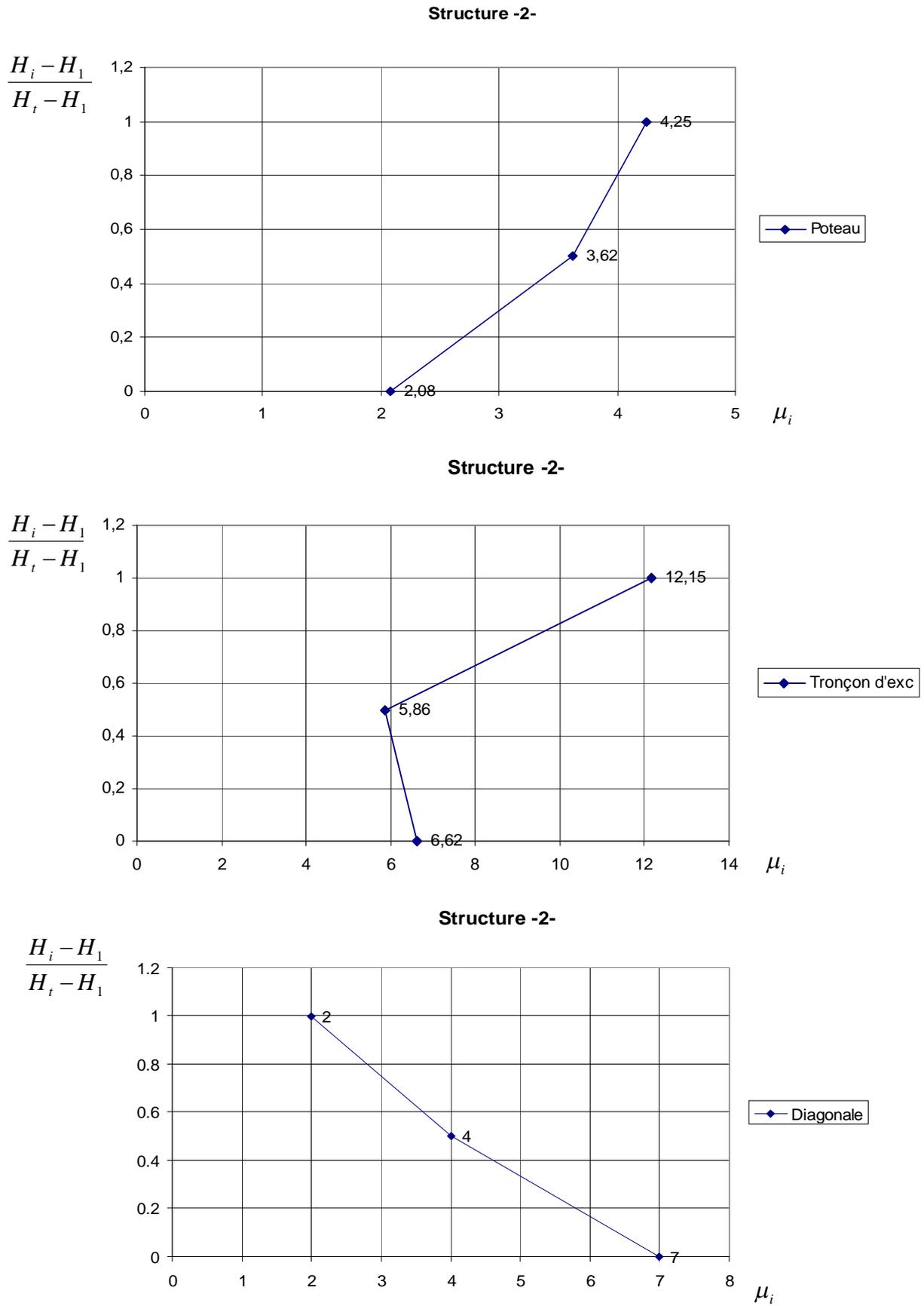
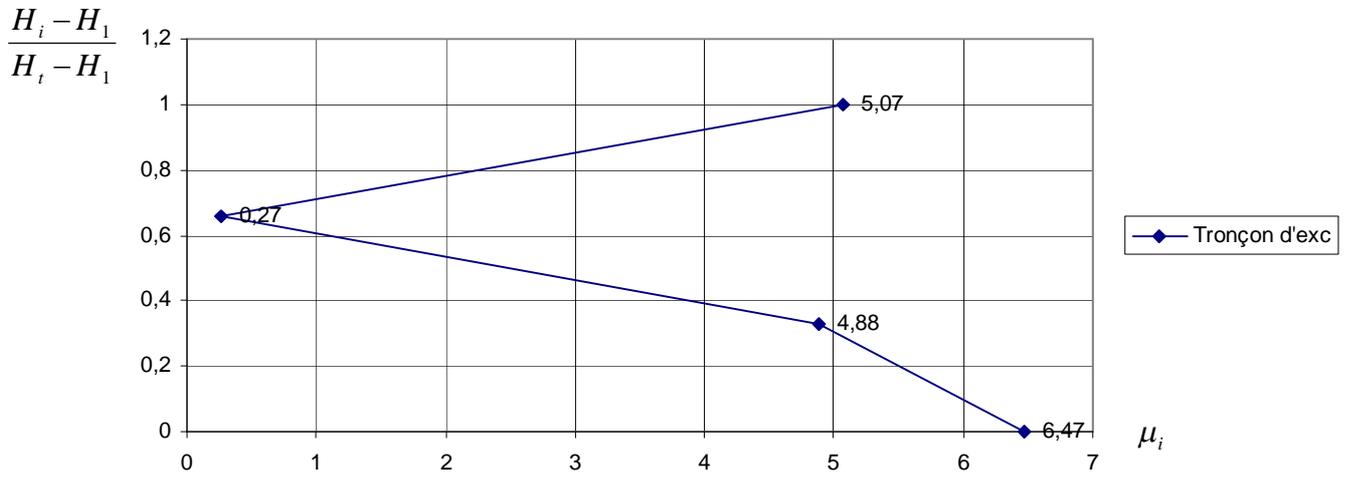
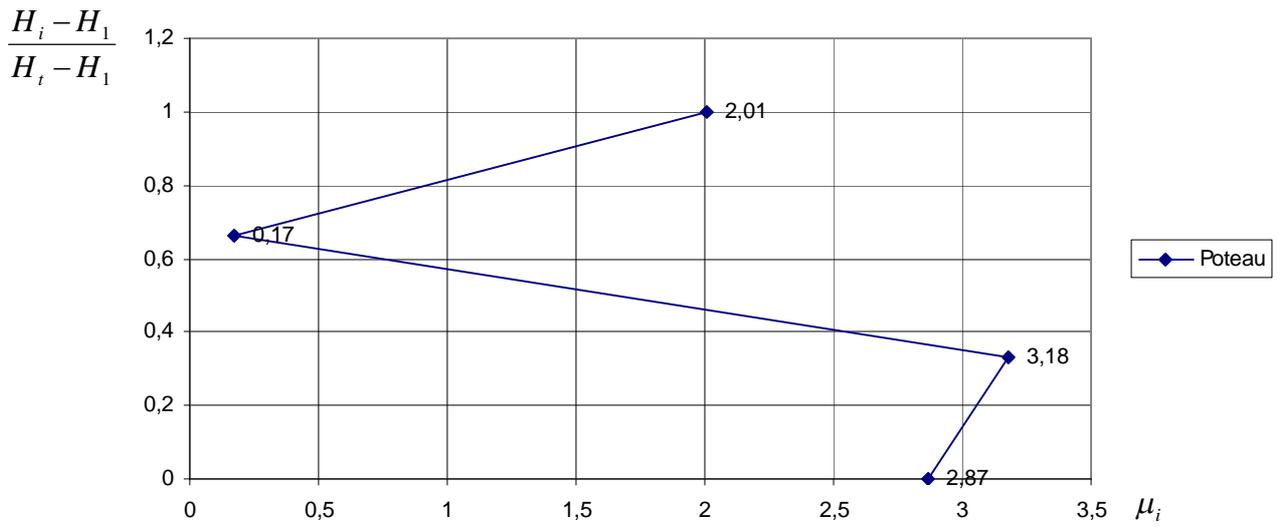


Figure V.14 Distribution de la ductilité locale Strc 2

Structure -3-



Structure -3-

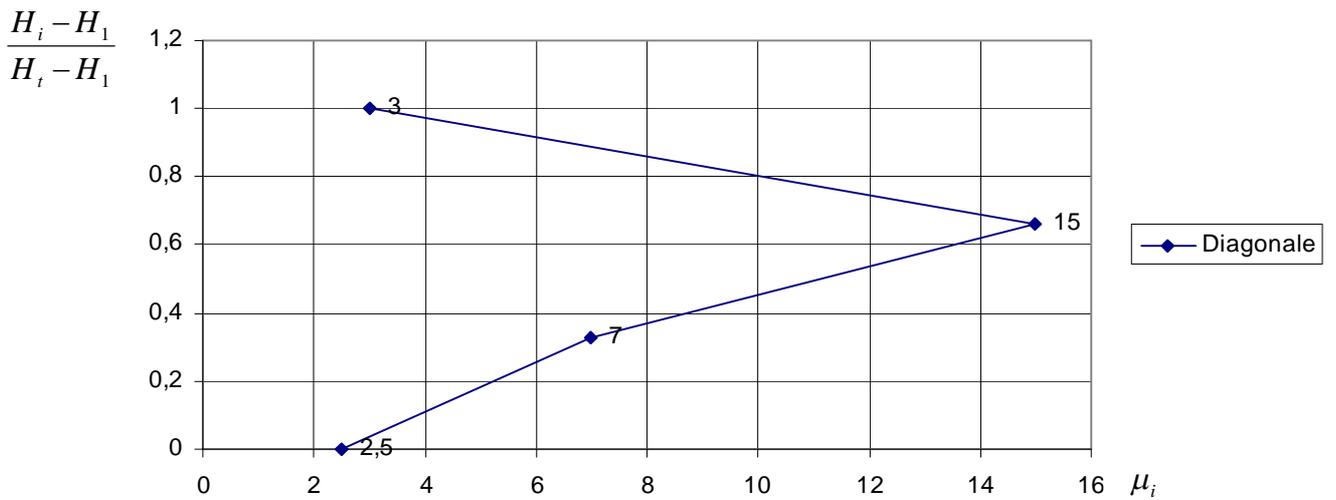


Figure V.15 Distribution de la ductilité locale Strc 3

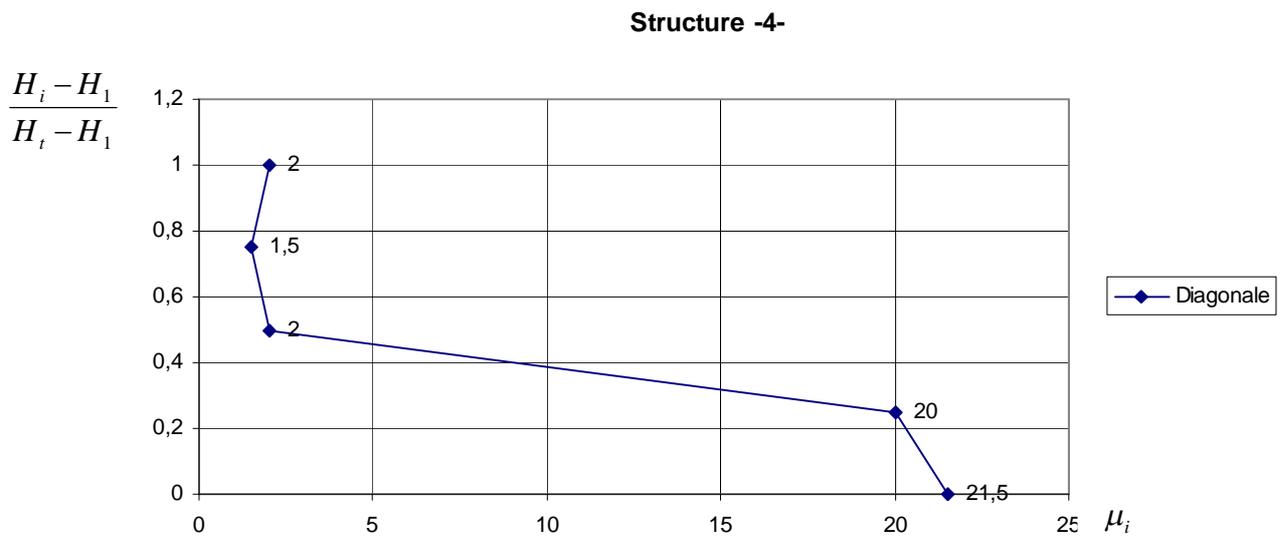
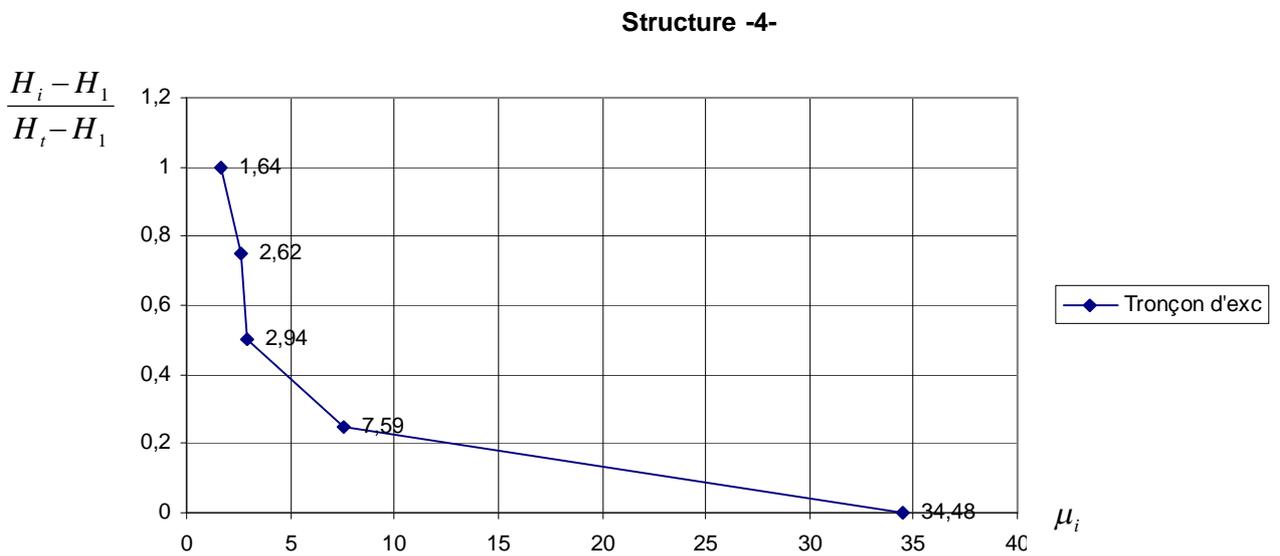
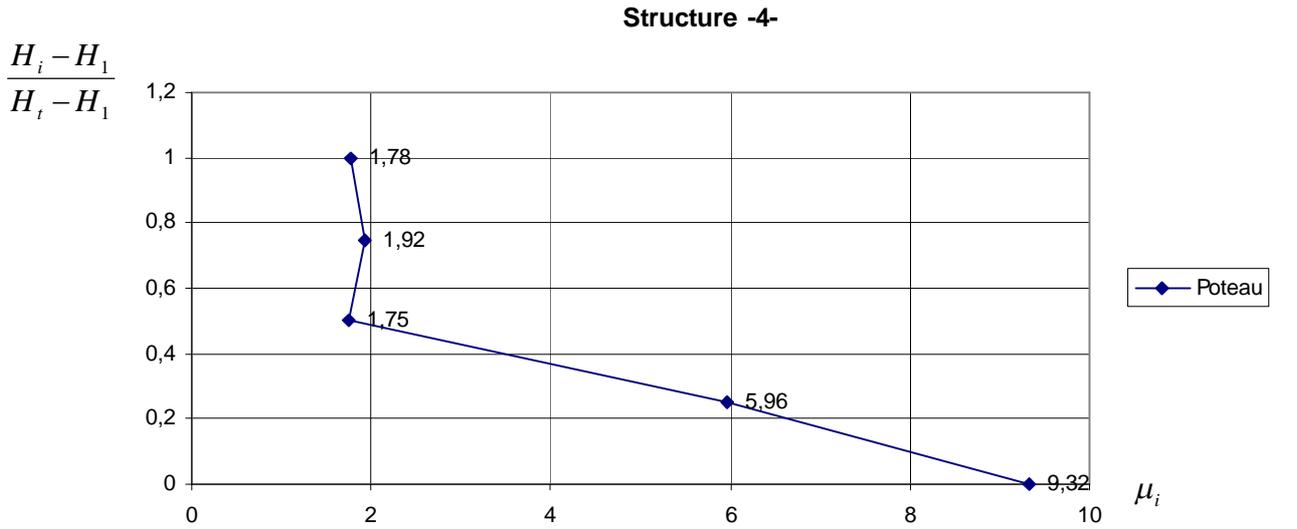
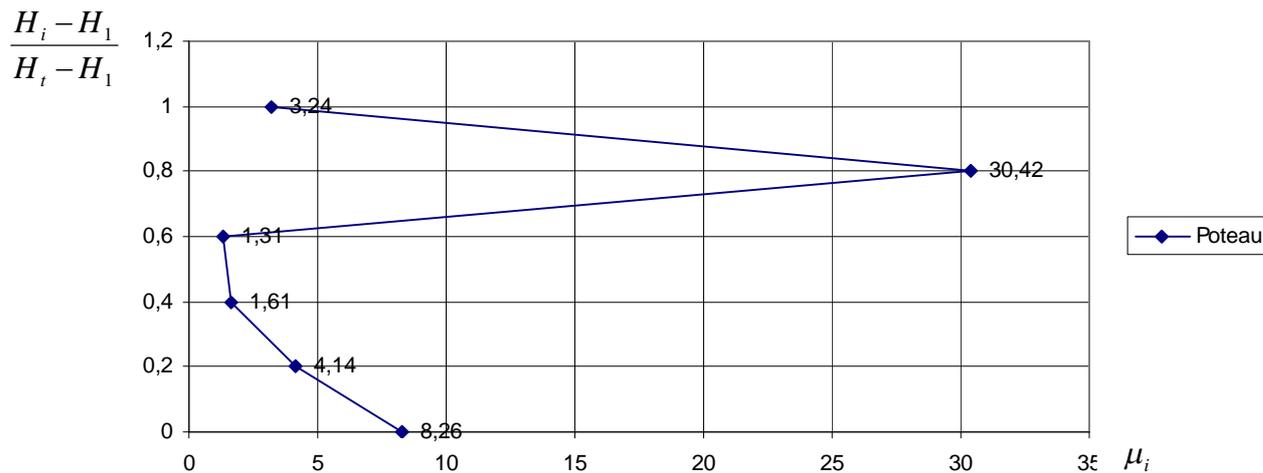
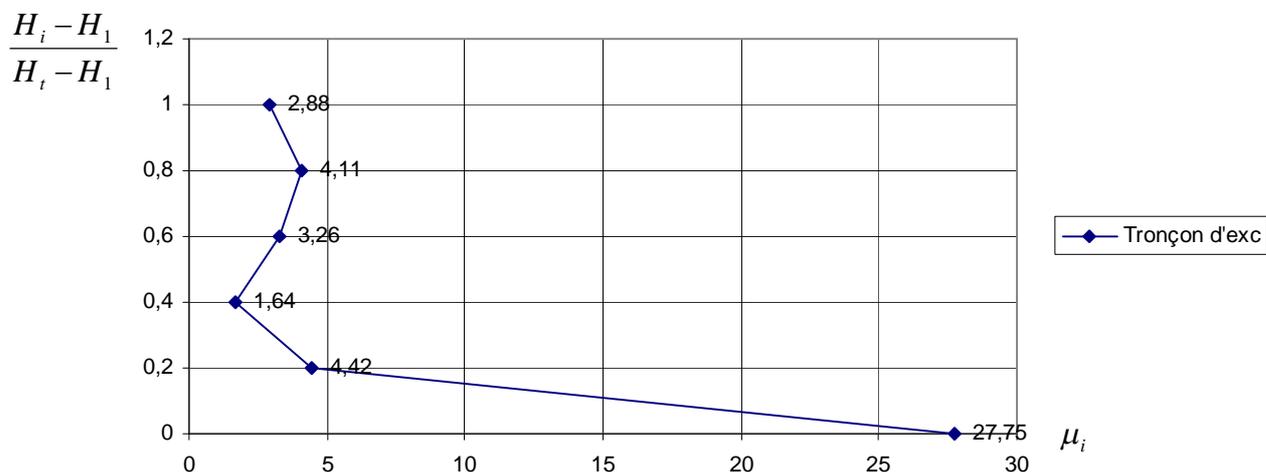


Figure V.16 Distribution de la ductilité locale Strc 4

Structure -5-



Structure -5-



Structure -5-

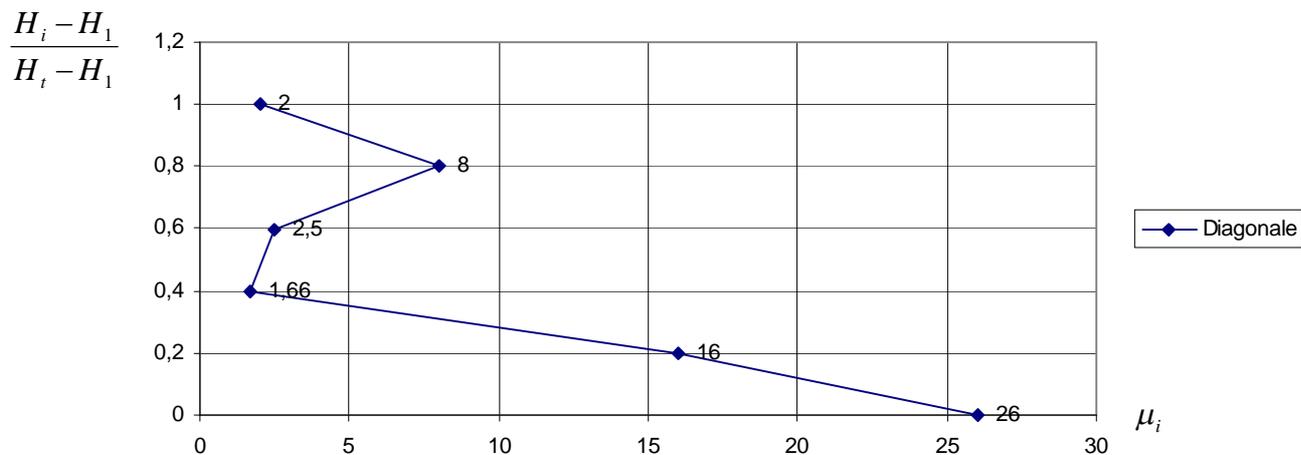


Figure V.17 Distribution de la ductilité locale Strc 5

Structure -2-

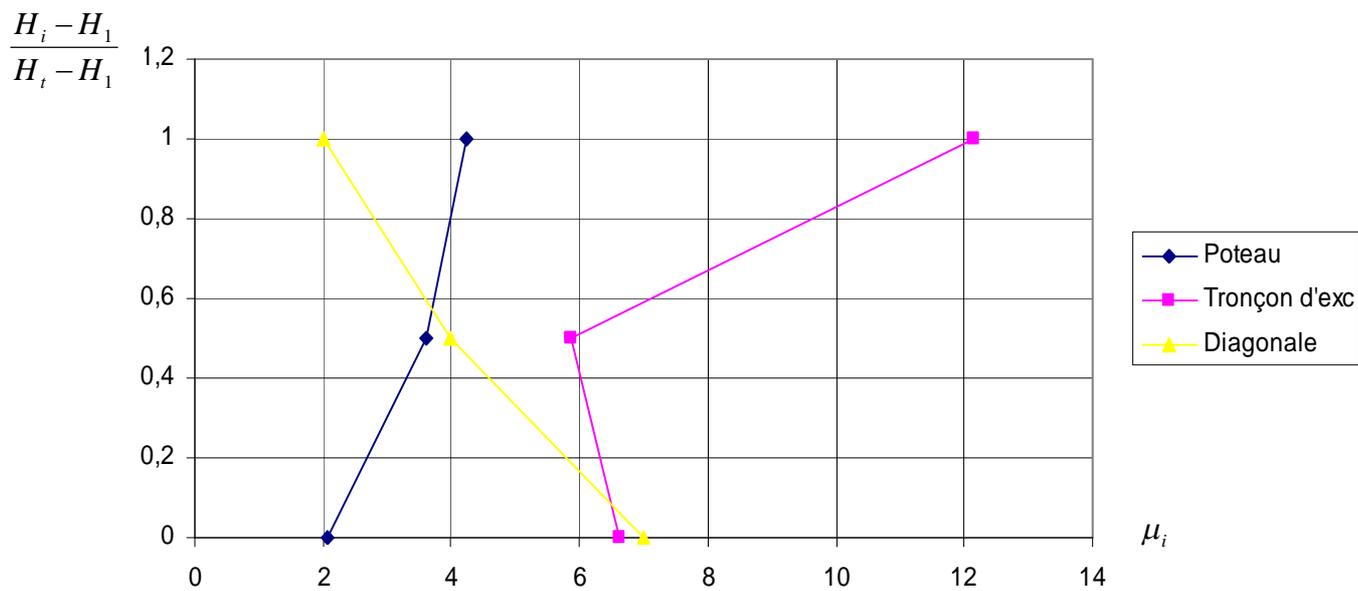


Figure V.18 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 2

Structure -3-

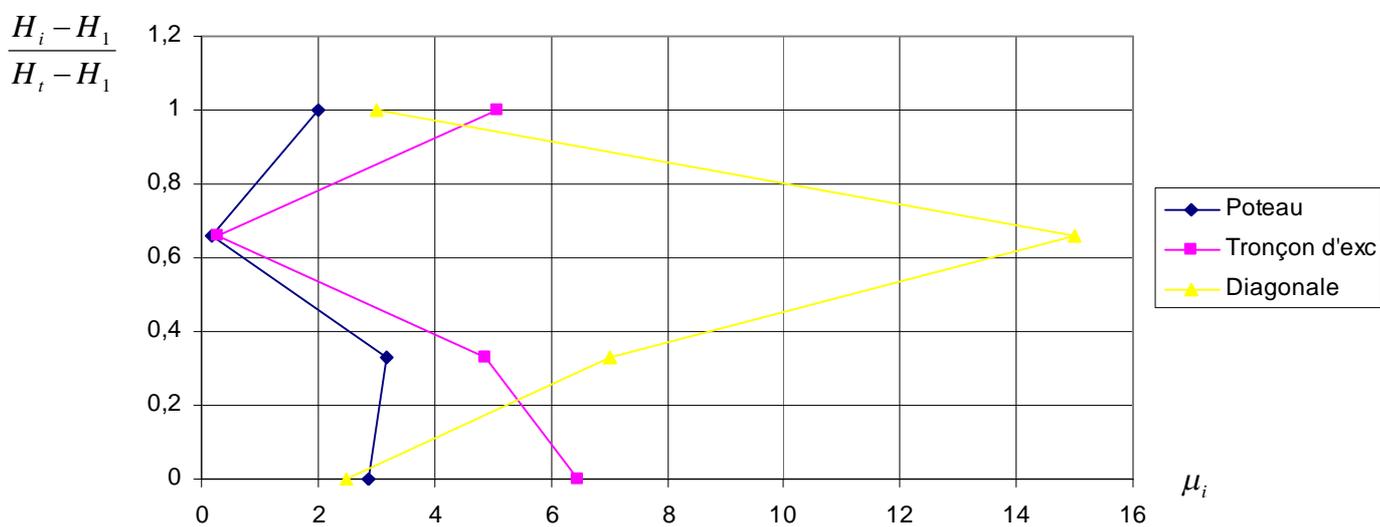


Figure V.19 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 3

Structure -4-

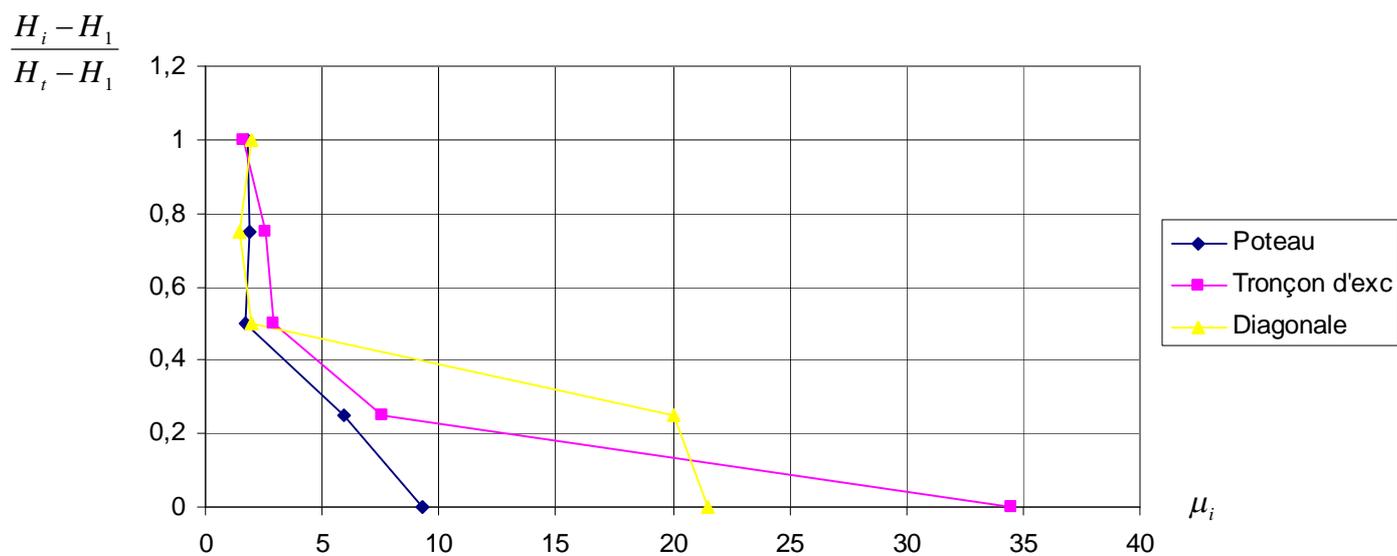


Figure V.20 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 4

Structure -5-

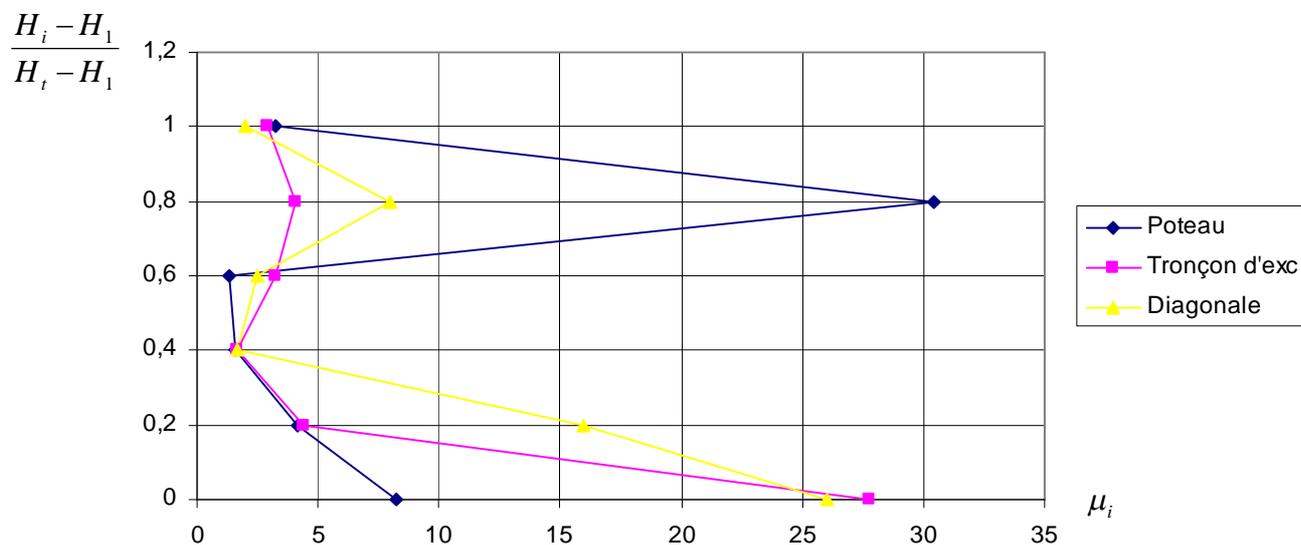


Figure V.21 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 5

V.2 Conclusion

L'étude menée a permis d'évaluer le facteur de comportement global (R pour le règlement parasismique Algérien) pour chaque structure. De même un diagramme a été déduit montrant la relation qui lie ce facteur avec la ductilité global des structures. Ce diagramme a été tracé en utilisant le concept de formation de rotule plastique dans les traverses : concept sécuritaire en zone sismique.

Une proposition de loi de distribution de ductilités locales requises en fonction du facteur de comportement suivant la hauteur des structures est formulée pour les éléments : tronçons d'excentrement sismiques et colonnes

Chapitre VI

INTERPRETATION DES RESULTATS (Interprétation de l'étude numérique)

VI.1 Valeur du coefficient de comportement q trouvées

Les valeurs du coefficient de comportement q trouvées sont synthétisées dans les tableaux V.1 et V.2.

Les courbes correspondantes sont montrées aux figures V.1, V.2, V.3, V.4 et V.5.

Il en résulte que les valeurs du facteur de comportement q sont de l'ordre de 2,5. Cette valeur apparaît comme étant maximale avant que n'apparaisse pour toutes les structures un mécanisme partiel les rendant instables. En effet, à $q = 2,5$, les tronçons d'excentrement et les poutres sont plastifiées par effet de flexion, ce qui confère aux structures une faible capacité de dissipation d'énergie par flexion plastique. Ce qui est prévisible d'après la théorie [23].

Cette faible capacité de dissipation peut s'expliquer par :

- l'influence des forces statiques verticales : l'effet $P - D$ joue un rôle non négligeable.
- la symétrie de la structure (une seule travée) qui ne permet pas une redistribution de plastification comme pour les éléments à travées adjacentes de portiques classiques.

Cette étude fait remarquer aussi que pour :

Des projets de hauteurs et de travées classiques telles que les structures étudiées, la plastification des tronçons d'excentrement survient avant celle des diagonales, des poutres et des poteaux. Ce qui confirme le rôle dissipatif des tronçons d'excentrement. De plus, il est vérifié que les tronçons d'excentrement se plastifient uniquement par flexion.

La comparaison entre les types de contreventement étudiés et les types classiques (en portique et en X, [45]) montre que ce type de comportement choisi est intermédiaire aux deux autres.

VI.2 Ductilité locales requises

Les ductilités locales requises dans les éléments plastifiés sont données dans les tableaux V.3 et V.4. Les courbes correspondantes sont données aux figures V.6, V.7, V.8, V.9, V.10, V.11, V.12 et V.13. On considère chaque fois la ductilité maximale demandée dans les zones dissipatives d'un même étage situé à un niveau H_i , ceci pour les colonnes, les diagonales et les tronçons d'excentrement.

VI.2.1 Pour les colonnes

Pour les structures à deux (2), trois (3) et quatre (4) niveaux, la ductilité locale requise est de l'ordre de q ; pour les structures à cinq (5) et six (6) niveaux, elle est de l'ordre de $3q$.

VI.2.2 Pour les diagonales

Les diagonales ont pour rôle l'acheminement de l'effort au niveau du tronçon d'excentrement.

L'étude a montré que la demande en ductilité est beaucoup plus forte à la base pour les structures cinq (5) et six (6) niveaux. Elle est de l'ordre de $9q$ pour ces structures et de l'ordre de q pour les petites structures.

VI.2.3 Pour les tronçons d'excentrement

L'étude ressort que la demande en ductilité est semblable à celle des diagonales, à savoir :

- pour les systèmes à cinq (5) et six (6) niveaux, la demande est de l'ordre de $12q$,
- pour les petites structures, la demande en ductilité est de l'ordre de q .

VI.3 Proposition de courbes de distribution de ductilités

Afin d'avoir un aperçu global du comportement type de contreventement étudié, nous donnons ici une proposition d'une courbe de ductilité pour les trois éléments sujets à dissipation d'énergie : tronçon d'excentrement, poteau et diagonale. Ceci est le fait de valeurs moyennes pour les quatre structures au sommet et à la base de chacune d'elles. La proposition est illustrée au tableau VI.1 et dans les figures VI.1, VI.2, VI.3 et VI.4.

Tableau VI.1 Ductilités locales requises des éléments

Structure		μ_i	
		En tête	En bas
Struc -2-	Poteau	4,00	2,00
	Tronçon d'exc	12,15	6,24
	Diagonale	3,00	7,00
Struc -3-	Poteau	1,00	3,00
	Tronçon d'exc	4,97	6,47
	Diagonale	5,00	2,50
Struc -4-	Poteau	2,00	7,52
	Tronçon d'exc	3,67	34,48
	Diagonale	1,82	20,75
Struc -5-	Poteau	2,50	8,26
	Tronçon d'exc	3,26	27,75
	Diagonale	3,50	21,00

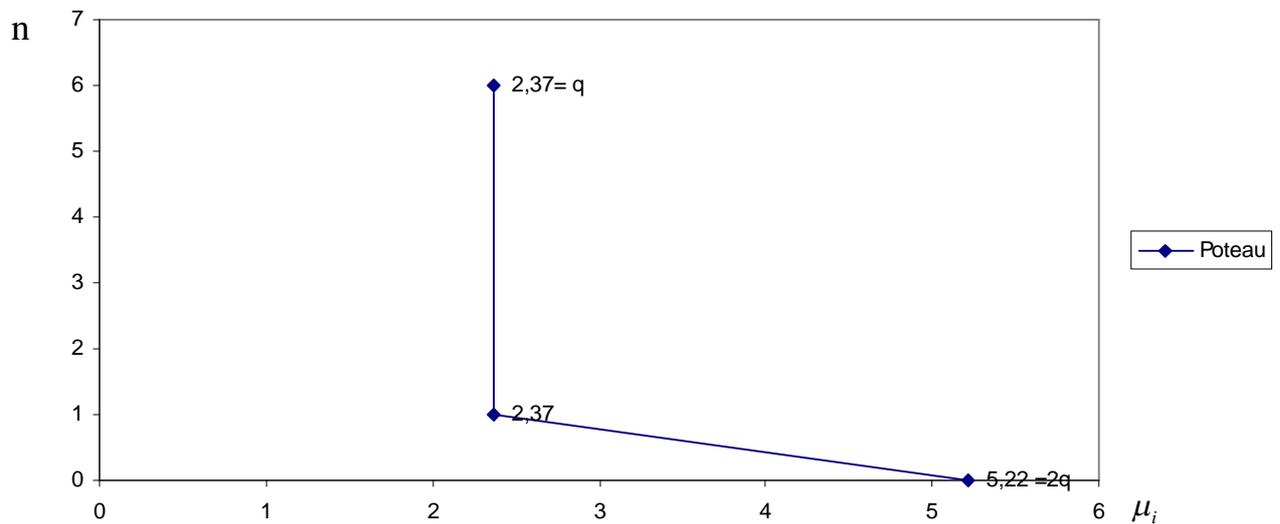


Figure VI.1 Proposition d'une courbe de distribution de ductilité

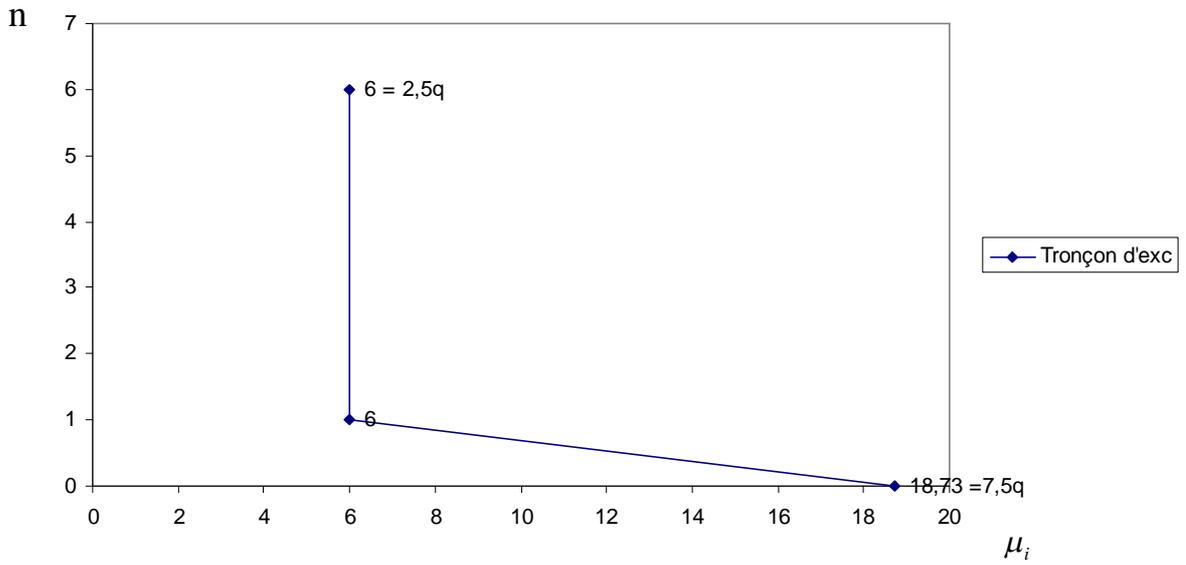


Figure VI.2 Proposition d'une courbe de distribution de ductilité

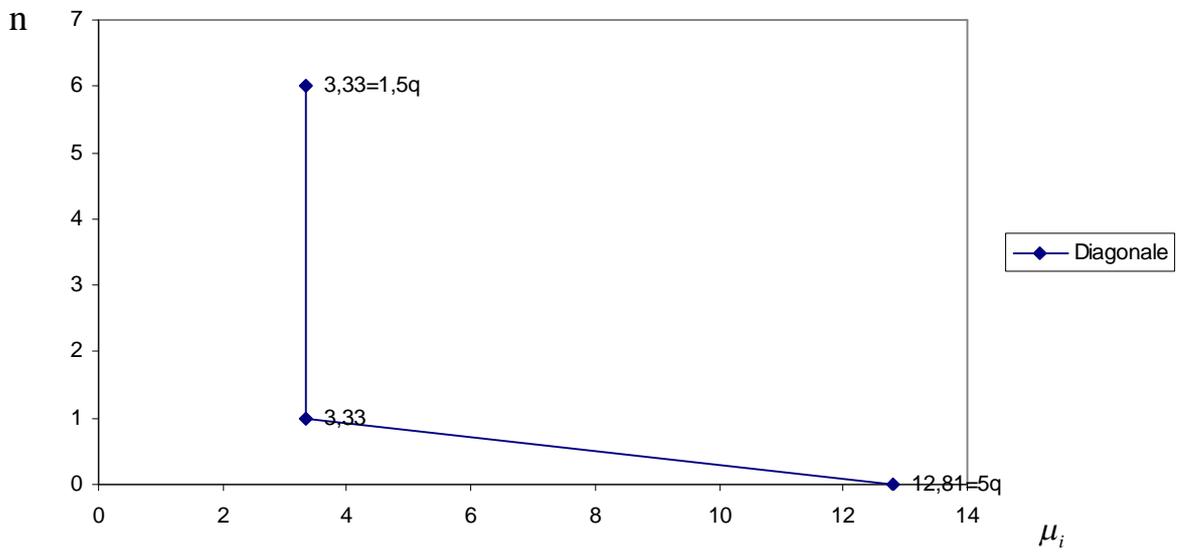


Figure VI.3 Proposition d'une courbe de distribution de ductilité

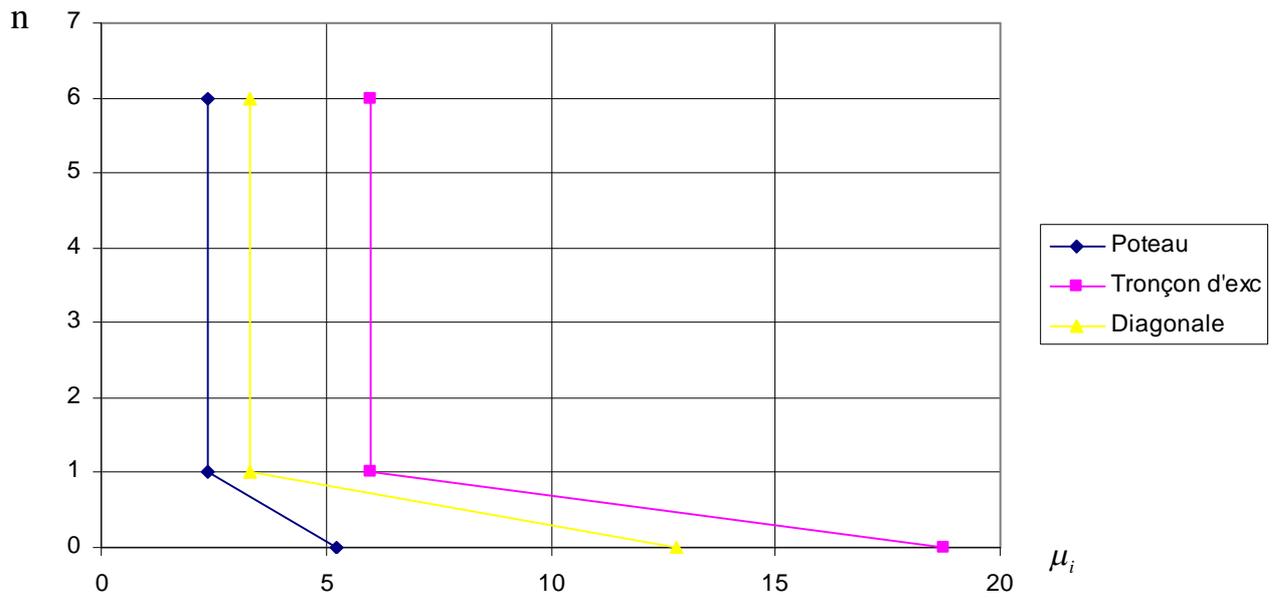


Figure VI.4 Proposition d'une courbe de distribution des ductilités

VI.6 Séquence d'apparition de rotules plastiques

Tout au long de l'étude, nous avons suivi la séquence de plastification des éléments et nous avons remarqué que pour toutes les structures, les tronçons d'excentrement se plastifient avant les colonnes et les poutres, puis les poutres et enfin la plastification des colonnes apparaisse, ce qui est sécuritaire.

- → $\lambda = 1,50 \rightarrow q = 1$
- → $\lambda = 2,62 \rightarrow q = 1,75$
- → $\lambda = 3,00 \rightarrow q = 2$

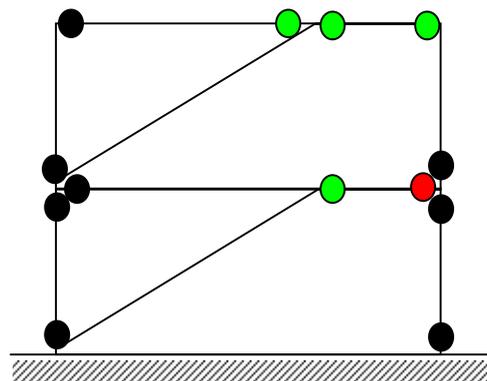


Figure VI.5 Séquence de formation de rotules plastiques pour la structure 1'

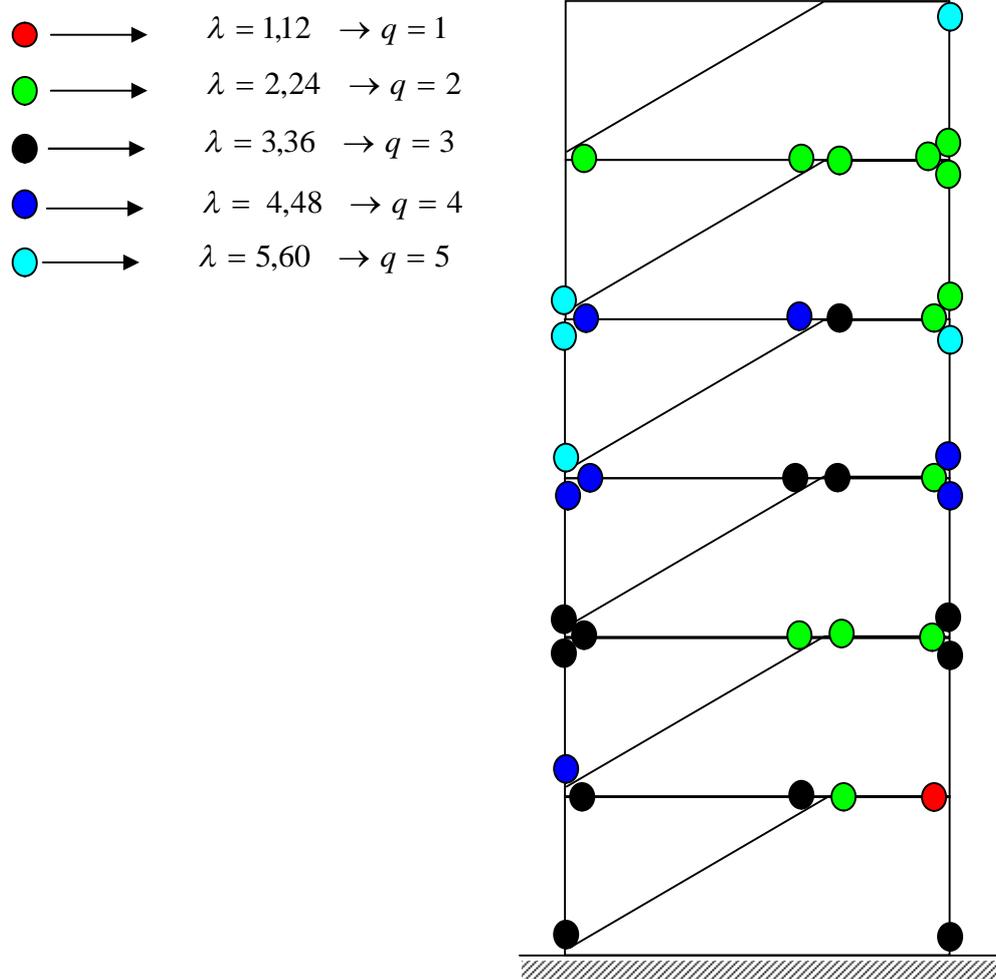


Figure VI.6 Séquence de formation de rotules plastiques pour la structure 5

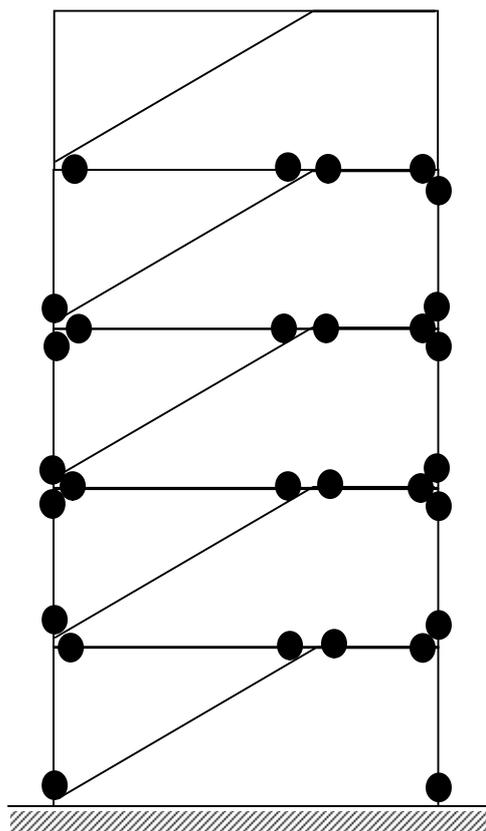
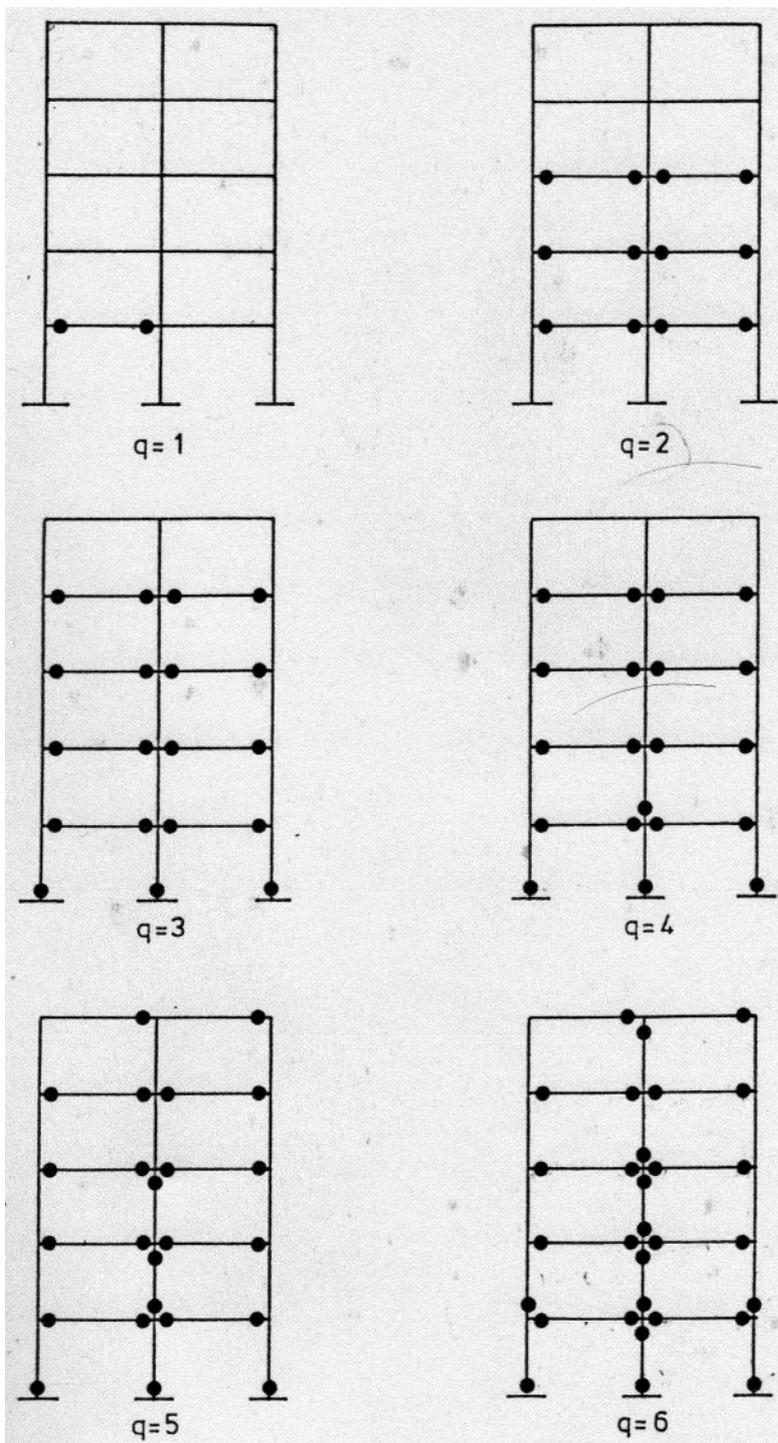


Figure VI.7 Séquence de formation de rotules plastiques pour la Structure 4



Chapitre VII

CONCLUSION ET PERSPECTIVES**VII.1 Conclusion**

L'étude menée a permis d'analyser des structures en acier contreventées par des tronçons d'excentrement comme définies au chapitre IV. Cette étude a été rendu possible grâce à un programme d'analyse non linéaire.

Nous avons gardé pour toutes les structures les mêmes sections sur la hauteur. Par contre nous avons introduit une irrégularité de masse au niveau du dernier étage (terrasse) pour tenir compte de la réalité. En générale une terrasse inaccessible est soumise à une surcharge d'exploitation moins élevée.

Nous nous sommes intéressés à deux aspects : coefficient de comportement global q (R du RPA) et ductilités locales requises.

VII.1.1 Coefficient de comportement

Les valeurs du coefficient de comportement q trouvés sont de l'ordre de 2,5 exception faite de la structure 1' qui de par son nombre d'étages faible ($n = 2$) est moins dissipative. Ces valeurs de q sont valables à celles de l'eurocode – niveau de ductilité 1- par contre on ne peut rien conclure à titre de comparaison avec le RPA puisqu'il ne fait pas référence à ce type de contreventement.

L'étude révèle un comportement intermédiaire entre le type de contreventement en portique classique [6] et le type à barres centrées [45] ; ce qui est révélateur de la fiabilité de l'étude. Cette relative faible dissipation peut s'expliquer par :

- L'irrégularité introduite
- Les structures étudiées présentent toutes une travée. Ce qui ne permet pas une redistribution des plastifications comme pour les structures à travées adjacentes.

VII.1.2 Ductilités locales requises

L'étude a montré que les ductilités locales requises à la base des différentes structures sont de l'ordre :

- 7,5 q pour les tronçons d'excentrement
- 2 q pour les poteaux
- 5 q pour les diagonales

La demande en ductilité est relativement élevée pour ce type de contreventement, néanmoins il devient économique puisqu'on obtient la même ruine pour un nombre de niveaux comparables : figure VI.7, VI.8.

On recommandera pour chaque élément une distribution de ductilité en fonction de q comme montré aux figures VI.1, VI.2, VI.3 et VI.4.

VII.2 Perspectives

Cette étude concerne l'évaluation du facteur de comportement q pour les structures en acier contreventés par des tronçons d'excentrement. Elle vient compléter celle relative aux portiques [6] et celle relative aux palés de stabilité en X [45]. Celle-ci a l'avantage d'introduire une irrégularité. L'étude reste à faire pour des structures raidies par des panneaux de cisaillement. Nous signalons aussi qu'au pays du soleil levant, le programme d'analyse non linéaire utilisé est disponible en trois dimensions et que des essais grande nature sont réalisés. Il serait intéressant d'acquérir ce programme dans le laboratoire de génie parasismique.

ANNEXES

Réponse Dynamique

1- Equation d'équilibre dynamique [43]

Les structures planes à plusieurs degrés de liberté peuvent être modélisées du point de vue comportement dynamique par un ensemble de masse « m » attribuées à chaque plancher « i » considéré comme infiniment rigide, reposant sur des colonnes supposées encastrées à leurs basses, figure (1).

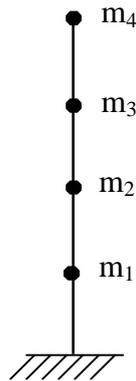


Figure 1 Représentation massique d'un portique

Dans ce cas l'équation d'équilibre dynamique qui régit le déplacement du système s'écrit :

$$[M] \left\{ \ddot{V}_t(t) \right\} + [C] \left\{ \dot{V}(t) \right\} + [K] \{V(t)\} = 0 \quad (1)$$

Avec : $V_t(t) = V_g(t) + V(t)$: Déplacement total, figure (2).

$V_g(t)$: Déplacement du sol.

$V(t)$: Déplacement relatif de la structure.

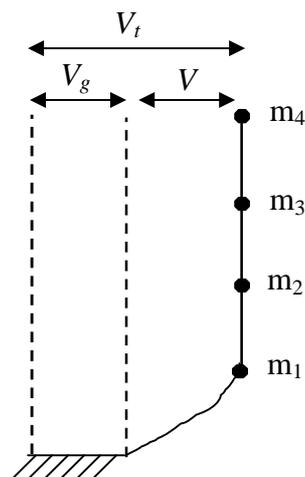


Figure 2 Déplacement du portique sous action $g(t)$

$$[M] \left\{ \ddot{V}_g(t) + \ddot{V}(t) \right\} + [C] \left\{ \dot{V}(t) \right\} + [K] \{V(t)\} = 0 \quad (2)$$

$$[M] \left\{ \ddot{V}(t) \right\} + [C] \left\{ \dot{V}(t) \right\} + [K] \{V(t)\} = -[M] \left\{ \ddot{V}_g(t) \right\} \quad (3)$$

$$[M] \left\{ \ddot{V}(t) \right\} + [C] \left\{ \dot{V}(t) \right\} + [K] \{V(t)\} = \{P(t)\} \quad (4)$$

Avec : $\{P(t)\} = -[M] \left\{ \ddot{V}_g(t) \right\}$

2- Décomposition de l'équation dans la base de modes propres

$$[V(t)] = [\phi] \{y\} \quad (5)$$

Avec :

$\{V(t)\}$: Vecteur déplacement

$\{\phi\}$: Vecteur modal

$\{y\}$: Amplitude

$$[M] \{\phi\} \left\{ \ddot{y} \right\} + [C] \{\phi\} \left\{ \dot{y} \right\} + [K] \{\phi\} \{y\} = \{P(t)\} \quad (6)$$

On multiplie (6) par $[\phi']$

$$[\phi'] [M] \{\phi\} \left\{ \ddot{y} \right\} + [\phi'] [C] \{\phi\} \left\{ \dot{y} \right\} + [\phi'] [K] \{\phi\} \{y\} = [\phi'] \{P(t)\} \quad (7)$$

La condition d'orthogonalité s'écrit :

$$\left. \begin{aligned} [\Phi_m]^t [M] [\Phi_n] &= 0 \\ [\Phi_m]^t [K] [\Phi_n] &= 0 \\ [\Phi_m]^t [C] [\Phi_n] &= 0 \end{aligned} \right\} m + n \quad (8)$$

Donc :

$$[Mm] \left\{ \ddot{y} \right\} + [Cm] \left\{ \dot{y} \right\} + [Km] \{y\} = \{\Phi\}' \{P(t)\} \quad (9)$$

$[Mm]$, $[Cm]$, $[Km]$: Matrices diagonales de mode m .

$$[M_n] = \begin{bmatrix} M_I & 0 \\ & M_{II} \\ 0 & & M_n \end{bmatrix}$$

$$[C_m] = \begin{bmatrix} C_I & 0 \\ & C_{II} \\ 0 & & C_n \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$[K_m] = \begin{bmatrix} K_I & 0 \\ & K_{II} \\ 0 & & K_n \end{bmatrix}$$

3- Condition d'orthogonalité de l'amortissement

Le problème est de déterminer la forme de la matrice d'amortissement pour laquelle les conditions d'orthogonalité s'appliquent.

Rayleigh a montré qu'une matrice de la forme :

$$[C] = \alpha [M] + \beta [K] \quad (11)$$

La formule (11) satisfait ces conditions.

Avec : α et β : Coefficients à déterminer.

Mode I :

$$C_I = \alpha m_I + \beta K_I$$

Mode II :

$$C_{II} = \alpha m_{II} + \beta K_{II} \quad (12)$$

On divise par m_I et m_{II} :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{C_I}{m_I} = \alpha + \beta \frac{K_I}{m_I} \\ \frac{C_{II}}{m_{II}} = \alpha + \beta \frac{K_{II}}{m_{II}} \end{array} \right\} \quad (13)$$

Comme :

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{K_I}{m_I} = \omega_I^2 \quad \frac{K_{II}}{m_{II}} = \omega_{II}^2 \\ \frac{C_I}{m_I} = 2\omega_I \xi \quad \frac{C_{II}}{m_{II}} = 2\omega_{II} \xi \end{array} \right\}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\omega_I \xi_I = \alpha + \beta \omega_I^2 \\ 2\omega_{II} \xi_{II} = \alpha + \beta \omega_{II}^2 \end{array} \right\}$$

ξ_I et ξ_{II} Sont respectivement les amortissements critiques dans les modes I et II. Ils dépendent du type de matériau (Tableau 1).

Remarque

- 1- On peut considérer le même amortissement critique ξ_i ($\xi_I = \xi_{II} = \xi$).
- 2- Les modes I et II représentant les deux modes de vibration prépondérants de la Structure.

$$\begin{cases} 2\omega_I \xi = \alpha + \beta \omega_I^2 \\ 2\omega_{II} \xi = \alpha + \beta \omega_{II}^2 \end{cases} \quad (14)$$

Après résolution :

$$\beta = \frac{2\xi}{\omega_I + \omega_{II}}$$

$$\alpha = 2\xi \frac{\omega_I * \omega_{II}}{\omega_I + \omega_{II}}$$

Ou bien :

$$\alpha = \beta * \omega_I * \omega_{II}$$

Donc :

$$\alpha > \beta \quad \text{Pour} \quad \omega_I * \omega_{II} > 1$$

Tableau : 1 -Tableau des Coefficients ξ_i d'amortissement (ξ_i en %)

Matériau	Assemblage	Structure	Régime	ξ_i (en %)
Acier	Soudé	Ossature	Elastiques	2
Acier	Boulonné	Ossature	Elastiques	5
Acier	Soudé	Contreventée	Elastiques	5
Acier	Boulonné Soudé	Ossature	Avec rotules plastiques	10 à 15
Béton armé	/	Ossature	/	5
Béton armé	/	Ossature + murs de remplissage	/	7 à 10

Tableau : 2- Principe de dimensionnement, classes de ductilité des structures et limites supérieures des valeurs de référence des coefficients de comportement

Principe de dimensionnement	Classe de ductilité de la structure	Intervalle des valeurs de référence du coefficient de comportement
Principe a) Comportement de structure faiblement dissipatif	DCL (limitée)	$\leq 1,5 - 2$
Principe b) Comportement de structure dissipatif	DCM (moyenne)	≤ 4 Egalement limité par les valeurs du tableau -3-
	DCH (haute)	Uniquement limité par les valeurs du tableau -3-

Tableau : 3- Limite supérieure à la valeur de référence du coefficient de comportement pour les systèmes réguliers en élévation

Type de structure	Classe de ductilité	
	DCM	DCH
a) Ossature en portique	4	$5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
b) Ossature avec triangulation à barres centrée	4	4
Entretoises diagonales	2	2,5
Entretoises en V		
c) Ossature avec triangulation à barres excentrées	4	$5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
d) Pendule inversé	2	$2 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
e) Structures avec noyaux ou murs en béton	Voir article 5	
f) Ossature en portique avec triangulation centrée	4	$4 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$
g) Ossature en portique avec remplissages		
Remplissage en béton ou en maçonnerie non connectés, en contact avec l'ossature	2	2
Remplissage en béton armé connectés	Voir article 7	
Remplissages isolés de l'ossature en portique (voir ossatures en portique)	4	$5 \frac{\alpha_u}{\alpha_1}$

Tableau : 4- Exigence relatives à la classe de section des éléments dissipatifs en fonction de la classe de ductilité et du coefficient de comportement de référence

Classe de ductilité	Valeur de référence du coefficient de comportement q	Classe de section requise
DCM	$1,5 \leq q \leq 2$	Classe 1,2 ou 3
	$2 \leq q \leq 4$	Classe 1 ou 2
DCH	$q > 4$	Classe 1

FICHER DONNEES

- STRC 5 -

START	STRUCTURE 5							
20	20	0	2	0	6	2	0	0
1		0.		0.				
2		4.		0.				
3		0.		3.				
4		3.3		3.				
5		4.		3.				
6		0.		6.				
7		3.3		6.				
8		4.		6.				
9		0.		9.				
10		3.3		9.				
11		4.		9.				
12		0.		12.				
13		3.3		12.				
14		4.		12.				
15		0.		15.				
16		3.3		15.				
17		4.		15.				
18		0.		18.				
19		3.3		18.				
20		4.		18.				
1	1	1	1					
2	1	1	1					
3		4.4		4.4	0.	15	3	1.
4		5.34		5.34	0.	16	3	1.
5		0.934		0.934	0.	17	3	1.
18		4.22		4.22	0.			
19		5.11		5.11	0.			
20		0.895		0.895	0.			
		2000		0.02		5.6		
2000	0	1	1		EL Centro Earthquake			
0.00	0.000	0.02-0.014	0.04-0.108	0.06-0.101	0.08-0.088	0.10-0.095		
0.12	0.120	0.14-0.142	0.16-0.128	0.18-0.110	0.20-0.085	0.22-0.085		
0.24	0.131	0.26-0.176	0.28-0.194	0.30-0.162	0.32-0.144	0.34-0.108		
0.36	0.082	0.38-0.042	0.40-0.066	0.42-0.131	0.44-0.190	0.46-0.196		
0.48	0.066	0.50-0.030	0.52-0.141	0.54-0.049	0.56-0.128	0.58-0.144		
0.60	0.203	0.62-0.260	0.64-0.325	0.66-0.306	0.68-0.172	0.70-0.197		
0.72	0.163	0.74-0.164	0.76-0.067	0.78-0.025	0.80-0.150	0.82-0.236		
0.84	0.252	0.86-0.336	0.88-0.463	0.90-0.492	0.92-0.419	0.94-0.359		
0.96	0.271	0.98-0.235	1.00-0.339	1.02-0.412	1.04-0.530	1.06-0.639		
1.08	0.732	1.10-0.652	1.12-0.599	1.14-0.400	1.16-0.400	1.18-0.063		
1.20	0.515	1.22-0.787	1.24-0.603	1.26-0.484	1.28-0.250	1.30-0.059		
1.32	0.134	1.34-0.308	1.36-0.499	1.38-0.710	1.40-0.995	1.42-1.219		
1.44	1.529	1.46-1.449	1.48-1.155	1.50-0.935	1.52-0.892	1.54-0.926		
1.56	0.839	1.58-0.901	1.60-0.993	1.62-1.209	1.64-0.328	1.66-1.475		
1.68	2.066	1.70-1.989	1.72-2.034	1.74-1.816	1.76-1.725	1.78-1.752		
1.80	1.753	1.82-1.805	1.84-1.630	1.86-1.347	1.88-1.087	1.90-0.782		
1.92	0.429	1.94-0.017	1.96-0.360	1.98-0.785	2.00-1.164	2.02-1.598		
2.04	1.960	2.06-2.412	2.08-2.729	2.10-3.036	2.12-3.200	2.14-3.417		
2.16	2.821	2.18-2.324	2.20-1.198	2.22-2.373	2.24-1.640	2.26-1.865		
2.28	1.095	2.30-0.753	2.32-0.173	2.34-0.113	2.36-0.533	2.38-0.895		
2.40	1.186	2.42-1.757	2.44-0.576	2.46-2.631	2.48-1.547	2.50-1.729		
2.52	1.012	2.54-0.579	2.56-0.237	2.58-0.670	2.60-1.980	2.62-1.641		
2.64	1.685	2.66-1.481	2.68-1.231	2.70-1.001	2.72-0.751	2.74-0.523		
2.76	0.271	2.78-0.044	2.80-0.188	2.82-0.095	2.84-0.433	2.86-0.838		
2.88	0.951	2.90-0.716	2.92-0.599	2.94-0.334	2.96-0.108	2.98-0.185		
3.00	0.420	3.02-0.673	3.04-0.097	3.06-0.372	3.08-0.040	3.10-0.011		
3.12	0.344	3.14-0.565	3.16-0.883	3.18-1.130	3.20-1.363	3.22-0.219		
3.24	0.241	3.26-0.683	3.28-0.689	3.30-1.318	3.32-1.353	3.34-2.040		
3.36	0.931	3.38-1.308	3.40-0.692	3.42-0.546	3.44-0.072	3.46-0.675		
3.48	1.067	3.50-1.488	3.52-1.071	3.54-1.162	3.56-0.762	3.58-0.559		
3.60	0.215	3.62-0.126	3.64-0.674	3.66-0.324	3.68-0.337	3.70-0.109		
3.72	0.017	3.74-0.299	3.76-0.488	3.78-0.608	3.80-0.222	3.82-0.032		
3.84	0.245	3.86-0.077	3.88-0.211	3.90-0.568	3.92-0.826	3.94-1.206		
3.96	1.478	3.98-1.737	4.00-0.421	4.02-0.029	4.04-0.259	4.06-0.293		
4.08	0.055	4.10-0.147	4.12-0.143	4.14-0.206	4.16-0.499	4.18-0.645		
4.20	0.957	4.22-1.128	4.24-1.447	4.26-1.629	4.28-1.945	4.30-1.856		

4.32	1.984	4.34	1.769	4.36	1.250	4.38	-1.207	4.40	-0.542	4.42	-0.384
4.44	-0.311	4.46	-1.118	4.48	-1.661	4.50	-2.464	4.52	-2.025	4.54	-1.835
4.56	-1.317	4.58	-0.960	4.60	-0.325	4.62	0.154	4.64	0.816	4.66	1.319
4.68	1.818	4.70	-0.058	4.72	-0.169	4.74	0.285	4.76	0.447	4.78	0.983
4.80	1.424	4.82	1.853	4.84	2.456	4.86	1.685	4.88	-1.380	4.90	-0.999
4.92	-1.089	4.94	-0.907	4.96	-0.469	4.98	-1.250	5.00	-2.111	5.02	-1.617
5.04	-1.692	5.06	-1.306	5.08	-1.111	5.10	-0.773	5.12	-0.510	5.14	-0.544
5.16	-1.200	5.18	-1.209	5.20	-1.158	5.22	-1.145	5.24	-0.717	5.26	-0.546
5.28	0.064	5.30	-0.804	5.32	-1.634	5.34	-0.859	5.36	-0.961	5.38	-0.396
5.40	-0.147	5.42	0.319	5.44	0.648	5.46	0.876	5.48	0.472	5.50	0.198
5.52	-0.027	5.54	0.292	5.56	0.445	5.58	0.785	5.60	1.033	5.62	1.352
5.64	1.606	5.66	1.861	5.68	1.281	5.70	0.640	5.72	0.204	5.74	0.314
5.76	0.373	5.78	0.496	5.80	0.235	5.82	-0.084	5.84	-0.168	5.86	-0.113
5.88	-0.229	5.90	-0.248	5.92	-0.157	5.94	-0.069	5.96	0.147	5.98	0.379
6.00	0.579	6.02	0.255	6.04	-0.041	6.06	-0.428	6.08	-0.133	6.10	0.095
6.12	0.230	6.14	-0.129	6.16	-0.050	6.18	0.080	6.20	0.210	6.22	0.380
6.24	0.510	6.26	0.157	6.28	-0.032	6.30	-0.111	6.32	0.005	6.34	0.076
6.36	0.035	6.38	-0.095	6.40	-0.036	6.42	-0.016	6.44	0.038	6.46	0.085
6.48	-0.056	6.50	-0.304	6.52	-0.421	6.54	-0.244	6.56	-0.236	6.58	-0.177
6.60	-0.129	6.62	-0.018	6.64	0.203	6.66	-0.108	6.68	-0.091	6.70	-0.034
6.72	-0.106	6.74	-0.111	6.76	-0.099	6.78	-0.002	6.80	0.073	6.82	0.235
6.84	0.355	6.86	0.705	6.88	0.779	6.90	0.184	6.92	-0.263	6.94	-0.124
6.96	-0.042	6.98	0.159	7.00	0.048	7.02	-0.219	7.04	-0.467	7.06	-0.428
7.08	-0.216	7.10	-0.043	7.12	0.159	7.14	0.320	7.16	0.419	7.18	0.123
7.20	-0.160	7.22	-0.204	7.24	-0.082	7.26	-0.206	7.28	-0.137	7.30	-0.055
7.32	0.053	7.34	0.134	7.36	0.266	7.38	0.232	7.40	0.079	7.42	-0.008
7.44	0.200	7.46	0.435	7.48	0.492	7.50	0.191	7.52	0.092	7.54	-0.022
7.56	-0.021	7.58	0.052	7.60	0.093	7.62	0.255	7.64	0.368	7.66	0.525
7.68	0.541	7.70	0.425	7.72	0.398	7.74	0.559	7.76	0.756	7.78	0.365
7.80	0.411	7.82	0.098	7.84	-0.204	7.86	-0.249	7.88	-0.405	7.90	-0.413
7.92	-0.471	7.94	-0.433	7.96	-0.458	7.98	-0.057	8.00	0.178	8.02	-0.208
8.04	-0.492	8.06	-0.530	8.08	-0.362	8.10	-0.405	8.12	-0.308	8.14	-0.316
8.16	-0.265	8.18	-0.265	8.20	-0.269	8.22	-0.345	8.24	-0.309	8.26	-0.217
8.28	-0.078	8.30	0.087	8.32	0.281	8.34	0.310	8.36	0.358	8.38	0.341
8.40	0.358	8.42	0.287	8.44	0.305	8.46	0.112	8.48	0.214	8.50	0.136
8.52	0.384	8.54	-0.861	8.56	-1.349	8.58	-1.342	8.60	-1.354	8.62	-1.193
8.64	-1.042	8.66	-0.829	8.68	-0.651	8.70	-0.444	8.72	-0.258	8.74	-0.060
8.76	-0.091	8.78	-0.182	8.80	-0.147	8.82	0.085	8.84	0.163	8.86	0.050
8.88	0.264	8.90	0.582	8.92	0.867	8.94	1.200	8.96	1.695	8.98	1.111
9.00	-1.100	9.02	-0.366	9.04	-0.445	9.06	-0.236	9.08	-0.960	9.10	-0.656
9.12	-0.597	9.14	-0.670	9.16	-0.552	9.18	-0.027	9.20	0.378	9.22	1.072
9.24	1.669	9.26	0.947	9.28	0.408	9.30	0.667	9.32	0.132	9.34	-0.095
9.36	-0.520	9.38	-0.827	9.40	-1.152	9.42	-1.150	9.44	-0.803	9.46	-0.369
9.48	0.029	9.50	0.545	9.52	1.178	9.54	1.610	9.56	-0.270	9.58	0.034
9.60	-0.056	9.62	0.020	9.64	0.146	9.66	0.537	9.68	0.798	9.70	-0.205
9.72	-0.590	9.74	-0.169	9.76	-0.175	9.78	-0.028	9.80	0.074	9.82	0.382
9.84	0.567	9.86	0.753	9.88	0.801	9.90	0.592	9.92	0.304	9.94	0.023
9.96	0.064	9.98	-0.406	10.00	-0.451	10.02	-0.079	10.04	0.168	10.06	0.567
10.08	0.093	10.10	-0.055	10.12	0.044	10.14	-0.123	10.16	-0.282	10.18	-0.437
10.20	-0.352	10.22	-0.255	10.24	-0.111	10.26	0.205	10.28	0.519	10.30	0.854
10.32	1.144	10.34	0.733	10.36	0.237	10.38	-0.368	10.40	-0.271	10.42	-0.217
10.44	-0.873	10.46	-0.973	10.48	-0.589	10.50	-0.336	10.52	0.077	10.54	0.259
10.56	0.508	10.58	0.361	10.60	0.081	10.62	-0.056	10.64	-0.209	10.66	-0.317
10.68	-0.238	10.70	-0.376	10.72	-0.550	10.74	-0.722	10.76	-0.803	10.78	-0.523
10.80	-0.340	10.82	-0.011	10.84	0.065	10.86	-0.037	10.88	-0.005	10.90	-0.168
10.92	-0.410	10.94	-0.080	10.96	0.079	10.98	0.374	11.00	0.615	11.02	0.665
11.04	0.254	11.06	-0.057	11.08	-0.474	11.10	-0.356	11.12	-0.243	11.14	-0.048
11.16	0.126	11.18	0.379	11.20	0.241	11.22	-0.227	11.24	-0.428	11.26	-0.679
11.28	-0.661	11.30	-0.590	11.32	-0.513	11.34	-0.408	11.36	-0.309	11.38	-0.266
11.40	-0.541	11.42	-0.628	11.44	-0.908	11.46	-1.107	11.48	-0.881	11.50	-0.770
11.52	-0.582	11.54	-0.473	11.56	-0.333	11.58	-0.199	11.60	0.020	11.62	0.211
11.64	0.432	11.66	0.613	11.68	0.767	11.70	0.933	11.72	1.066	11.74	1.130
11.76	1.187	11.78	1.247	11.80	1.334	11.82	1.594	11.84	1.797	11.86	2.037
11.88	1.236	11.90	0.442	11.92	-0.140	11.94	-0.666	11.96	-0.555	11.98	-0.693
12.00	-0.984	12.02	-1.246	12.04	-1.179	12.06	-1.050	12.08	-0.920	12.10	-0.743
12.12	-0.809	12.14	-0.850	12.16	-0.860	12.18	-0.863	12.20	-0.873	12.22	-0.868
12.24	-0.885	12.26	-0.537	12.28	0.052	12.30	0.215	12.32	0.245	12.34	0.580
12.36	0.314	12.38	0.236	12.40	0.485	12.42	0.589	12.44	0.525	12.46	0.355

12.48 0.197 12.50 0.199 12.52 0.492 12.54 0.343 12.56 0.288 12.58 0.432
12.60 0.239 12.62 0.088 12.64 0.077 12.66-0.148 12.68-0.077 12.70-0.019
12.72 0.075 12.74 0.044 12.76-0.145 12.78-0.316 12.80-0.241 12.82-0.028
12.84 0.182 12.86 0.426 12.88 0.439 12.90 0.512 12.92 0.466 12.94 0.479
12.96 0.193 12.98 0.222 13.00 0.274 13.02 0.393 13.04 0.504 13.06 0.577
13.08 0.588 13.10 0.822 13.12 0.797 13.14 0.949 13.16 0.345 13.18 0.045
13.20-0.123 13.22-0.347 13.24-0.426 13.26-0.416 13.28-0.275 13.30-0.270
13.32 0.074 13.34 0.428 13.36-0.231 13.38-0.387 13.40-0.083 13.42 0.139
13.44 0.445 13.46 0.027 13.48-0.697 13.50-0.796 13.52-0.251 13.54-0.135
13.56 0.079 13.58-0.115 13.60-0.251 13.62-0.333 13.64-0.269 13.66-0.301
13.68-0.200 13.70-0.067 13.72-0.038 13.74 0.105 13.76 0.296 13.78 0.344
13.80 0.957 13.82 0.898 13.84 0.179 13.86-0.362 13.88-0.994 13.90-0.807
13.92-0.744 13.94-0.539 13.96-0.330 13.98-0.128 14.00 0.031 14.02 0.148
14.04 0.508 14.06-0.022 14.08-0.489 14.10-0.358 14.12-0.691 14.14-0.516
14.16-0.371 14.18 0.088 14.20 0.632 14.22 0.841 14.24 1.276 14.26 1.388
14.28 1.193 14.30 0.751 14.32 0.225 14.34-0.088 14.36-0.227 14.38 0.074
14.40 0.181 14.42 0.544 14.44 0.399 14.46 0.045 14.48-0.082 14.50-0.185
14.52-0.020 14.54 0.006 14.56-0.117 14.58-0.210 14.60-0.303 14.62-0.512
14.64-0.727 14.66-0.579 14.68-0.266 14.70-0.178 14.72 0.040 14.74 0.098
14.76 0.137 14.78 0.221 14.80 0.437 14.82 0.091 14.84-0.548 14.86-0.555
14.88-0.243 14.90-0.081 14.92 0.250 14.94 0.410 14.96 0.182 14.98-0.027
15.00-0.243 15.02-0.015 15.04 0.247 15.06 0.482 15.08 0.783 15.10 0.622
15.12 0.331 15.14-0.014 15.16-0.195 15.18-0.247 15.20-0.212 15.22-0.110
15.24 0.050 15.26 0.241 15.28-0.034 15.30-0.216 15.32-0.471 15.34-0.363
15.36-0.195 15.38-0.018 15.40 0.170 15.42-0.080 15.44 0.005 15.46 0.230
15.48 0.374 15.50 0.601 15.52 0.516 15.54 0.432 15.56 0.344 15.58 0.505
15.60 0.653 15.62 0.683 15.64 0.172 15.66-0.170 15.68-0.527 15.70-0.664
15.72-0.387 15.74-0.222 15.76-0.033 15.78 0.119 15.80-0.128 15.82-0.351
15.84-0.514 15.86-0.335 15.88-0.218 15.90-0.012 15.92 0.142 15.94 0.070
15.96-0.063 15.98-0.120 16.00-0.322 16.02-0.346 16.04-0.091 16.06 0.073
16.08 0.309 16.10 0.472 16.12 0.603 16.14 0.576 16.16 0.330 16.18-0.073
16.20-0.777 16.22-0.608 16.24-0.438 16.26-0.209 16.28 0.031 16.30 0.350
16.32 0.293 16.34 0.121 16.36 0.338 16.38 0.317 16.40 0.254 16.42 0.206
16.44 0.198 16.46 0.174 16.48 0.021 16.50-0.144 16.52-0.343 16.54-0.339
16.56-0.145 16.58-0.028 16.60 0.170 16.62-0.096 16.64-0.255 16.66-0.279
16.68-0.388 16.70-0.242 16.72-0.215 16.74-0.182 16.76-0.174 16.78-0.038
16.80-0.027 16.82-0.185 16.84-0.123 16.86 0.087 16.88 0.343 16.90 0.695
16.92 0.910 16.94 0.853 16.96 0.760 16.98 0.513 17.00 0.186 17.02 0.015
17.04-0.190 17.06-0.151 17.08-0.073 17.10 0.021 17.12 0.129 17.14 0.215
17.16 0.024 17.18-0.124 17.20-0.329 17.22-0.519 17.24-0.708 17.26-0.579
17.28-0.462 17.30-0.307 17.32-0.145 17.34-0.009 17.36-0.180 17.38-0.318
17.40-0.465 17.42-0.391 17.44-0.345 17.46-0.316 17.48-0.435 17.50-0.491
17.52-0.475 17.54-0.420 17.56-0.361 17.58-0.277 17.60-0.258 17.62-0.139
17.64-0.068 17.66 0.507 17.68 0.722 17.70 0.878 17.72 0.782 17.74 0.765
17.76 0.439 17.78 0.080 17.80 0.013 17.82-0.126 17.84-0.015 17.86 0.030
17.88 0.104 17.90 0.104 17.92 0.193 17.94 0.205 17.96 0.074 17.98-0.056
18.00-0.072 18.02 0.070 18.04 0.106 18.06 0.147 18.08-0.009 18.10-0.159
18.12-0.187 18.14-0.007 18.16 0.155 18.18 0.105 18.20-0.115 18.22-0.302
18.24-0.309 18.26-0.095 18.28-0.058 18.30 0.004 18.32 0.020 18.34 0.050
18.36 0.057 18.38 0.097 18.40 0.134 18.42 0.177 18.44 0.218 18.46 0.261
18.48 0.302 18.50 0.346 18.52 0.386 18.54 0.474 18.56 0.393 18.58 0.238
18.60 0.115 18.62-0.079 18.64-0.124 18.66 0.054 18.68 0.027 18.70-0.250
18.72-0.566 18.74-0.630 18.76-0.591 18.78-0.413 18.80-0.068 18.82 0.272
18.84 0.277 18.86-0.021 18.88-0.060 18.90-0.110 18.92-0.221 18.94-0.416
18.96-0.519 18.98-0.222 19.00 0.030 19.02 0.079 19.04 0.139 19.06 0.171
19.08 0.253 19.10 0.323 19.12 0.391 19.14 0.164 19.16-0.136 19.18-0.323
19.20-0.291 19.22-0.287 19.24-0.304 19.26-0.339 19.28-0.245 19.30-0.076
19.32 0.125 19.34 0.376 19.36 0.402 19.38 0.245 19.40 0.156 19.42-0.040
19.44-0.153 19.46-0.289 19.48-0.316 19.50-0.111 19.52 0.094 19.54 0.335
19.56 0.576 19.58 0.424 19.60 0.143 19.62-0.007 19.64-0.135 19.66-0.270
19.68-0.341 19.70-0.357 19.72-0.396 19.74-0.402 19.76-0.488 19.78-0.480
19.80-0.406 19.82-0.407 19.84-0.351 19.86-0.187 19.88-0.057 19.90 0.044
19.92-0.019 19.94-0.072 19.96-0.169 19.98-0.115 20.00 0.126 20.02 0.358
20.04 0.654 20.06 0.716 20.08 0.762 20.10 0.739 20.12 0.628 20.14 0.484
20.16 0.264 20.18-0.044 20.20-0.288 20.22-0.384 20.24-0.492 20.26-0.428
20.28-0.416 20.30-0.276 20.32-0.052 20.34 0.237 20.36 0.426 20.38 0.604
20.40 0.452 20.42 0.284 20.44 0.126 20.46-0.054 20.48-0.275 20.50-0.423
20.52-0.175 20.54 0.001 20.56 0.254 20.58 0.481 20.60 0.641 20.62 0.554

20.64 0.413 20.66 0.184 20.68-0.048 20.70-0.303 20.72-0.531 20.74-0.708
20.76-0.928 20.78-0.863 20.80-0.631 20.82-0.376 20.84 0.087 20.86 0.309
20.88 0.589 20.90 0.614 20.92 0.385 20.94 0.351 20.96 0.311 20.98 0.246
21.00 0.019 21.02-0.198 21.04-0.158 21.06-0.015 21.08 0.099 21.10 0.286
21.12 0.408 21.14 0.563 21.16 0.531 21.18 0.314 21.20 0.165 21.22-0.024
21.24-0.189 21.26-0.276 21.28-0.371 21.30-0.450 21.32-0.534 21.34-0.483
21.36-0.379 21.38-0.296 21.40-0.196 21.42-0.184 21.44-0.159 21.46-0.119
21.48-0.053 21.50 0.002 21.52 0.059 21.54-0.023 21.56-0.112 21.58-0.205
21.60-0.322 21.62-0.388 21.64-0.341 21.66-0.287 21.68-0.328 21.70-0.407
21.72-0.487 21.74-0.563 21.76-0.644 21.78-0.555 21.80-0.446 21.82-0.008
21.84 0.253 21.86 0.411 21.88 0.644 21.90 0.579 21.92 0.474 21.94 0.384
21.96 0.385 21.98 0.340 22.00 0.357 22.02 0.008 22.04-0.254 22.06-0.460
22.08-0.471 22.10-0.222 22.12-0.065 22.14 0.164 22.16 0.355 22.18 0.504
22.20 0.371 22.22 0.280 22.24 0.158 22.26 0.041 22.28-0.027 22.30 0.021
22.32 0.044 22.34 0.099 22.36 0.135 22.38 0.094 22.40 0.058 22.42 0.022
22.44-0.031 22.46-0.031 22.48 0.004 22.50-0.025 22.52-0.124 22.54-0.235
22.56-0.406 22.58-0.530 22.60-0.701 22.62-0.323 22.64-0.052 22.66 0.094
22.68 0.328 22.70 0.478 22.72 0.509 22.74 0.358 22.76 0.342 22.78 0.306
22.80 0.285 22.82 0.263 22.84 0.168 22.86-0.005 22.88-0.212 22.90-0.365
22.92-0.310 22.94-0.297 22.96-0.280 22.98-0.237 23.00-0.266 23.02-0.308
23.04-0.366 23.06-0.357 23.08-0.308 23.10-0.193 23.12 0.019 23.14 0.196
23.16 0.160 23.18 0.129 23.20 0.140 23.22 0.110 23.24 0.108 23.26 0.092
23.28 0.089 23.30 0.019 23.32-0.131 23.34-0.247 23.36-0.436 23.38-0.432
23.40-0.300 23.42-0.192 23.44-0.048 23.46 0.097 23.48 0.168 23.50 0.148
23.52 0.173 23.54 0.078 23.56-0.058 23.58-0.215 23.60-0.234 23.62 0.060
23.64 0.262 23.66 0.269 23.68 0.084 23.70-0.041 23.72-0.227 23.74-0.076
23.76 0.031 23.78 0.182 23.80 0.310 23.82 0.479 23.84 0.459 23.86 0.166
23.88-0.058 23.90-0.396 23.92-0.444 23.94-0.241 23.96-0.101 23.98 0.217
24.00 0.261 24.02 0.121 24.04 0.008 24.06-0.168 24.08-0.382 24.10-0.566
24.12-0.781 24.14-0.619 24.16-0.256 24.18 0.044 24.20 0.456 24.22 0.783
24.24 1.103 24.26 0.953 24.28 0.489 24.30 0.122 24.32-0.387 24.34-0.846
24.36-1.226 24.38-0.864 24.40-0.616 24.42-0.228 24.44 0.150 24.46 0.477
24.48 0.323 24.50 0.248 24.52 0.095 24.54 0.227 24.56 0.338 24.58 0.505
24.60 0.594 24.62 0.519 24.64 0.552 24.66 0.595 24.68 0.617 24.70 0.593
24.72 0.466 24.74 0.158 24.76-0.077 24.78-0.230 24.80-0.303 24.82-0.329
24.84-0.364 24.86-0.490 24.88-0.660 24.90-0.723 24.92-0.784 24.94-0.846
24.96-0.566 24.98-0.209 25.00 0.128 25.02 0.381 25.04 0.488 25.06 0.363
25.08 0.250 25.10 0.158 25.12 0.377 25.14 0.594 25.16 0.630 25.18 0.370
25.20 0.217 25.22 0.040 25.24 0.023 25.26-0.062 25.28-0.286 25.30-0.380
25.32-0.457 25.34-0.505 25.36-0.777 25.38-0.628 25.40-0.189 25.42 0.189
25.44 0.509 25.46 0.744 25.48 0.749 25.50 0.562 25.52 0.455 25.54 0.525
25.56 0.635 25.58 0.731 25.60 0.851 25.62 0.927 25.64 0.975 25.66 0.929
25.68 0.814 25.70 0.264 25.72-0.289 25.74-0.901 25.76-1.364 25.78-0.859
25.80-0.468 25.82 0.081 25.84 0.594 25.86 0.823 25.88 0.556 25.90 0.301
25.92-0.011 25.94-0.380 25.96-0.347 25.98-0.020 26.00 0.180 26.02 0.633
26.04 1.013 26.06 1.122 26.08 1.107 26.10 0.940 26.12 0.805 26.14 0.608
26.16 0.508 26.18 0.206 26.20-0.201 26.22-0.572 26.24-1.021 26.26-1.332
26.28-1.225 26.30-1.207 26.32-1.006 26.34-0.762 26.36-0.548 26.38-0.489
26.40-0.405 26.42-0.291 26.44-0.176 26.46-0.141 26.48-0.098 26.50-0.050
26.52 0.019 26.54 0.080 26.56 0.035 26.58-0.029 26.60-0.061 26.62-0.034
26.64-0.013 26.66 0.076 26.68 0.205 26.70 0.327 26.72 0.450 26.74 0.577
26.76 0.562 26.78 0.464 26.80 0.300 26.82 0.107 26.84-0.004 26.86-0.033
26.88-0.069 26.90-0.101 26.92-0.201 26.94-0.188 26.96 0.025 26.98 0.134
27.00 0.243 27.02 0.266 27.04 0.265 27.06 0.155 27.08-0.019 27.10-0.095
27.12-0.216 27.14-0.167 27.16-0.120 27.18-0.064 27.20-0.129 27.22-0.163
27.24-0.193 27.26-0.242 27.28-0.236 27.30-0.175 27.32-0.124 27.34-0.185
27.36-0.265 27.38-0.323 27.40-0.336 27.42-0.454 27.44-0.430 27.46-0.334
27.48-0.213 27.50-0.069 27.52 0.030 27.54 0.003 27.56-0.093 27.58-0.089
27.60-0.150 27.62-0.164 27.64-0.238 27.66-0.323 27.68-0.421 27.70-0.457
27.72-0.397 27.74-0.349 27.76-0.258 27.78-0.172 27.80-0.020 27.82 0.156
27.84 0.284 27.86 0.362 27.88 0.354 27.90 0.269 27.92 0.101 27.94-0.045
27.96-0.125 27.98-0.245 28.00-0.229 28.02-0.126 28.04-0.068 28.06 0.018
28.08 0.093 28.10 0.200 28.12 0.286 28.14 0.365 28.16 0.311 28.18 0.181
28.20 0.024 28.22-0.156 28.24-0.319 28.26-0.219 28.28-0.118 28.30 0.015
28.32 0.153 28.34 0.298 28.36 0.243 28.38 0.136 28.40 0.102 28.42 0.024
28.44-0.010 28.46-0.023 28.48-0.036 28.50-0.048 28.52-0.089 28.54-0.155
28.56-0.148 28.58-0.076 28.60 0.000 28.62-0.020 28.64-0.148 28.66-0.225
28.68-0.374 28.70-0.365 28.72-0.251 28.74-0.164 28.76-0.014 28.78 0.153

28.80 0.302 28.82 0.393 28.84 0.406 28.86 0.385 28.88 0.329 28.90 0.183
28.92 0.125 28.94 0.070 28.96-0.001 28.98-0.068 29.00-0.130 29.02-0.128
29.04-0.115 29.06-0.102 29.08-0.084 29.10-0.141 29.12-0.205 29.14-0.269
29.16-0.350 29.18-0.359 29.20-0.297 29.22-0.227 29.24 0.018 29.26 0.099
29.28 0.203 29.30 0.256 29.32 0.199 29.34 0.160 29.36 0.107 29.38 0.156
29.40 0.198 29.42 0.242 29.44 0.141 29.46 0.055 29.48-0.066 29.50-0.097
29.52-0.026 29.54 0.016 29.56 0.100 29.58 0.094 29.60 0.039 29.62 0.000
29.64-0.066 29.66-0.099 29.68-0.109 29.70-0.115 29.72-0.131 29.74-0.168
29.76-0.199 29.78-0.104 29.80-0.010 29.82 0.055 29.84 0.129 29.86 0.200
29.88 0.199 29.90 0.169 29.92 0.143 29.94 0.109 29.96 0.128 29.98 0.152
30.00 0.137 30.02 0.117 30.04 0.097 30.06 0.060 30.08-0.028 30.10-0.050
30.12-0.084 30.14-0.178 30.16-0.321 30.18-0.420 30.20-0.518 30.22-0.472
30.24-0.394 30.26-0.290 30.28-0.110 30.30 0.050 30.32 0.132 30.34 0.157
30.36 0.177 30.38 0.195 30.40 0.255 30.42 0.331 30.44 0.328 30.46 0.252
30.48 0.173 30.50 0.045 30.52-0.085 30.54-0.190 30.56-0.229 30.58-0.304
30.60-0.277 30.62-0.227 30.64-0.174 30.66-0.121 30.68-0.126 30.70-0.129
30.72-0.080 30.74-0.026 30.76 0.039 30.78 0.065 30.80 0.055 30.82 0.050
30.84 0.064 30.86 0.126 30.88 0.179 30.90 0.243 30.92 0.307 30.94 0.298
30.96 0.251 30.98 0.216 31.00 0.163 31.02 0.192 31.04 0.234 31.06 0.282
31.08 0.301 31.10 0.196 31.12 0.106 31.14-0.039 31.16-0.163 31.18-0.322
31.20-0.335 31.22-0.219 31.24-0.148 31.26-0.010 31.28 0.011 31.30-0.053
31.32-0.101 31.34-0.126 31.36-0.143 31.38-0.129 31.40-0.104 31.42-0.071
31.44-0.018 31.46 0.033 31.48 0.085 31.50 0.158 31.52 0.239 31.54 0.319
31.56 0.341 31.58 0.318 31.60 0.213 31.62 0.073 31.64 0.009 31.66-0.015
31.68-0.047 31.70-0.075 31.72-0.121 31.74-0.156 31.76-0.116 31.78-0.056
31.80-0.006 31.82-0.003 31.84-0.003 31.86 0.014 31.88 0.046 31.90 0.072
31.92 0.086 31.94 0.098 31.96 0.124 31.98 0.147 32.00 0.172 32.02 0.200
32.04 0.256 32.06 0.317 32.08 0.287 32.10 0.231 32.12 0.105 32.14-0.001
32.16-0.011 32.18-0.036 32.20-0.053 32.22-0.083 32.24-0.052 32.26-0.007
32.28 0.037 32.30 0.096 32.32 0.155 32.34 0.205 32.36 0.143 32.38 0.073
32.40 0.021 32.42-0.022 32.44-0.070 32.46-0.100 32.48-0.075 32.50-0.054
32.52-0.029 32.54-0.015 32.56 0.000 32.58-0.001 32.60-0.006 32.62-0.011
32.64-0.010 32.66-0.003 32.68 0.001 32.70 0.016 32.72 0.053 32.74 0.086
32.76 0.126 32.78 0.154 32.80 0.131 32.82 0.102 32.84 0.056 32.86 0.006
32.88-0.040 32.90-0.098 32.92-0.096 32.94-0.046 32.96-0.007 32.98 0.031
33.00 0.045 33.02 0.068 33.04 0.052 33.06 0.045 33.08 0.018 33.10-0.002
33.12-0.029 33.14-0.028 33.16-0.017 33.18-0.006 33.20-0.005 33.22-0.017
33.24-0.022 33.26-0.036 33.28-0.032 33.30-0.007 33.32 0.014 33.34 0.041
33.36 0.065 33.38 0.063 33.40 0.052 33.42 0.006 33.44-0.045 33.46-0.076
33.48-0.064 33.50-0.065 33.52-0.107 33.54-0.161 33.56-0.174 33.58-0.117
33.60-0.070 33.62-0.036 33.64-0.025 33.66-0.002 33.68 0.004 33.70 0.036
33.72 0.082 33.74 0.115 33.76 0.070 33.78 0.038 33.80-0.010 33.82-0.025
33.84-0.034 33.86-0.041 33.88-0.045 33.90-0.065 33.92-0.120 33.94-0.117
33.96-0.108 33.98-0.098 34.00-0.081 34.02-0.076 34.04-0.110 34.06-0.138
34.08-0.166 34.10-0.144 34.12-0.130 34.14-0.111 34.16-0.108 34.18-0.098
34.20-0.098 34.22-0.063 34.24-0.002 34.26 0.054 34.28 0.110 34.30 0.152
34.32 0.197 34.34 0.170 34.36 0.140 34.38 0.103 34.40 0.064 34.42 0.010
34.44-0.067 34.46-0.105 34.48-0.122 34.50-0.138 34.52-0.166 34.54-0.215
34.56-0.269 34.58-0.274 34.60-0.217 34.62-0.178 34.64-0.116 34.66-0.061
34.68 0.000 34.70 0.054 34.72 0.099 34.74 0.144 34.76 0.187 34.78 0.232
34.80 0.262 34.82 0.255 34.84 0.227 34.86 0.171 34.88 0.127 34.90 0.054
34.92-0.047 34.94-0.149 34.96-0.210 34.98-0.254 35.00-0.252 35.02-0.245
35.04-0.226 35.06-0.179 35.08-0.136 35.10-0.082 35.12-0.014 35.14 0.044
35.16 0.089 35.18 0.097 35.20 0.100 35.22 0.100 35.24 0.104 35.26 0.136
35.28 0.121 35.30 0.100 35.32 0.072 35.34 0.019 35.36-0.028 35.38-0.083
35.40-0.131 35.42-0.190 35.44-0.194 35.46-0.139 35.48-0.100 35.50-0.044
35.52-0.044 35.54-0.040 35.56-0.045 35.58-0.049 35.60-0.039 35.62-0.021
35.64-0.022 35.66-0.016 35.68-0.016 35.70-0.012 35.72-0.012 35.74 0.028
35.76 0.068 35.78 0.115 35.80 0.096 35.82 0.056 35.84 0.017 35.86-0.031
35.88-0.078 35.90-0.092 35.92-0.092 35.94-0.095 35.96-0.092 35.98-0.086
36.00-0.052 36.02-0.022 36.04 0.014 36.06 0.038 36.08 0.034 36.10 0.034
36.12 0.029 36.14 0.040 36.16 0.054 36.18 0.067 36.20 0.085 36.22 0.087
36.24 0.077 36.26 0.070 36.28 0.061 36.30 0.075 36.32 0.087 36.34 0.102
36.36 0.111 36.38 0.090 36.40 0.075 36.42 0.053 36.44 0.062 36.46 0.079
36.48 0.097 36.50 0.118 36.52 0.135 36.54 0.105 36.56 0.077 36.58 0.044
36.60 0.012 36.62-0.021 36.64-0.042 36.66-0.068 36.68-0.087 36.70-0.120
36.72-0.159 36.74-0.198 36.76-0.233 36.78-0.258 36.80-0.270 36.82-0.278
36.84-0.287 36.86-0.278 36.88-0.270 36.90-0.258 36.92-0.251 36.94-0.219

36.96-0.173	36.98-0.129	37.00-0.109	37.02-0.105	37.04-0.095	37.06-0.091				
37.08-0.072	37.10-0.059	37.12-0.040	37.14-0.023	37.16 0.018	37.18 0.035				
37.20 0.042	37.22 0.048	37.24 0.043	37.26 0.043	37.28 0.038	37.30 0.036				
37.32 0.032	37.34 0.047	37.36 0.063	37.38 0.085	37.40 0.110	37.42 0.134				
37.44 0.160	37.46 0.181	37.48 0.173	37.50 0.168	37.52 0.159	37.54 0.147				
37.56 0.108	37.58 0.068	37.60 0.032	37.62 0.009	37.64 0.019	37.66 0.028				
37.68 0.040	37.70 0.054	37.72 0.069	37.74 0.095	37.76 0.117	37.78 0.143				
37.80 0.143	37.82 0.125	37.84 0.122	37.86 0.124	37.88 0.126	37.90 0.130				
37.92 0.133	37.94 0.106	37.96 0.079	37.98 0.046	38.00 0.020	38.02 0.005				
38.04-0.011	38.06-0.025	38.08-0.011	38.10 0.018	38.12 0.043	38.14 0.076				
38.16 0.103	38.18 0.133	38.20 0.101	38.22 0.062	38.24 0.018	38.26-0.027				
38.28-0.080	38.30-0.089	38.32-0.054	38.34-0.030	38.36 0.006	38.38 0.012				
38.40 0.022	38.42 0.027	38.44 0.032	38.46 0.048	38.48 0.069	38.50 0.089				
38.52 0.112	38.54 0.133	38.56 0.140	38.58 0.137	38.60 0.140	38.62 0.135				
38.64 0.139	38.66 0.102	38.68 0.030	38.70-0.032	38.72-0.063	38.74-0.085				
38.76-0.112	38.78-0.157	38.80-0.197	38.82-0.188	38.84-0.182	38.86-0.170				
38.88-0.156	38.90-0.142	38.92-0.129	38.94-0.125	38.96-0.120	38.98-0.116				
39.00-0.114	39.02-0.106	39.04-0.064	39.06-0.021	39.08 0.002	39.10-0.004				
39.12-0.004	39.14-0.014	39.16-0.019	39.18-0.008	39.20 0.011	39.22 0.027				
39.24 0.050	39.26 0.053	39.28 0.042	39.30 0.030	39.32 0.011	39.34-0.005				
39.36-0.024	39.38-0.020	39.40-0.007	39.42 0.004	39.44 0.019	39.46 0.033				
39.48 0.048	39.50 0.057	39.52 0.065	39.54 0.074	39.56 0.081	39.58 0.091				
39.60 0.127	39.62 0.169	39.64 0.144	39.66 0.105	39.68 0.070	39.70 0.035				
39.72 0.002	39.74-0.032	39.76-0.064	39.78-0.095	39.80-0.091	39.82-0.083				
39.84-0.073	39.86-0.051	39.88-0.030	39.90-0.004	39.92 0.033	39.94 0.052				
39.96 0.044	39.98 0.040	40.00 0.030	40.00 0.000	40.00 0.000	40.00 0.000				
0.226	0.0207	0.	0.5						
100	100	100	18	18	18				
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20		
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20		
3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19	20		
1	6	1	6						
1	2.1e+8		0.001		0.004	235e+3	-164e+3	0	
1	0	4.07	-1.83	-3.09	-0.75				
2	0	1.05	-1.41	-0.07	-0.33				
3	0	1.46	-1.44	-0.48	-0.36				
4	0	1.44	-1.43	-0.46	-0.35				
5	0	0.97	-1.39	0.01	-0.31				
6	0	1.98	-1.55	-1.	-0.47				
1	1	4	1	1	1				
2	3	7	1	1	1				
3	6	10	1	1	1				
4	9	13	1	1	1				
5	12	16	1	1	1				
6	15	19	1	1	1				
2	24	2	0	2	24				
1	2.1e+8		0.001		0.004	3.9e-5	4	4	2
2	2.1e+8		0.001		0.01	1.12e-4	4	4	2
1	1	78.32	-78.32						
2	2	225.	-225.	-1585.	2264.	0.9	0.7	0.9	0.7
1	0	100.3	-0.68	-0.82	-97.88	-0.68			2.87
2	0	99.22	2.46	3.77	-96.82	2.46			3.62
3	0	-2.15	-12.37	6.43	2.15	10.60			-3.51
4	0	-0.37	7.98	0.44	0.37	12.85			-7.73
5	0	83.77	-3.	-4.76	-81.36	-3.			-4.24
6	0	83.97	2.83	4.35	-81.56	2.83			4.34
7	0	+0.11	-12.80	7.08	-0.11	10.18			-2.82
8	0	-0.07	9.89	0.16	0.07	14.76			-8.59
9	0	66.52	-2.78	-4.24	-64.11	-2.78			-4.14
10	0	66.80	2.89	4.25	-64.39	2.89			4.45
11	0	-0.12	-12.78	7.18	0.12	10.20			-2.73
12	0	-0.005	9.61	0.08	0.005	14.48			-8.49
13	0	49.31	-2.79	-4.24	-49.31	-2.79			-4.14
14	0	49.91	2.9	4.25	-47.50	2.9			4.45
15	0	0.22	-12.84	7.18	-0.22	10.14			-2.73

16	0	0.33	9.57	0.08	-0.33	14.44	-8.49								
17	0	32.38	-2.79	-4.29	-32.38	-2.79	-4.09								
18	0	33.06	2.57	4.04	-30.65	2.57	3.68								
19	0	-1.34	-12.86	7.26	1.34	10.11	-2.73								
20	0	-1.56	9.89	0.19	1.56	14.77	-8.82								
21	0	14.64	-3.71	-4.73	-12.24	-3.71	-6.4								
22	0	15.88	4.13	5.14	-13.48	4.13	7.26								
23	0	+3.71	-12.24	6.4	-3.71	9.81	-2.4								
24	0	+4.13	8.8	-0.53	-4.13	13.48	-7.26								
1	1	3	0	2	0	2	2	0	1	1	0	1	0	0	0
2	2	5	0	2	0	2	2	0	1	2	0	1	0	0	0
3	3	4	0	1	0	1	1	0	1	3	0	1	0	0	0
4	4	5	0	1	0	1	1	0	1	4	0	1	0	0	0
5	3	6	0	2	0	2	2	0	1	5	0	1	0	0	0
6	5	8	0	2	0	2	2	0	1	6	0	1	0	0	0
7	6	7	0	1	0	1	1	0	1	7	0	1	0	0	0
8	7	8	0	1	0	1	1	0	1	8	0	1	0	0	0
9	6	9	0	2	0	2	2	0	1	9	0	1	0	0	0
10	8	11	0	2	0	2	2	0	1	10	0	1	0	0	0
11	9	10	0	1	0	1	1	0	1	11	0	1	0	0	0
12	10	11	0	1	0	1	1	0	1	12	0	1	0	0	0
13	9	12	0	2	0	2	2	0	1	13	0	1	0	0	0
14	11	14	0	2	0	2	2	0	1	14	0	1	0	0	0
15	12	13	0	1	0	1	1	0	1	15	0	1	0	0	0
16	13	14	0	1	0	1	1	0	1	16	0	1	0	0	0
17	12	14	0	2	0	2	2	0	1	17	0	1	0	0	0
18	14	17	0	2	0	2	2	0	1	18	0	1	0	0	0
19	15	16	0	1	0	1	1	0	1	19	0	1	0	0	0
20	16	17	0	1	0	1	1	0	1	20	0	1	0	0	0
21	15	18	0	2	0	2	2	0	1	21	0	1	0	0	0
22	17	20	0	2	0	2	2	0	1	22	0	1	0	0	0
23	18	19	0	1	0	1	1	0	1	23	0	1	0	0	0
24	19	20	0	1	0	1	1	0	1	24	0	1	0	0	0

STOP

RESUME

Lors de cycles de chargement alternés, comme c'est le cas durant les tremblements de terre, les structures entrent dans un état de comportement non élastique. Ce qui est le cas notamment des structures métalliques. De ce fait, elles offrent une meilleure résistance, car absorbant plus d'énergie communiquée par le séisme.

Cette faculté peut être décrite, à l'aide du facteur de comportement q (R pour le règlement Algérien).

Dans cette recherche est présentée une méthode de détermination de ce facteur de comportement global q de structures en acier contreventées par des tronçons d'excentrement sismiques.

SUMMARY

During alternate cycles of loading, as is the case during the earthquakes, the structures fall into a state of non-elastic behaviour. This is particularly the case of metallic structures. Thus, they offer greater resistance, for absorbing more energy imparted by the earthquake.

This option can be described using the behaviour factor q (R to Algerian Regulation).

In this research is presented a method for determining the overall behaviour factor q of braced steel structures by seismic sections of eccentrics.

Bibliographies

- 1) ARIBERT, BROZETTI. (n°1/1982). **“Comportement, conception, dimensionnement des structures métalliques en zone sismique”**, Construction métallique. Pp 6- 21
- 2) BALLIO G, PERROTTI F. (n°6/1983). **“Cyclic behavior of axially loaded members numerical simulation and experimental verification”**, cours Ecole polytechnique Vilon. Pp 3 – 39.
- 3) BALLIO G, PLUMIER A. (n°3/1985). **“Définition d’une méthode expérimentale d’évaluation de la résistance antisismique”**, construction métallique. Pp 21.
- 4) BALLIO G. (1985). **“Approche de la CECM pour la conception des structures métalliques antisismiques”**, comité 13 Européen convention of construction
- 5) BOLLIO G, CALADO L. (1986). **“The role ductility in seismic resistance of steel structures”**, symposium lisbonne. Pp 373 – 389.
- 6) BOUSHABA B. (1987) **“Relation entre ductilité locale et facteur de comportement sismique global des structures métalliques en portiques”**, thèse de maîtrise, Université de liège Belgique. steelwork Brussels. Pp 373 -380.
- 7) Boutique AFNOR, Association Française de Normalisation, Eurocode 8. (2005) **“Calcul des structures pour leurs résistance aux séismes”**.
- 8) Boutique AFNOR, Eurocode 8. (2006) **“Règles particulières aux bâtiments en acier”**, APC Ingénierie le.
- 9) CLOUGH. R.w, PENZIEN J, MARC GRAW HILL BOOK Company. (1976). **”Dynamique des structures”**.
- 10) Centre Technique Industriel de la Construction Métallique. (1978). **“manuel pour le calcul en plasticité des constructions en acier”**,
- 11) CTICM. **“Règles de calcul CM 66 et additif 80”**. (2001) règle de calcul des constructions métalliques en acier. 12^{ème} édition - Eyrolles.
- 12) Centre national de recherche appliquée en génie-parasismique **“Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / version 2003”**. DTR B C2 48, Ministère de l’habitat.
- 13) DRUCKER D.C. (1956). **“Effect of shear on the Plastic bending of Beams”**, Journal of Applied, Mechanics, Vol. 23(4). P 509.

- 14) EDJTEMAI, ARIBERT. (n°4/1981). **“Prise en compte de la ductilité dans la réponse spectrales”**, Construction métallique. Pp3 - 23
- 15) **“Eccentrically braced steel frame systems”**, Rep. No. UCB/EERC686/87. Earthquake Engrg. Res. Ctr. Univ. of California, Berkeley
- 16) **Eurocode 3. (2002). « calcul des structures en acier » et Document d’Application Nationale.**
- 17) FEDERECO M. MAZZOLANI and VICTOR GIONCU. **“Behavior of steel structures in seismic areas”** ,STESSA ‘94
- 18) **“Formulation de la construction métallique Règles CM 66 + Additif 80 Normes d’assemblage”**. Euro code 3. Le moniteur.
- 19) HJELMSTAD K.D and POPOV E.P. (1983). **“Seismic behavior of active beam link in eccentrically braced frames”**, Engrg. Struct, 16(1), 33-41.
- 20) HJELMSTAD K.D and POPOV E.P. (1983). **“Cyclic Behavior and Design of Link Beams”**, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No.10 Oct. Pp 2387_2403.
- 21) HJELMSTAD K.D and POPOV E.P. (1984). **“Characteristics of eccentrically Braced frames”**, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 110, No.2, Feb. pp. 340-353.
- 22) HODGE P.G and POPOV E.P., **“Cyclic Behavior and Design of Link Beam”**, Journal of Structural Engineering, ASCE, in press.
- 23) HERVE (MP2 Kléber) **”Les Constructions Parasismiques”**
- 24) KASAI K. (1983). **“A Plastic Design Method for Eccentrically Braced Frames”**, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Calif., CE 299 Report.
- 25) LESCOURA’CH Y. (n°3/1973). **“Intérêt du calcul en plasticité”** Construction métallique. Pp 5 – 10
- 26) LIBBY J.R. (18, N° 4/ 1981). **“Eccentrically Braced Frames Construction- A Case History”**, AISC Engineering Journal, Vol. Pp. 149-153.
- 27) MASSONNET CH, M SAVE. (1976). **“Calcul plastique des constructions”**, Volume 1/ 3^{ème} édition, Université de liège Belgique. Edition B. NELISSEN.
- 28) MAHIM S.A, BERTERO V, ASCE SD ST9. (1981) **“An evaluation of inelastic seismic design SPECTRA”**. Pp 1777 – 1795.

- 29) MANHEIM D.N. (1982). **“On the Design of Eccentrically Braced frames”**, D. Eng. Thesis, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley, Calif., Feb.
- 30) MALLY J.O and POPOV E.P (1983), **“Design consideration for the links in eccentrically braced frames”**. Rep. No. UCB/EERC683/2. Earthquake Engrg. Res. Ctr., Univ. of California, Berkeley C.
- 31) MALLEY J.O and POPOV E.P. (1983). **“Design considerations for Shear Links in Eccentrically Braced Frames”**, EERC Report 83-24, University of California, Berkeley, Calif., Nov.
- 32) MALLEY, EGOR P, POPOV, JEAMS O. (n°9/1984). **“Shear links in eccentrically braced frames”**. P 2275/2295. Journal structural Engineering.
- 33) MALLEY J.O., and POPOV E.P. **“Design of Shear Links in Eccentrically Braced Frames”**, Journal of Structural Engineering, ASCE, in press.
- 34) MOREL Jean. (1996). **“Calcul des structures métalliques selon l’Eurocode 3”**, 12^{ème} tirage - Eyrolles
- 35) NEAL B.G. (N° 3/ 1961) **“Effect of Shear Force on the Fully Plastic Moment of an I-Beam,”** journal of Mechanics and Engineering Science, Vol. 3. P 258.
- 36) POWEL. G.H, Earthquake Engineering research Center. (1973). **“Drain 2D general purpose prog for the analysis of plane inelastic structures”**, University of California, Berkeley.
- 37) POPOV, EGOR P, ROEDER, CHARLES W. (n°3/1978). **“Eccentrically braced steel frames for earthquake”**. P 391-412.
- 38) POPOV E.P., and HJELMSTAD K.D. (1981). **“Cyclic Web Buckling”** Proceeding, Structural Stability Research council. P 57
- 39) POPOV E.P., and MANHEIM D.N. (1981). **“Eccentric Bracing of Steel frames in Seismic design”**, transaction, 6th international Conference on Structural Mechanics in reactor Technology, Paris, France, Vol. K(b), K 13/8, Aug.
- 40) POPOV, EGOR P, RAZUHIKO, ENGELHARDT, MICHAEL D. (n°2/1987) **“Advances in design of eccentrically braced frames”**. P 43-55. Earthquake spectra.
- 41) POPOV, EGORS P. (n°10/1988) **“Seismic eccentrically braced frames”**. P 321-354. Journal of constructional steel research.
- 42) POPOV, EGOR P. (n°2/1989). **“Eccentrically braced frames”**, vs. practice. P 66-80 Engineering journal of the American institute of steel construction.

- 43) POPOV, EGOR P. (n°8/1989). **“On design of eccentrically braced frames”** P 495/511. Earthquake spectra.
- 44) POPOV, EGOR P. (n°3/1991). **“seismic steel code”**, Engineering journal of the American institute of steel construction.
- 45) PLUMIER A, MECHICHE M. (1994). **“Etude du facteur de comportement global des structures en acier”**, Thèse de magister, Université HOUARI BOUMEDIENE, BAB EZZOUAR.
- 46) PIERRE MAITRE. (1994). **“Proceedings of the international workshop”**, organized by the European convention for constructional steel work Timisoara, Romania.
- 47) ROCKEY K.C, and Cook I.T. (1962). **“Shear Buckling of Clamped and Simply Supported Infinitely Long Plates Reinforced by Transverse Stiffeners”**, Aeronautical Quarterly, Vol. XIII.
- 48) ROEDER C.W, and POPOV, E.P. (1977). **“Inelastic Behavior of Eccentrically Braced Steel Frames Under Cyclic Loadings”**, EERC Report 77- 18, Univ. of California, Berkely, Calif. Aug.
- 49) ROEDER C.W and POPOV E.P. (1978). **“Eccentrically B raced Steel Frames for Earthquakes”**, **Journal** of the structures division, ASCE, Vol. 104, no. ST3.
- 50) ROEDER C.W. and POPOV E.P. (1978). **“Design of an Eccentrically Braced Steel Frame”**, AISV Engineering Journal, Third Quarter.
- 51) RICLS, JEAMS M, POPOV, EGOR P. (n°2/1994) **“Inelastic link element EBF seismic design”**, journal of structural Engineering. P 441-463.
- 52) SETTI P. (n°3 /1985). **“A method to compute the behavior factor for construction in seismic zones”**, constructions métalliques. Pp 128 – 139.
- 53) WAKABAYASHI M, MAC GRAW HILL. (1976). **“Design of earthquake resistant buildings”**. Pp 138 – 165.

Liste des figures

Figure I.1 Courbe de comportement élasto-plastique

Figure I.2 Flexion plastique d'une poutre

Figure I.3 Diagramme du moment courbure d'une poutre en flexion

Figure I.4 Diagramme des déformations et contraintes

Figure I.5 Diagramme des forces compression - traction

Figure I.6 Distribution des contraintes sur la hauteur de la section droite

Figure I.7 Diagramme contrainte – déformation du métal

Figure I.8 Diagramme trapézoïdal des contraintes

Figure I.9 Diagramme non dimensionnel du moment réduit $\frac{M}{M_e}$ en fonction de la courbe réduite $\frac{\chi}{\chi_e}$

Figure I.10 Etape de formation de rotule plastique sous charge concentrée

Figure I.11 Etapes de formation de rotule plastique sous charge uniformément répartie

Figure I.12 courbe des contraintes fonction de l'allongement

Figure I.13 Evolution des contraintes dans en une section comprimée et fléchie

Figure I.14 Distribution des contraintes bi rectangulaire d'une section droite à deux axes de symétrie

Figure I.15 Section carrée

Figure I.16 Coubre d'interaction

Figure I.17 Section en double té fléchie

Figure I.18 Poutre en double Té

Figure I.19 Diagramme des contraintes sous l'effort tranchant

Figure II.1 Exemple de formation de rotules plastique dans deux poutres isostatique et hyperstatique

Figure II.2 Formation de rotules plastique dans une poutre uniformément chargée

Figure II.3 Formation de deux rotules plastiques simultanément dans une poutre uniformément chargée

Figure II.4 Courbe illustrative du bénéfice de résistance

Figure II.5 Courbe illustrative du bénéfice de résistance en pourcentage

Figure II.6 Courbe de contraintes en fonction de l'allongement

Figure III.1 Oscillateur à 1DDL

Figure III.2 Différentes courbes de comportement

Figure III.3 Courbe de comportement de l'acier en traction

Figure III.4 Comportement d'un assemblage idéalement élasto-plastique

Figure III.5 Instabilité des parois comprimées $\frac{b}{t}$ en diminuant de a) à c)

Figure III.6 Instabilité d'élément par flambement

Figure III.7 Instabilité d'ensemble de la structure

Figure III.8 Résistance d'assemblage : a) soudé, b) boulonné

Figure III.9 Répétition de cycles de chargement

Figure III.10 Différents essais cycliques

Figure III.11 Diagramme du chargement cyclique

Figure III.12 Définition de la contrainte élastique F_y

Figure IV.1 Vue en plan de la structure à étudiée

Figure IV.2 Vue en élévation de la structure étudiée.

Figure IV.3a Loi de comportement en traction

Figure IV.3b Loi de comportement en compression

Figure IV.4a Courbe d'interaction élément poteau

Figure IV.4b Courbe d'interaction élément tronçon d'excentrement

Figure IV.5 Accélérogramme d'El Centro

Figure IV.6 Procédure de calcul par DRAIN2D

Figure IV.7 Structure 1 de l'étude

Figure V.1 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 1'

Figure V.2 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 2

Figure V.3 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 3

Figure V.4 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc 4

Figure V.5 Facteur de comportement en fonction de la ductilité d'ensemble Strc

Figure V.6 Distribution de la ductilité locale Strc 2

Figure V.7 Distribution de la ductilité locale Strc 3

Figure V.8 Distribution de la ductilité locale Strc 4

Figure V.9 Distribution de la ductilité locale Strc 5

Figure V.10 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 2

Figure V.11 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 3

Figure V.12 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 4

Figure V.13 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 5

Figure V.14 Distribution de la ductilité locale Strc 2

Figure V.15 Distribution de la ductilité locale Strc 3

Figure V.16 Distribution de la ductilité locale Strc 4

Figure V.17 Distribution de la ductilité locale Strc 5

Figure V.18 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 2

Figure V.19 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 3

Figure V.20 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 4

Figure V.21 Distribution des ductilités locales de tous les éléments Strc 5

Figure VI.1 Proposition d'une courbe de distribution de ductilité

Figure VI.2 Proposition d'une courbe de distribution de ductilité

Figure VI.3 Proposition d'une courbe de distribution de ductilité

Figure VI.4 Proposition d'une courbe de distribution des ductilités

Figure VI.5 Séquence de formation de rotules plastiques pour la structure 1'

Figure VI.6 Séquence de formation de rotules plastiques pour la structure 5

Figure VI.7 Séquence de formation de rotules plastiques pour la Structure 4

Figure VI.8 Séquence de formation de rotules plastiques pour la structure en portique

Liste des tableaux

Tableau IV.1 Chargement aux nœuds

Tableau IV.2 Chargement aux nœuds

Tableau IV.3 Éléments de structures

Tableau IV.4 Caractéristiques des éléments

Tableau IV.5 Nombre de rotules plastiques qui rendent la structure mécanisme

Tableau V.1 Déplacement global, allongement en fonction de q

Tableau V.2 Déplacement global, Allongement en fonction de q

Tableau V. 3 Ductilité locale correspondant à q

Tableau V.4 Ductilité locale correspondant à q

Tableau V.5 Distribution de la ductilité locale requise μ dans les poteaux, les diagonales et les tronçons d'excentrement

Tableau VI.1 Ductilités locales requises des éléments

Notations

A : section de barre

B : facteur de comportement selon les normes parasismiques algériennes RPA2003

D : paramètre représentatif du déplacement horizontal global d'une structure

D_e : valeur de D telle qu'on obtient la limite élastique en un point de la structure

D_{max} : valeur de D telle qu'on obtient une déformée maximale de la structure

D_u : valeur du D correspondante à la ruine de la structure

E : module d'élasticité d'un matériau

E_t : énergie impulsée à la structure par un tremblement de terre

E_e : énergie de déformation élastique de la structure

E_a : énergie d'amortissement viscoélastique

E_{cin} : énergie cinétique

E_p : énergie absorbée par hystérésis

F : force horizontale dans la structure

F_y : valeur de F qui correspond à l'état élastique de la structure

G : charge permanente

H_i : hauteur de l'étage i

H_t : hauteur totale du bâtiment

M_y^+ : moment plastique en traction

M_y^- : moment plastique en compression

\bar{N} : résistance au flambement d'une barre

N : force verticale dans la structure, effort dans une diagonale

N_{yd} : force qui provoque la plastification de la diagonale tendue

P_{yt} : force de plastification en traction

P_{yc} : force de plastification en compression

Q : surcharge d'exploitation

R : résistance d'un joint dans un assemblage

$a(t)$: accélérogramme

b : largeur d'une section carrée

e : excentricité, allongement

e_y : valeur de e qui correspond à l'état élastique

f_y : contrainte élastique du matériau acier

h : hauteur d'une section

t : épaisseur d'une section

t_f : épaisseur de la semelle

t_w : épaisseur de l'âme

q : facteur de comportement sismique d'une structure

α : coefficient multiplicatif de F

α_1 : valeur de α qui correspond à l'état élastique d'une structure

α_u : valeur de α qui correspond à l'état de ruine d'une structure

β_i : angle de degrés

λ : coefficient multiplicateur de $a(t)$

λ_e : valeur de λ qui correspond à l'état élastique d'une structure

λ_{\max} : valeur de λ qui correspond à la déformée maximale de la structure

λ_{\lim} : valeur de λ qui correspond à l'état de ruine

λ : élancement

λ_c : élancement critique

E : déformation relative d'un matériau

E_y : valeur de E qui correspond à l'état élastique d'un matériau

E_p : valeur de E qui correspond à l'état d'écrouissage d'un matériau

μ_e : ductilité d'un matériau

μ_θ : ductilité d'un matériau de structure

μ_Δ : ductilité globale d'une structure