REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA**



**F**aculté de **T**echnologie

## Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Civil

Spécialité : STRUCTURE

---

# DETERMINATION DU MECANISME DE RUINE D'UN PORTIQUE SIMPLE A TRAVERS UNE ETUDE CLASSIQUE

---

Présenté par

**Mme HAMROUCHE AICHA**

Proposé et Dirigé par

**Mme BLAIFI HABIBA**

**Promotion Juin 2019**

# *REMERCIEMENTS*

*Je remercie d'abord ALLAH le tout puissant qui m'a guidé et qui m'a donné la force et la volonté de réaliser ce travail.*

*Au terme de ce travail, il m'est très agréable d'exprimer toute ma gratitude, ma reconnaissance et mes très vifs remerciements à Madame BLAIFI Habiba Professeur au département de génie civil de l'université YAHIA FARES MEDEA d'avoir acceptée de diriger ce travail avec beaucoup de disponibilité et d'efficacité, pour m'avoir faite partager son expérience, , pour son aide permanente sur tous les plans, pour les conseils et encouragements qu'il a su me prodiguer pendant toute la durée de cette thèse.*

*Mes remerciements sont adressés à l'ensemble du corps enseignant en graduation et en post-graduation qui ont contribué à ma formation.*

*Que mes collèges trouvent ici toute ma reconnaissance pour le temps passé en leurs compagnies. Mes plus vifs remerciements vont également à tous mes amis avec qui j'ai partagé des moments inoubliables pendant mes études.*

*Enfin mes pensées vont vers mes parents, mon marie, mes petites , mes frères et sœurs. C'est grâce à leur soutien que j'ai pu réaliser ce travail. Ils savent déjà combien je leur dois.*

# DEDICACE

Je dédie le présent travail

A mes très chers parents

A mon marie bien aimée

A mes filles hadil et lina

A mes soeurs et frères

A l'ensemble de ma famille et mes amis

# *RESUME*

*Le présent travail a pour objet l'ét ude de l'influence du rapport, α=V/H, entre les charges concentrées verticales, V, appliquées au milieu des travées des poutres, et horizontales, H, appliquées au niveau des jonctions poteaux-poutres, pour des combinaisons des rapports de l/Mpb et h/Mpc, sur les mécanismes de ruine et la détermination des charges de ruine pour un portique témoin (simple portique).*

*Pour ce type de structures, la détermination du vrai mécanisme de ruine peut se faire par la méthode cinématique en combinant les différents mécanismes élémentaires de ruine, m, (m=p- r, où p représente le nombre de sections critiques et r le degré d'hyperstaticité) jusqu'à l'obtention du plus petit facteur de charge de ruine, λc, ou par la méthode statique, dite pas à pas, jusqu'à l'obtention de la (r+1)nième rotule plastique.*



***Mots clés*** *: charge, concentrée, verticale, horizontale, mécanisme de ruine, charge de ruine, mécanisme élémentaire, rotule plastique, portique, facteur de charge de ruine.*

# ABSTRACT

*The present work has for aim the study of the effect of the ratio ‣=V/H where V and H are respectively the point hads applied in the mid-span of the beams and those applied at the junction of beams and columns for three combinations for l/Mpb and h/Mpc .*

*The effects looked for concern the collapse mechanism and collapse loads of a two-storey-one bay frame taken as a reference frame. For this type of structures could be achieved either by the kinematic method by combing the different elementary mechanism m, (with m=p-r where p represents the number of critical sections and r the degree of redundancy) until the reach of smallest value of load factor $\lambda$ or by the static method called step by step until the reach of the (r+1)th plastic hinge.*


***Key words**: loads, collapse, frame, mechanism, elementary mechanism, plastic hinge, load Factor*

# ملـــخـــص

هذا العمل يهتم بدراسة تأثير نسبة القوى المركزة العمودية المطبقة على منتصف العارضة على القوى المركزة الأفقية المطبقة على نقطة اتصال العوارض بالروافد $\alpha$ , و ذلك من أجل تمثيلات النسب l/Mpb وh/Mpc على ميكانزمات انهيار لهياكل بسيطة .

يمكن تحديد الميكانزم الحقيقي عبر طريقتين:

الطريقة السينيماتيكية وذلك بتطبيق ترتيبات الميكانزمات الأساسية الانهيار m حيث m=p-r و p عدد المقاطع الحرجة و r درجة غير التقرير الستاتيكي حتى الحصول على اصغر عامل حمولة الانهيار $\lambda c$ أو بالطريقة السكونية" خطوة خطوة " حتى الحصول على r+1 مفصل بلاستيكي.

**الكلمات المفتاحية** :حمولة -مركزة -عموديا -أفقيا -ميكانيزم الانهيار -حمولة الانهيار - ميكانيزم أساسي – مفصل بلاستيكي -هيكل -عامل حمولة الانهيار.

# SOMAIRE

Remerciements

Dédicace

Résumé

Abstract

ملخص

Table des matières

Liste des notations et abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction ……...……..……. 2

Objectifs Du Mémoire…….…… 3

Structuration de la thèse …….…… 4

CHAPITRE 1 : Charges de ruine et mecanismes de ruine pour des éléments de structures et des portique simples ……..5

1 . Charges de ruine et mecanismes de ruine pour des éléments de structures et des portique simples. ……...……...6

1.1 Introduction ……..6

1-2 Comportement d'un élément structurel simplement appuyé en flexion simple…...…….. 6

1-2-1 Elément en charpente métallique…….. 6

1.2.2 Elément en béton armé……. 9

1-2-3 Synthèse et comparaison ……... 13

1-3 Comportement d'un portique simple sous l'action de charges concentrées verticales et horizontales croissantes……...…….. 13

1.3.1 Introduction …… 13

1-3-2 Caractéristique du portique……...……. 13

1-3-3 Traitement du portique. …….…….13

1-4 Théorèmes fondamentaux de l'analyse plastique des structures……... 17

1-4-1 Introduction……...……. 17

1-4-2 Théorème de la limite inferieure…… 17

1-4-3 Théorème de la limite supérieure……... 17

1-4-4 Théorème de la l'unicité…… 18
1-5 Méthodes utilisées pour le calcul des charges de ruine pour des éléments structuraux ou structures simples……...……. 18
1-5-1- introduction……...…… 18
1-5-2 Calcul de la charge de ruine par la méthode du moment libre……...…… 18
1-5-3 Calcul de la charge de ruine par la méthode des travaux virtuels…….. 19
1-6 Exemples d'application……. 19
1-6-1 Poutre simplement appuyée…… 19
1-6-2 Poutre encastrée et appuyée ou console retenue ……..……... 20
1-6-3 Poutre doublement encastrée…….……. 22
1-6-4 Poutre continue soumise à un chargement concentré…….…… 25
1-7 Détermination De Charges De Ruine et mécanisme de ruine d'un portique simple……..…… 28
1-7-1 Introduction……..…… 28
1-7-2 « Beam mechanism » ……..……..... 29
1-7--3 « Sway mechanism » ……..... 30
1-7-4 « Combined mechanism »…….……...….. 31
1-7-5 Effet du rapport λV/λH ……..……...……. 33
1-7-6 Construction des diagrammes d'interaction……..……...…….. 34
1-7-7 Synthèse……. 35
CHAPITRE 2 : Presentation et discussion des mecanismes et charge de ruine du portiuqe temoin ……..36
2- Presentation et discussion des mecanismes et charge de ruine du portiuqe temoin……..…37
2-1 Introduction ……..…..37
2-2 Caractéristique du portique témoin…… 37
2-3 Processus de détermination des mécanismes de ruine……... 38
2-4 Phénomène de redistribution des moments……...…… 41
CHAPITRE 3 : Mécanismes de ruine pour des structures en portique……43
3- Mécanismes de ruine pour des structures en portique……..……44
3-1 Introduction …….…….. 44
3-2 Raisons du choix de la méthode retenue pour l'étude ……...….. 44
3-3 choix du portique témoin de base P 3N 3T …….…….. 45
3-4 Caractéristiques mécaniques et géométriques de Portique retenu …….…….. 45
3-5 Mécanismes de ruine pour le portique témoin …….…… 47
3-5-1 Introduction …….…….. 47

3-5-2 Mécanismes De Ruine de Portique Témoin P 3N 3T ……...…… 47
3-5 Synthèse de synthèse ……...……..…….. 52
CHAPITRE 4 : Construction des diagrammes d'interaction ……...…..…….. 53
4- Construction des diagrammes d'interaction …….…….. 54
4-1 Introduction……..……...…….. 54
4-2 Principes Généraux De Construction ……...…….....….. 54
4-3 Représentation graphique ……...……...…….. 55
4-3-1 Introduction ……...…… 55
4-3-2 Développement graphique …….……...…… 55
4-3-3 Discussion des résultats ……...…….…… 55
CHAPITRE 5 : Conclusions et Perspectives…….……..……... 59
5-1 Conclusions……... 60
5-2 Perspectives……... 61
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

# Liste des notations et abréviations

*a* Petite portée de la poutre

*b* Grande portée de la poutre

$E_c$ Module d'élasticité du béton

$E_s$ Module de déformation longitudinal des armatures ( Module de Young)

*H* Charge concentrée horizontale

$H_c$ Charge horizontale de ruine

*h* Hauteur d'étage

*I* Moment d'inertie de la section totale.

*K* Rigidité

*l* Travée de la poutre.

*M* Moment fléchissant de la poutre

$(M_{max})_i$ Moment fléchissant maximum de l'étape i.

$(M_{max})_{ij}$ Le $j_{ieme}$ plus grand moment de l'étape i.

$(M_{max\,r})_{ij}$ Le $j_{ieme}$ plus grand moment résultant de l'étape i

$M_p$ Moment plastique de la section

$M_{pb}$ Moment plastique de la poutre

$M_{pc}$ Moment plastique du poteau

$M_r$ Moment de rupture de la section

$M_u$ Moment ultime d'une section en béton armé

*m* Nombre de mécanismes élémentaires de ruine.

*n* Nombre de rotule plastique

*P* Charge concentrée

$P_c$ Charge de ruine

$P_e$ Charge à la limite élastique

$P_r$ Charge à la limite de rupture

*p* Nombre de sections critiques

*r* Nombre de redondance ou degré d'hyperstaticité

*V* Charge concentrée verticale

$V_c$ Charge verticale de ruine

$\alpha=\lambda V/\lambda H$ Rapport entre la charge concentrée verticale et la charge concentrée horizontale.

$\delta_e$ *Déplacement au seuil élastique*

$\delta_r$ *Déplacement à la rupture*

$\delta_u$ *Déplacement ultime*

$\theta$ *Rotation plastique*

$\lambda$ *Facteur de charge*

$\lambda_c$ *Facteur de charge de ruine*

$\lambda_i$ *Facteur de charge de l'étape i.*

$\lambda_l$ *Limite inferieure du facteur de charge*

$\lambda_u$ *Limite supérieure du facteur de charge*

$\chi_e$ *Courbure élastique de la déformée*

$\chi_r$ *Courbure de rupture de la déformée*

$\chi_u$ *Courbure ultime de la déformée*

$\Delta$ *Déplacement virtuel*

*B.A* *Béton armé*

*C.M* *Charpente métallique*

*DMF* *Diagramme des moments fléchissants*

*DMR* *Diagramme des moments résultants.*

*E.L.U* *Etat limite ultime*

*E.L.S* *Etat limite de service*

*RDC* *Rez de chaussée*

# Liste des figures

**(1.1)** Comportement d'une poutre en charpente métallique sous charge croissante……. 7

**(1.2)** courbe M/Me = F(χ/χe) ……..……8

(1.3) Diagramme moment plastique ……..9

(1.4) Comportement d'une poutre en béton armé sous charge croissante ……...…….. 12

(1.5) Comportement d'une poutre en béton armé sous charge croissante …….....…….. 12

(1.6) Diagramme charge-déplacement.……..…. 13

(1.7) Portique simple à une travée et un étage……..……... 14

(1.8)Détermination du mécanisme de ruine d'un portique simple par la méthode pas à Pas……...…..16

(1.9) Courbe facteur de charge, λ, en fonction du déplacement horizontal du portique simple……18

(1.10) Condition du vrai mécanisme de ruine en fonction de λ.…….…... 19

(1.11) Poutre simplement appuyée.……..……..…... 21

(1-12) Poutre encastrée d'un coté et simplement appuyée de l'autre coté …….. 23

(1.13) Poutre encastrée à ses deux extrémités……. 26

(1-14) Poutre continue sous charges ponctuels…… 28

(1-15) Mécanisme de ruine des travées AB et CD ……..29

(1-16) Mécanisme de ruine pour la travée *BC*……. 30

(1-17) Portique simple à une travée et un étage ……..31

(1.18) « Beam mechanism »….……...…… 32

(1.19) « Sway mechanis » …….…… 33

(1.20) « Combined mechanism »……. 34

(1.21) Diagramme des moments fléchissants du portique simple …….…….…… 35

(1.22) Diagramme des moments fléchissants de la poutre B-D..... 35

(1.23) Diagramme des moments fléchissants total du portique simple…..……...…..… 36

(1.24) Relation entre la charge de ruine horizontale et le rapport α.……..... 37

(1.25) Diagramme d'interaction du portique simple……...…… 37

(2.1) Portique témoin……..…. 41

(2.2) Détermination du mécanisme de ruine par la méthode pas à pas du portique témoin42-43

(2.3) Analyse du portique témoin après le développement d'un mécanisme élémentaire….. 44

(2.4) Redistribution des moments dans le portique témoin……..……... 44

(3.1) Présentation du P 3N 3T (portique de base ) …….…….... 49
(3.2) Les différents types de mécanisme de ruine développés en fonction de α pour le P 3N 3T (portique de base ) P 3N 3T (portique de base )…….51-52
(4.1) Diagramme d'interaction pour le système de coordonnées $\lambda$ V – $\lambda$ H : cas du P 3N 3T (portique de base ) ……59

# Liste des tableaux

**(2-1)** Redistribution Des Moments Dans Le Portique Témoin ……45

# INTRODUCTION GENERAL

## INTRODUCTION

Une structure multi-étagée multi-travée correctement calculée et conçue à l'état limite ultime et vérifiée à l'état limite de service présente toute les garanties d'être en élasticité même après un séisme et ceci est dû à plusieurs paramètres qui ont trait à la marge de sécurité. Cette dernière pourrait être quantifiée comme étant la différence entre la vraie charge de ruine et la combinaison de charges à l'E.L.U. les charges à l'E.L.U sont affectées de coefficients de pondération supérieurs à un, les résistances de calcul sont les résistances caractéristiques (résistances admettant un minimum de risque) divisées par des coefficients de sécurité supérieurs à un. Les structures sont étudiées en plan alors qu'en réalité elles sont dans l'espace (confinement par des plans parallèles et perpendiculaires).

**Objectifs Du Mémoire**

Il est proposé dans le présent mémoire la sélection d'un portique témoin à une travée et deux niveaux soumis à des charges concentrées verticales, V, en milieu de travée des poutres et des charges concentrées horizontales, H, appliquées au niveau des jonctions poteaux-poutres (les détails sont donnés au §3-1). Le portique en question est six fois hyperstatique avec douze sections critiques.

Ce dernier pouvant être traité soit par la méthode ''pas à pas'' ou par une série de combinaisons de mécanismes élémentaires (analyse limite). Le choix a été porté sur la première méthode, et l'objectif premier est la détermination et l'identification de l'ensemble de mécanismes de ruine possibles pour différentes valeurs de α (α allant de 0,2 à 15) et ce pour trois combinaisons de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$ représentant des variations sur le plan géométrique (portée, hauteur et dimensions des sections) en relation avec les moments plastiques respectifs des poutres et poteaux jugées appropriées pour la présente étude.

Le deuxième objectif consiste à analyser l'ensemble des résultats avec la construction des diagrammes d'interaction mettant en exergue les effets des paramètres les plus influents sur les charges de ruine et les mécanismes de ruine.

Enfin, il faut essayer de sortir avec des conclusions et les perspectives de développement de la présente thèse.

**Structuration De La Thèse**

Le chapitre 1 est réservé pour l'introduction générale avec une problématique mettant en exergue l'intérêt du calcul plastique des structures.

Le chapitre 2 constitue la base théorique de la thèse et présente le calcul des charges de ruine pour des éléments de structure et structures allant de la poutre simplement appuyée au portique simple « single bay single storey »en passant par la poutre continue.

Le chapitre 3 : La présentation des caractéristiques du portique témoin etudier par BOUKHALOI et la discussion des différentes étapes du processus de calcul font l'objet du troisième chapitre.

Le chapitre 4, quant à lui, présente les différents mécanismes observés en fonction des facteurs, $\alpha=\lambda V/\lambda H$ et les trois combinaisons de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$.

Le chapitre 5 met en relief l'effet des différents paramètres influents, avec le développement graphique de $\lambda V$ et $\lambda H$ en fonction de $\alpha$ et la construction des diagrammes d'interaction.

La conclusion générale et les perspectives sont présentées dans le chapitre 6.

# CHAPITRE 1

## CHARGES DE RUINE ET MECANISMES DE RUINE POUR DES ELEMENTS DE STRUCTURES ET DES PORTIQUES SIMPLES.

## 1- CHARGES DE RUINE ET MECANISMES DE RUINE POUR DES ELEMENTS DE STRUCTURES ET DES PORTIQUES SIMPLES.

### 1-1 Introduction

Les éléments de structures ou structures en génie civil peuvent être isostatiques ou hyperstatiques.

Le traitement des structures hyperstatiques est laborieux et fait appel à des méthodes complexes et difficiles à utiliser manuellement. L'apport ces dernière années de l'outil informatique a facilité grandement cette opération. Les éléments de structures ou structures sont en général calculés à l'ELU et vérifiés à l'ELS. Mais aucun code ne spécifie les charges de ruine ou les mécanismes de ruine (manière de déformation d'une structure sous une combinaison de charges extérieures). Ceci ne peut avoir lieu qu'en laboratoire ou après un séisme sévère (structures ou éléments de structures poussés à l'extrême). La charge de ruine est de facto différente de la charge à l'ELU.

L'objectif primordial de l'étude plastique des structures est de répondre à cette attente. C'est-à-dire la détermination de vraies charges de ruine et des vrais mécanismes de ruine, leur connaissance donne une idée précise sur la vraie marge de sécurité d'un élément de l'ouvrage ou de l'ouvrage lui même.

L'analyse plastique des structures hyperstatique consiste à considérer qu'au fur et à mesure que la charge augmente il y a apparition de rotules plastiques à chaque fois que le moment dans une section donnée atteint la valeur du moment plastique. Ce dernier est indépendant du chargement ou de sa nature. Il est une caractéristique de la section elle-même et ne dépend que des caractéristiques géométriques et mécaniques de celle-ci (cf. annexe A). Évidement si r rotules plastiques se forment au total, la structure devient un système isostatique (r étant le degré d'hyperstaticité) elle se transforme en un mécanisme immédiatement avec la naissance ou création ou développement de la $(r+1)_{nième}$ rotule plastique.

### 1-2 Comportement d'un élément structurel simplement appuyé en flexion simple

#### 1-2-1 Elément en charpente métallique

Soit une poutre en charpente métallique, chargée au milieu de sa portée par une force concentrée, P, figure.1-1-a.

Dans un premier temps, la répartition des contraintes au niveau de la section médiane (section critique) est linéaire. C'est la phase élastique du comportement du matériau, si on augmente la charge, les contraintes ne sont plus proportionnelles aux déformations et les

fibres extrêmes se plastifient graduellement de bat en haut et de haut en bas figure.1-1-c , la section se plastifie entièrement quand le moment fléchissant de cette dernière atteint le moment plastique $M_p$, et une rotule plastique se forme au niveau de cette section critique. A cet effet, la poutre est constituée de deux éléments rigides reliés par une articulation figure1-1-d. On dit qu'il y a plastification totale de la section et la poutre se transforme en un mécanisme figure1-1-b.

Il est facile de trouver la charge de ruine, Pc, de la poutre et ce en égalant le moment maximum dû à la charge appliquée au moment plastique $M_p$.

$M_p = \frac{P_c l}{4}$ D'où $P_c = \frac{4M_p}{l}$

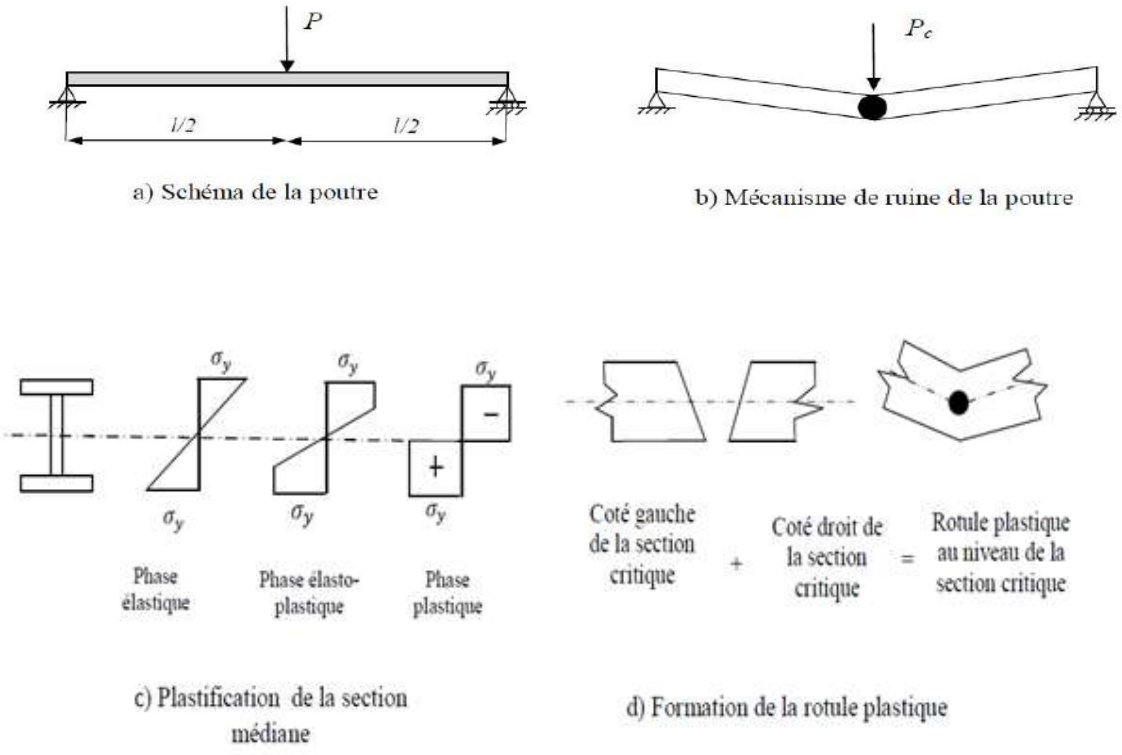



**Figure 1-1 : comportement d'une poutre en charpente métallique sous charge croissant**

La théorie de la flexion pure peut s'appliquer avec une très bonne approximation à des poutres sollicitées par 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 limite pour laquelle l'âme du profil se plastifie avant les semelles.

La théorie s' applique également pour les colonnes comprimées et fléchies . pour autant que l'effort normal reste une fraction suffisamment faible (<15 %) de l'effort normal plastique $N_p \equiv \Omega R_e$ .

Un facteur qui joue un rôle sensible dans les poutres industrielles est la présence d'importantes contraintes résiduelles dues surtout au refroidissement inégalement rapide de l'âme et des semelles après laminage à chaud de profilé .ces contraintes provoquent une plastification prématurée de certaines fibres , abaissent la valeur du moment maximum élastique , et déforment la courbe $M/M_e = F(\chi/\chi_e)$ de la manière présentée à la figure courbe 2 . Cependant , ces contraintes ne modifient pas la valeur du moment plastique car, d'une part , la tension dans une fibre ne peut dépasser $\sigma e$ , donc le moment plastique $M_p \equiv Z\sigma_e$ , correspond certainement au plus grand moment fléchissant que la poutre peut supporter.

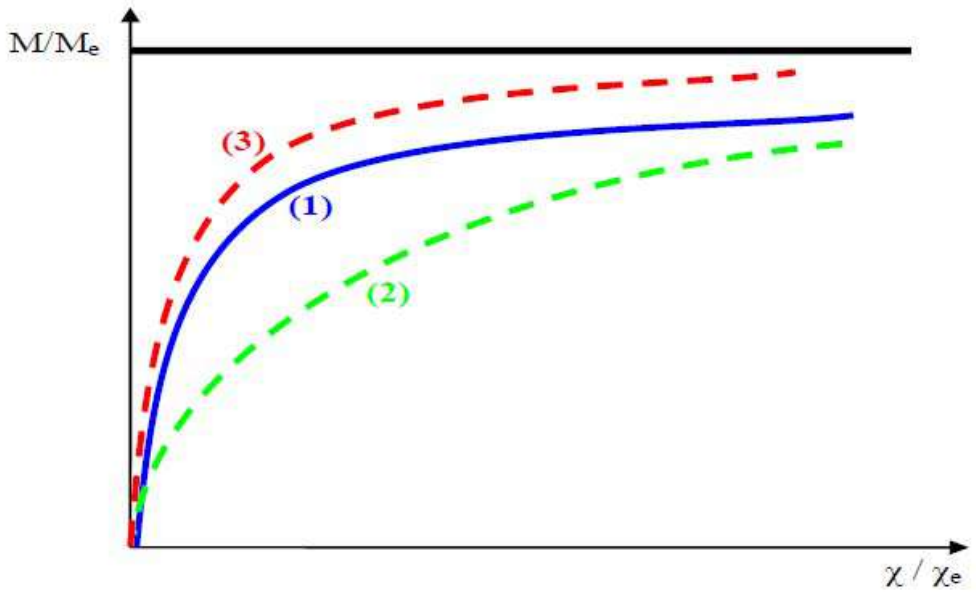



**Figure 1-2 : courbe M/Me = F(χ/χe)**

D' autre part , ce n'est que quand la distribution des contraintes est bi-rectangulaire que la courbure peut devenir infinie car , pour toute autre distribution, il existe un noyau élastique qui correspond nécessairement a une courbure finie .

L' existence éventuelle d'une limite supérieure fait remonter le moment maximum élastique de la valeur $\sigma_{el}$ W à la valeur $\sigma_{es}$ W . la courbe 4.9 passe de la forme 1 à la forme 3

mais la valeur du moment plastique n'est pas affectée car dans le stade ultime ,la pointe du diagramme correspond à un bras du levier interne tendant vers 0 .

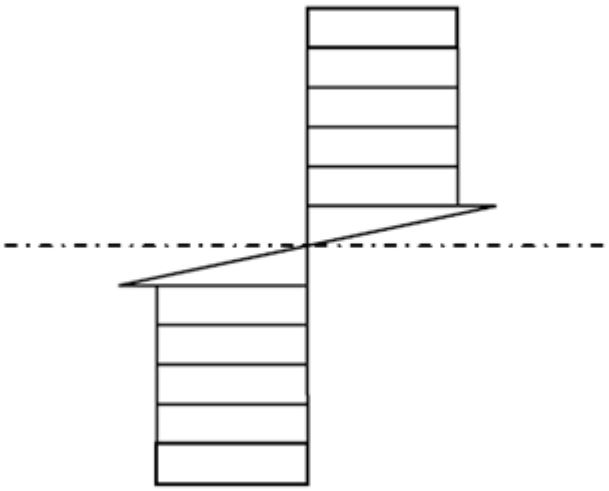


**Figure 1-3 : Diagramme du moment plastique**

Notons également que le métal d'une poutrelle n'est pas identique en tout point , mais que sa limite élastique varie appréciablement selon l'endroit de la section envisagé . les opérations industrielles telles que perçage, poinçonnage de trous , soudage de renfort ,ets… occasionnent elles aussi des perturbations.

En première approximation le moment flechissant 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 $Mp = \sigma e\ Z$ ou $\sigma e$ est la limite élastique apparente de l'acier utilisé et Z le module plastique de la section .

Ce moment provoque dans la barre une courbure très grande (théoriquement infini ).

### 1.2.2 Elément en béton armé

Contrairement à la charpente métallique le béton armé est caractérisé par son hétérogénéité, sa faiblesse en traction et au phénomène de fissures. Pour cela le comportement d'une poutre en béton armé reposant sur deux appuis simple soumise à une charge concentrée, P, figure.1-4, progressive croissant de zéro jusqu'à la rupture, passe par les différentes étapes suivantes [3,9] :

**a- 1ère étape :**

Pour les petites valeurs de, *P,* n'entrainant pas des fissurations dans le béton tendu, dans cette étape toutes les sections de la poutre se comportent élastiquement. La rigidité en flexion est donnée par la relation :

$K = E_c I \qquad e\,q \quad (2.1)$

$E_c$ : Module d'élasticité du béton.

$I$ : Moment d'inertie de la section totale rendue homogène.

Les déformations répondent sensiblement aux lois de la résistance des matériaux, étant donné que la rigidité est constante sur la longueur de la poutre, la courbure de la déformée est directement proportionnelle au moment fléchissant, figure.2-2-b.

$\chi_e = M / E_c I \qquad e\,q \quad (2.2)$

$M$ : Moment fléchissant de la poutre.

**b- 2ème étape :**

Dans la seconde étape, les valeurs de $P$ entraînent la fissuration du béton tendu dans les sections les plus sollicitées figure.1-4-e, mais on peut encore considérer que la poutre se comporte élastiquement jusqu'à une certaine charge ($P_e$), figure.1-4. Dans cette étape la rigidité chute brusquement au fur et à mesure de l'apparition des fissures, cependant il est difficile d'attribuer une valeur au facteur de rigidité $K$.

En effet, le module d'élasticité $E_c$ varie avec le temps (phénomène de fluage) et le moment d'inertie est, lui, très approximatif, car :

- Le long de la poutre toutes les sections ne sont pas fissurées et notamment vers les appuis ou le moment fléchissant tend vers zéro ;
- Dans les parties fissurées, le béton compris entre deux fissures successives est plus ou moins pris en compte et la profondeur des fissures varie d'une section à l'autre ;
- Le coefficient d'équivalence acier / béton « $n = E_s / E_c$ » est supposé constant alors que sa valeur varie du fait que $E_c$ varie dans le temps ;
- En fin, l'armature n'a pas la même section tout le long de la poutre.

**c- 3ème étape :**

Si la charge continue à augmenter, l'armature s'allonge et le béton commence à se raccourcir. Les fibres comprimées de la section la plus sollicitée se plastifient et leurs raccourcissements continuent à augmenter jusqu'à une valeur limite égale à $\varepsilon_{cu}$ au niveau de cette section critique. Lorsque sa contrainte de rupture est atteinte, le béton équilibre encore la composante de compression du couple de flexion et comme l'armature tendue n'a pas atteint

un allongement de rupture et peut équilibrer la composante de traction, le moment extérieur de flexion est équilibré dans cette section où la rotation est très importante, on dit qu'il y a eu formation d'une rotule plastique figure.1-4-d.

Au chargement, la poutre présente une courbure permanente figure.1-1.c, et la section est considérée comme fragile vis-à-vis des chargements répétés et surtout alternés. En effet, sous des actions réversibles et répétées (actions cycliques), il y a un affaiblissement de la rigidité qui provient en particulier de la chute de la contrainte d'adhérence consécutive à la détérioration du béton. La figure.1-4 représente les trois étapes par un diagramme moment courbure.

(M, $\chi$), le diagramme charge-déplacement (P, $\delta$) est représenté sur la figure.1-4

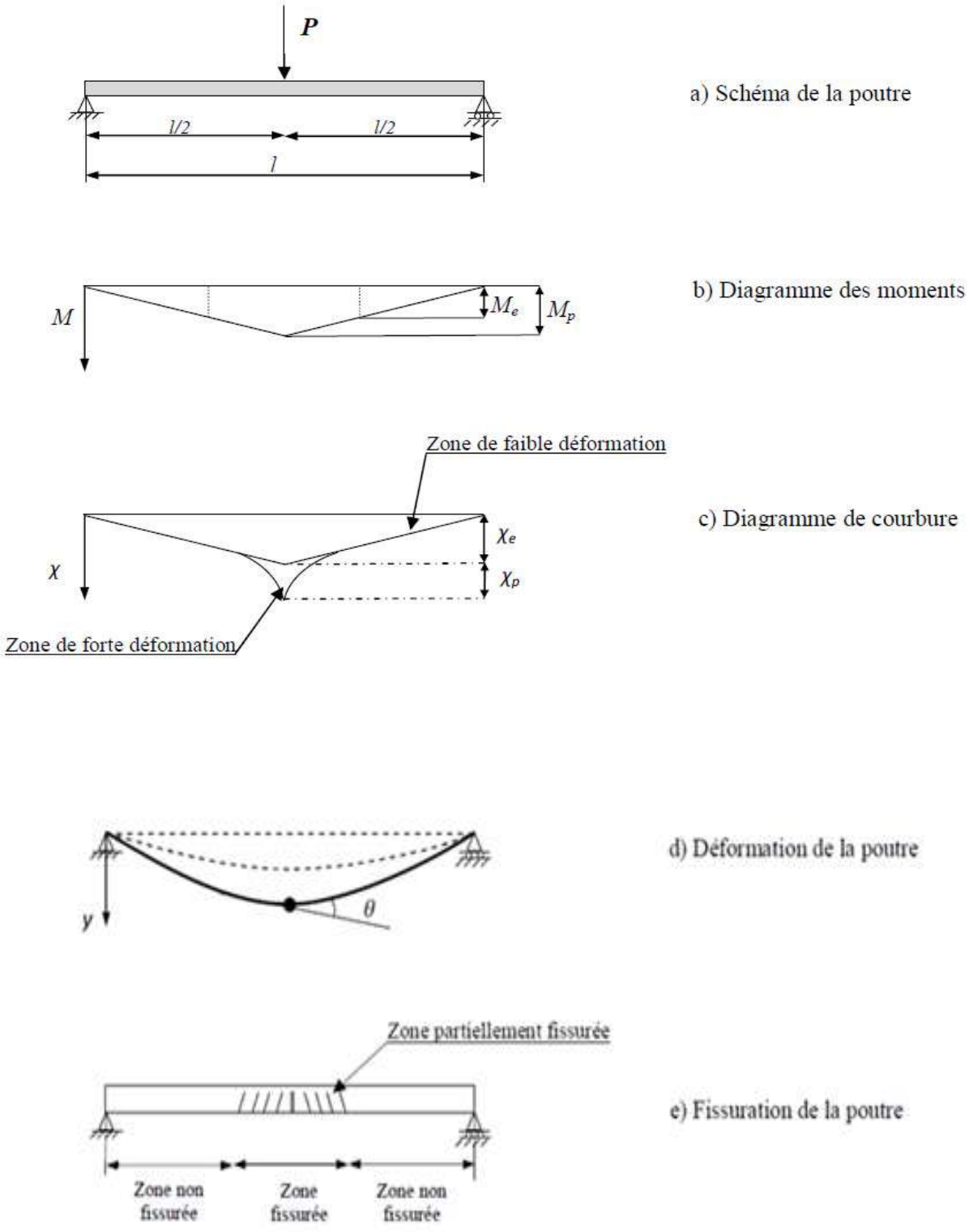



**Figure 1-4 : Comportement d'une poutre en béton armé sous charge croissante**

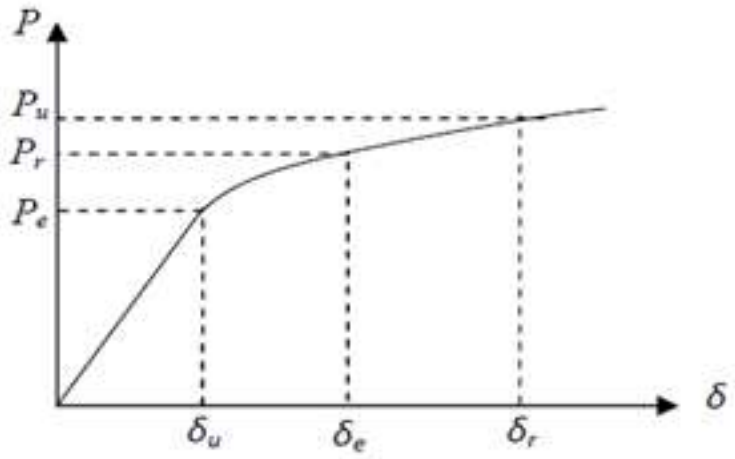



**Figure 1-5 : Comportement d'une poutre en béton armé sous charge croissante**

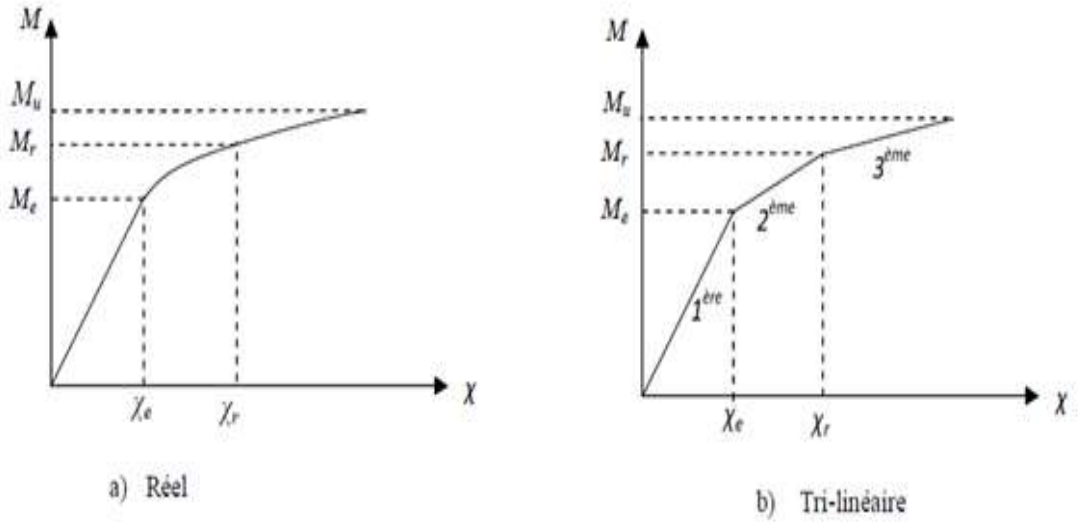



**Figure 1-6 : Diagramme charge- déplacement .**

### 1-2-3 Synthèse et comparaison

La performance plastique est différente, les étapes par les quelles passent les deux éléments ne sont pas les mêmes, mais vis à vis de l'analyse plastique des structures, ils ont la même charge de ruine théorique s'ils ont le même moment plastique.

## 1-3 Comportement d'un portique simple sous l'action de charges concentrées verticales et horizontales croissantes.

### 1- 3-1 Introduction

Pour mieux comprendre le comportement des portiques hyperstatiques soumis à des combinaisons de charge horizontale et verticale croissante jusqu'à la ruine, il a été jugé utile de considérer carrément un exemple d'un portique simple et d'étudier son comportement à savoir la naissance successive des rotules plastiques au niveau des sections critiques, et bien sûr illustrer quelques théorèmes importants et essentiels de l'analyse plastique des structures.

### 1-3-2 Caractéristiques du portique

Les caractéristiques géométriques et mécaniques du portique simple et les points d'application des charges concentrées verticales, λV, et horizontales, λH, et les sections critiques de A à E, sont représentés dans la figure.1-6 :

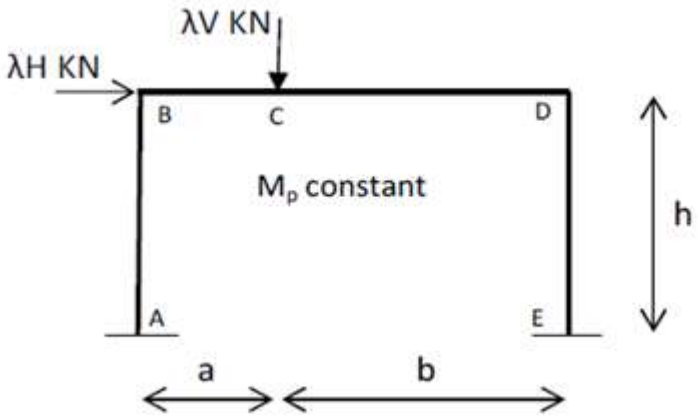



**Figure 1-7 : Portique simple à une travée et un étage .**

### 1-3-3 Traitement du portique

Le portique représenté dans la figure.1-6 supporte les charges concentrées verticales λV et horizontales λH , où λ est le facteur de charge . Il est supposé initialement que V=H=1 KN, le comportement du portique quand λ est augmenté, est résumé dans la figure.2-6. Au début de ce processus, le comportement du portique est élastique (c'est-à-dire le comportement des sections critiques est élastique), et une analyse élastique donne un diagramme des moments fléchissant représenté dans l'étape N°1. Quand $\lambda = \lambda_1$ le plus grand

moment fléchissant se trouve au niveau de l'encastrement droit (point E), ce dernier devient égal au moment plastique et une rotule plastique se forme au niveau de cette section critique. Evidement, la structure entière en dehors de la section, E, est encore élastique et le demeure quand la valeur du facteur de charge, $\lambda$, est au dessus de $\lambda_1$ . Et La section, E, se comporte comme une rotule plastique, de ce fait peut pivoter librement. Le moment
fléchissant au point E doit rester égal au moment plastique.

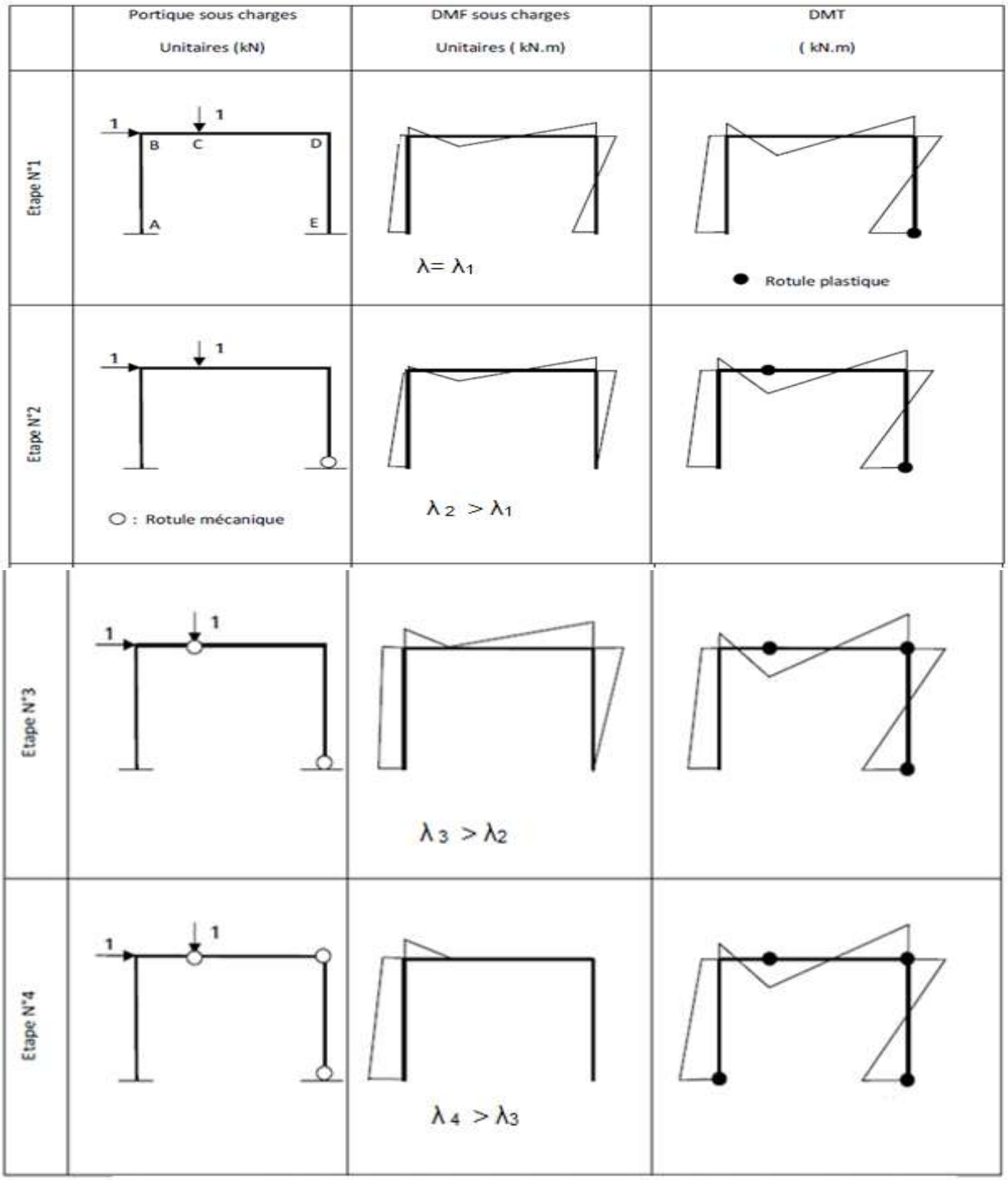



**Figure 1-8 : Détermination du mécanisme de ruine d'un portique simple par la méthode pas à pas .**

L'étape N°2 représente la structure effective qui résiste au chargement quand λ est augmenté. C'est simplement le portique originel avec une rotule sans frottement au point E (la rotule physique est remplacée par une rotule mécanique). Cette structure peut être réanalysée par la même méthode élastique comme à l'étape N°1. Le résultat de l'analyse est le changement en moments fléchissants. Pour obtenir les moments totaux, il est nécessaire d'ajouter le changement (différence) en moments fléchissants aux moments fléchissants quand $\lambda = \lambda_1$ (N.B : la rotule sans frottement en E assure que le changement en moments fléchissants en E est nul, de telle sorte que le moment reste égal au moment plastique, dans ce cas le moment maximum est sous la charge concentrée verticale au niveau de la section critique point C.

Mc étant le deuxième plus grand moment de l'étape N°2

Mc + déplacement de point c x λ' = Mp d'où λ'

D'où la nouvelle valeur de $\lambda_2 = \lambda_1 + \lambda' = 45.91$.

Comme l'indique l'étape N°3, à partir de ce moment il y'a deux pivots (rotules) dans la structure effective qui peut quand même être analysée élastiquement. Très rapidement, cependant, une rotule se forme en niveau de la section critique (point D) quand λ atteint la valeur de $\lambda_2$.

$M_D$ étant le troisième plus grand moment de l'étape N°3

$M_D$+ déplacement de point d x λ'= Mp d'ou λ'

D'où la nouvelle valeur de $\lambda_3 = \lambda_2 + \lambda'$

Le procédé peut continuer à l'étape 4 avec trois rotules sans frottement jusqu'à ce que la valeur de λ atteigne la valeur de $\lambda_3$, le moment max de l'étape 3 se trouve au niveau de la section critique (point A).

$M_A$ étant le quatrième plus grand moment de l'étape N°4

D'où $M_A$+ déplacement de point A x λ'= Mp d'où λ'= 3.3.

D'où la nouvelle valeur de $\lambda_4 = \lambda_3 + \lambda'$.

A ce moment, une quatrième rotule plastique prend naissance.

Il est intéressant de remarquer deux points au sujet du moment fléchissant total représenté dans la figure.1-8

- La distribution des moments flèchissants est en équilibre avec les charges appliquées, la condition d'équilibre est l'une des conditions fondamentales requise par la méthode pas à pas.
- Les moments fléchissants ne dépassent nulle part, le moment plastique des membres, ceci étant la condition d'écoulement.

Toute tentative de continuer le procédé utilisant une structure effective avec quatre rotules sans frottement est impossible, puisque les équations deviennent singulières et ne peuvent pas être résolues. En fait la structure devient un mécanisme.

La distribution des moments fléchissants a ce point satisfait la condition d'équilibre et la condition d'écoulement et en plus :

- Il ya suffisamment de rotules plastiques (n=r+1=3+1=4) pour la structure pour qu'elle devienne un mécanisme, ceci étant la condition de mécanisme [7].

La courbe représentée dans la figure. 1- 9, définit la relation entre le facteur de charge pour chaque étape en fonction des déplacements horizontaux du portique simple à une travée et à un étage figure 1.8 .

Cette dernière montre la réduction de la rigidité de la structure (la pente de la courbe λ-déplacement horizontal figure.1-9) à chaque fois qu'une rotule plastique se forme jusqu'à moment de la ruine totale de la structure où la pente de la courbe devient nulle ( ceci étant une définition alternative de la plasticité) .

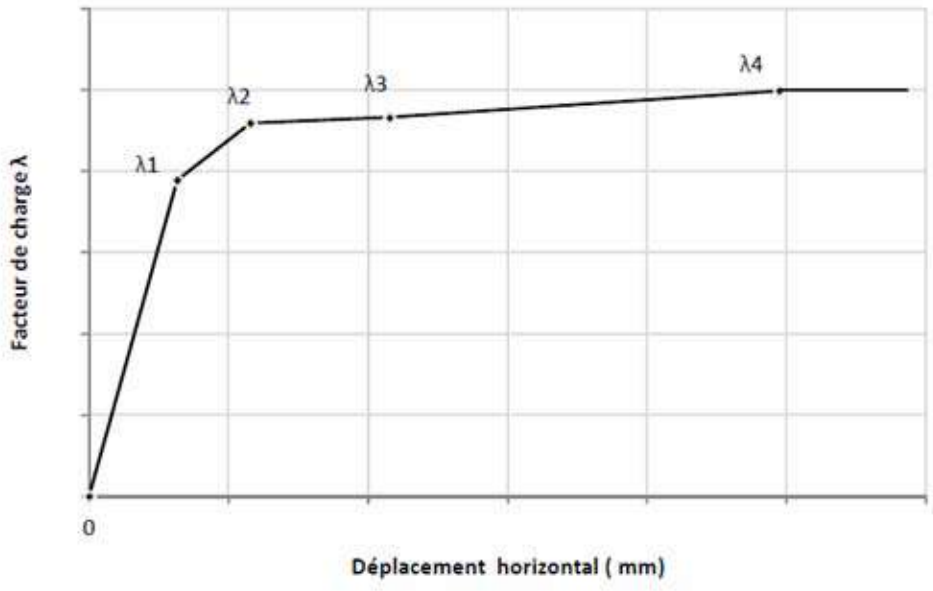



**Figure.1-9 : Courbe facteur de charge λ en fonction du déplacement horizontal du portique simple**

## 1-4 Théorèmes fondamentaux de l'analyse plastique des structures

### 1-4-1 Introduction

L'analyse plastique des structures a pour objet de calculer la charge réelle de ruine d'une partie des structures ou de structures et les mécanismes de ruine correspondants. La détermination du facteur de charge de ruine, $\lambda_c$, ainsi que les mécanismes de ruine des structures dépend essentiellement de la satisfaction des trois conditions du vrai mécanisme de ruine à savoir la condition d'équilibre, la condition d'écoulement et la condition de mécanisme.

La figure.1-10 présente les trois conditions, où les flèches indiquent les conditions qui ont été satisfaites.

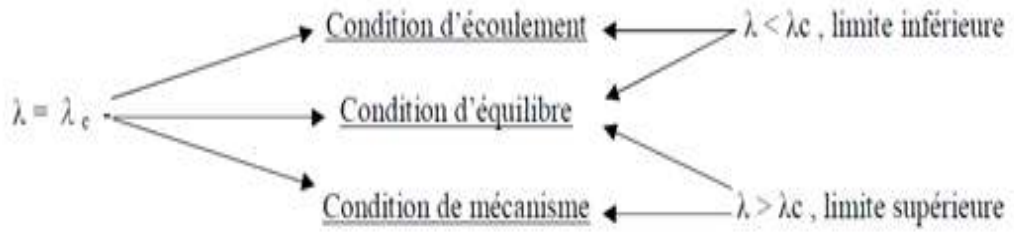



**Figure.1-10 : Condition du vrai mécanisme de ruine en fonction de λ**

### 1-4-2 Théorème de la limite inferieure

Si, dans une structure sujette à un chargement défini par un facteur de charge positif, λ, une distribution des moments fléchissants satisfaisant les conditions d'équilibre et d'écoulement peut être trouvée, ensuite λ est moins que, ou égal au facteur de charge de ruine λc. Dans ce cas la valeur de λ est une limite inferieure pour λc.

### 1-4-3 Théorème de la limite supérieure

Dans ce cas la distribution des moments fléchissants dans les structures ne vérifie que les conditions d'équilibre et de mécanisme, le facteur de charge correspondant, λ, est supérieur ou égal au facteur de charge de ruine, λc, la valeur de ce facteur est une limite supérieure pour λc.

### 1-4-4 Théorème de la l'unicité

Si une structure est sujette à un chargement défini par un facteur de charge positif, $\lambda$, et une distribution des moments fléchissants qui satisfait les trois conditions peut être trouvée, alors $\lambda=\lambda_c$. Il est impossible d'obtenir toute autre distribution des moments fléchissants pour n'importe quelle autre valeur de $\lambda$ qui satisfait les trois conditions simultanément.

## 1-5 Méthodes utilisées pour le calcul des charges de ruine pour des éléments structuraux ou structures simples.

### 1-5-1- introduction

Il a été annoncé précédemment que la ruine d'une structure se produit par la formation d'un nombre suffisant de rotules plastiques aux endroits des sections critiques (plastifiées), ceci engendre une diminution de la rigidité accompagnée à chaque fois d'une redistribution des efforts internes, jusqu'à ce que la structure devienne hypostatique. A ce stade le mécanisme de ruine est atteint et la charge devient la charge de ruine. Cette charge est évidement différente de la charge à l'E.L.U et la différence représente la vraie marge de sécurité pour la structure.

Les outils théoriques nécessaires pour cette détermination sont le théorème du moment libre et des moments de réaction et la méthode basée sur les travaux virtuels.

### 1-5-2 Calcul de la charge de ruine par la méthode du moment libre

Il est possible de déterminer le mécanisme de ruine des éléments structuraux ou structures simples et de tracer leurs diagramme des moments fléchissants à la ruine par la méthode du moment libre et de réaction et ce sans passer par aucune analyse. Une fois le diagramme des moments est déterminé, on peut vérifier la satisfaction des trois conditions du vrai mécanisme de ruine et calculer facilement la charge de ruine.

Cette méthode est basé sur le principe de :

| $M_{p1}$ | + | $M_{p2}$ | = | $M_{p3}$ **e q** (2-3) |
|---|---|---|---|---|
| Moment fléchissant réel au point d'application de la charge | | Moment fléchissant de réaction au point d'application de la charge | | Moment fléchissant libre au point d'application de la charge (Moment de la poutre simplement appuyée) |

La charge de ruine peut être déterminée facilement de cette relation vu que le moment fléchissant libre au point d'application de la charge, $M_{p3}$, est en fonction de cette dernière.

### 1-5-3 Calcul de la charge de ruine par la méthode des travaux virtuels

La charge de ruine peut être déterminée par une deuxième méthode, cette dernière basée sur le principe des déplacements virtuels, Le travail produit par l'effort extérieur, F, doit être égal au travail produit par l'effort intérieur, c'est-à-dire au travail du moment Mp.

La charge de ruine produit un déplacement virtuel $\delta$ et un travail extérieur défini par le produit F. $\delta$ , le moment plastique Mp produit une rotation virtuelle $\theta$, Le travail virtuel intérieur est Mp.$\theta$, la charge de ruine des éléments structuraux ou structures simples peut s'obtenir à partir de l'égalité suivante :

$\Sigma$ Pi. $\delta$i = $\Sigma$ Mpi.$\theta$i (2-4)

## 1-6 Exemples d'application

### 1-6-1 Poutre simplement appuyée

#### i)- Méthode du moment libre

La charge de ruine d'une poutre simplement appuyée soumise à une charge concentrée au milieu de sa portée figure.1-11-a peut être déterminée par cette méthode, le degré d'hyperstaticité de cette dernière est r = 0. Le nombre de rotules nécessaires pour qu'elle devienne un mécanisme est : n = r + 1= 1.

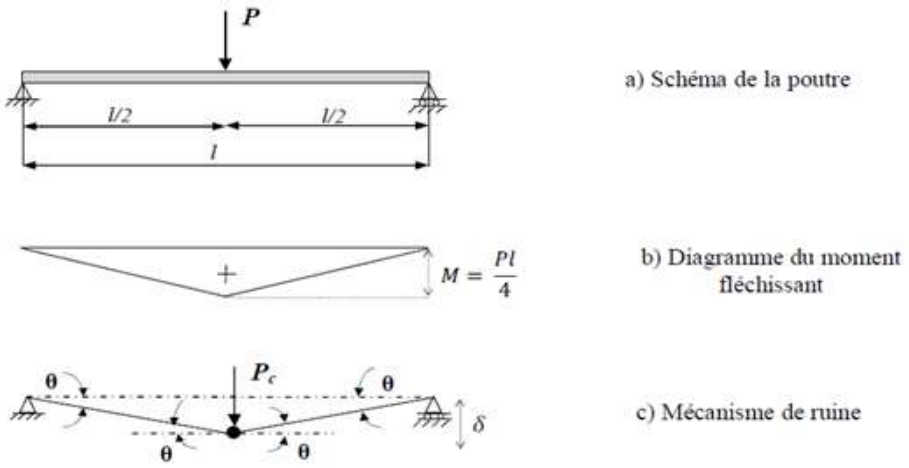



**Figure.1-11 : Poutre simplement appuyée .**

La ruine de cette poutre aura lieu lorsqu'une rotule plastique se produit au niveau du point d'application de charge (section critique) où le moment fléchissant est égal au moment plastique.

On connaît l'allure des moments fléchissants réels au point d'application de la charge lors de la ruine, $M_p$. Le moment fléchissant libre au point d'application de la charge prend la valeur de $P\,l$

figure.1-11-b, dans ce cas (poutre isostatique), le moment fléchissant de réaction au point d'application de la charge est nul d'où la relation (2-3) Devient :

$$M_p = \frac{P_c\, l}{4} \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}5)$$

$$P_c = \frac{4\, M_p}{l} \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}6)$$

**ii)- Méthode des travaux virtuels**

La charge de ruine de cette poutre isostatique peut être déterminée par la méthode des travaux virtuels, Le travail produit par l'effort extérieur, Pc doit être égal au travail produit par l'effort intérieur, Mp.

La géométrie de la structure figure-1-11-c, nous permet d'écrire l'équation :

$$\delta = \frac{l\theta}{2}$$

L'égalité des travaux virtuels, lors de la ruine nous permet d'écrire

$$\mathbf{P_c}\,.\,\delta = \mathbf{M_p}.2\theta \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}7)$$

$$\mathbf{P_c}\,.\,\frac{l\theta}{2} = \mathbf{M_p}.2\theta$$

$$\text{D'où}\quad \mathbf{P_c} = 4\,\frac{M_p}{l} \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}8)$$

### 1-6-2 Poutre encastrée et appuyée ou console retenue

#### i)- Méthode du moment libre

Soit la poutre de section constante, encastrée à une extrémité et appuyée librement à l'autre et à laquelle est appliquée une charge concentrée P figure.1-12-a. Il s'agit donc d'une poutre qui présente un (01) degré d'hyperstaticité, elle nécessite alors la formation de deux rotules plastiques pour qu'elle devienne un mécanisme.

Comme le cas précédent, la charge de ruine peut être déterminée à partir du moment libre et du moment de réaction d'où :

$$M_p \quad + \quad x \quad = \quad P_c \frac{a\,b}{l}$$

| Moment fléchissant réel Au point d'application de la charge | Moment fléchissant de réaction au point d'application de la charge | Moment de la poutre comme si elle étant simplement appuyée |
|---|---|---|

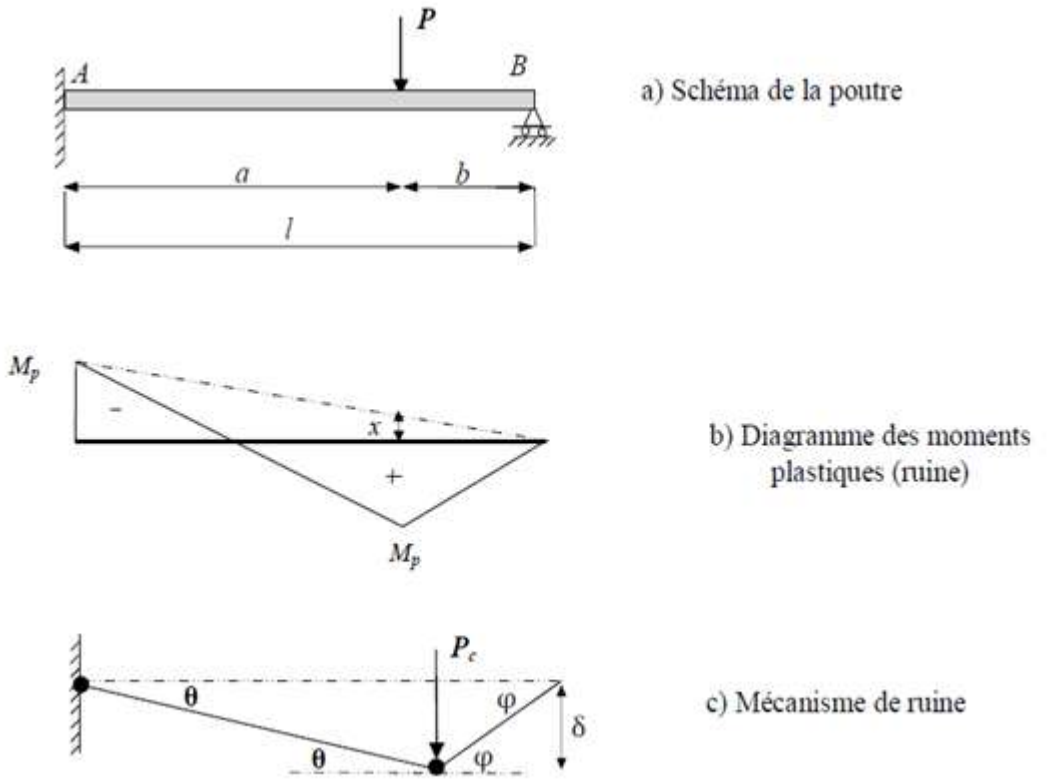



**Figure.1-12 : Poutre encastrée d'un coté et simplement appuyée de l'autre coté .**

Utilisant la règle des triangles semblables on déduit la valeur figure.1-12-b, où $x = \frac{bMp}{1}$

$$M_p + \frac{bM_p}{1} = \frac{P_c ab}{1}$$

Eq (2-9 )

D'où $$P_c = \frac{M_p(l+b)}{a.b}$$

**ii)- Méthode des travaux virtuels**

Le même principe des travaux virtuels à été utilisé pour déterminer la charge de ruine de la poutre encastrée et appuyée figure.1-12.

$$\sum F_i \delta_i = \sum Mp_i \theta_i$$

La géométrie de la structure figure.1-12-c, nous permet d'écrire l'équation :

$\delta = a\theta = b\varphi$ D'où $\varphi = \frac{a}{b}\theta$

$$P_c.\delta = M_p.\theta + M_p(\theta + \varphi) \quad \text{Eq} \quad (2\text{-}10)$$

$$P_c.a\theta = M_p.\theta + M_p(\theta + \frac{a}{b}\theta)$$

$$P_c = \frac{(l+b)}{ab} M_p. \quad \text{Eq} \quad (2\text{-}11)$$

**1-6-3 Poutre doublement encastrée**

**i)- Méthode du moment libre**

On étudie une poutre de section constante, parfaitement encastrée à ses extrémités et soumise à une charge concentrée, *P*, figure.1-13-a. Il s'agit donc d'une poutre qui est deux fois hyperstatique, elle nécessite alors la formation de trois rotules plastiques pour qu'elle devienne un mécanisme.

D'après le diagramme des moments fléchissants, les rotules plastiques ne pouvant se former qu'au droit des sections critiques, c'est au niveau de l'application de la charge et au niveau des deux encastrements.

$$M_p \quad + \quad M_p \quad = P_c \frac{a\,b}{l}$$

| Moment fléchissant réel au point d'application de la charge | Moment fléchissant de réaction au point d'application de la charge | Moment fléchissant libre |
|---|---|---|

Donc la charge de ruine est donnée par :

$$P_c = \frac{2M_p\,l}{ab} \qquad \text{E q} \qquad (2.12)$$

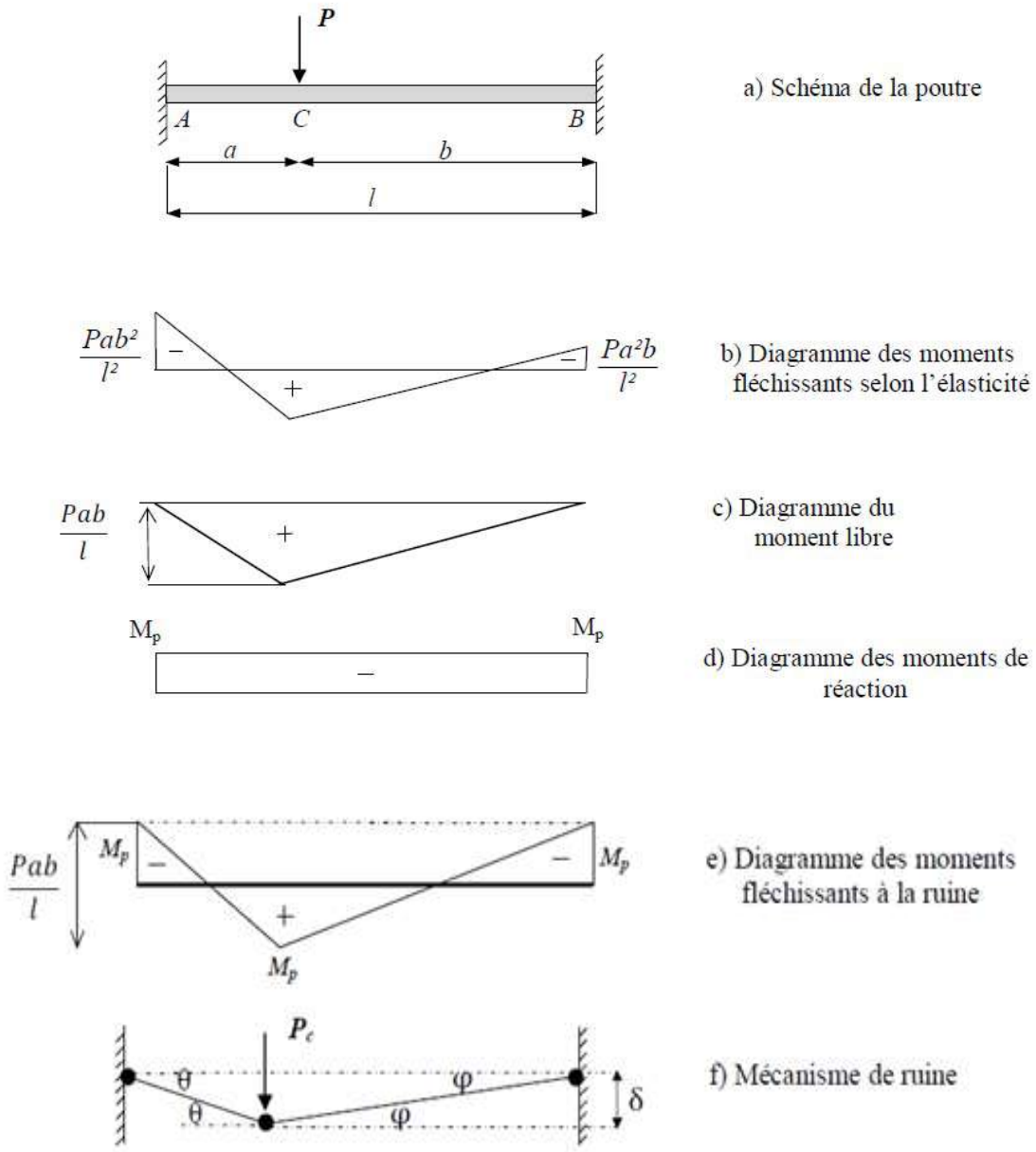



**Figure.1-13 : Poutre encastrée a ses deux extrémités .**

**ii)- Méthode des travaux virtuels**

méthode, cette dernière basée sur le principe des déplacements virtuels, la charge de ruine Pc produit un déplacement virtuel δ, le moment plastique Mp produit une rotation virtuel 2θ à mi travée de la poutre et une rotation virtuelle θ à l'encastrement gauche et $\varphi$ à l'encastrement droit de la poutre.

La géométrie de la structure lors de la ruine figure1-13-f, nous permet d'écrire l'équation :

$$\delta = a\theta = b\varphi \quad \text{D'où} \quad \varphi = \frac{a}{b}\theta$$

La charge de ruine, $P_c$ provoque la formation des trois rotules plastiques, ainsi que le déplacement virtuel δ, le travail extérieur est égal au produit λV. δ , le travail intérieur est égal au à la somme des produits du moment plastique fois les rotations virtuelles.

$$P_c.\delta = M_p.\theta + M_p.\varphi + M_p(\theta + \varphi) \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}13)$$

$$P_c.a\theta = M_p.\theta + M_p.\frac{a}{b}\theta + M_p(\theta + \frac{a}{b}\theta)$$

$$P_c = \frac{2l}{ab}M_p. \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}14)$$

**1-6-4 Poutre continue soumise à un chargement concentré**

**i)- Méthode du moment libre**

Soit une poutre continue à trois travées, dont le schéma statique et les différentes caractéristiques sont données dans la figure.1-14-a .

L'analyse de ce type de poutres se fait d'une manière similaire que les cas précédemment étudiés, chaque travée devrait être étudiée séparément. Il y a lieu à prendre en considération les hypothèses suivantes :

- Au niveau des appuis entre les travées de la poutre, le moment fléchissant est identique à droite et à gauche de l'appui. La rotule plastique se forme dans les membres les plus faibles

(c'est-à-dire que le moment plastique sera le moment le plus faible des deux travées de la poutre considérée à ce niveau).

· Il est improbable que les travées de la poutre se rompent simultanément, donc chaque travée est à vérifier individuellement. La charge de ruine de la poutre continue est la plus petite des charges de ruine des travées prises séparément. Il s'agit donc d'une ruine partielle de la poutre.

La poutre devient désormais comme sur la figure.1-14-c.

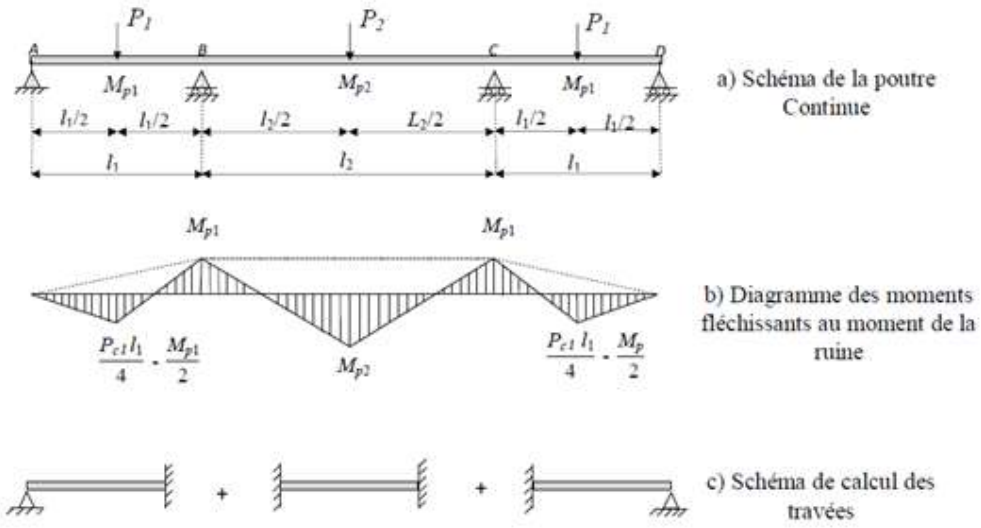



**Figure.1-14 : Poutre continue sous charge ponctuelles .**

**Travées *AB*, *CD* :**

Isolant les travées (AB) et (CD), (symétrie du chargement et même portée) elles sont comme si des poutres encastrées à une extrémité et libre à l'autre figure 1-14-c, si elles se rompent en premier, le diagramme des moments fléchissants aura la forme donnée sur la figure.1-15-a.

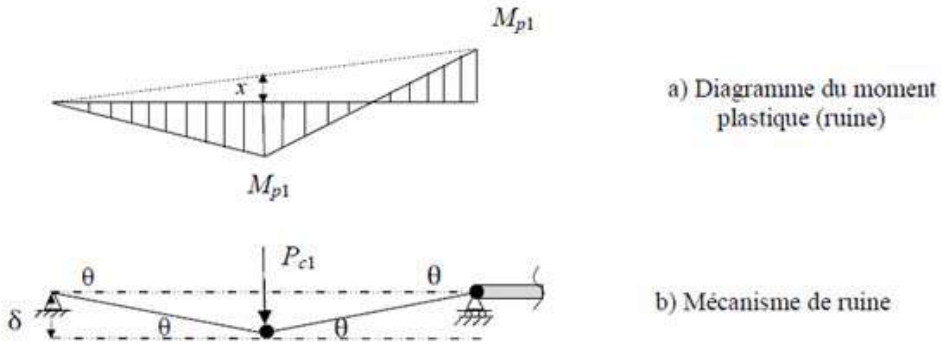



**Figure.1-15 : Mécanisme de ruine des travées AB et CD .**

Utilisant le même principe que pour les exemples précédents pour le calcul de la charge de ruine, on obtient donc :

$$M_{p1} + x = \frac{Pc_1 \, l_1^2}{4 \, l_1} \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}15)$$

Des triangles semblables on déduit la valeur de $x$, d'où $x = \frac{Mp}{2}$

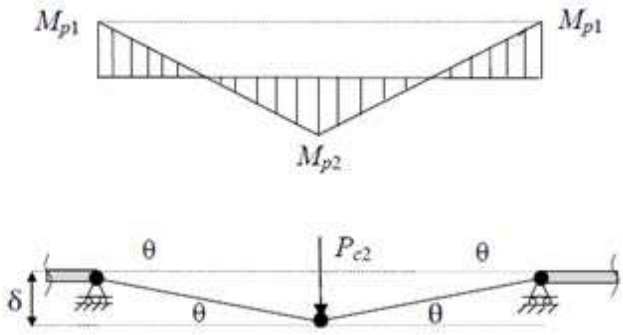
$$M_{p1} + \frac{M_{p1}}{2} = \frac{P_{c1} \, l_1^2}{4 \, l_1}$$

La charge de ruine est égale donc à :

$$P_{c1} = \frac{6 \, M_{p1}}{l_1} \qquad \text{Eq} \qquad (2\text{-}16)$$

**Travées *BC* :**

Ce type de problème est similaire à celui da la poutre encastrée à ses deux extrémités, les rotules plastiques ne pouvant se former qu'au droit des sections critiques, c'est au niveau de l'application de la charge et au niveau des deux encastrements, figure (1.13).




a) Diagramme des moments fléchissants au moment imminent de la ruine

b) Mécanisme de ruine

**Figure.1-16 : Mécanisme de ruine pour la travée BC .**

On aura : $$P_{c2} = \frac{4(M_{p1} + M_{p2})}{l_2} \qquad \text{Eq} \quad (2.17)$$

**Conclusion** : la charge de ruine est égale au min($P_{c1}$ , $P_{c2}$) donc elle est en fonction des valeurs des moments plastiques et des portées . Avec les valeurs littérales, il n'est pas possible de dire quelle est la travée critique.

**ii)- Méthode des travaux virtuels**

La charge de ruine de la poutre continue peut être déterminée par la méthode des travaux virtuels. La ruine de cette dernière peut se produire seulement par un des deux mécanismes représentés dans les figures. 2-15-b et 2-16-b, des deux travées AB ou CD et BC, la plus petite valeur des deux charges de ruine $P_{c1}$ et $P_{c2}$ de ces deux mécanismes est la vraie charge de ruine.

L'équation des travaux virtuels pour chacun des deux mécanismes nous permet d'écrire :

- **Travées *AB*, *CD* :**

$$P_{c1}\frac{l\theta}{2} = M_P(2\theta + \theta) \qquad \text{Eq (2-18)}$$

$$P_{c1} = \frac{6M_P}{l}$$

**- Travées *BC* :**

$$P_{c2}\frac{l\theta}{2} = M_{P1}.\theta + M_{P2}2\theta + M_{P1}.\theta$$

$$P_{c2} = \frac{4(M_{P1}+M_{P2})}{l} \qquad \text{Eq (2-19)}$$

Il est à noter qu'à chaque fois les deux méthodes donnent exactement la même expression pour les charges de ruine.

## 1-7 Détermination de charges de ruine et mécanisme de ruine d'un portique simple.

### 1-7-1 Introduction

Le présent paragraphe a pour objet la détermination des charges de ruine et les mécanismes de ruine d'un portique simple composé d'une travée et un niveau figure.1-17.

Ce portique est trois fois hyperstatique, il ne devient un mécanisme qu'après la formation de quatre rotules plastiques. A cet effet les charges de ruine et les mécanismes de ruine de ce portique sont détermines par une série de combinaisons des mécanismes élémentaires et ce à cause de la complexité de ce dernier Comparativement aux poutres doublement encastrées. Cette méthode est basée sur le principe des déplacements virtuels, elle consiste a combiner les différents mécanismes élémentaires de ruine, m, (m=p- r, où p représente le nombre de sections critiques) jusqu'à l'obtention du plus petit facteur de charge, $\lambda_c$ . Le mécanisme et la charge de ruine de chaque combinaison sont obtenus à partir de l'égalité du travail produit par les charges extérieures $\Sigma F_i.\delta$ et le travail produit par les efforts intérieurs $\Sigma M_p.\ \theta$ (ce travail est obtenu par rotation des différentes rotules plastique)

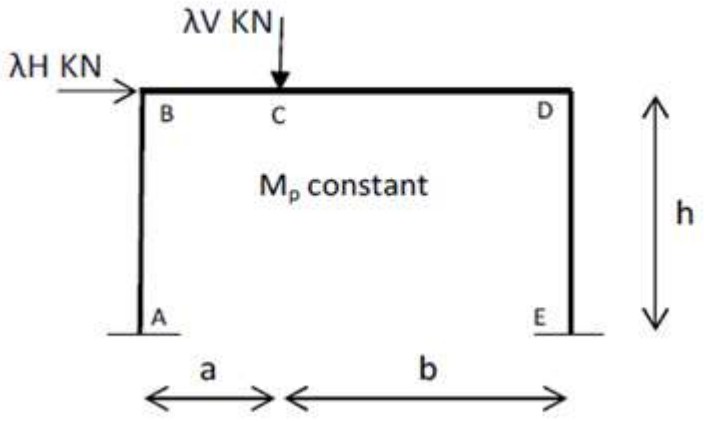



**Figure.1-17 : Portique simple a une travée et un étage .**

Les possibles déformées du portique sont représentées dans les figures 1-18 à 1-20 et dépendent essentiellement de la valeur des deux charges λV et λH. Le portique se transforme en un mécanisme de panneau ou « Sway mechanism » si la charge horizontale est prépondérante, si la charge verticale est prépondérante, il se produit un mécanisme de poutre ou ‘’Beam mechanism’’ ou un mécanisme combiné ‘’Combined mechanism’’ avec la participation des deux charges.

La combinaison des charges verticales λV et horizontales λH provoque la formation de deux (m=p- r =5-3=2, où p représente le nombre de sections critiques) mécanismes élémentaires et un troisième avec la combinaison des deux.

### 1-7-2 ´´Beam mechanism´´

Dans ce cas, la ruine de la structure est causée par la charge concentrée verticale λV, le mécanisme et l’emplacement des rotules sont représentés dans la figure.1-18.
La géométrie de la structure nous permet d’écrire l’équation :

$$\delta = a\theta = b\varphi \quad \text{D'où} \quad \varphi = \frac{a}{b}\theta$$

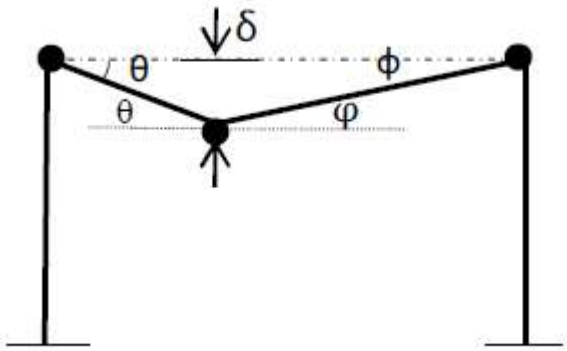



**Figure.1-18 : « Beam mechanism » .**

La charge concentrée verticale provoque la formation des trois rotules plastiques, ainsi que le déplacement virtuel δ, le travail extérieur est égal au produit λV. δ , le travail intérieur est égal à la somme des produits du moment plastique fois les rotations virtuelles $\Sigma M_p$. θi.

$$\lambda V_c.\delta = M_p.\theta + M_p.\varphi + M_p(\theta + \varphi) \qquad \text{Eq} \quad (2\text{-}20)$$

$$\lambda V_c .a\theta = M_p.\theta + M_p.\frac{a}{b}\theta + M_p(\theta + \frac{a}{b}\theta)$$

$$\lambda V_c = \frac{2l}{ab} M_p. \qquad \text{Eq} \quad (2\text{-}21)$$

### 1-7-3 ´´Sway mechanism´´

L'effort horizontal λH transforme la structure en un mécanisme de panneau ou étage ou ''Sway mechanism'', suite à la naissance de quatre rotules plastiques au droit des sections critiques figure.2-19.

La géométrie de la structure nous permet d'écrire l'équation :

$$\Delta = h\theta$$

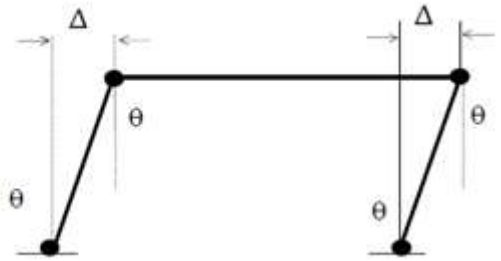



**Figure.1-19 : « Sway mechanism » .**

Avec le même principe des déplacements virtuels, on peut calculer facilement le facteur de charge de ruine de ce mécanisme :

$$\lambda Hc.\Delta = 4\, M_p.\theta \qquad \text{Eq} \quad (2\text{-}22)$$

$$\lambda Hc.h\theta = 4\, M_p.\theta$$

$$\lambda Hc = \frac{4}{h} Mp \qquad \text{Eq} \quad (2\text{-}23)$$

### 1-7-4 ´´Combined mechanism´´

Le mécanisme représenté dans la figure.1-20 produit par la combinaison des deux charges concentrées verticale λV et horizontale λH, ces dernieres provoquent des déformations du portique dans les deux sens avec naissance de quatre rotules plastiques . le facteur de charge peut être calculé à partir :

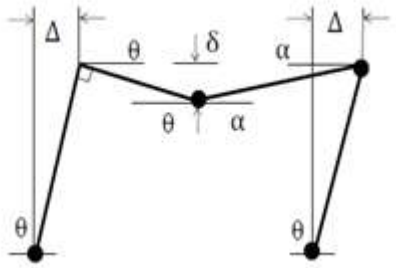



**Figure.1-20 : « Combined mechanism » .**

$$\lambda V_c.\delta + \lambda H_c.\Delta = \frac{2l}{ab}M_p.\theta + \frac{4}{h}Mp\theta - M_p.\theta - M_p.\theta \quad \text{Eq (2-24)}$$

| external Work ,beam mechanism | external Work ,sway mechanism | internal Work ,beam mechanism | In ternal Work ,sway mechanism | internal Work ,at hing which disappears |
|---|---|---|---|---|

$$\lambda V_c.a\theta + \lambda H_c.h\theta = \frac{2l}{b}M_p.\theta + 4Mp\theta - 2Mp.\theta$$

$$\lambda V_c.a + \lambda H_c.h = (\frac{2l}{b} + 2).M_p \qquad \text{Eq (2-25)}$$

Il est constaté que ce mécanisme a la plus petite valeur du facteur de charge, donc λc d'où le diagramme des moments fléchissants au moment de la ruine est le suivant :

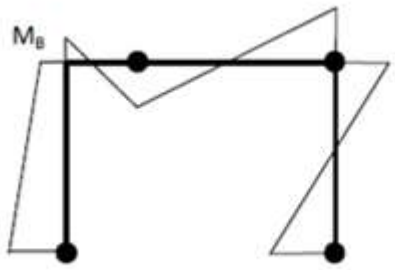



**Figure.1-21 : Diagramme des moments fléchissants du portique simple .**

Pour calculer la valeur du moment au niveau de la section B, il faut utiliser la méthode du moment libre et de réaction :

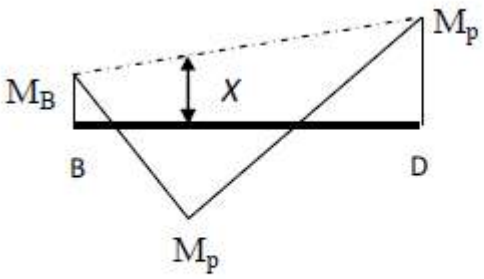



**Figure.1-22 : Diagramme des moments fléchissants poutre B-D .**

$$M_{libre}=\frac{V.a.b}{l} = Mp + X \qquad \text{Eq} \quad (2\text{-}26)$$

D'après le diagramme des moments fléchissants on a :

$$\frac{Mp - M_B}{15} = \frac{X - M_B}{5}$$

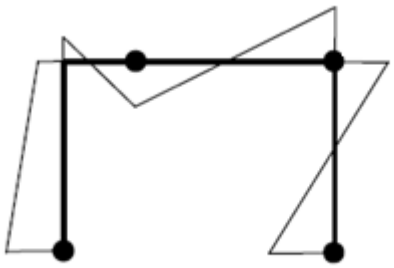


**Figure.1-23 : Diagramme des moments fléchissants total du portique simple au moment de la ruine .**

Les trois conditions du vrai mécanisme, condition d'équilibre, d'écoulement et de mécanisme sont vérifiées.

**1-7-5 Effets du rapport λV/λH**

Le présent paragraphe a pour objet l'étude de l'influence du rapport entre la charge concentrée verticale, **λV,** et la charge concentrée horizontale, **λH,** α= **λV/λH,** sur la charge de ruine du portique simple a une travée et un niveau figure.1-24.

D'après le paragraphe précédent, on a trois types de mécanismes de ruine avec trois charges de ruine correspondantes du portique en question. En introduisant la relation linéaire entre ces deux charges, **λV** = α**.λH** dans les relations caractérisant chaque mécanisme :

Pour le « beam machine » ou mécanisme I on a : $\lambda H = \frac{cst}{\alpha}$ MP (2-27)

Pour le « sway mechanism » ou mécanisme II on a : λH = cst MP (2-28)

Pour le « combined machine » ou mécanisme III on a : $\lambda H = \frac{cst}{1+\alpha}$ MP (2-29)

Pour une valeur unitaire du moment plastique $M_p$ =1KN.m, on peut construire les courbes traduisant la relation entre la charge de ruine horizontale et le rapport α et ce pour chaque mécanisme de ruine. On peut constater que pour chaque valeur de α trois valeurs différentes de charge de ruine chacune correspondant à l'un des mécanismes de ruine.

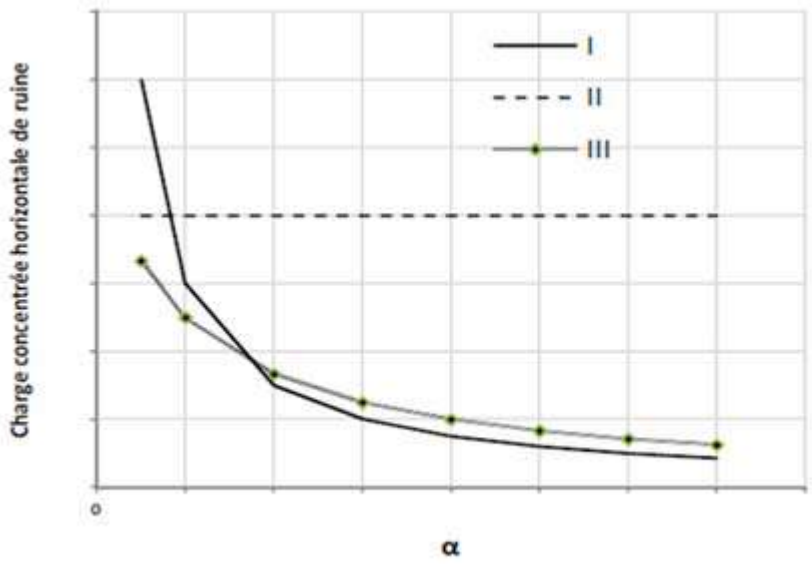



**Figure.1-24 : Relation entre la charge de ruine horizontale et la rapport** $\alpha$ .

### 1-7-6 Construction des diagrammes d'interaction

Afin d'illustrer le comportement du portique.1-17 vis-à-vis des combinaisons de charges horizontales et verticales, il est nécessaire de représenter la relation entre ces deux charges par un diagramme d'interaction figure.1-25. Il s'agit de la relation entre les deux charges de ruine représentée dans le système de coordonnées ($\lambda V$ , $\lambda H$) .ce diagramme permet de déterminer le type de mécanisme de ruine et la charge de ruine correspondante .

- ''Beam mechanism'' ( I ) pour : $\lambda V_c$
- ''Sway mechanism'' ( II ) pour : $\lambda H_c$
- ''Combined mechanism'' ( III )pour : $\lambda V + \lambda H = M_p$

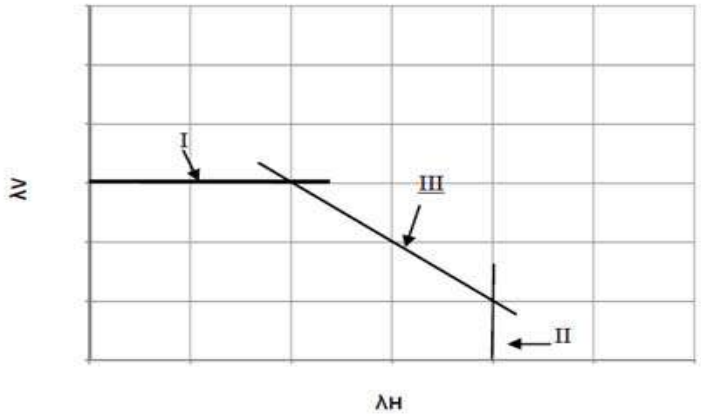



**Figure.1-25 : Diagramme d'interaction du portique simple** .

### 1-7-7 Synthèse

Il est constaté que la détermination du mécanisme et de la charge de ruine des éléments de structures ou structures simples par les différentes méthodes annoncées précédemment, a conduit aux mêmes résultats, mais il faut dire qu'en dehors de ces structures simples, et chaque fois que le degré d'hyperstaticité augmente, la détermination des vrais mécanismes de ruine par la méthode cinématique devient laborieuse car elle exige une série de combinaisons entre les différents mécanismes élémentaires en incluant le mécanisme de joint « joint rotation mechanism » afin de minimiser la valeur du facteur de charge, $\lambda$. Cette méthode peut être très longue sans garantie d'obtention du vrai mécanisme de ruine.

La méthode dite pas à pas peut être salutaire et peut faire éviter le risque d'erreurs et la lourdeur de la première. Elle est facile d'utilisation grâce à la disponibilité de logiciels entre autres le SAP2000. Pour cela, on a opté pour cette dernière pour l'étude et la détermination des mécanismes et les charges de ruine dans le reste du présent travail.

Concernant le choix du portique témoin il a été jugé utile de prendre le plus simple portique possible après celui du « single bay single storey ».

# CHAPITRE 2

## PRESENTATION ET DISCUSSION DES MECANISMES ET CHARGES DE RUINE DU PORTIQUE TEMOIN

## 2- PRESENTATION ET DISCUSSION DES MECANISMES ET CHARGES DE RUINE DU PORTIQUE TEMOIN

### 2-1 Introduction

Ce qui est donné dans la littérature de l'analyse plastique des structures avec suffisamment de détails concerne les structures allant de la poutre simple au portique d'un niveau et d'une travée. Boukeloua [2] a opté pour un portique témoin le plus simple après le « single bay single storey » à savoir un portique de deux niveaux et d'une travée lors de l'élaboration de sa thèse de magister [2].

### 2-2 Caractéristiques Du Portique Témoin

Les caractéristiques géométriques et mécaniques du portique témoin et les points d'application des charges concentrées verticales, λV, et horizontales, λH, sont représentés ci contre dans la figure.2-1-a :

l = 6m

h =3m

Mpb =200KN.m

Mpc =150kN.m

r = 6

p = 12 (numérotées de 1 à 12 figure.2-1.b)

m= p -r =6

Le nombre de rotules nécessaires pour avoir un mécanisme de ruine n = r + 1 = 7

Le portique en question comprend deux encastrements, A et F, deux joints, B et E (rencontre de plus de deux éléments), et deux noeuds C et D (rencontre de deux éléments)

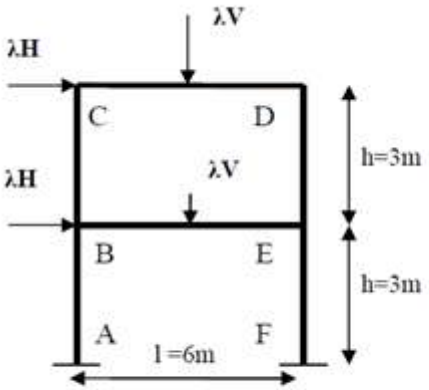


Figure.a : dimensions et chargement

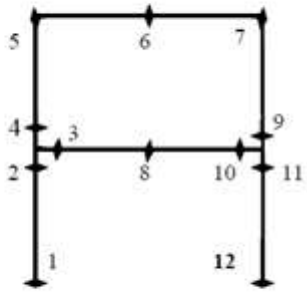


Figure.b : position des sections critiques

**Figure.2-1 : Portique témoin** .

## 2-3 Processus De Détermination Du Mécanisme De Ruine

La méthode utilisée dans ce processus de détermination du vrai mécanisme de ruine ainsi que les charges de ruine du portique témoin est une méthode statique appelée « pas à pas».

En premier lieu, le portique est analysé sous l'action des charges unitaires V= H =1KN. La première rotule plastique se forme au niveau de la section critique qui aura le plus grand moment, Mmax 11, du diagramme des moments flèchissants obtenus. Le facteur de charge de cette étape $\lambda 1$= Mpc/Mmax11, figure2-2 étape N°1. Le portique est ré-analysé sous chargement unitaire figure.2-2 étape N°2 avec une rotule mécanique ( M=0 ) au droit de la rotule physique (M = Mp), la nouvelle valeur du facteur de charge $\lambda 2$ de la deuxième étape est obtenu en superposant les deux diagrammes des moments flèchissants du portique originel et le portique avec la rotule mécanique figure.2-2, $\lambda 2= \lambda 1+$ (Mpc- $\lambda 1$(Mmax )12)/ Mmax21 , le même processus est utilisé pour les autres étapes avec la vérification des conditions d'équilibre et d'écoulement pour chaque étape jusqu'à l'obtention de n rotules plastiques (n = r+1 ) au moment de la ruine totale du portique. Le facteur de charge pour lequel la structure se transforme en un mécanisme est appelé le facteur de charge de ruine, $\lambda C$,.

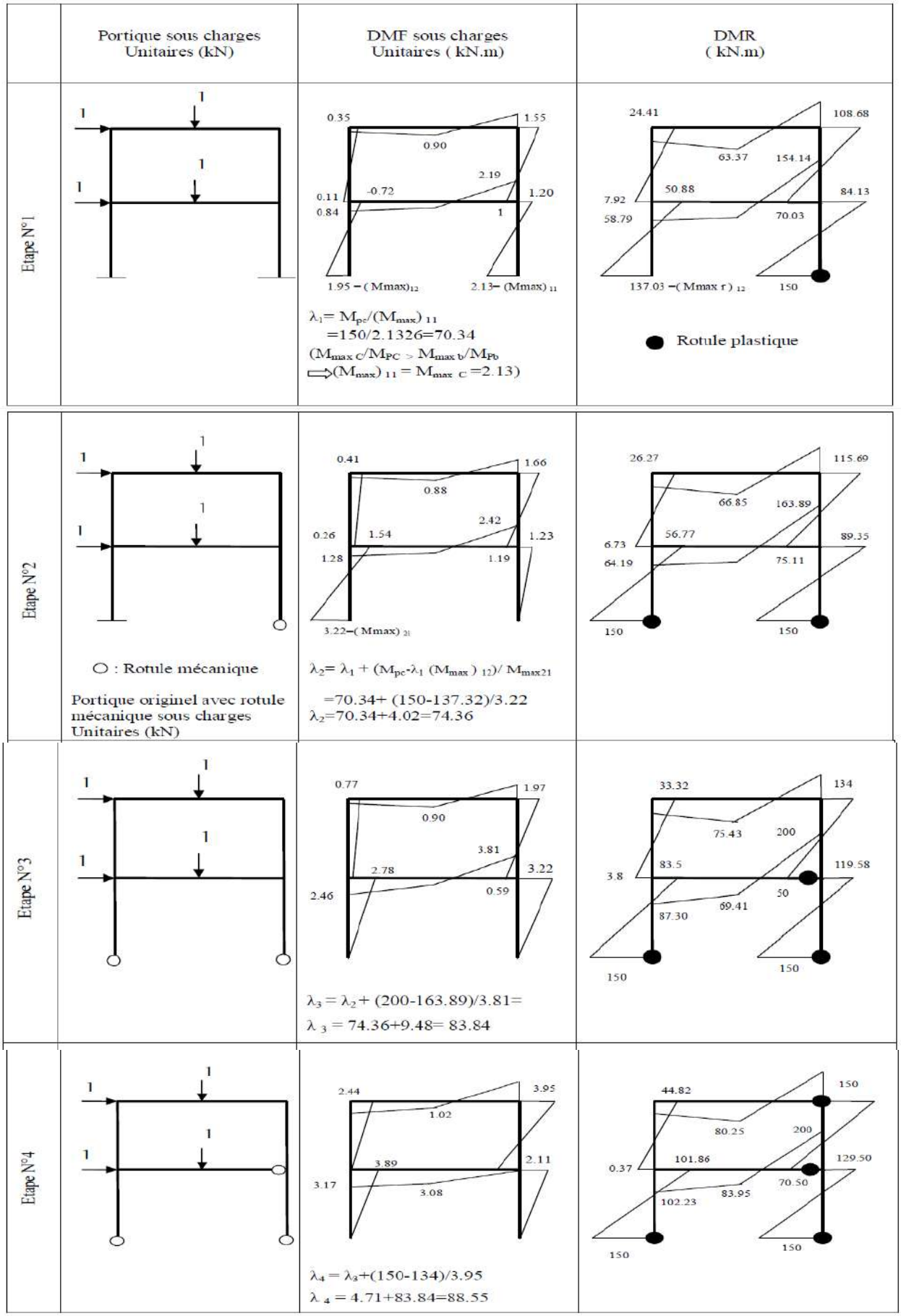



**Figure.2-2 : Détermination du mécanisme de ruine par la méthode pas à pas du portique témoin**

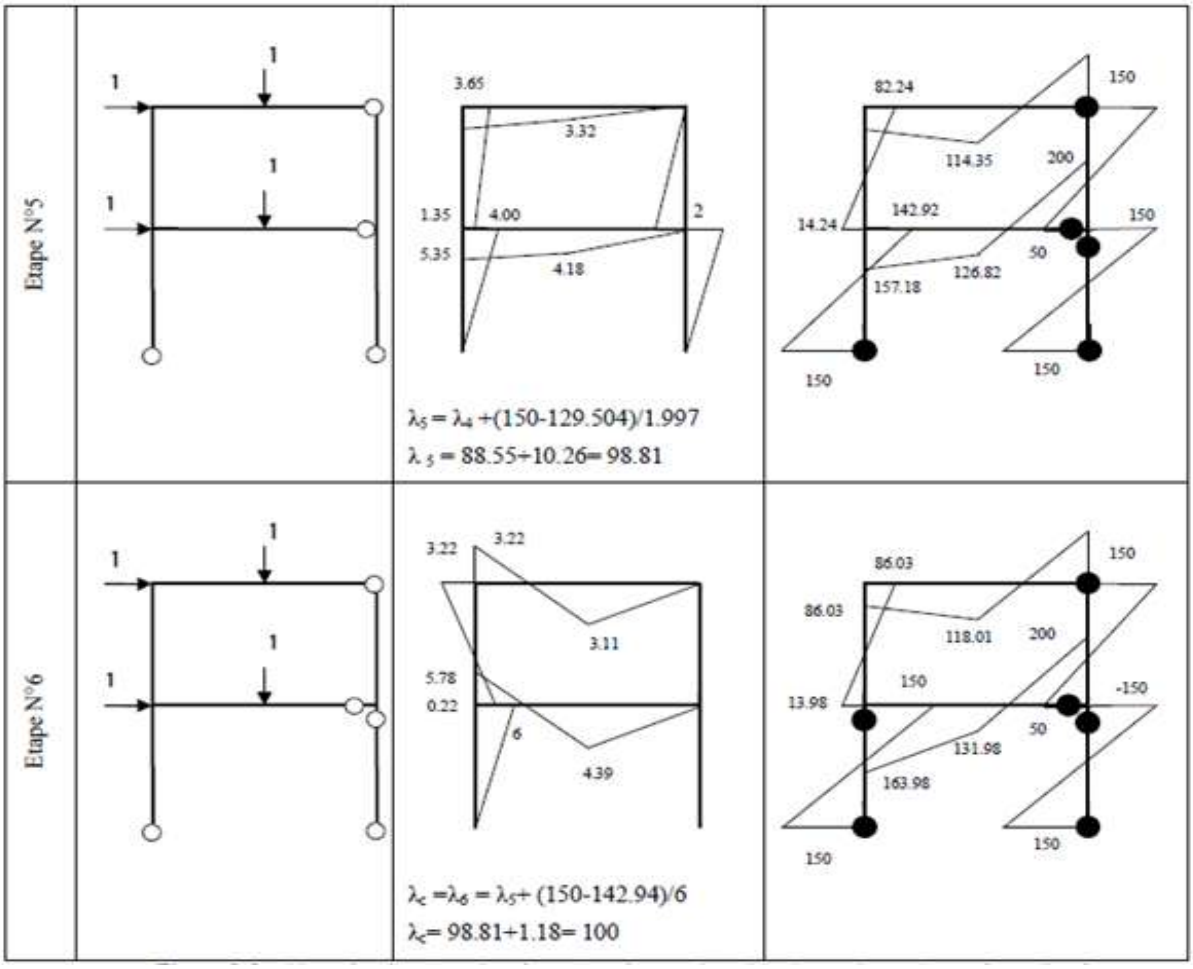



**Figure.2-2 : Détermination du mécanisme de ruine par la méthode pas à pas du portique témoin**

La poursuite du processus au-delà de l'étape N°6 figure.2-3 conduit à analyser le portique originel avec six rotules mécaniques au droit des sections ou se sont formées les six rotules physiques (fin de l'étape N°6) conduit à une situation ou la condition d'équilibre n'est pas vérifiée au niveau des deux joints B et E et des noeuds C et D.

Cette situation conduit à la formulation des remarques suivantes :

- Formation de la (r + 1) me rotule n'a pas en lieu (condition de mécanisme non satisfait).
- La condition d'équilibre n'est plus satisfaite dans certaines sections (deux nœuds et deux joints).

A partir de ce moment, la conclusion principale à tirer est que :

Dés qu'une des conditions (équilibre, écoulement et mécanisme) n'est pas satisfaite, en l'occurrence, la condition d'équilibre, dans ce cas, le processus est condamné à s'arrêter quelque soit le nombre de rotule plastique développés .cette situation est en fait expliquée par le développement d'un mécanisme élémentaire (sway mechanism pour le cas figure.3-2) ou le développement d'une ruine partielle.

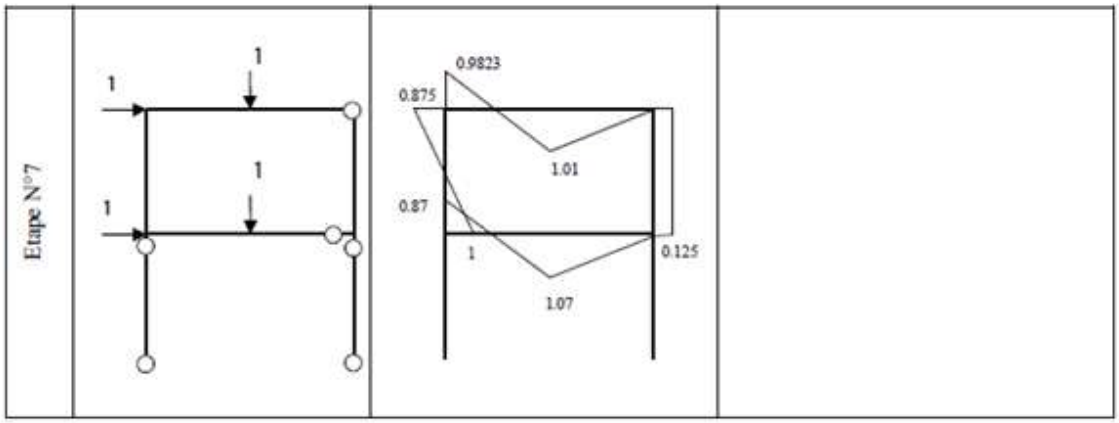



**Figure.2-3 : Analyse du portique témoin après le développement d'un mécanisme élémentaire**

**2-4 Phénomène De Redistribution Des Moments Dans Le Portique Témoin**

Le phénomène de redistribution des moments flechissants après la formation de la première

rotule est illustré dans la figure.2-4 et le tableau 2-1.

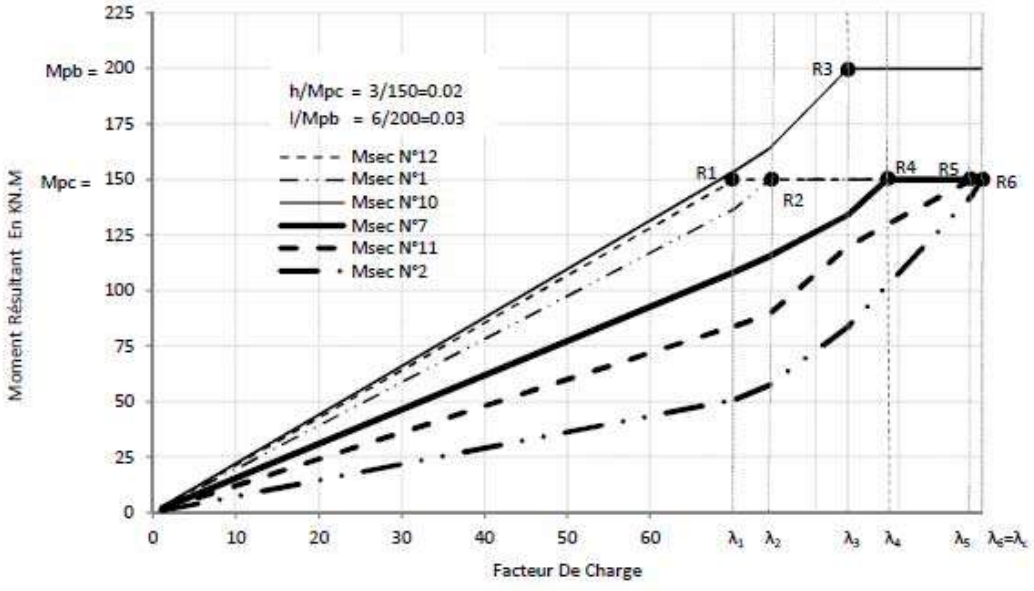



**Figure.2-4 : Redistribution des moments dans le portique témoin**

Il est évident qu'une section ayant atteint la valeur de Mp ne peut en aucun cas avoir un moment supérieur à Mp à la suite de la réanalyse de la structure avec la rotule physique devenant une rotule mécanique. De ce fait, il est observe un phénomène de redistribution des moments flèchissants et sa quantification est donnée dans le tableau 2-1. Pour le cas présent, ce phénomène de redistribution est à chaque fois amplifié et une section en l'occurrence la section critique N°2 ou le moment était égal à Mp/3 atteindra à la fin du processus et la création du mécanisme de ruine la valeur de Mp soit une augmentation de prés de 300%.

**Tableau .2-1 : Redistribution des moments dans le portique témoin**

| N° Sect | Mp KN,m | Etape N°1 | | Etape N°2 | | Etape N°3 | | Etape N°4 | | Etape N°5 | | Etape N°6 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Mr | Mr/Mp | Mr | Mr/Mp | Mr | Mr/Mp | Mr | Mr/Mp | Mr | Mr/Mp | Mr | Mr/Mp |
| 12 | 150 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 |
| 1 | 150 | 137,03 | 0,91 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 |
| 10 | 200 | 154,14 | 0,77 | 163,89 | 0,82 | 200,00 | 1 | 200,00 | 1 | 200,00 | 1 | 200,00 | 1 |
| 7 | 150 | 108,68 | 0,72 | 115,34 | 0,77 | 134,00 | 0,89 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 |
| 11 | 150 | 84,13 | 0,56 | 89,08 | 0,59 | 119,58 | 0,80 | 129,50 | 0,86 | 150,00 | 1 | 150,00 | 1 |
| 2 | 150 | 50,87 | 0,34 | 57,08 | 0,38 | 83,50 | 0,56 | 101,86 | 0,68 | 142,94 | 0,95 | 150,00 | 1 |

# CHAPITRE 3

# MÉCANISME DE RUINE POUR DES STRUCTURES EN PORTIQUES

## 3- MÉCANISME DE RUINE POUR DES STRUCTURES EN PORTIQUES

### 3-1 Introduction

Les mécanismes de ruine ainsi que les charges de ruine de structures en portiques dépendent d'une multitude de paramètres (les dimensions en plan et en élévation de la structure, les caractéristiques géométriques et mécaniques des matériaux mis en oeuvre, la nature du chargement, la simulation des charges réparties uniformément …). Le même processus décrit dans le chapitre précédent (chapitre 1) a été utilisé pour étudier l'effet de quelques paramètres sur le comportement des structures en portiques jusqu'à l'obtention du vrai mécanisme de ruine et la charge de ruine correspondantes. La vérification des conditions du vrai mécanisme est indispensable pour chaque étape.

Le présent chapitre a pour objet de déterminer les mécanismes de ruine pour des structures en portiques sous l'effet du rapport $\alpha$ = V/H (V étant la charge verticale concentrée et H étant la charge horizontale concentrée) ainsi que la construction des diagrammes d'interaction appropriés.

### 3-2 Raisons du choix de la méthode retenue pour l'étude :

Il est constaté que la détermination du mécanisme et de la charge de ruine des éléments de structures ou structures simples par les différentes méthodes de l'analyse plastique, a conduit aux mêmes résultats, mais il faut dire qu'en dehors des cas de structures simples, et chaque fois que le degré d'hyperstaticité augmente, la détermination des vraies charges de ruine par la méthode cinématique devient laborieuse car elle exige une série de combinaisons entre les différents mécanismes élémentaires en incluant le mécanisme de joint « joint rotation mechanism » afin de minimiser la valeur du facteur de charge, $\lambda$ .

Cette méthode peut être très longue sans garantie d'obtention du vrai mécanisme de ruine.

La méthode « pas à pas » a ses limites car une partie du travail devrait se faire manuellement alors que la méthode non linéaire dite « pushover » peut être salutaire et peut faire éviter le risque d'erreurs et la lourdeur de la première ainsi que la deuxième. Elle est facile d'utilisation grâce à la disponibilité de logiciels entre autre le SAP2000. Pour cela, la méthode non linéaire « pushover » a été retenue pour le reste du travail car elle permettra et facilitera l'analyse d'une multitude de portiques avec un ensemble de paramètres différents.

**3-3 choix du portique témoin de base P 3N 3T :**

Pour la présente étude, il a jugé nécessaire de sélectionner un portiques témoins de base à trois niveaux et trois travées dénommé P 3N 3T, d'une travée sur les mécanismes de ruines et les charges de ruine,

**3-4 Caractéristiques mécaniques et géométriques de Portique retenu :**

Les caractéristiques géométriques et mécaniques du P 3N 3T (portique de base) et les points d'application des charges concentrées verticales et horizontales, $\lambda$ V, et horizontales, $\lambda$ H, (V = H = 1 kN) sont représentés sur la figure (3-1-a) :

Une combinaison de charges concentrées verticales et horizontales a été réalisée avec h/Mpc=3/200=0.015 kN-1 et l/Mpb=6/150=0.04 kN-1.

N.B : les charges latérales (horizontales) sont appliquées uniquement pour déterminer les mécanismes de ruine et les charges de ruine du portique témoin non endommagé.

l = 6m

h =3m

Mpb =150 kN.m

Mpc =200 kN.m

r = 3.k -j

r : degré d'hyperstaticité

k : nombre de barres

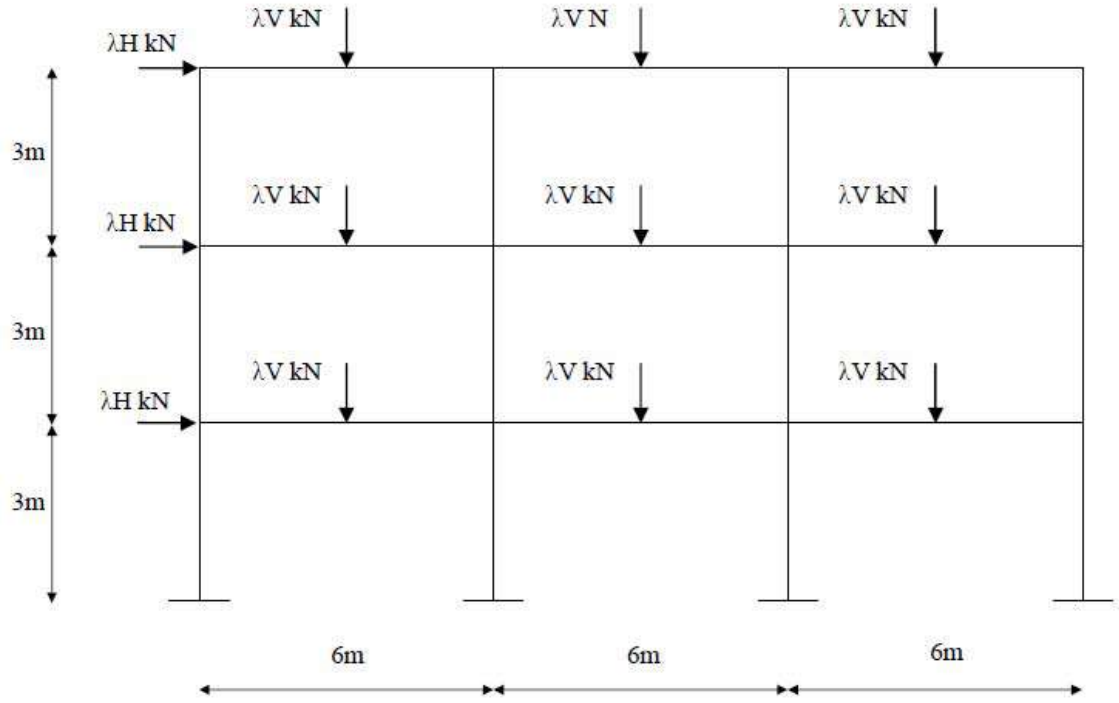
j : nombre de rotules mécaniques

r = 3×9 - 0 = 27

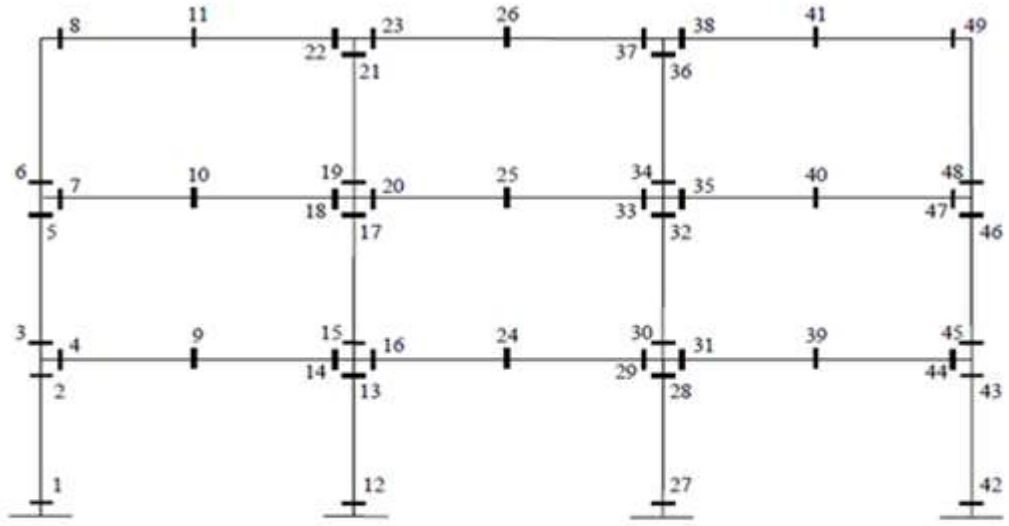
Les sections critiques sont représentées dans la figure (3-1-b) et sont numérotées de 1 à 49.

Le nombre de rotules nécessaires pour avoir un mécanisme de ruine n = r + 1 = 28

Le portique en question comprend quatre encastrements, dix joints (rencontre de plus de deux éléments), et deux noeuds (rencontre de deux éléments).




a) dimensions et chargement en élévation




b) numérotation des sections critiques

**Figure.3-1 : Présentation du P 3 N 3 T (portique de base )**

## 3-5 Mécanismes de ruine pour le portique témoin :

### 3-5-1 Introduction :

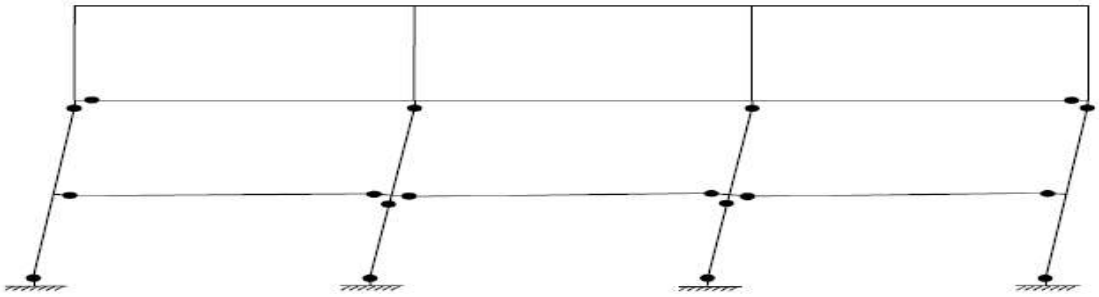
La présente étude a pour objet de déterminer les mécanismes de ruine de portique témoin soumis à une combinaison de charges concentrées verticales et horizontales linéairement dépendantes, $\lambda$ V et $\lambda$ H avec $\alpha$ = V/H. Les caractéristiques géométriques et mécaniques sont (h, l, Mpc, Mpb).

Il a été jugé nécessaire et pratique de ne représenter les portiques avec les différentes rotules plastiques qu'à chaque changement de l'ordre d'apparition de ces dernières et ce pour les valeurs ou les intervalles appropriés de $\alpha$ .

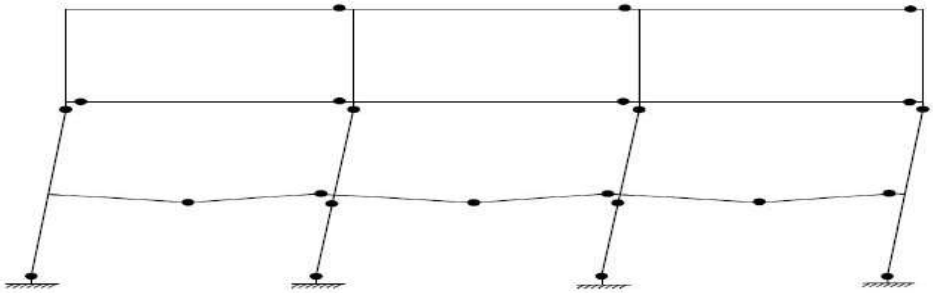
### 3-5-2 Mécanismes De Ruine de Portique Témoin P 3N 3T

#### i) Présentation Des Mécanismes

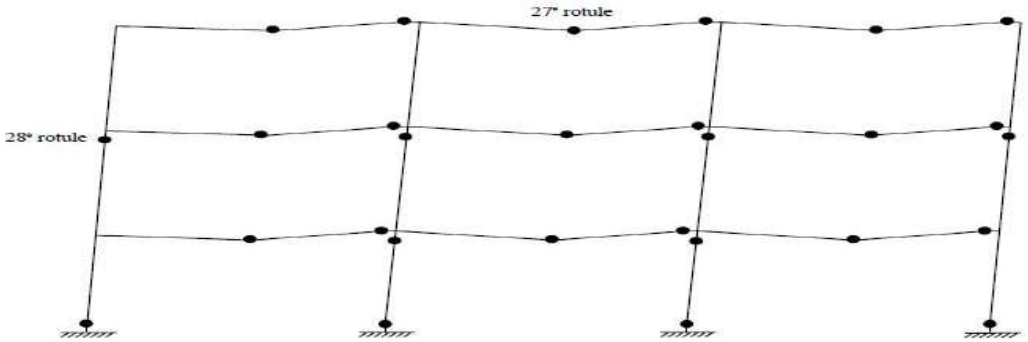
Une série de combinaisons de charges concentrée verticales et horizontales a été réalisée en fonction de $\alpha$ pour $h/M_{pc}$= 3/200= 0.015 $kN^{-1}$ et $l/M_{pb}$= 6/150= 0.04 $kN^{-1}$, les mécanismes de ruine obtenus sont représentés sur la figure (3-2) avec l'emplacement des rotules plastiques sur le portique témoin **P 3N 3T** (portique de base).



a- mécanisme de ruine pour
$\alpha < 0.6$

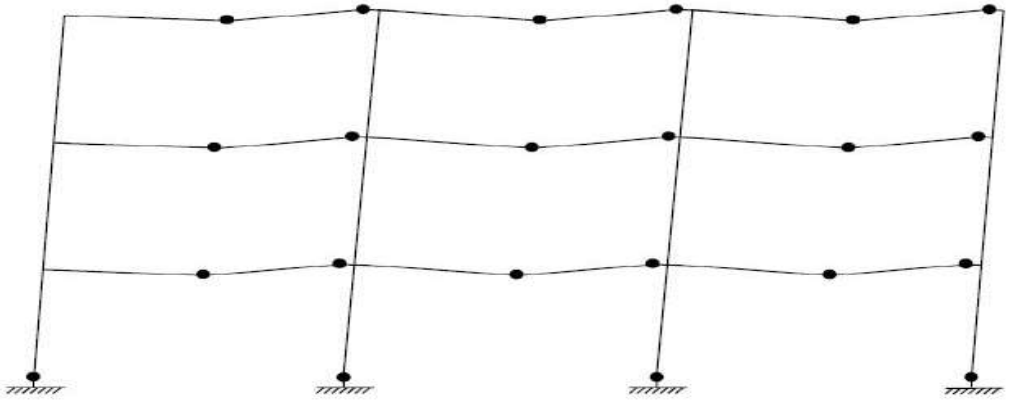


b- mécanisme de ruine pour
$0.6 < \alpha < 0.93$

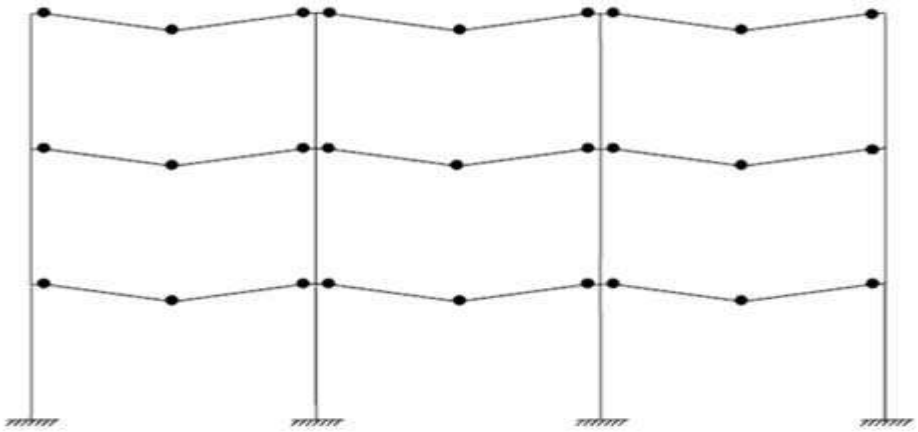



c- mécanisme de ruine pour
$\alpha = 0.93$

**Figure.3-2 : Les déférents types de mécanismes de ruine développés en fonction de $\alpha$ pour le P 3 N 3 T (portique de base )**



d- mécanisme de ruine pour
$0.93 < \alpha < 4.5$



e- mécanisme de ruine pour
$\alpha > 4.5$

**Figure.3-2 : Les déférents types de mécanismes de ruine développés en fonction de $\alpha$ pour le P 3 N 3 T (portique de base )**

### ii) Principales Constatations

L'analyse du portique pour la combinaison de $h/M_{pc}=3/200=0.015$ $KN^{-1}$ et $l/M_{pb}=6/150=0.04$ $KN^{-1}$ et en faisant varier le rapport $\alpha$ =V/H révèle les faits saillants suivants :

- Pour des valeurs de $\alpha \leq 0.6$ le mécanisme élémentaire se forme avec la naissance de la dix huitième rotule et est un « total first and second story sway mechanism ».

Les charges horizontales étant prépondérantes (figure 3-2-a).

- Pour l'intervalle 0.6< $\alpha$ < 0.93 un « total lower storey combined mechanism » avec un « total second storey sway mechanism » se forme mais avec seize rotules plastiques. Pour toute valeur de $\alpha$ comprise entre 0.6 et 0.93 ; l'ordre de formation de rotules plastiques est proportionnel avec la valeur de $\alpha$, les rotules plastiques formées au niveau des poutres du deuxième et dernier étage pourront être considérées comme bloquées (car elles ne peuvent pas agir sur déformabilité globale de la structure). Dans ce cas les sept rotules plastiques considérées comme bloquées sont développées au niveau des poutres du deuxième et dernier étage (figure 3-2-b).

- Le nombre théorique de rotules nécessaires pour la transformation du portique témoin en question en un mécanisme est de n= r+1= 28. Ce qui est, en fait, la condition de mécanisme conformément aux théorèmes de la plasticité. Pour le cas singulier de $\alpha$ = 0.93 (figure.3-2-c) la vint huitième rotule développée, pour ce cas, donne naissance à un « over collapse » (sur ruine) où deux mécanismes ont lieu simultanément « total second storey sway mechanism » avec « total combined mechanism » cette valeur de $\alpha$ peut être considérée comme une valeur « tampon » ou une valeur frontière (figure 3-2-c).

- Pour l'intervalle de 0.93< $\alpha$ < 4.5 le nombre de rotules plastiques formées est de vint deux, et ce au niveau des mêmes sections critiques et toujours dans le même ordre. la nature du mécanisme de ruine observé est un « lower storey combined mechanism » et un « total combined mechanism », ce mécanisme peut être identifié comme un « double combined mechanism ». la création d'une rotule supplémentaire n'est pas nécessaire et sa présence compliquerait la déformation.

La similitude avec « sway + combined mechanism » d'un portique simple à une travée et un étage (« single storey single bay frame ») est évidente (figure 3-2-d).

- Pour les valeurs de $\alpha$ > 4.5, les valeurs des charges concentrées verticales, V, sont nettement supérieures aux charges concentrées horizontales, H, les poutres sont les éléments les plus fragilisés et le mécanisme de ruine du portique en question est un « top, second and lower beam mechanism», ces mécanismes de poutre ont lieu suite à la formation de vingt sept rotules plastiques au niveau de sections critiques des poutres avec un ordre de formation identique à celui du figure (3-2-e).

**iii) Synthèse**

- pour de faibles valeurs de $\alpha$, $\alpha$ < 0.6 la charge concentrée horizontale, H, est prépondérante et des « total first and second story sway mechanisms » sont observés. Ce mécanisme ne peut être se déformé qu'avec deux autre «joint rotation mechanism» au niveau de premier étage et «left and right hand joint rotation mechanism» au niveau de deuxième étage.
- Une combinaison de « total lower storey combined mechanism » avec un « total second storey sway mechanism » a lieu pour 0.6 ≤ $\alpha$ < 0.93 ; la dernière rotule prend naissance au niveau du poteau gauche de rive qui a produit «left hand joint rotation mechanism» au niveau du deuxième étage. La valeur de $\alpha$ = 0.6 est une valeur frontière entre les deux mécanismes de ruine «second storey sway mechanism » et la combinaison de « lower storey combined mechanism » avec le « second storey sway mechanism ».
- la valeur de $\alpha$ = 0.93 peut être considérée comme valeur frontière ou une valeur « tampon » et d'ailleurs elle est la valeur unique pour laquelle se sont développées vint huit rotule, les deux dernières rotules apparaissant simultanément, l'une des deux participe à la formation du « total combined mechanism » et l'autre participe à la formation du « total second storey sway mechanism » donc le mécanisme de ruine formé est une combinaison entre les deux mécanisme « total second storey sway mechanism » et le mécanisme « total combined mechanism ».
- un « lower storey combined mechanism » et un « total combined mechanism » a lieu pour 0.93 < $\alpha$ ≤ 4.5 ; La valeur de $\alpha$ = 4.5 est une valeur frontière entre les deux mécanismes de ruine « top, second and lower beam mechanism» et la combinaison de « lower storey combined mechanism » et « total combined mechanism ».
- pour des valeurs de $\alpha$ > 4.5 les charges verticales sont prépondérantes, et elles produisent carrément les «beam mechanisms» au niveau de chaque poutre.

- un « double combined mechanism » se produit pour 1.39 < $\alpha$ ≤ 7.49 ; la frontière entre les deux mécanismes de ruine « top, second and lower beam mechanism» et la combinaison de « lower storey combined mechanism » et « total combined mechanism » est de $\alpha$ = 7.49 ;
- pour des valeurs de $\alpha$ > 7.49 les charges verticales sont prépondérantes, et elles produisent des «beam mechanisms» (création de trois rotules) au niveau de chaque poutre.

**3-5-3 Synthèse de synthèse :**

Après l'analyse de portique non endommagé pour la détermination des vrais mécanisme de ruine par la méthode « pushover » il s'est avéré que le paramètre le plus influent est le rapport $\alpha$ = V/H. il a un effet direct sur les mécanismes obtenus et les charges de ruine. L'étude a révélé trois principaux intervalles de ' $\alpha$ ' où les principaux changements sont constatés, l'étendue de ces intervalles est directement influencée par la forme en élévation du portique (effet du rajout d'un niveau ou d'une travée).

Pour de faibles valeurs de ' $\alpha$ ' :

$\alpha$ > 0.60 pour le **P 3N 3T (portique de base)**

La prépondérance est aux « sway mechanisms » localisés ou totaux.

Pour de grandes valeurs de ' $\alpha$ ' :

$\alpha$ > 4.50 pour le **P 3N 3T (portique de base)**

La prépondérance est aux « beam mechanisms » localisés ou totaux.

Pour des valeurs intermédiaires de $\alpha$ où les mécanismes prépondérants sont des « combined mechanism » avec des combinaisons de quelques mécanismes élémentaires y compris des « joint rotation mechanism ».cette zone intermédiaire a été trouvée être influencée par le nombre de niveaux et par celui des travées.

L'obtention de valeurs tampons intermédiaires a nécessite un travail miticuleux.

- Pour le portique de base **P 3N 3T**, la valeur tampon intermédiaire trouvée est de 0.73
- Pour le portique à quatre travées **P 3N 3T**, la valeur tampon intermédiaire trouvée est de 0.73
- Pour le portique à quatre niveaux **P 3N 3T**, deux valeurs tampons intermédiaires ont été trouvées à savoir $\alpha$ =1.2 et $\alpha$ =1.39

# CHAPITRE 4

# Construction des diagrammes d'interaction

## 4- CONSTRUCTION DES DIAGRAMMES D'INTERACTION :

### 4-1 Introduction :

Il ressort de ce qui a été réalisé dans les chapitres (1 et 1) que les paramètres les plus influents sont les rapports $\alpha$ =V/H et les combinaisons $l/M_{pb}$ ; $h/M_{pc}$ et le changement du nombre de niveau et nombre de travées. Ces paramètres influent directement sur les valeurs des charges causant la ruine et aussi sur la nature des mécanismes de ruine identifiés. Les variations de l et h sans relation avec les moments plastiques respectifs ont produit des résultats dans tous les sens car il s'est avéré qu'elles ne représentaient pas des cas pratiques et pourraient engendrer des incohérences vis-à-vis du dimensionnement. Dans le présent chapitre, il a été jugé utile d'opter pour une représentation graphique pour mettre en exergue les effets du paramètre le plus influent à savoir, $\alpha$ , et ce pour une seule combinaison de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$ en relation avec le changement du nombre de niveaux ou de travées.

L'utilisation de la méthode non linéaire « pushover » a permis l'étude et l'analyse des trois portiques témoins retenus et ce pour large variation du rapport $\alpha$ = V/H. cette analyse a permis l'identification des valeurs de $\alpha$ pour lesquelles s'opère le changement des mécanismes de ruine. Les valeurs tampons ne sont pas figées et varient pour chaque portique témoins les valeurs changent aussi lorsque les rapports géométrico-mécaniques $l/M_{pb}$ ; $h/M_{pc}$ [2].

L'analyse a fait ressortir la possibilité de construire des diagrammes d'interaction similaires a ce qui est donné par la théorie pour des structures simples « single bay single storey »et aussi par ce qui a été réalisé par Boukeloua pour le portique à deux niveaux et une travée.

### 4-2 Principes Généraux De Construction :

Dés qu'il y'a plus d'une variable (contrainte, effort, moment …etc.) qui influent sur le comportement ou la rupture d'un élément de structure ou d'une structure entière, il y'a nécessité absolue de recourir à une courbe reliant les deux ou trois variables qui interagissent. Ceci étant le cas pour la construction des cercles de Mohr reliant les contraintes normales et tangentielles, les diagrammes d'interaction en flexion composée reliant les efforts de compression aux moments fléchissants dans un plan donné, les diagrammes d'interaction en flexion déviée reliant les efforts de compression aux deux moments agissants dans deux plans perpendiculaires ou les diagrammes mettant en relief les critères retenus en analyse plastique à savoir les critères de Von Mises et Tresca.

Pour le cas présent, les variables en question sont les charges horizontales et les charges verticales qui ne sont pas complètement indépendantes mais sont prises, pour des soucis de simplicité, comme étant proportionnelles. Leurs interaction et en fonction de $\alpha$ agit directement sur la nature des mécanismes de ruine développés, et cette nature est mieux explicitée graphiquement.

**4-3 Représentation graphique :**

**4-3-1 Introduction :**

La représentation graphique de l'interaction (V-H) a deux possibilités pour le choix du système de coordonnées le premier est de prendre directement $\lambda$ H en abscisse et $\lambda$ V en ordonnée et le second est d'opter pour un système de coordonnées adimensionnelles à savoir $Hh/M_{pc}$ en abscisse et $Vl/M_{pb}$ en ordonnée. Ce dernier système est praticable pour discerner

les effets du changement de l'ensemble des paramètres (H, h, V, l, $M_{pb}$ et $M_{pc}$) pour de différentes valeurs.

**4-3-2 Développement graphique :**

Le développement concerne l'ensemble des portiques testés. Le premier est de trois niveaux et trois travées, le deuxième est de trois niveaux et quatre travées et le dernier est de quatre niveaux et trois travées, ce pour une seule combinaison de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$ les graphes sont représentés sur les figures .

**4-3-3 Discussion des résultats :**

Le développement graphique a été réalisé pour des valeurs de $\alpha$ allant de 0 à 200 et ce pour la combinaison retenue de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$, les graphes sont représentés dans les figures pour chacun le portiques temoin.

Il ressort de la construction des trois diagrammes d'interaction (un pour chaque combinaison de charge) ce qui suit :

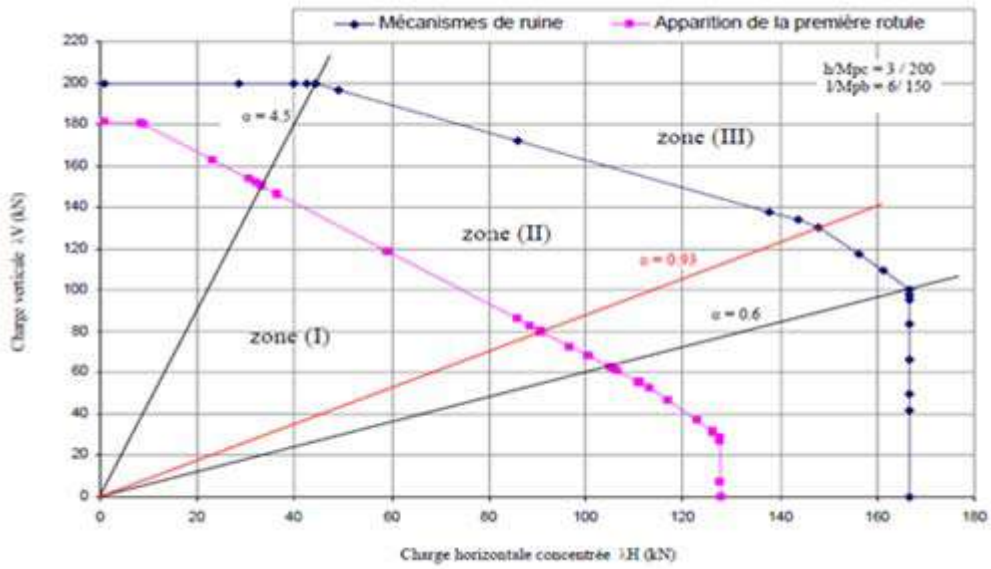



**Figure.4-1 : Diagramme d'interaction pour le système de coordonnées $\lambda V - \Lambda H$ : Cas du P 3 N 3 T (portique de base )**

- La première courbe à son tour représente graphiquement les combinaisons de charges qui engendrent l'apparition de la première rotule plastique dans le portique témoin testé.
- Il y'a une forte similitude avec les diagrammes d'interaction développés pour un « Single bay –single storey frame » et pour un portique « Single bay –tow storey frame » réalisées par Boukeloua avec trois parties distinctes de la courbe enveloppe.

**a- Partie№.1**

$\lambda$H semblent constant tendance de « Sway mechanism » la charge horizontale est prépondérante.

**P 3N 3T:**

- Pour $\alpha \leq 0.60$ tendance de « total first and second story sway mechanism ».

**b- Partie№.2**

Partie inclinée représentante des tendances des « combined mechanism » d'où la contribution des charges verticales et horizontales à la formation des mécanismes de ruine est prépondérante.

- Pour $\alpha \in ]0.93 - 0.6[$ tendance de « total lower storey combined mechanism » avec un « total second storey sway mechanism ».
- Pour $\alpha = 0.93$ tendance de « total second storey sway mechanism » avec « total combined mechanism »

- Pour $\alpha \in ]\ 0.93 - 4.5\ [$ tendance de « double combined mechanism ».

**c- Partie№3**

$\lambda V$ a des valeurs plus au moins constantes, l'étendue de cette partie dépend essentiellement de $\alpha$ dont la charge verticale est prépondérante et pour une combinaison de l/Mpb ; h/Mpc considérée constante, d'où l'importance de ces deux paramètres par rapport aux valeurs des charges de ruine et des mécanismes de ruine développés.

- Pour $\alpha \geq 4.5$ tendance de «beam mechanism» au niveau de chaque poutre.
- Pour $\alpha \geq 7.49$ tendance de «beam mechanism» au niveau de chaque poutre.

**5-4 Synthèse**

A la suite de ce qui a été développé au paragraphe où les différents mécanismes ont été traité dans le détail et ce qui a été développé dans le paragraphe avant avec les différents développements graphiques pour les trois portiques témoins, il ressort qu'effectivement que le paramètre le plus influent est le rapport $\alpha$ pour une combinaison donnée de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$.

Ces diagrammes d'interaction présentent une forte similitude avec ceux des portiques simples (un niveau et une travée) et ceux des portiques de deux niveaux et une travée réalisés par Boukeloua [2] :

a- Partie №1 : tendance de « Sway mechanism » dont la charge horizontale est prépondérante. cette partie est nettement similaire pour les trois portiques témoins ainsi que le portique simple (un niveau et une travée) et le portique de deux niveaux et une travée représentés dans le chapitre 2.

b- Partie №2 : Partie inclinée représentante des tendances (chaque tendance représente une inclinaison) des « combined mechanism ». la similitude est relativement semblable des trois portiques testés avec ceux des portiques simples (un niveau et une travée) et ceux des portiques de deux niveaux et une travée décrits dans le chapitre 2. Il est constaté que le **P 3N 3T** a deux inclinaisons .

c- Partie №3 : tendance de « beam mechanism » dont la charge verticale est prépondérante. cette partie est édifiante pour les trois portiques témoins ainsi que le portique simple (un niveau et une travée) et relativement similaire avec le portique de deux niveaux et une travée représentés dans le chapitre 2.

A partir des diagrammes d'interaction, la détermination des mécanismes de ruine est très possible, elle est liée directement à la relation entre les deux charges $\lambda V$ et $\lambda H$ présentées sur les diagrammes d'interaction en fonction de $\alpha$.

Le rapport $\alpha = \lambda V / \lambda H$ agit directement sur les charges de ruine et les mécanismes développés.

La partie inclinée qui représentante des tendances des « combined mechanism » est liée directement avec le nombre de niveaux d'un portique à l'autre, c'est-à-dire, chaque rajout d'un niveau va faire créé à son toure une nouvelle tendance des « combined mechanism ».
Il est clair que ce diagramme d'interaction est divisé en trois zones:

- zone (I) : représente les combinaisons de charges ( $\lambda$ V et $\lambda$ H) sécuritaires, c'est-àdire, le comportement des sections critiques est parfaitement élastique
- zone (II) : représente les combinaisons de charges ( $\lambda$ V et $\lambda$ H) qui participe à la formation d'un nombre de rotules plastiques inférieur à celui qui cause la ruine
- zone (III) : représente les combinaisons de charges inacceptables.

# CHAPITRE 5

# CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

## 5- CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES :

### 5-1 Conclusions :

Les résultats obtenus étaient dispersés et ceci pouvant s'expliquer par le fait que les moments plastiques $M_{pb}$ et $M_{pc}$ étaient restés constants quelque soit la portée des poutres et la hauteur des poteaux, d'où, pour certains cas, une incohérence du point de vue pré dimensionnement. A notre sens, les variations utiles doivent concerner les rapports $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$ et qui permettent une représentation des diagrammes d'interaction avec un système de coordonnées adimensionnelles à savoir $Vl/M_{pb}$ et $Hh/M_{pc}$.

Avec cette étude et cette approche les principales conclusions tirées se résument ainsi :

i)- La troisième condition celle de mécanisme (développement de n rotules plastiques où n=r+1 pour que la structure se transforme en un mécanisme), en conformité avec les trois théorèmes fondamentaux de l'analyse plastique des structures, n'est pas impérativement satisfaite pour les portiques à plus d'une travée et plus d'un niveau.

ii)- Le rapport $\alpha=\lambda V/\lambda H$ agit directement sur l'ordre de formation et l'emplacement des rotules plastiques, ainsi que sur les charges de ruine et la nature des mécanismes développés. La variation de ce rapport pour chacune des combinaisons $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$ a donné naissance à trois modes de ruine du portique témoin pour trois intervalles différents de $\alpha$. Le portique témoin se transforme en un « sway mechanism» pour des petites valeurs de $\alpha$ (charges horizontales prépondérantes), en « beam mechanism» pour des valeurs plus grandes de $\alpha$ (charge verticales prépondérantes), et en « combined mechanism » pour des valeurs intermédiaires de $\alpha$. L'étendue de chaque intervalle est directement liée à la combinaison $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$.

iii)- La construction des diagrammes d'interaction pour des structures multi-étagés n'est pas prévue dans la littérature. Ce qui a été réalisé dans la présente thèse est encouragent a plus d'un titre car des explications ont été trouvées pour l'ensemble des cas singuliers et plus particulièrement pour des valeurs ''tampons'' de $\alpha$ vis-à-vis de la nature des mécanismes développés ainsi que du nombre effectif de rotules plastiques développés. La similitude des diagrammes d'interaction du portique témoin « Double storey-single bay » avec le portique simple « Single bay single storey » est édifiante.

**5-2 Perspectives :**

Le présent thème peut être développé dans plusieurs directions et à notre sens, il y a lieu de commencer par affiner et compléter ce qui a été réalisé dans le cadre de l'accomplissement de la présente thèse en :

i)- Faire augmenter le nombre de combinaisons de $l/M_{pb}$ et $h/M_{pc}$.

ii)- Apporter des changements au portique témoin en rapportant 1 ou plusieurs niveau ou en rajoutant 1 ou plusieurs travées.

iii)- Changer la nature du chargement verticale par deux ou plusieurs charges simulant un chargement de charge réparties uniformément.

iv)- Etablir une relation de l'étendue de chaque intervalle de α pour les différentes mécanismes de ruine en étudiant un nombre plus important de portique pour les valeurs tampons de α ( valeurs où des « over collapse » ont lieu c'est-à-dire là où deux mécanismes ont lieu simultanément « Beam machanism » avec « combined mechanism » ou « Sway mechanism and combined mechanism » ou aussi des « joint rotation mechanism » sont combinés avec certains des mécanismes élémentaires .

# RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

## RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1]. BEROUAL. S, " caractérisation des sections en BA équivalents a la gamme des profilés IPE en utilisant la caractéristique des Matériaux adoptés par les Eurocodes 2 et 3". Thèse de Magister. Université de Skikda. Algérie (2008).

[2]. BOUKELOUA S. "Etude des mécanismes de ruine pour des structures multiétagées" Thèse de Magister. Université de Skikda. Algérie (2008).

[3]. BOUKHLOUF. B, CHARIF .A.H, "Analyse élasto-plastique des structures planes par la méthode des rotules plastiques". Thèse de Magister. Université de Batna. Algérie.

[4]. BOUSSAFEL S. "Analyse plastique d'éléments structuraux rectilignes en béton armé et en charpente métallique - Etude comparative". Thèse de Magister. Université de Constantine. Algérie (2003).

[5]. HORNE Plastic Theory Of Structures 2nd Edition in SI/Metric Units university of Manchester, England (1979)

[6]. JEAN COURBON, Plasticité appliquée au calcul des structures (1976) [7]. MOSLEY W.H, HULSE R, BUNGEY J.H. "Reinforced concrete design to Eurocode 2". Eurocode 2. EDITIONS ROWE LTD CHIPPENHAM WILTS. Londres. Grande-Bretagne (1996).

[8]. SAMAI M. L. "Analyse plastique des structures". Notes des cours de postgraduation. Université de Constantine. Algérie (2007).

[9]. STUART S, MOY J, Plastic Methods for Steel and Concrete Structures (1996).