

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

Institut de Génie Civil, d'Hydraulique et d'Architecture

Université Hadj Lakhdar de Batna

Département de Génie Civil



Mémoire

Présenté pour l'Obtention du diplôme de
Magister en Génie Civil

Option : Construction en zone sismique

Présenté par : **MERAZKA Bouzid**

Thème

CONTRIBUTION A L'ANALYSE PLASTIQUE DES STRUCTURES

Membres du Jury de Soutenance

Président : ZIDANI Kamel

Professeur Université de Batna

Rapporteur : BOUZID Tayeb

M.CA Université de Batna

Examineur : ZEDIRA Hamma

Professeur Université de Khenchla

Examineur : LAHBARI Nouredine

M.CA Université de Batna

29 Mai 2014

REMERCIEMENTS

« Je remercie en premier Dieu pour tout.

Je remercie en second mes parents, qui ont sacrifiés
leur vie pour notre bien.

En fin, mes sincères reconnaissances et gratitudes à tous
mes enseignants, et en particulier le :

1^{er} encadreur de ce mémoire Mr : DEMAHQ Kamel,
M.CA à l'université de BATNA et le

2^{ème} encadreur de ce mémoire Mr : BOUZID Tayeb,
M.CA à l'université de BATNA

Je remercie également le président et les membres de
jury d'avoir accepté et d'examiner mon travail. »

DEDICACES

« Je dédie ce modeste travail :

*à toute la famille, mon père, ma mère et mes frères et
sœurs, personne qui m'encourage toujours, à toute les
amis proches et à tous personne ayant contribué à ce
travail de près ou de loin.»*

RESUME

Le présent mémoire a pour objet de déterminer les mécanismes de ruine et les charges de ruine des structures en acier, la détermination du vrai mécanisme peut se faire par les différentes méthodes existantes dans l'analyse plastique des structures, à savoir la méthode d'analyse plastique manuelles basés sur les théorèmes fondamentaux et l'analyse plastique par le moyen de logiciels, pour notre cas le SAP2000.

Pour cette étude on choisit quatre portiques, un portique à un niveau et une travée dénommé (1N-1T). Un portique à un niveau et trois travées (1N-3T) qui devra faire ressortir l'effet du rajout de deux travées sur les mécanismes de ruines et les charges de ruine. Un troisième portique à trois niveaux et trois travées (3N-3T) qui devra faire ressortir l'effet du rajout de deux niveaux et un quatrième portique à cinq niveaux et trois travées (5N-3T) qui va faire ressortir l'effet du rajout de plusieurs niveaux sur les mécanismes de ruine et les charges de ruine. Une deuxième étape sera consacré en suite a la variation de la section du profilé des poteaux pour voir son effet sur les charges horizontales de ruine.

Les portiques choisis, sont dimensionnés en élasticité sous les charges verticales V (charge permanentes et charge d'exploitations) appliquées au milieu des travées des poutres et les charges horizontales H appliquées au niveau des jonctions poteaux-poutres qui sont déterminées au préalable par la méthode modale spectrale basée sur le Règlement Parasismique Algérien (RPA 2003). Les portiques sont situés en zone de moyenne sismicité (zone IIA) avec un site meuble de type S3.

Finalement, des comparaisons ont été faites entre les charges horizontales déterminées par l'analyse élastique (l'analyse modale) avec les charges horizontales déterminées par l'analyse plastique afin de déterminer la vrai marge de sécurité d'une structure, d'une part, et d'autre part de comparer les résultats obtenue par l'analyse limite manuelle avec les résultats obtenue par logiciel SAP2000.

Les résultats ainsi obtenus tenant compte des différents paramètres et pour les différents cas énumérés ci-dessus présentent un très bon agrément entre eux. Toutefois, les résultats obtenus en élasticité peuvent être considérés comme convenable même si la structure rentre en phase plastique et même aussi si on est dans une zone supérieure.

ABSTRACT

The present memory has for object to determination of the collapse mechanisms and collapse loads for steel structure, the determination of the true mechanism may be through various existing methods in plastic structural analysis, namely manual analysis method based on fundamental theorems plastic and plastic analysis by means of the software, in our case the SAP2000.

For this study, we selected four frames, a frame with a level and a span called (1N-1T). A frame with a level and three spans (1N-3T) which will bring out the effect of the addition of two spans on the collapse mechanisms and collapse loads. A third frame with three levels and three spans (3N-3T) which will bring out the effect of addition of two levels and a fourth frame with five levels and three spans (5N-3T) which will bring out the effect of addition several levels on the collapse mechanisms and collapse loads. A second step will devote following the variation of the profile section of the column to see its effect on the horizontal loads of ruin.

The frames was chosen, are dimensioned in elasticity under vertical loads V (dead load and live load) applied at mid spans and horizontal loads H applied at junctions column-beams, which are determined in advance by the modal spectral method based on the Algerian Earthquake Regulations (RPA 2003), the frames are located in areas of average seismicity (area IIA) with loose site S3.

Finally, comparisons are made between the horizontal loads determined by elastic analysis (modal analysis) with the horizontal loads determined by the plastic analysis in the end determined the true safety margin of a structure, on the one hand , and on the other hand comparing the results obtained by the manual limit analysis with the results obtained by software SAP2000.

The results obtained taking into account different parameters and different cases listed above have a very good agreement between them. However, the results obtained in elasticity may be considered as suitable even if the structure falls in the plastic phase and also even if it is in an upper area.

TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ii
DEDICACE	iii
RESUME	iv
ABSTRACT.....	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS	ix
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
1. INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 INTRODUCTION	2
1.2 PROBLEMATIQUE	3
1.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE	3
1.4 STRUCTURATION DE LA THESE	4
1.5 RECHERCHES ANTERIEURES	4
2. METHODES D'ANALYSE PLASTIQUE	6
2.1 INTRODUCTION	7
2.2 CALCUL PLASTIQUE	7
2.2.1 Notion	7
2.2.2 Mécanisme de ruine et rotule plastique	8
2.2.3 Redistribution des efforts dans les structures hyperstatiques	10
2.2.4 Classes de sections et résistance ultime	12
2.3 METHODE DE L'EQUILIBRE ULTIME	12
2.3.1 Hypothèses de base	12
2.3.2 Théorèmes fondamentaux	14
2.3.2.1 Théorème cinématique	14
2.3.2.2 Théorème statique	14
2.3.2.3 Théorème d'unicité	15
2.3.3 Méthode par combinaisons de mécanismes	16
2.3.4 Méthode des charges concentrées équivalentes	18
2.4 METHODE PAS A PAS	22
3. MECANISMES DE RUINE ET CHARGES DE RUINE	27
3.1 INTRODUCTION	28
3.2 PORTIQUE A UN NIVEAU UNE TRAVEE (1N-1T)	28
3.3 PORTIQUE A UN NIVEAU TROIS TRAVEES (1N-3T)	33
3.4 PORTIQUE A TROIS NIVEAUX TROIS TRAVEES (3N-3T)	39
3.5 PORTIQUE A CINQ NIVEAUX TROIS TRAVEES (5N-3T)	57
3.6 PORTIQUE A N NIVEAUX M TRAVEES (nN-mT)	60

4. INTERPRETATION DES RESULTATS	61
4.1 INTRODUCTION	62
4.2 PORTIQUE A UN NIVEAU UNE TRAVEE (1N-1T)	62
4.2.1 Dimensionnement de portique	63
4.2.2 Détermination des charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ par l'analyse plastique	63
4.2.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{\text{plastique}}$	64
4.2.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{\text{plastique}}$	64
4.3 PORTIQUE A UN NIVEAU TROIS TRAVEES (1N-3T)	65
4.3.1 Dimensionnement de portique	66
4.3.2 Détermination des charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ par l'analyse plastique	66
4.3.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{\text{plastique}}$	67
4.3.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{\text{plastique}}$	67
4.4 PORTIQUE A TROIS NIVEAUX TROIS TRAVEES (3N-3T)	69
4.4.1 Dimensionnement de portique	70
4.4.2 Détermination des charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ par l'analyse plastique	70
4.4.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{\text{plastique}}$	71
4.4.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{\text{plastique}}$	71
4.5 PORTIQUE A CINQ NIVEAUX TROIS TRAVEES (5N-3T)	73
4.5.1 Dimensionnement de portique	74
4.5.2 Détermination des charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ par l'analyse plastique	74
4.5.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{\text{plastique}}$	75
4.5.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{\text{plastique}}$	75
5. CONCLUSION	77

ANNEXE A	79
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	89

LISTE DES NOTATIONS ET ABREVIATIONS

A	Section totale d'un profilé en charpente métallique
b	Largeur du profilé en charpente métallique
E	Module d'élasticité longitudinal de l'acier (module de Young)
f_y	Résistance caractéristique d'écoulement des aciers
G	Charge permanente
h	Hauteur d'étage
h	Hauteur totale de la section d'un profilé en charpente métallique
H	Charge concentrée horizontale
H_i	Charge concentrée horizontale au niveau i
I	Moment d'inertie de la section totale.
I_y	Moment d'inertie de la section totale par rapport à l'axe Y
I_z	Moment d'inertie de la section totale par rapport à l'axe Z
j	Nombre de rotules mécaniques
k	Nombre de barres
K	Rigidité ; facteur de forme
L	Portée de la poutre
m	Nombre de travée
M	Moment fléchissant
M_{el}	Moment élastique de la section
M_{pb}	Le moment de plastification de la poutre
M_{pc}	Le moment de plastification du poteau
M_{pl}	Moment plastique de la section
M_u	Moment ultime d'une section
N	Effort normal
n	Nombre de rotule plastique
n	Nombre d'étage
P	Charge concentrée
P_c	Charge de ruine
P_e	Charge à la limite élastique
P_r	Charge à la limite de rupture
Q	Charge d'exploitation
q_c	Charge uniformément répartie de ruine
r	Nombre de redondance ou degré d'hyperstaticité
S	Moment statique de la moitié de la section
t_f	Epaisseur de la semelle du profilé IPE

t_w	Epaisseur de l'âme du profilé IPE
$T(x)$	Effort tranchant dans la section à une distance (x)
V	Charge concentrée verticale
V_e	Charge concentrée verticale d'étage courant
V_t	Charge concentrée verticale de terrasse
V	Demi-hauteur du profilé en charpente métallique
W_{el}	Module élastique
W_{pl}	Module plastique
x	Profondeur de l'axe neutre
α	Coefficient sans dimension
ε_y	Déformation limite d'écoulement de l'acier
ε_u	Allongement à la rupture
ε_z	Allongement de striction
σ_e	Contrainte limite d'écoulement des aciers
Φ	Rotation plastique
χ_e	Courbure élastique de la déformée
χ_r	Courbure de rupture de la déformée
χ_u	Courbure ultime de la déformée
C.M	Charpente Métallique
E.L.U	Etat limite ultime
E.L.S	Etat limite de service
ml	Mètre linéaire
1N-1T	Portique à un niveau et une travée
1N-3T	Portique à un niveau et trois travées
3N-3T	Portique à trois niveaux et trois travées
5N-3T	Portique à cinq niveaux et trois travées

LISTE DES FIGURES

Figure (2.1) : Distribution élastique	8
Figure (2.2) : Distribution élasto-plastique	8
Figure (2.3) : Distribution plastique	8
Figure (2.4) : Phase élastique	9
Figure (2.5) : Phase plastique	9
Figure (2.6) : Mécanisme de ruine	10
Figure (2.7) : Comportement des sections suivant la classification de l'Eurocode 3	11
Figure (2.8) : Diagramme moment - courbure	11
Figure (2.9) : Diagramme moment - courbure	12
Figure (2.10) : Diagramme moment - courbure	13
Figure (2.11) : Diagramme charge - moment	15
Figure (2.12) : Portique à deux niveaux et deux travées	16
Figure (2.13) : Mécanisme de poutre	17
Figure (2.14) : Mécanisme de panneau	17
Figure (2.15) : Mécanisme de nœud	17
Figure (2.16) : Diagramme de moment	19
Figure (2.17) : Diagrammes des moments	20
Figure (2.18) : Portique à un niveau et une travée	23
Figure (2.19) : Détermination du mécanisme de ruine d'un portique simple par la méthode « pas à pas »	25
Figure (2.20) : Courbe facteur de charge λ en fonction du déplacement horizontal d du portique simple	26
Figure (3.1) : Caractéristique de portique	29
Figure (3.2) : Mécanisme de poutre	29
Figure (3.3) : Détail 1 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	30
Figure (3.4) : Mécanisme de panneau	30
Figure (3.5) : Détail 2 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	31
Figure (3.6) : Mécanisme de portique	31
Figure (3.7) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	32
Figure (3.8) : Caractéristique de portique	33
Figure (3.9) : Mécanisme de poutre	34
Figure (3.10) : Détail 1 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	34
Figure (3.11) : Mécanisme de panneau	35
Figure (3.12) : Détail 2 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	35
Figure (3.13) : Mécanisme de joint	36
Figure (3.14) : Mécanisme 6 : 4+1	36
Figure (3.15) : Mécanisme 7 : 6+2+5	37
Figure (3.16) : Mécanisme de portique 8 : 7+3+5	38
Figure (3.17) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	38

Figure (3.18) : Caractéristique de portique	39
Figure (3.19) : Mécanisme de poutre	40
Figure (3.20) : Détail 1 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	41
Figure (3.21) : Mécanisme de panneau 3 ^{ème} niveau	42
Figure (3.22) : Détail 2 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	42
Figure (3.23) : Mécanisme de panneau 2 ^{ème} niveau	43
Figure (3.24) : Mécanisme de panneau 1 ^{er} niveau	44
Figure (3.25) : Mécanisme de joint	44
Figure (3.26) : Mécanisme 14 : 10+11+13	45
Figure (3.27) : Mécanisme 15 : 12+13+14	47
Figure (3.28) : Mécanisme 15 : 15+1	48
Figure (3.29) : Mécanisme 17 : 16+2	49
Figure (3.30) : Mécanisme 18 : 17+3	50
Figure (3.31) : Mécanisme 19 : 18+4	51
Figure (3.32) : Mécanisme 20 : 19+5	52
Figure (3.33) : Mécanisme 21 : 20+6	53
Figure (3.34) : Mécanisme 22 : 21+7	54
Figure (3.35) : Mécanisme 23 : 22+8+13	55
Figure (3.36) : Mécanisme 24 : 23+9+13	56
Figure (3.37) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	57
Figure (3.38) : Caractéristique de portique	58
Figure (3.39) : Mécanisme 40	59
Figure (3.40) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)	60
Figure (4.1) : Caractéristique de portique 1N-1T	62
Figure (4.2) : Caractéristique de portique 1N-3T	65
Figure (4.3) : Caractéristique de portique 3N-3T	69
Figure (4.4) : Caractéristique de portique 5N-3T	73

LISTE DES TABLEAUX

Tableau (2.1) : Classification des sections	12
Tableau (4.1) : Dimensionnement de portique	63
Tableau (4.2) : Charges horizontales $H_{\text{plastique}}$	63
Tableau (4.3) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{\text{plastique}}$	64
Tableau (4.4) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{\text{plastique}}$	65
Tableau (4.5) : Dimensionnement de portique	66
Tableau (4.6) : Charges horizontales $H_{\text{plastique}}$	66
Tableau (4.7) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{\text{plastique}}$	67
Tableau (4.8) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{\text{plastique}}$	68
Tableau (4.9) : Dimensionnement de portique	70
Tableau (4.10) : Charges horizontales $H_{\text{plastique}}$	70
Tableau (4.11) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{\text{plastique}}$	71
Tableau (4.12) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{\text{plastique}}$	72
Tableau (4.13) : Dimensionnement de portique	74
Tableau (4.14) : Charges horizontales $H_{\text{plastique}}$	74
Tableau (4.15) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{\text{plastique}}$	75
Tableau (4.16) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{\text{plastique}}$	76

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

1.1 INTRODUCTION

Jusqu'ici, on a essentiellement appris à calculer les éléments structuraux selon la méthode élastique, supposant que le milieu était continu et que le matériau obéissait à la loi de Hooke. L'hypothèse de linéarisation matérielle s'est développée dans la théorie de l'élasticité issue des travaux de Cauchy (1822). Elle a été amenée à un grand degré de perfection durant deux siècles environ de recherches. Ceci a permis aujourd'hui de résoudre, grâce aux méthodes numériques de discrétisation (éléments finis), les problèmes très complexes.

Mais le reproche fait à cette théorie est d'être basée sur une loi (droite brisée) qui ne représente absolument pas le comportement réel du matériau pour autant qu'il soit ductile, même faiblement- au-delà du domaine élastique borné par la limite d'élasticité σ_e . Selon le dimensionnement élastique, la ruine d'une structure serait atteinte dès qu'en un point quelconque, la contrainte de compression maximale atteint σ_e ($\sigma_{\max} = \sigma_e$).

Par ailleurs, cette méthode néglige la capacité d'adaptation élasto-plastique des matériaux ductiles que l'expérience montre être très importante et d'ailleurs très variable d'un matériau et d'une structure à l'autre. Elle est actuellement jugée très insuffisante pour mesurer avec précision la résistance ultime des structures employées en Génie Civil et, par suite, leur *degré réel de sécurité*.

La théorie de la plasticité, dont les premiers progrès importants datent de 1925 est basée sur le milieu continu et le modèle élastique parfaitement plastique. Ce dernier est caractérisé par le palier indéfini de plasticité et le déchargement élastique. Aucun matériau ductile de construction n'obéit rigoureusement à ce modèle ; les aciers au carbone (aciers doux et faiblement alliés) s'en approchent assez fortement (palier étendu, mais comportement discontinu dans ce palier, suivi d'une zone d'écrouissage), tandis que les autres matériaux de construction (aciers alliés, alliages d'aluminium, béton) présentent un comportement plus complexe (absence de palier) [1].

Néanmoins, ce modèle est bien meilleur que le modèle élastique. Il permet de prédire l'extension progressive des zones plastifiées dans une structure soumise des charges croissantes et aussi, ce qui est d'un grand intérêt, la charge de ruine ou d'effondrement, dite charge limite, de cette structure. A cet effet le concept *d'analyse limite* a été introduit et qui présente en fait la partie de la théorie de la plasticité vouée au calcul des charges limites.

Le succès de la méthode plastique va en grandissant non seulement les calculs ne sont pas plus compliqués qu'en méthode élastique (ils peuvent être plus simples), mais

aussi concordent fort bien avec les expériences menées jusqu'à la ruine sur des structures réelles [1].

1.2 PROBLEMATIQUE

La détermination de la charge de ruine pour les structures simples (poutre simplement appuyée, poutre encastree à une extrémité et libre de l'autre, poutre continue) est relativement facile et les modes de ruine sont complètement identifiables.

Pour les structures en portiques à un niveau ou plusieurs soumis à des combinaisons de charges horizontales et verticales, les charges de ruine ainsi que les mécanismes de ruine sont établis à partir de série de combinaison d'un grand nombre de mécanismes élémentaires. La détermination de la marge de sécurité réelle d'une structure peut être obtenue par une comparaison des charges horizontales obtenues par l'analyse plastique avec des charges de dimensionnement en élasticité. Ceci aura pour but essentiel de vérifier a posteriori une structure mal dimensionnée en élasticité ou ayant changée de destination (utilisation) ou changement de zone et ainsi observer son comportement en plasticité avant ou après un séisme.

Les charges de ruine obtenue par l'analyse plastique sont différentes aux charges calculées par le logiciel SAP2000. Ceci étant du au fait les deux méthodes n'utilisent pas le diagramme du matériau de la même manière. Pour l'analyse deux paramètres ont été utilisé à savoir le nombre de niveaux et le nombre de travées. Il est également question de la variation des sections des profilés des poteaux pour vérifier la période fondamentale et ainsi les mécanismes de rupture.

1.3 OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

Les objectifs assignés à la présente thèse peuvent être classés comme suit :

- Prendre des structures en portique soumises à des combinaisons des charges verticales et horizontales (les charges verticales sont appliquées au milieu de travées et les charges horizontales au niveau des jonctions poutres-poteaux pour les niveaux) en faisant varier le nombre de niveaux et de travées.
- Dimensionner les différents portiques en élasticité, en utilisant le règlement Eurocode 3.
- Faire une analyse plastique complète pour déterminer les mécanismes de ruine et charges de ruine pour les différents portiques.
- Etudier les effets du rajout des travées et ceux du rajout des niveaux au portique et faire ainsi l'analyse pour la détermination des charges de ruine et les mécanismes de ruine.

- Varier les sections de profilés de poteau pour avoir une idée sur l'influence de la variation de la section de profil de poteau sur les mécanismes de ruine et les charges de ruine.
- Déterminer les charges horizontales de différents portiques par la méthode modale et les comparer par les charges horizontales de ruine établie par la méthode d'analyse plastique.
- Déterminer les charges de ruine par le logiciel SAP2000 pour les différents portiques pour le début de plastification des sections et la plastification totale de rotule plastique. Une comparaison est ensuite faite entre les résultants de SAP2000 avec les résultats de l'analyse plastique.

1.4 STRUCTURATION DE LA THESE

La thèse se divise en cinq chapitres et une annexe.

- Le premier chapitre est réservé pour l'introduction générale avec une problématique mettant en exergue l'intérêt du calcul plastique des structures.
- Le deuxième chapitre constitue la base théorique de la thèse concernant les différentes méthodes d'analyse plastique.
- Le troisième chapitre présente le calcul des charges de ruine et les mécanismes de ruine de différents portiques.
- Le quatrième chapitre est réservé pour analyser les résultats et pour voir l'influence de différent paramètre.
- Le dernier chapitre est réservé à la conclusion.

Dans l'annexe, on présente le dimensionnement des portiques et la détermination des charges latérale modale.

1.5 RECHERCHES ANTERIEURES

Bien que de nouvelles idées sont apparues dans le 18 e siècle, analyse limite est de date plus récente. Ses origines sont liées à Kazincy (1914), qui a calculé la charge de rupture dans les poutres encastées et confirmé expérimentalement. Un concept similaire a été proposé à la fois par Kist (1917) et Gruning (1926). Mais les premières œuvres de ce domaine étaient principalement basées sur l'intuition de génie. Bien que le théorème statique a d'abord été proposé par Kist (1917), comme un axiome intuitive, il est toujours considéré que les fondamentaux des théorèmes d'analyse limite ont d'abord été présentés par Gvozdev en 1936. Dans le même temps, une preuve formelle de théorèmes liés pour des poutres et des trames a été donnée par Horne (1949), et par Greenberg et Prager (1951). Généralisations pour les organismes de moins arbitraires triaxiale états de contraintes (Drucker, Prager et Greenberg, 1952). L'analyse cinématique régularisée, qui

sera évoquée plus loin, s'appuie de plus sur les travaux de Moreau (1966) et Nayrolles (1970).

La grande différence entre l'analyse limite et l'analyse d'équilibre limite réside dans la prise en compte de la cinématique des déformations dans l'analyse de la rupture. L'analyse des déformations permet d'une part de raisonner en termes de travail des forces internes et externes, et plus seulement en termes d'équilibres de forces, et d'autre part de tenir compte directement des conditions aux limites sur les déplacements. L'analyse limite admet que les sols et autres matériaux ont un comportement élastique (ou rigide) parfaitement plastique, avec une loi d'écoulement plastique associée. Notons que cette loi d'écoulement plastique associée n'est en fait utilisée que pour calculer les puissances virtuelles de la déformation du matériau à l'état limite de contraintes, ce qui est aussi la base du calcul à la rupture (Salençon, 1996). Des présentations détaillées en ont été données par Salençon (1974, 1983, 1996), Chen (1975) et Christiansen (1996). Deux théorèmes limites ont été établis, qui définissent deux approches des charges limites par valeurs supérieures et par valeurs inférieures.

La possibilité de plus la conception structurelle de l'économie basée sur l'analyse de limite structurelle a été d'attirer l'attention des ingénieurs de conception pour les années et les premières œuvres avec des constructions simples apparu il ya 60 ans. A côté de la possibilité d'accepter une charge plus élevée, l'analyse de limite s'est avéré être beaucoup plus facile pour le travail que l'analyse élastique classique.

CHAPITRE 2

METHODES D'ANALYSE PLASTIQUE

METHODES D'ANALYSE PLASTIQUE

2.1 INTRODUCTION

Ce deuxième chapitre présente les bases du calcul plastique des structures. Il se limite aux structures planes et n'aborde que les aspects liés à la mécanique des structures, soit, principalement, la plastification des sections et les théorèmes fondamentaux de l'analyse limite. L'étude plastique des ossatures (méthode par combinaison de mécanismes, etc.) relève de la théorie des structures. De plus, seule la théorie plastique simple est abordée (hypothèse de linéarisation géométrique).

La théorie de la plasticité et de l'analyse limite a été développée intensivement en Grande Bretagne sous l'impulsion du Professeur John Baker (Université de Cambridge), dès 1938 [1], pour être appliqué aux charpentes métalliques. Elle a ensuite trouvé un domaine d'utilisation beaucoup plus vaste (acier, béton armé et précontraint, alliages d'aluminium). Aussi, elle donne une vue largement plus réaliste du comportement des structures à la ruine et du degré de sécurité réel que la théorie élastique. Elle conduit également à un dimensionnement plus économique et à des calculs souvent plus simples. Alors qu'elle convient idéalement à l'acier, c'est encore dans les structures en béton armé et précontraint qu'elle trouve le plus d'applications concrètes. La plasticité permet d'évaluer avec sûreté l'état limite ultime d'une construction, au sens de la méthode semi-probabiliste de la sécurité.

2.2 CALCUL PLASTIQUE

2.2.1 Notion

Le comportement mécanique de l'acier n'est pas infiniment linéaire. La relation contrainte - déformation d'un matériau idéal, élastique - parfaitement plastique ; ainsi il s'ensuit que la loi de Hooke est limitée aux valeurs des contraintes f_y (f_y étant la limite élastique du matériau). Au-delà de cette valeur, le matériau s'écoule plastiquement à contrainte constante $\sigma = f_y$. Si la contrainte diminue en un point quelconque du domaine plastique, le chemin de retour est une droite parallèle à la loi de Hooke dont la pente est égale au module d'élasticité E . A la fois E et f_y , mais aussi l'ensemble de la courbe contrainte-déformation, sont supposés identiques en traction et en compression.

Considérons une poutre isostatique soumise à une charge uniformément répartie q .

La section médiane, la plus sollicitée, est soumise à un moment égal à $ql^2/8$

Dans un premier temps, la répartition des contraintes normales est linéaire (hypothèse de Navier-Bernouilli). Nous sommes dans la phase élastique du comportement du matériau (figure 2.1).

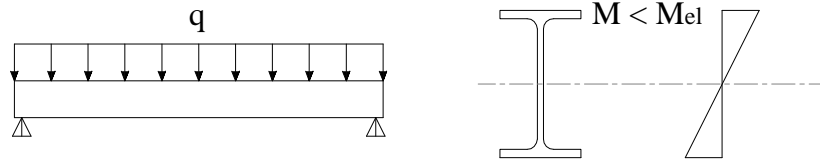


Figure (2.1) : Distribution élastique

Lorsque les contraintes sur les fibres extrêmes atteignent la limite élastique f_y , le moment fléchissant sollicitant la section médiane est égale au moment élastique M_{el} . Si on augmente la charge, les contraintes ne sont plus proportionnelles aux déformations. Les fibres extrêmes se plastifient (figure 2.2).

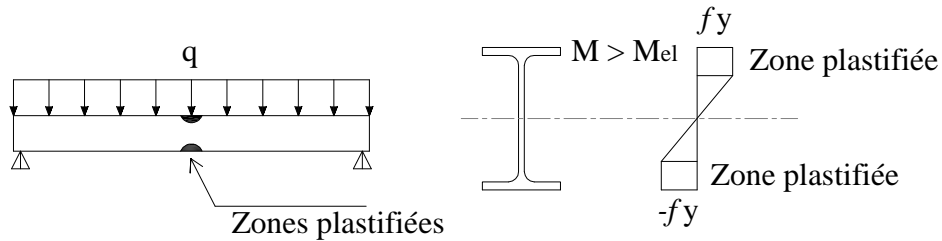


Figure (2.2) : Distribution élasto-plastique

On peut augmenter la charge jusqu'à ce que la section médiane soit entièrement plastifiée. C'est-à-dire que le moment fléchissant soit égal au moment plastique M_{pl} . La courbure de la poutre est très importante dans la zone centrale de la poutre qui est plastifiée. On admet qu'il se forme, dans la section médiane, une rotule plastique (ou articulation). La poutre se comporte comme deux éléments rigides reliés par une articulation. On dit qu'il y a plastification totale.

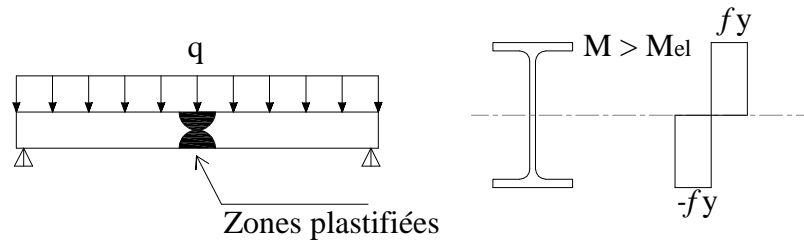


Figure (2.3) : Distribution plastique

2.2.2 Mécanisme de ruine et rotule plastique

Considérons une poutre bi-encastree d'inertie constante, soumise à une charge uniformément répartie q (figure 2.4).

Dans un premier temps, la poutre a un comportement élastique. On peut écrire :

$$\text{Moment à l'encastrement } M_A = M_C = -\frac{ql^2}{12}$$

Moment à mi portée $M_B = \frac{ql^2}{24}$

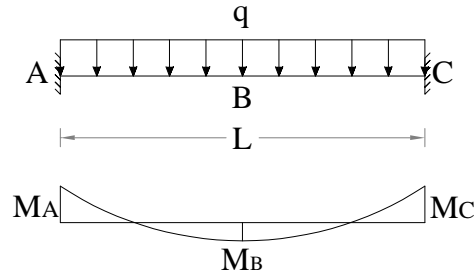


Figure (2.4) : Phase élastique

Si on augmente la charge, les sections d'encastrement, les plus sollicitées, vont se plastifier en premier. On atteint dans ces sections le moment plastique M_{pl} .

$$M_A = M_C = M_{pl} = \frac{ql^2}{12} \tag{2.1}$$

$$M_B = \frac{M_{pl}}{2} = \frac{ql^2}{24} \tag{2.2}$$

Il se forme alors une rotule plastique à chaque encastrement. L'apparition de rotule plastique n'est possible que s'il n'y a aucun phénomène de voilement local.

Si la capacité de rotation des sections A et C importante on peut encore augmenter la charge. L'accroissement de charge Δq est repris par la poutre qui a un comportement bi-articulé après plastification des sections d'encastrement. On dit que les sections A et C sont épuisées et travaillent comme des articulations pour ce supplément de charge. La poutre devient isostatique.

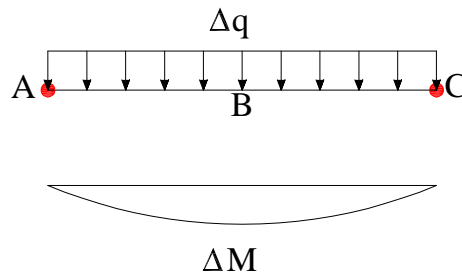


Figure (2.5) : Phase plastique

Ce nouveau fonctionnement reste possible jusqu'à ce que la section médiane soit complètement plastifiée. On a alors :

$$M_A = M_C = M_{pl} = \frac{ql^2}{12} \tag{2.3}$$

$$M_B = M_{pl} = \frac{ql^2}{24} + \frac{\Delta ql^2}{8} \quad (2.4)$$

L'apparition d'une rotule plastique en B transforme la structure en mécanisme de ruine. Le système est instable et s'effondre.

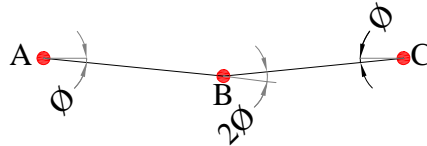


Figure (2.6) : Mécanisme de ruine

La charge de rupture vaut

$$q_r = q + \Delta q = \frac{16 \cdot M_{pl}}{l^2} = 1.33 \cdot q \quad (2.5)$$

La poutre, initialement hyperstatique, a successivement épuisé toutes ses possibilités de résistance jusqu'à se transformer en mécanisme. Ce phénomène est appelé l'adaptation plastique.

2.2.3 Redistribution des efforts dans les structures hyperstatiques

L'exemple de la poutre bi-encastree montre bien la redistribution du moment fléchissant après plastification des sections d'encastrement (formation de rotules plastiques). Cette redistribution n'est possible que si les éléments de la structure et le matériau le permettent [5].

Le calcul plastique des sollicitations n'est possible que si les conditions suivantes sont remplies :

a- Ductilité du matériau

L'acier doit être suffisamment ductile afin de permettre la formation de rotules plastiques (allongements plastique importantes).

b- Capacité de rotation

Les éléments plastifiés doivent être capables de supporter la rotation des rotules plastiques.

c- Absence d'instabilité

La plastification des sections n'est possible qu'en l'absence de tout phénomène d'instabilité (voilement locale, déversement).

La figure suivante illustre la capacité de rotation des différentes classes de sections. Elle montre la résistance et la capacité de rotation qui peuvent être atteintes avant apparition du phénomène de voilement local. Tout risque de déversement est supposé empêché.

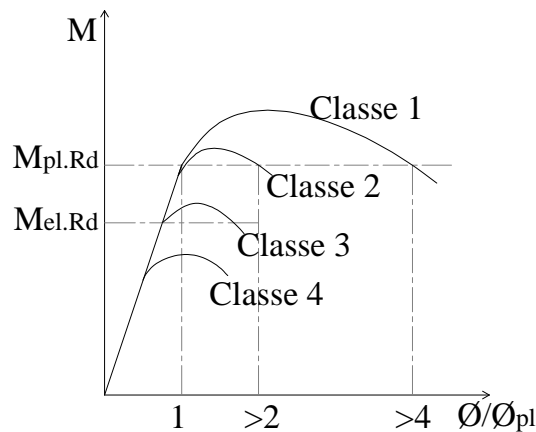


Figure (2.7) : Comportement des sections suivant la classification de l’Eurocode 3

Classe 1 : les sections de classe 1 peuvent former une rotule plastique et ont une capacité de rotation importante.

Classe 2 : les sections de classe 2 peuvent former une rotule plastique mais avec une capacité de rotation limitée.

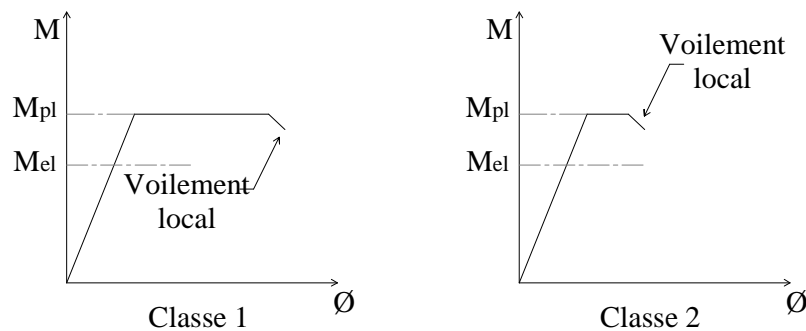


Figure (2.8) : Diagramme moment - courbure

Classe 3 : les sections de classe 3 ne peuvent pas former de rotule plastique. Le moment fléchissant les sollicitant peut atteindre le moment élastique M_{el} mais le voilement local est susceptible d’empêcher le développement du moment plastique M_{pl} .

Classe 4 : les sections de classe 4 ne peuvent pas former de rotule plastique. Le voilement local est susceptible d’empêcher le développement du moment élastique M_{el} .

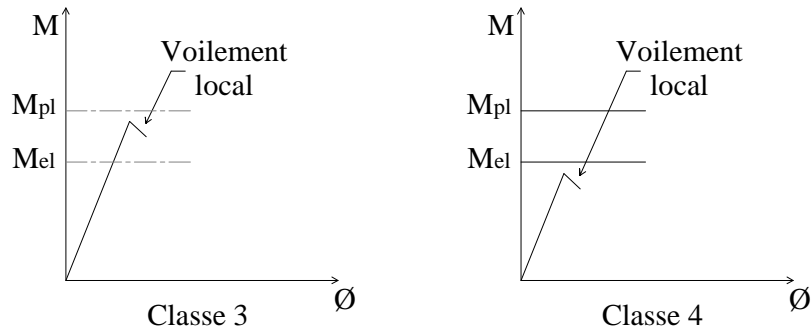


Figure (2.9) : Diagramme moment - courbure

2.2.4 Classes de sections et résistance ultime

Comme nous l'avons vu précédemment la classification des sections permet de préjuger de leur comportement et leur résistance. Le tableau suivant indique, pour chaque classe, la méthode d'analyse que l'on peut utiliser pour le calcul des sollicitations et pour le calcul de la résistance ultime [5].

Classe	Capacité De rotation	Calcul des sollicitations	Résistance de calcul
1	Importante	Plastique	Plastique
2	Limitée	Plastique Si justification par essai	Plastique
3	Nulle	élastique	Elastique sur section complète
4	Nulle	élastique	Elastique sur section efficace

Tableau (2.1) : Classification des sections

2.3 METHODE DE L'EQUILIBRE ULTIME

2.3.1 Hypothèses de base

Par opposition à la méthode « pas à pas » qui consiste à analyser l'évolution des efforts dans une structure depuis le début jusqu'à la ruine, la méthode de l'équilibre ultime ne fournit que la répartition des efforts internes juste avant la ruine faisant ainsi abstraction au comportement ultérieur de la structure, d'où le nom de la méthode.

Les hypothèses principales de la méthode de l'équilibre ultime sont :

- Les sections de la structure, où le moment fléchissant M est inférieur au moment plastique M_{pl} , se comportant élastiquement, ceci conduit à admettre une loi du type élasto-plastique pour le diagramme moment-courbure figure (2.10a).
- Si dans l'une des sections de la structure, le moment M atteint le moment plastique, il se forme alors une rotule plastique parfaite.
- La rotation de la section où se situe la rotule plastique peut augmenter sans restriction et sans que le moment fléchissant s'accroisse ;
- Les efforts normaux naissant dans les barres de leur flexion par suite de l'effet d'arc sont négligeables ;
- Avant la ruine, il ne se produit aucun phénomène de flambement dans la structure ou dans l'une de ses parties.

Avec ces hypothèses, les moments ultimes M_{pl} sont atteints dans les différentes sections critiques, et il y a formation de rotules plastiques au fur et à mesure de l'accroissement de la charge.

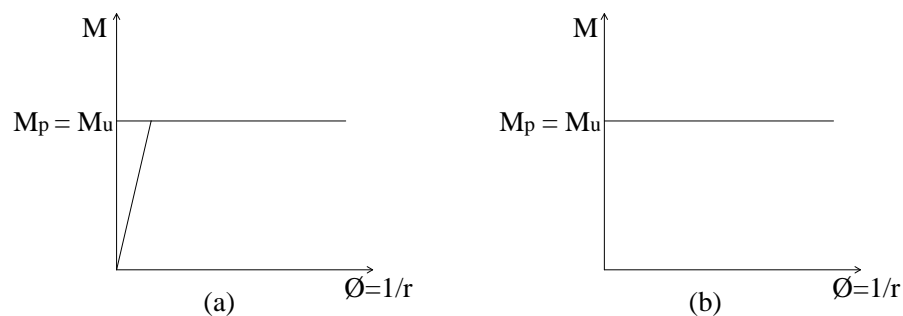


Figure (2.10) : Diagramme moment - courbure

Si la structure est r fois hyperstatique et s'il y a création de r rotules plastiques supplémentaires, elle devient isostatique. La naissance d'une rotule plastique supplémentaire a pour effet de transformer la structure en un système hypostatique, c'est à dire qu'elle se transforme en un mécanisme qui s'écroule par suite d'une augmentation quelconque de la charge. La ruine de la structure peut se produire de deux façons :

- Ruine totale par la formation de $r+1$ rotules plastiques,
- Ruine partielle comportant q rotules plastique ($q < r+1$), c'est le cas par exemple des travées des poutres continues et des portiques qui se transforment en un mécanisme par la formation de trois rotules plastiques.

2.3.2 Théorèmes fondamentaux

Le calcul plastique des structures doit satisfaire les conditions suivantes :

- Equilibre : les forces extérieures et les réactions appliquées a la structure doivent s'équilibrer ;
- Résistance : les efforts intérieurs sont inférieurs aux valeurs limites durant toutes les étapes de chargement ;
- Mécanisme : un nombre suffisant de rotules plastiques doit se former afin que la structure puisse se transformer en un système instable (Mécanisme).

Notons que dans le calcul élastique que la troisième condition est remplacée par la condition de compatibilité et de continuité des déformations.

Par ailleurs, on admet une relation du type rigide-plastique pour le diagramme moment-courbure, figure (2.10). Il n'est, en général, pas possible de satisfaire en une seule fois les trois conditions du calcul plastique. On est obligé de partir de deux de ces conditions et essayer de satisfaire la troisième par essais successifs.

A partir de ces considérations, on peut formuler les théorèmes fondamentaux de la *méthode de l'équilibre ultime*.

2.3.2.1 Théorème cinématique

Le théorème de la méthode cinématique s'énonce comme suit :

"Si on peut trouver, pour le système étudié, plusieurs mécanismes de rupture auxquels correspond pour chacun une charge ultime P_u , calculée selon le théorème des travaux virtuels, cette charge est au moins égale à la charge ultime exacte ".

En conséquence, lorsqu'on a déterminé par le procédé cinématique les charges ultimes P correspondant à tous les mécanismes possibles, la plus faible d'entre elles est la charge ultime la plus probablement exacte.

Le théorème de la méthode cinématique satisfait les conditions d'équilibre et de mécanisme ; il est également connu sous le nom du *théorème de la borne supérieure*. Les résultats de la méthode cinématique ne se trouvent donc pas du côté de la sécurité.

2.3.2.2 Théorème statique

Le théorème de la méthode statique s'énonce comme suit :

" Si pour une ossature donnée, soumise à un type de charge donnée il est possible de trouver une répartition des moments statiquement admissible et si en toutes sections de

la structure les moments restent inférieurs aux moments ultimes, la charge ultime qui correspond à une telle répartition est toujours au plus égale à la charge ultime exacte " .

Si on peut donc trouver différentes charges par là méthode statique, la plus grande d'entre elles est la charge ultime la plus probable.

Le théorème statique satisfait les conditions d'équilibre et de résistance ; il est également connu sous le nom de *théorème de la borne inférieure*. Les solutions fournies par la méthode statique sont donc du côté de la sécurité.

2.3.2.3 Théorème d'unicité

Des deux théorèmes précédents, où

$$Q_u \text{ Statique} \leq Q_u, \text{ exacte}$$

$$Q_u \text{ Cinématique} \geq Q_u, \text{ exacte}$$

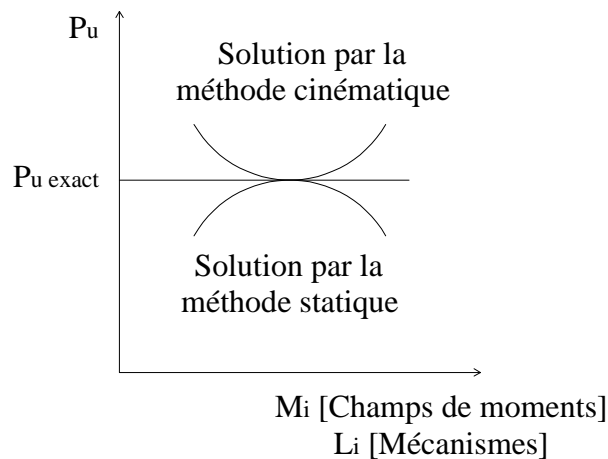


Figure (2.11) : Diagramme charge - moment

On peut en déduire le théorème d'unicité suivant :

" Lorsqu'il est possible de faire correspondre à un mécanisme de ruine cinématiquement admissible un champ de moments statiquement admissible, la charge commune correspondante est la charge ultime théoriquement exacte " figure (2.11).

Il y a donc deux approches possibles pour déterminer la charge ultime par la méthode de l'équilibre ultime :

- Soit d'appliquer d'abord le théorème statique, avec contrôle par le théorème cinématique.
- Soit d'appliquer d'abord le théorème cinématique, avec contrôle par le théorème statique.

Le théorème d'unicité peut cependant être mis en défaut, c'est le cas par exemple, où le sens des rotations plastiques admises ne corresponde pas au signe des moments des sections plastifiées.

2.3.3 Méthode par combinaisons de mécanismes

Lorsqu'on applique un système de charge à une structure hyperstatique, le théorème cinématique consiste à choisir un mécanisme cinématiquement admissible puis écrire qu'il y a équilibre par application du théorème des travaux virtuels. Supposons que la structure est p fois hyperstatique, qu'elle ait n sections critiques et que le moment de plastification soit constant dans toutes les sections. On imagine tous les mécanismes de ruine possible. En cas de ruine totale un mécanisme comporte $r+1$ rotules plastiques et un nombre inférieur en cas de ruine partielle.

On démontre qu'il y a $(n-r)$ mécanismes de ruines possibles linéairement indépendants, tous les autres n'étant que des combinaisons linéaires de ceux-ci. Si l'on a donc déterminé dans une structure $(n-r)$ mécanismes linéairement indépendants, on peut trouver des mécanismes par combinaisons linéaires de ces $(n-r)$ mécanismes.

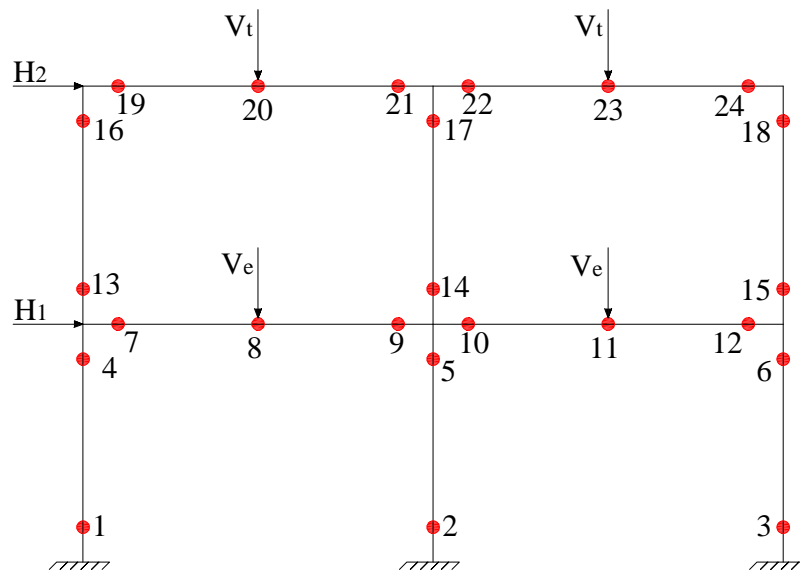


Figure (2.12) : Portique à deux niveaux et deux travées

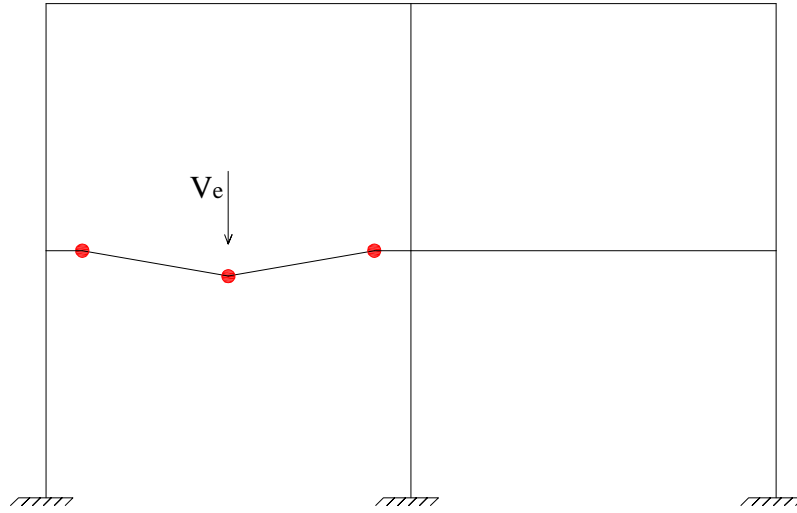


Figure (2.13) : Mécanisme de poutre

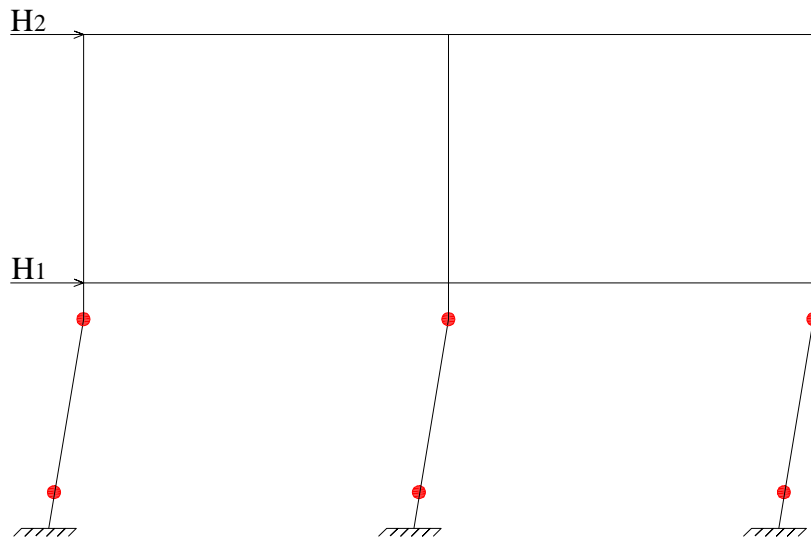


Figure (2.14) : Mécanisme de panneau

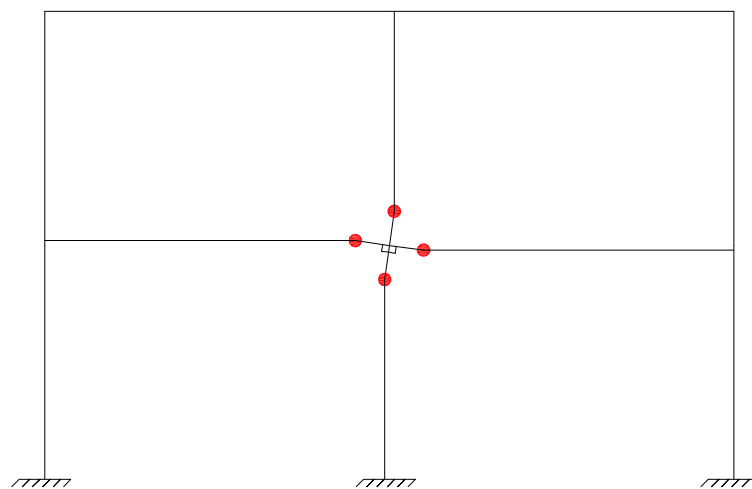


Figure (2.15) : Mécanisme de nœud

La méthode par combinaison de mécanisme consiste donc à :

- Chercher $(n-r)$ mécanismes linéairement indépendants ;
- Ecrire les $(n-r)$ relations découlant de l'application du théorème des travaux virtuels, d'où $(n-r)$ valeurs de P_u (pas nécessairement toutes différentes) ;
- Chercher la combinaison linéaire de ces $(n-r)$ relations qui donne la plus petite valeur de P_u ;
- Vérifier que cette valeur P_u est bien la charge ultime théoriquement exacte par application du théorème statique au mécanisme obtenu.

On doit cependant souligner que le mécanisme exact peut être l'un des mécanismes linéairement indépendants.

Considérons un portique multiple étage, soumis aux actions de forces verticales et horizontales comme il est indiqué dans la figure (2.12). Le système est 18 fois hyperstatique. Il y a 24 sections critiques, donc 24 positions possibles de rotules plastiques. Il y a donc $24 - 12 = 12$ mécanismes linéairement indépendants. Il est alors commode de les prendre suivant les trois groupes :

- La figure (2.13) représente un mécanisme de poutre ;
- La figure (2.14) représente un mécanisme de panneau ;
- La figure (2.15) représente un mécanisme de nœud.

2.3.4 Méthode des charges concentrées équivalentes

Les systèmes de poutre soumis à des forces ou des couples concentrés, les sections critiques sont les sections d'appui, les nœuds du système de poutre et les sections des points d'application des charges. Dans le cas de charges réparties, les sections au voisinage des appuis ou au voisinage des nœuds sont des sections critiques connues. En outre, on sait que pour une charge répartie entre nœuds extrêmes, il existe une section où la courbe passe par un maximum ou un minimum. Il y a donc une section critique entre nœuds de la poutre, mais on n'en connaît pas a priori la position, comme dans le cas de la charge concentrée. Pour les portiques supportant des charges réparties, Baker, Horne et Heyman ont proposé une méthode de calcul basée sur le concept des charges concentrées équivalentes.

Si on considère une barre entre deux nœuds qu'on suppose isostatique, on peut remplacer la charge répartie par plusieurs charges concentrées. On prend alors les points d'application des charges concentrées comme sections critiques. Considérons une poutre soumise à une charge répartie quelconque appliquée entre les nœuds $i-1$ et $i+1$ figure (2.16a). La charge concentrée équivalente à ce chargement est égale à la somme des

réactions en i des deux poutres $i-1$ i et i $i+1$ supposées simplement appuyées et soumises à la charge réelle, mais de signe opposé figure (2.16b et c). La force concentrée équivalente appliquée en i est déterminée alors par l'équation :

$$Q_i = \frac{l}{l_i} \cdot \int_0^{l_i} x \cdot q(x) \cdot dx + \frac{l}{l_{i+1}} \cdot \int_0^{l_{i+1}} x \cdot q(x) \cdot dx \quad (2.00)$$

La courbe des moments obtenus avec les charges concentrées équivalentes enveloppe la courbe des moments réels figure (2.16d).

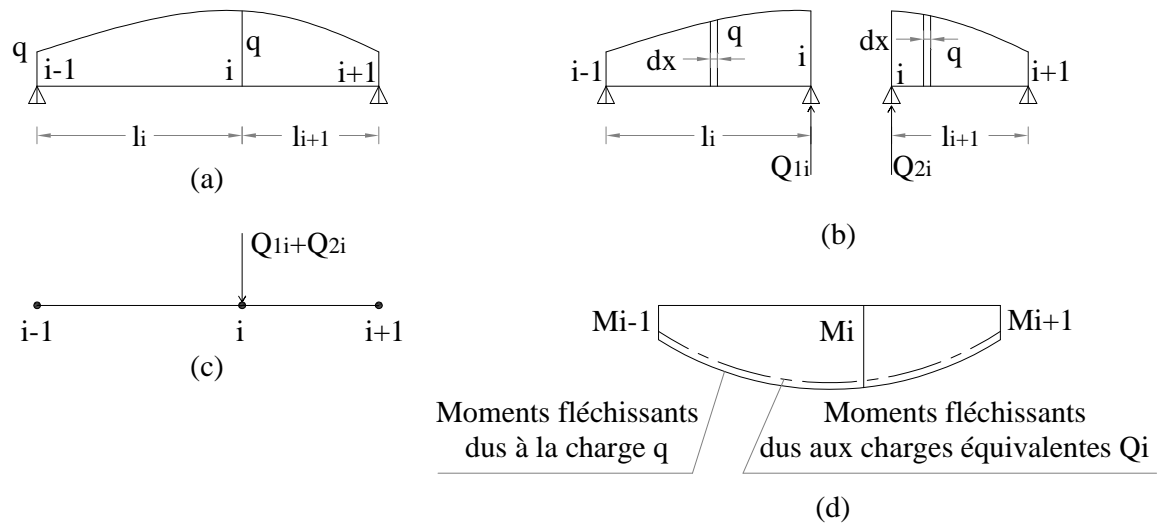


Figure (2.16) : Diagramme de moment

a- Exemple

On a le portique ABDE encasté en A et E et soumis à une charge horizontale en B et une charge uniformément répartie sur la poutre BD figure (2.17a). Le moment de plastification dans les poteaux et la poutre vaut 33.3 KN.m . On va déterminer le facteur λ de la charge ultime.

Remplaçons la charge uniformément répartie appliquée sur la traverse BD par trois charges concentrées équivalentes appliquées aux nœuds B, D et en un point quelconque de la poutre C. Les forces équivalentes, déterminées à l'aide de l'équation 2.1, sont indiquées sur la figure (2.24e). On remarque que quelle que soit la position de la force concentrée équivalente appliquée entre B et D, son intensité est toujours égale $\frac{q \cdot l}{2} = 20 \cdot \lambda \text{ KN}$. Les forces concentrées équivalentes appliquées aux nœuds B et D n'ont aucun effet sur le mécanisme de rupture ou sur la valeur du facteur de charge.

Le mécanisme de ruine admis est montré dans la figure (2.24b) : c'est une combinaison du mécanisme de poutre et du mécanisme de panneau.

Supposons, en premier lieu, que la rotule plastique sous la force concentrée équivalente se trouve au milieu de la poutre BD. L'équation des travaux virtuels s'écrit alors :

$$(10\lambda \cdot 4\Phi) + (20\lambda \cdot 3\Phi) = 6\Phi \cdot 33.3$$

D'où

$$\lambda = 2$$

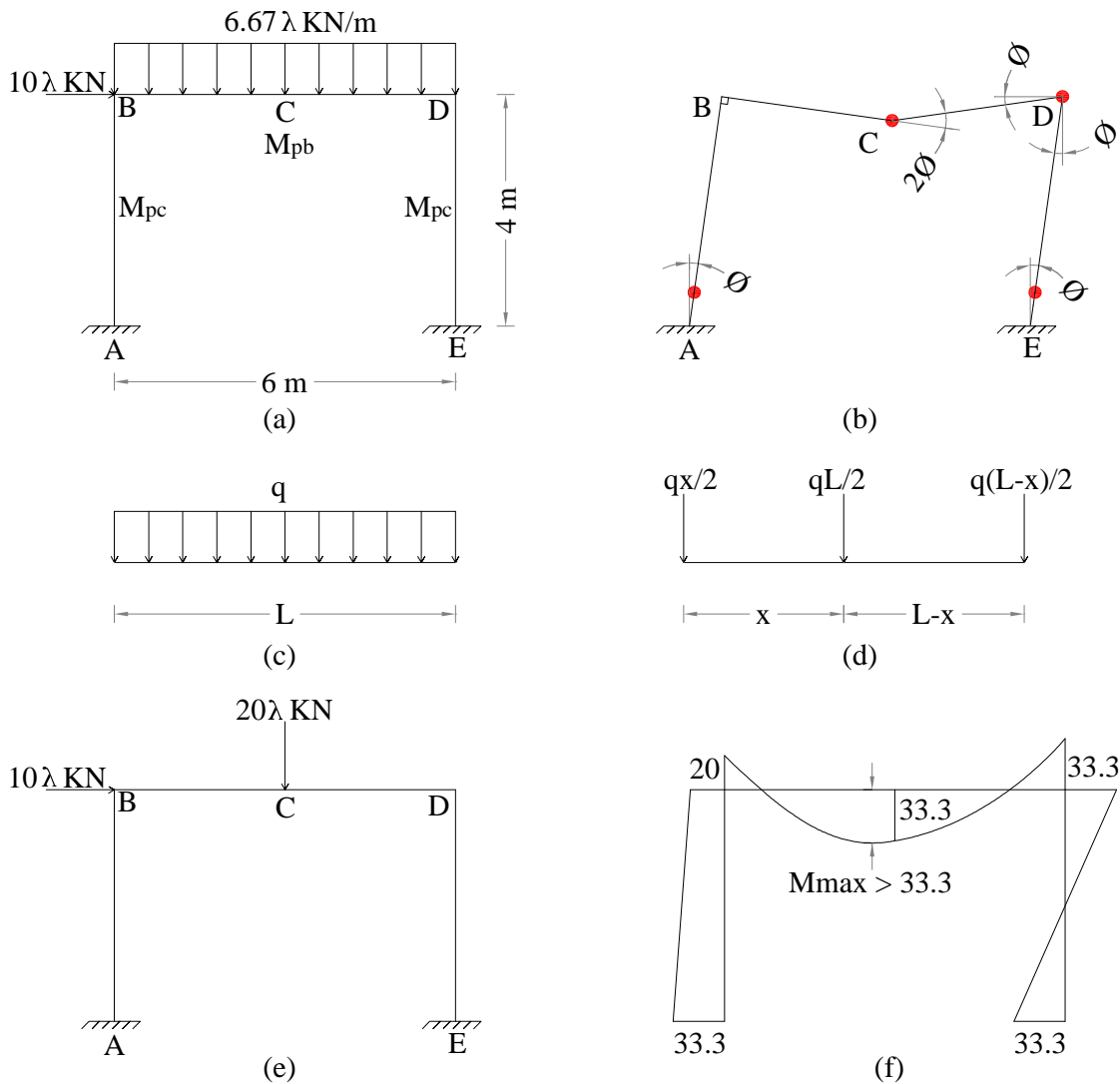


Figure (2.17) : Diagrammes des moments

Cette solution n'est pas nécessairement la solution exacte, mais elle représente une solution de la borne supérieure. Afin de vérifier si le mécanisme de ruine est statiquement admissible, on construit le diagramme des moments fléchissants, provoqués par les charges ultimes, de la structure isostatique équivalente.

L'effort tranchant dans le nœud D est déterminé en considérant l'équilibre des moments du nœud C, soit :

$$2 \cdot 33.3 + 6.67 \cdot 2 \cdot \frac{3^2}{2} - T_d \cdot 3 = 0$$

d'où

$$T_d = 42.2 \text{ kN}$$

Dans la traverse, le moment fléchissant est maximum dans la section x, l'effort tranchant est nul, par suite :

$$13.34 \cdot x - 42.2 = 0$$

soit

$$x = 3.16 \text{ m}$$

Le moment fléchissant maximum a donc pour valeur :

$$42.2 \cdot 3.16 - \frac{13.34 \cdot 3.16^2}{2} - 33.3 = 33.5 \text{ KN.m}$$

Le moment fléchissant maximum est légèrement supérieur au moment de plastification. Le mécanisme admis n'est donc pas statiquement admissible.

Pour que la distribution des moments fléchissant soit statiquement admissible, on attribue au facteur de charge λ la valeur :

$$\lambda = \frac{2 \times 33.3}{33.5} = 1.988$$

Notons que dans ce cas le moment en D, de valeur $\frac{1.988 \cdot 33.3}{33.5} = 33.1$, est inférieur au moment de plastification, la condition de mécanisme n'est donc pas satisfaite. La valeur de $\lambda=1.988$ est alors une borne inférieure du facteur de la charge ultime exacte. On peut donc écrire l'inégalité suivante :

$$1.988 \leq \lambda \leq 2$$

Par un raisonnement analogue recommençons les calculs en admettant cette fois-ci que la rotule plastique se trouve à 3.16 m du nœud D. l'équation des travaux virtuels s'écrit alors :

$$6.67 \cdot \lambda \cdot 6 \cdot \frac{(6-3.16) \cdot \Phi}{2} + 10 \cdot \lambda \cdot 4 \cdot \Phi = 33.3 \left(\Phi + \frac{6\Phi}{3.16} + \frac{6\Phi}{3.16} + \Phi \right)$$

$$\text{d'où } \lambda = 1.994$$

La valeur de $\lambda=1.994$ est une borne supérieure du facteur de la charge ultime exacte, on peut alors écrire l'inégalité suivante :

$$1.988 \leq \lambda \leq 1.994$$

En construisant le diagramme des moments correspondant au facteur de charge $\lambda=1.994$, on peut vérifier si le mécanisme admis est statiquement admissible ; dans le cas

contraire, on détermine la nouvelle borne inférieure du facteur de charge. Cette procédure doit être répétée jusqu'à ce que la différence entre la borne inférieure et la borne supérieure du facteur de charge soit jugée négligeable. Pour le portique considéré, le dernier résultat est largement suffisant pour les exigences du dimensionnement.

2.4 METHODE PAS A PAS

La méthode pas à pas consiste à analyser les structures par étapes en faisant croître progressivement le coefficient de charge. Chaque étape est un calcul élastique classique. Lorsque le moment fléchissant atteint dans une section critique le moment de plastification M_{pl} , une rotule plastique naît au droit de ce nœud, ceci correspond à la fin de l'étape. La structure sera analysée dans l'étape suivante en introduisant une articulation au droit de la section où s'est formée la rotule plastique. Cette procédure sera répétée jusqu'à ce que la structure soit devenue un mécanisme. Le facteur de charge λ est déterminé pour chaque étape de calcul. La charge ultime au moment de la ruine aura alors pour valeur :

$$P_u = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot P \quad (2.1)$$

n étant le nombre de pas.

L'avantage appréciable de cette méthode est qu'elle donne, en plus de la charge ultime (ruine) :

- L'ordre de formation des rotules plastiques ;
- Les déformations au cours des différents pas et les rotations plastiques ;
- Les réactions hyperstatiques et les efforts internes au cours des différents pas.

Dans le cas où la ruine est partielle, le champ des réactions et par suite celui des moments n'est pas unique et on peut aboutir à une répartition différente en partant d'un état initial différent.

Les méthodes de calcul élastique sont très nombreuses, certaines de ces méthodes sont destinées pour le calcul manuel, d'autres sont programmables. Les méthodes programmables sont : la méthode des forces et la méthode des déplacements. Mais la majorité des programmes sont basés sur la méthode des déplacements, car elle permet l'écriture de programmes généraux applicables dans la plupart des cas de la pratique.

a- Exemple

Pour mieux comprendre le comportement des portiques hyperstatiques soumis à des combinaisons de charge horizontale et verticale croissante jusqu'à la ruine, on a été jugé utile de considérer carrément un exemple d'un portique simple et d'étudier son comportement après la formation des rotules plastiques et ce jusqu'à la transformation de la structure en un mécanisme partiel ou total. Ceci permettra de mettre en lumière les

quelques théorèmes importants et essentiels cités ci-dessus de l'analyse plastique des structures.

Les caractéristiques géométriques et mécaniques du portique simple et les points d'application des charges concentrées verticales, λ_V , et horizontales, λ_H , et les sections critiques de A à E, sont représentés sur la figure (2.18) :

$$L = 4.00 \text{ m et } h = 3.40 \text{ m}$$

Le poteau IPE 270 et la poutre IPE 270

$$W_{pl} = 484 \text{ cm}^3$$

$$f_y = 235 \text{ MPa/m}^2$$

$$M_{pc} = M_{pb} = W_{pl} \cdot f_y = 484 \cdot 10^{-6} \cdot 235 \cdot 10^3 = 113.7 \text{ KN.m}$$

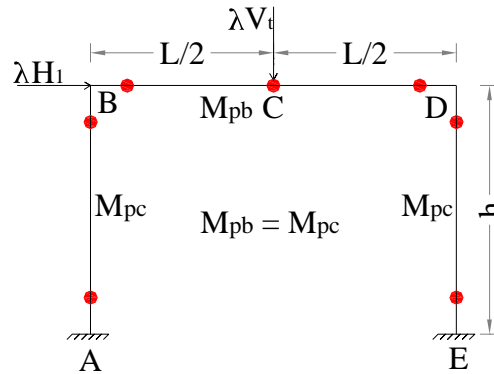


Figure (2.18) : Portique à un niveau et une travée

Le portique représenté sur la figure (2.18) supporte les charges concentrées verticales λ_V et horizontales λ_H , 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 (2.18).

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 $\lambda = \frac{113.7}{1.16} = 98.0$

le plus grand moment fléchissant se trouve au niveau de l'encastrement droit (point E), ce dernier devient égal au moment plastique ($M_{pl} = 113.7$ KN.m) et une rotule plastique se forme au niveau de cette section critique.

Evidemment, la structure entière en dehors de la section E est encore élastique et le demeure quand la valeur du facteur de charge λ est au-dessus de 98.0 et la section E se

comporte comme une rotule mécanique et de ce fait elle peut pivoter librement. Le moment fléchissant au point E doit rester égal au moment plastique.

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 ré-analysé 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 $\lambda = 98.0$ (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 D.

$M_D = 102.3$ KN.m étant le deuxième plus grand moment de l'étape N° 2

$$M_D = 102.3 + 1.13 \cdot \lambda_1 = M_{pl} = 113.7 \text{ KN.m}$$

$$\text{d'où } \lambda_1 = 10.1$$

D'où la nouvelle valeur de λ

$$\lambda = 98.0 + 10.1 = 108.1$$

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 au niveau de la section critique (point A) quand λ atteint la valeur de 97.2.

$$M_A = 97.2 + 2.39 \cdot \lambda_2 = M_P = 113.7 \text{ KN.m}$$

$$\text{d'où } \lambda_2 = 6.90$$

D'où la nouvelle valeur de λ

$$\lambda = 108.1 + 6.90 = 115.0$$

Le processus peut continuer à l'étape N° 4 avec trois rotules sans frottement jusqu'à ce que la valeur de λ atteigne la valeur de 129.7, le moment max de l'étape N° 3 se trouve au niveau de la section critique (point C).

$$\text{D'où } M_C = 74.1 + 2.7 \cdot \lambda_3 = M_{pl} = 113.7 \text{ KN.m}$$

$$\text{d'où } \lambda_3 = 14.7$$

D'où la nouvelle valeur de λ

$$\lambda = 115.0 + 14.7 = 129.7$$

	Portique sous charges unitaires (KN)	Diagramme du Moment Fléchissant sous charges unitaires (KN.m)	Diagramme du Moment Fléchissant (KN.m)
Etape N° 1			
Etape N° 2			
Etape N° 3			
Etape N° 4			

Figure (2.19) : Détermination du mécanisme de ruine d'un portique simple par la méthode « pas à pas »

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 (2.19).

- La distribution des moments fléchissants 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 dépassant nulle ne part, le moment plastique des membres, ceci étant la condition d'écoulement.

Toute tentative de continuer le processus 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 à ce point satisfait la condition d'équilibre et la condition d'écoulement et en plus :

Il y'a 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.

La courbe représentée dans la figure (2-10), 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 (2-9).

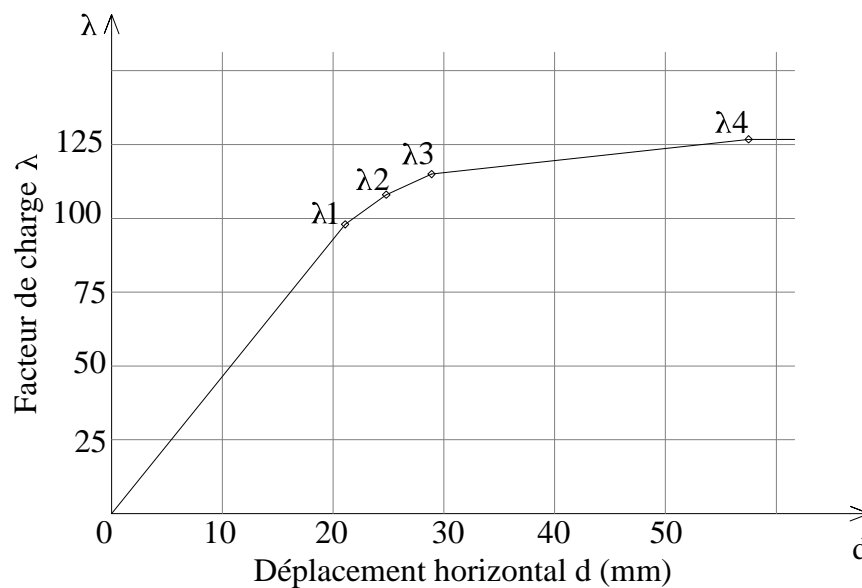


Figure (2.20) : Courbe facteur de charge λ en fonction du déplacement d horizontal du portique simple

CHAPITRE 3

MECANISMES DE RUINE ET CHARGES DE RUINE

MECANISMES DE RUINE ET CHARGES DE RUINE

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 œuvre, la nature du chargement, la simulation des charges réparties uniformément ...).

Le présent chapitre a pour objet de déterminer les mécanismes de ruine pour des structures en portiques sous l'effet de la charge V et H (V étant la charge verticale concentrée et H étant la charge horizontale concentrée).

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 exige une série de combinaisons entre les différents mécanismes élémentaires en incluant le mécanisme de joint afin de minimiser la valeur de la charge H .

Pour la présente étude, il a été jugé nécessaire de sélectionner quatre portiques :

- Un portique de base à un niveau et une travée dénommé (1N-1T),
- Un portique à un niveau et trois travées (1N-3T) qui va faire ressortir l'effet du rajout de deux travées sur les mécanismes de ruines et les charges de ruine,
- Un portique à trois niveaux et trois travées (3N-3T) qui va faire ressortir l'effet du rajout de deux niveaux sur les mécanismes de ruines et les charges de ruine,
- Un portique à cinq niveaux et trois travées (5N-3T) qui va faire ressortir l'effet du rajout de plusieurs niveaux sur les mécanismes de ruines et les charges de ruine.

3.2 PORTIQUE A UN NIVEAU UNE TRAVEE (1N-1T)

Considérons figure (3.1) le portique encasté à sa base, soumis à une charge verticale concentrée V_t au milieu de travée de poutre et de charge concentrée horizontale H_1 , appliquée au niveau des jonctions poteaux-poutres.

L'objectif premier est la détermination et l'identification de l'ensemble de mécanismes de ruine possibles et les différentes charges de ruine.

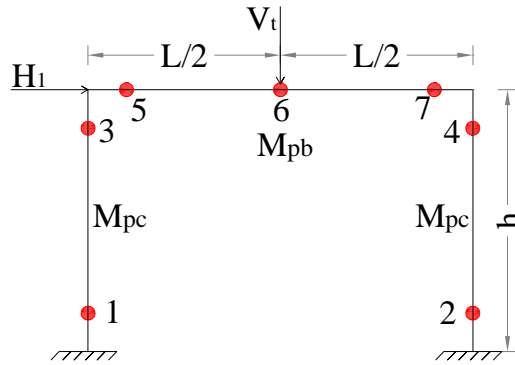


Figure (3.1) : Caractéristique de portique

M_{pc} : Le moment de plastification du poteau

M_{pb} : Le moment de plastification de la poutre,

La rotule plastique apparait dans l'élément de faible inertie c'est-à-dire de faible de moment plastique.

$$r = k - j \tag{3.1}$$

r : degré d'hyperstaticité

k : nombre de barres

j : nombre de rotules mécaniques

$$r = 3 - 0 = 3$$

Le portique est trois fois hyperstatiques avec sept sections critiques, les sections critiques sont représentées dans la figure (3.1) et sont numérotées de 1 à 7.

a- Mécanisme 1 : Mécanisme de poutre

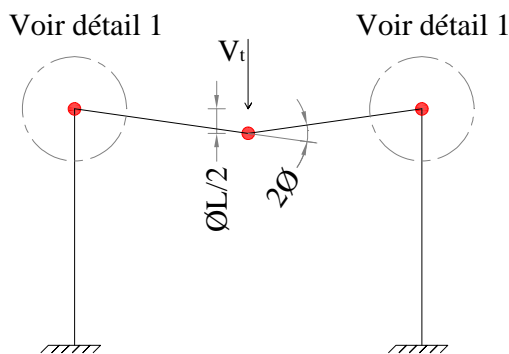


Figure (3.2) : Mécanisme de poutre

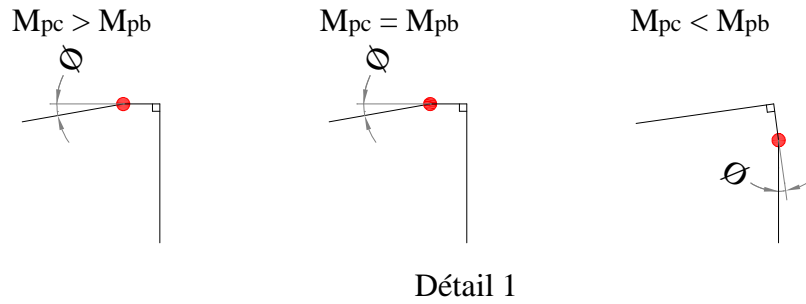


Figure (3.3) : Détail 1 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

a.1- Cas $M_{pc} \geq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2}\right) = M_{pb} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) \tag{3.2}$$

d'où

$$V_t = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \tag{3.3}$$

a.2- Cas $M_{pc} < M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2}\right) = M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) + M_{pc} \cdot (\Phi) \tag{3.4}$$

d'où

$$V_t = \frac{4 \cdot M_{pc} + 4 \cdot M_{pb}}{L} \tag{3.5}$$

b- Mécanisme 2 : Mécanisme de Panneau

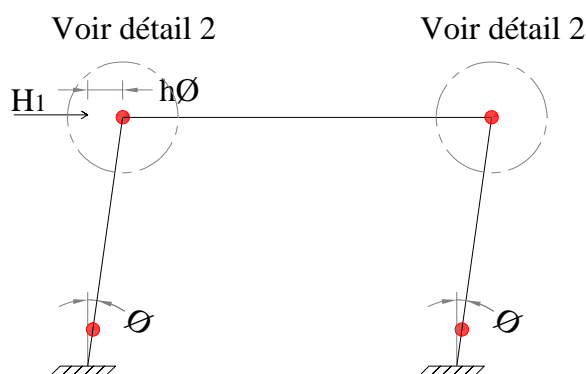


Figure (3.4) : Mécanisme de panneau

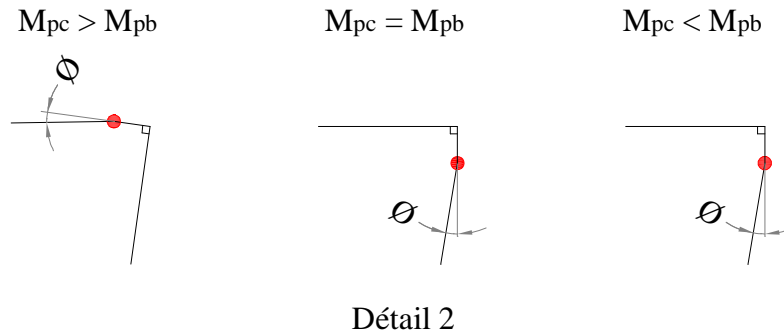


Figure (3.5) : Détail 2 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

b.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$H_1 \cdot (\Phi h) = M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) \tag{3.6}$$

d'où

$$H_1 = \frac{2 \cdot M_{pc} + 2 \cdot M_{pb}}{h} \tag{3.7}$$

b.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$H_1 \cdot (\Phi h) = M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pc} \cdot (\Phi) \tag{3.8}$$

d'où

$$H_1 = \frac{4 \cdot M_{pc}}{h} \tag{3.9}$$

c- Mécanisme 3 : Mécanisme de portique

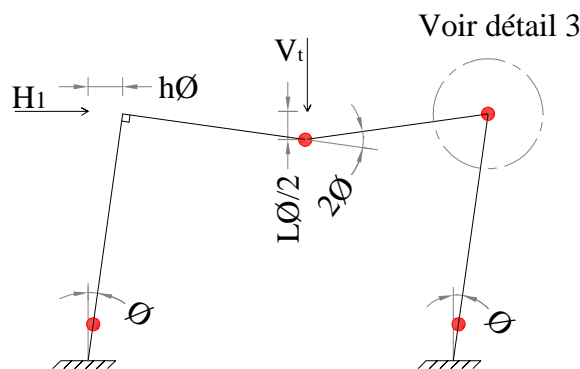


Figure (3.6) : Mécanisme de portique

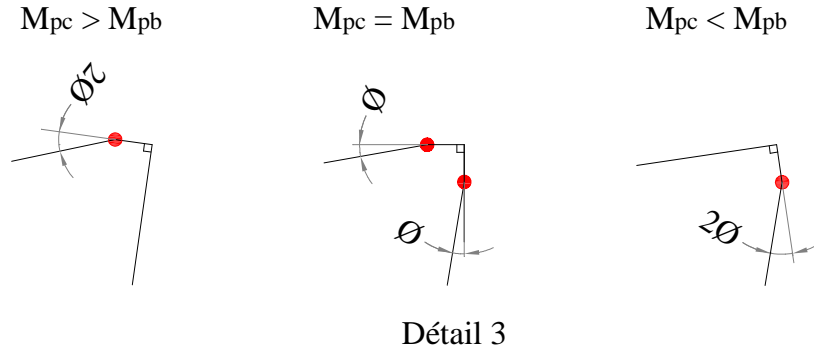


Figure (3.7) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

c.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 (\Phi h) = 2 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + 2 \cdot M_{pb} \cdot (2\Phi) \tag{3.10}$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{L}{2} + H_1 \cdot h = 2 \cdot M_{pc} + 4 \cdot M_{pb} \tag{3.11}$$

$$H_1 = \frac{2 \cdot M_{pc} + 4 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \tag{3.12}$$

c.2- Cas $M_{pc} = M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 (\Phi h) = 3 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) \tag{3.13}$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{L}{2} + H_1 \cdot h = 3 \cdot M_{pc} + 3 \cdot M_{pb} \tag{3.14}$$

$$H_1 = \frac{3 \cdot M_{pc} + 3 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \tag{3.15}$$

c.3- Cas $M_{pc} < M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 (\Phi h) = 2 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pc} \cdot (2\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) \tag{3.16}$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{L}{2} + H_1 \cdot h = 4 \cdot M_{pc} + 2 \cdot M_{pb} \tag{3.17}$$

$$H_1 = \frac{4 \cdot M_{pc} + 2 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.18)$$

3.3 PORTIQUE A UN NIVEAU TROIS TRAVEES (1N-3T)

Considérons figure (3.8) le portique encastré à sa base, soumis à des charges verticales concentrées V_t au milieu de travée des poutres et de charge concentrée horizontale H_1 , appliquées au niveau des jonctions poteaux-poutres.

L'objectif premier est la détermination et l'identification de l'ensemble de mécanismes de ruine possibles et les différentes charges de ruine.

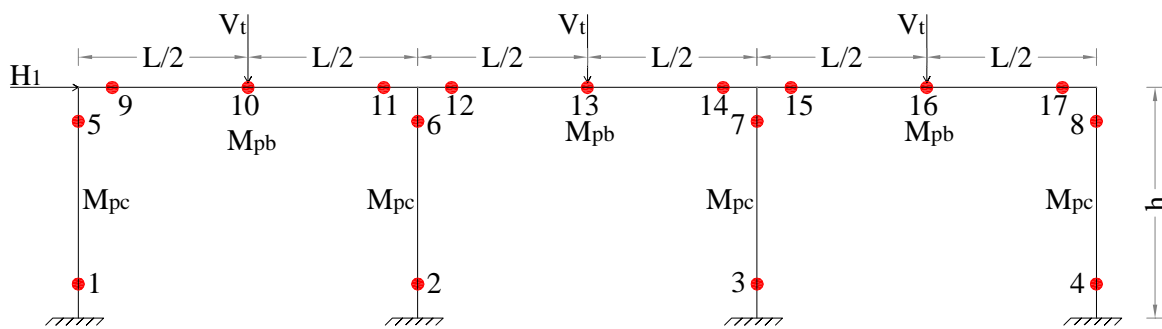


Figure (3.8) : Caractéristique de portique

M_{pc} : le moment de plastification du Poteau,

M_{pb} : le moment de plastification de la poutre.

La rotule plastique apparait dans l'élément de faible inertie c'est-à-dire de faible de moment plastique.

$$r = k - j \quad (3.19)$$

r : degré d'hyperstaticité

k : nombre de barres

j : nombre de rotules mécaniques

$$r = 9 - 0 = 9$$

Le portique est neuf fois hyperstatiques avec dix-sept sections critiques, les sections critiques sont représentées dans la figure (3.8) et sont numérotées de 1 à 17.

a- Mécanisme 1,2 et 3 : Mécanisme de poutre

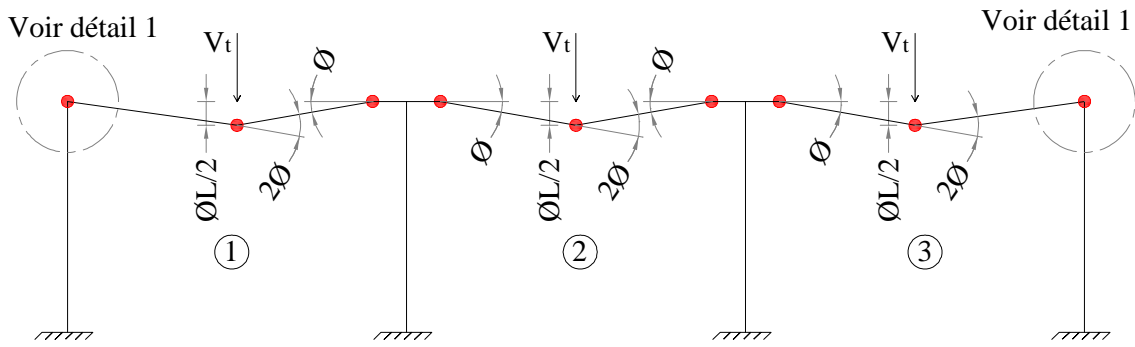


Figure (3.9) : Mécanisme de poutre

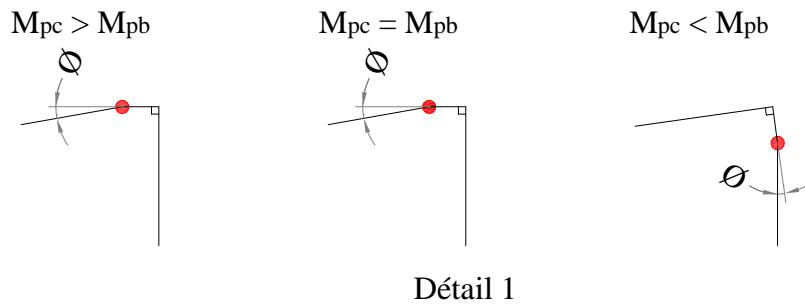


Figure (3.10) : Détail 1 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

a.1- Cas $M_{pc} \geq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

- Pour les mécanismes 1, 2 et 3

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) = M_{pb} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) \quad (3.20)$$

d'où

$$V_t = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.21)$$

a.2- Cas $M_{pc} < M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

- Pour les mécanismes 1 et 3

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) = M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) + M_{pc} \cdot (\Phi) \quad (3.22)$$

d'où

$$V_t = \frac{2 \cdot M_{pc} + 6 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.23)$$

- Pour le mécanisme 2

$$V_t = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.21)$$

b- Mécanisme 4 : Mécanisme de Panneau :

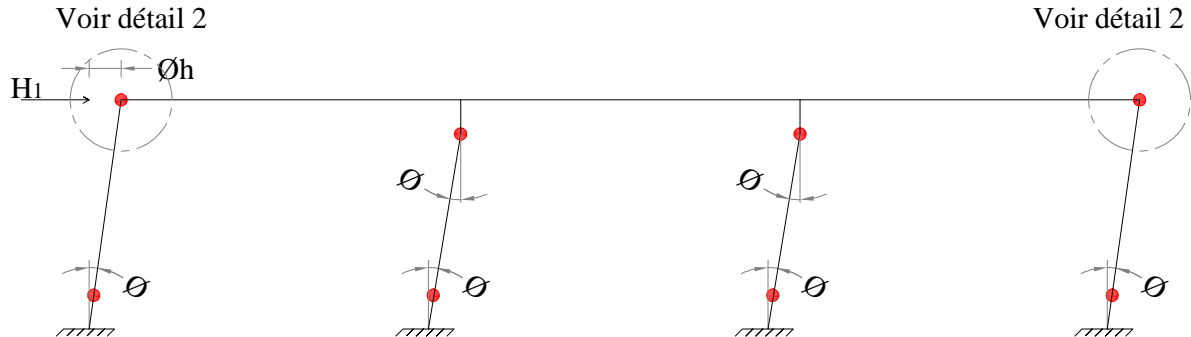
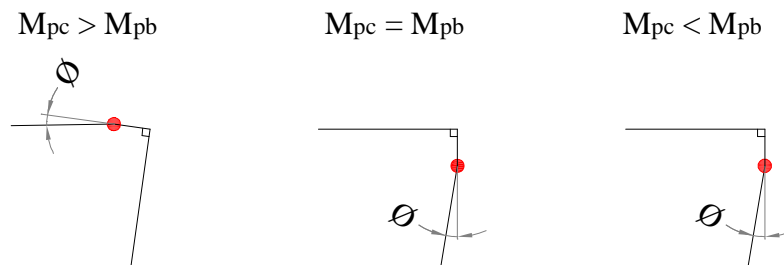


Figure (3.11) : Mécanisme de panneau



Détail 2

Figure (3.12) : Détail 2 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

b.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit :

$$H_1(\Phi \cdot h) = 6 \cdot M_{pc}(\Phi) + 2 \cdot M_{pb}(\Phi) \quad (3.24)$$

d'où

$$H_1 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 2 \cdot M_{pb}}{h} \quad (3.25)$$

b.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit :

$$H_1 \cdot (\Phi h) = 8 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) \quad (3.26)$$

d'où

$$H_1 = \frac{8 \cdot M_{pc}}{h} \quad (3.27)$$

c- Mécanisme 5 : Mécanisme de joint

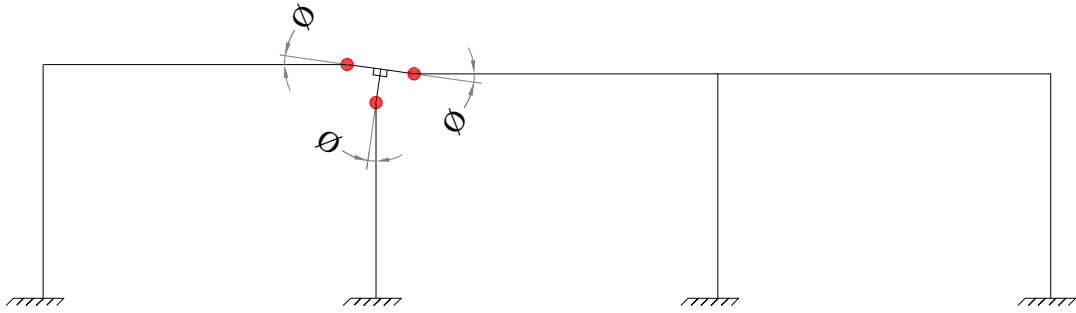


Figure (3.13) : Mécanisme de joint

$$M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) + M_{pb} \cdot (\Phi) = 0 \quad (3.28)$$

d- Mécanisme 6 : 4+1

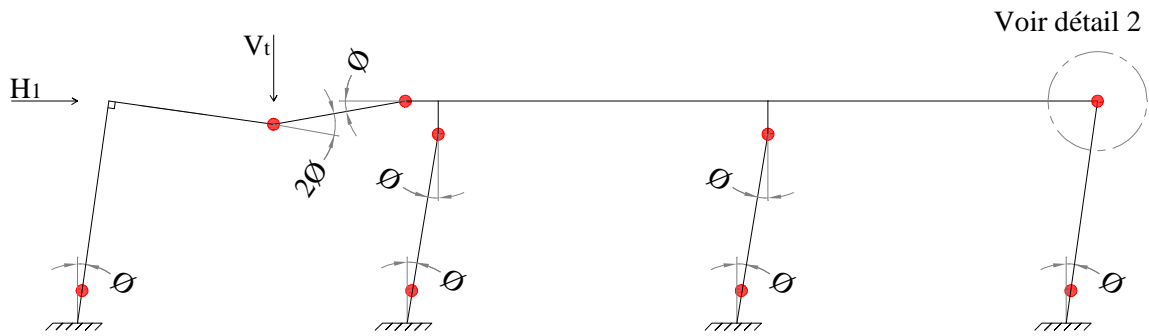


Figure (3.14) : Mécanisme 6 : 4+1

d.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit :

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 \cdot (\Phi h) = 6 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + 2 \cdot M_{pb} (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) \quad (3.28)$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{L}{2} + H_1 \cdot h = 6 \cdot M_{pc} + 4 \cdot M_{pb} \quad (3.29)$$

$$H_1 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 4 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.30)$$

d.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit :

$$V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 \cdot (\Phi h) = 7 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + M_{pb} (\Phi) + M_{pb} \cdot (2\Phi) \quad (3.31)$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{L}{2} + H_1 \cdot h = 7 \cdot M_{pc} + 3 \cdot M_{pb} \quad (3.32)$$

$$H_1 = \frac{7 \cdot M_{pc} + 3 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.33)$$

e- Mécanisme 7 : 6+2+5

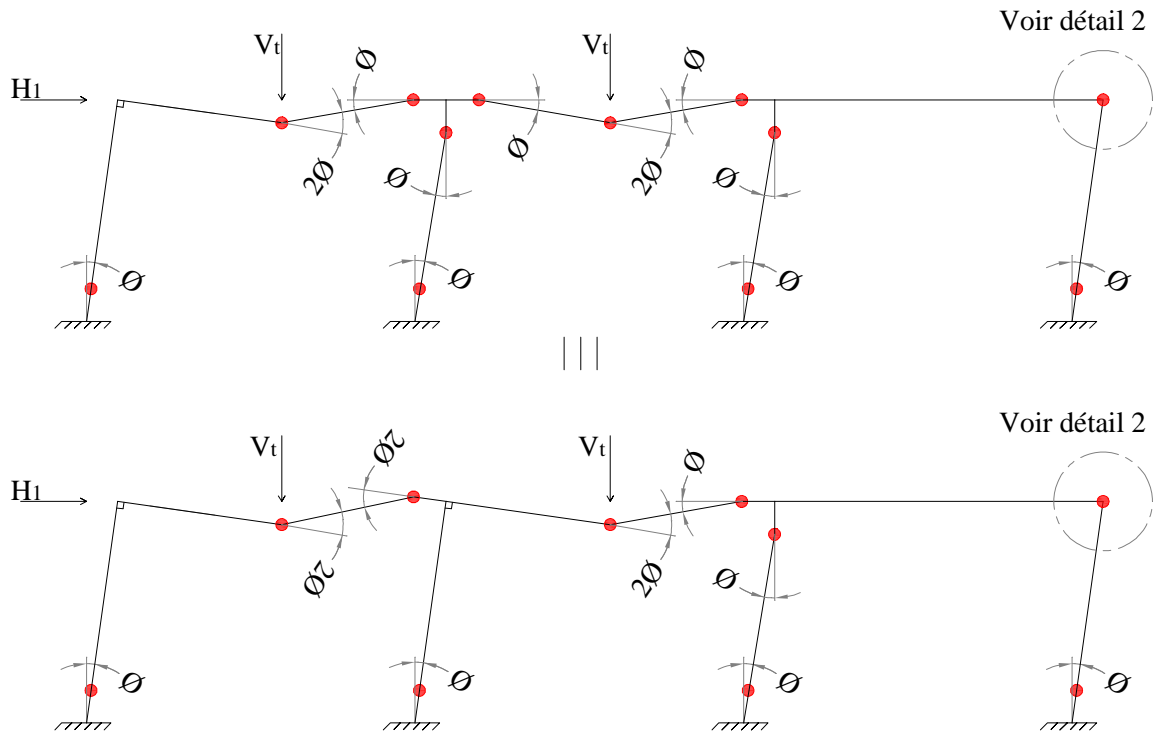


Figure (3.15) : Mécanisme 7 : 6+2+5

e.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$2 \cdot V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 \cdot (\Phi h) = 5 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + 8 \cdot M_{pb} \cdot (\Phi) \quad (3.34)$$

d'où

$$V_t \cdot L + H_1 \cdot h = 5 \cdot M_{pc} + 8 \cdot M_{pb} \quad (3.35)$$

$$H_1 = \frac{5 \cdot M_{pc} + 8 \cdot M_{pb} - V_t \cdot L}{h} \quad (3.36)$$

e.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$2 \cdot V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 \cdot (\Phi h) = 6 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + 7 \cdot M_{pb} \cdot (\Phi) \quad (3.37)$$

d'où

$$V_t \cdot L + H_1 \cdot h = 6 \cdot M_{pc} + 7 \cdot M_{pb} \quad (3.38)$$

$$H_1 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 7 \cdot M_{pb} - V_t \cdot L}{h} \tag{3.39}$$

f- Mécanisme de portique 8 : 7+3+5

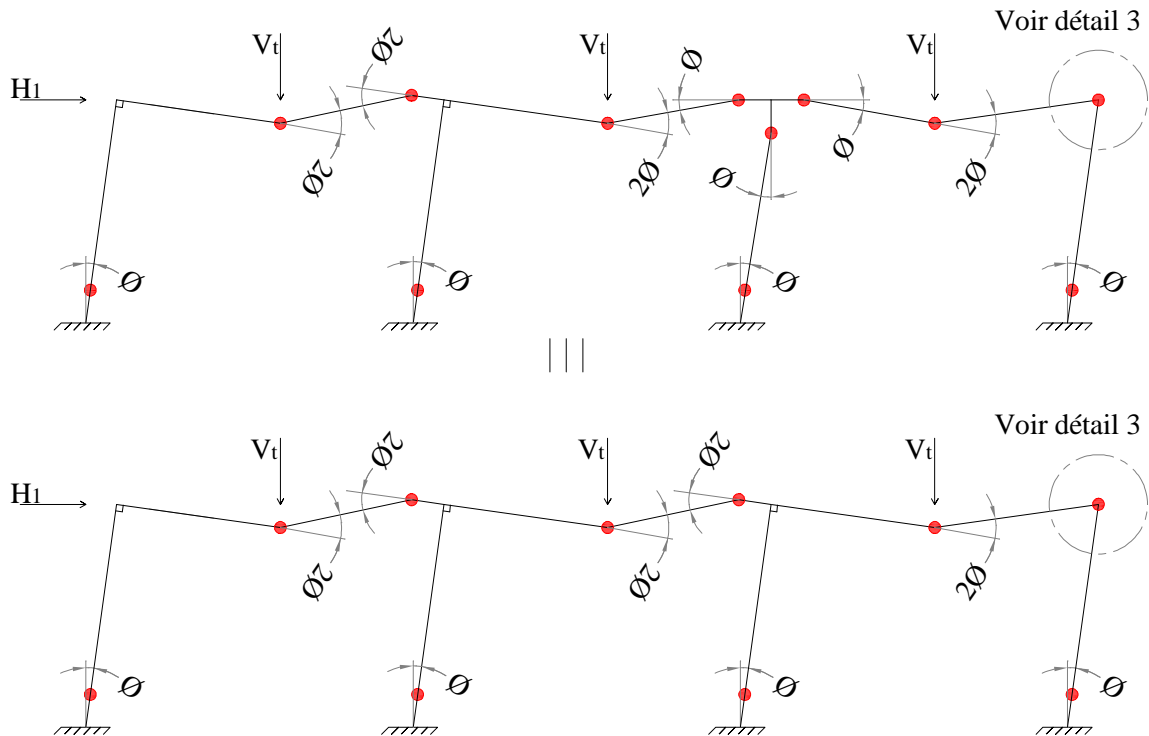


Figure (3.16) : Mécanisme de portique 8 : 7+3+5

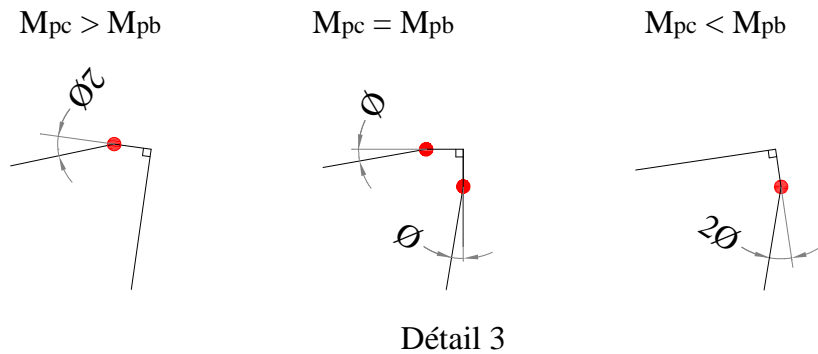


Figure (3.17) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

f.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$3 \cdot V_t \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 (\Phi h) = 4 \cdot M_{pc} (\Phi) + 6 \cdot M_{pb} (2\Phi) \tag{3.40}$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{3L}{2} + H_1 \cdot h = 4 \cdot M_{pc} + 12 \cdot M_{pb} \tag{3.41}$$

$$H_1 = \frac{4 \cdot M_{pc} + 12 \cdot M_{pb} - 1.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \tag{3.42}$$

f.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

L'équation des travaux virtuels s'écrit

$$3 \cdot V_t \cdot \left(\frac{\Phi L}{2} \right) + H_1 \cdot (\Phi h) = 6 \cdot M_{pc} \cdot (\Phi) + 5 \cdot M_{pb} \cdot (2\Phi) \tag{3.40}$$

d'où

$$V_t \cdot \frac{3L}{2} + H_1 \cdot h = 6 \cdot M_{pc} + 10 \cdot M_{pb} \tag{3.41}$$

$$H_1 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 10 \cdot M_{pb} - 1.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \tag{3.42}$$

3.4 PORTIQUE A TROIS NIVEAUX TROIS TRAVEES (3N-3T)

Considérons figure (3.18) le portique encasté à sa base, soumis à des charges verticales concentrées V_t au terrasse et V_e au étage courant au milieu de travée des poutres et des charges concentrées horizontales H_1, H_2 et H_3 appliquées au niveau des jonctions poteaux-poutres.

L'objectif premier est la détermination et l'identification de l'ensemble de mécanismes de ruine possibles et les différentes charges de ruine.

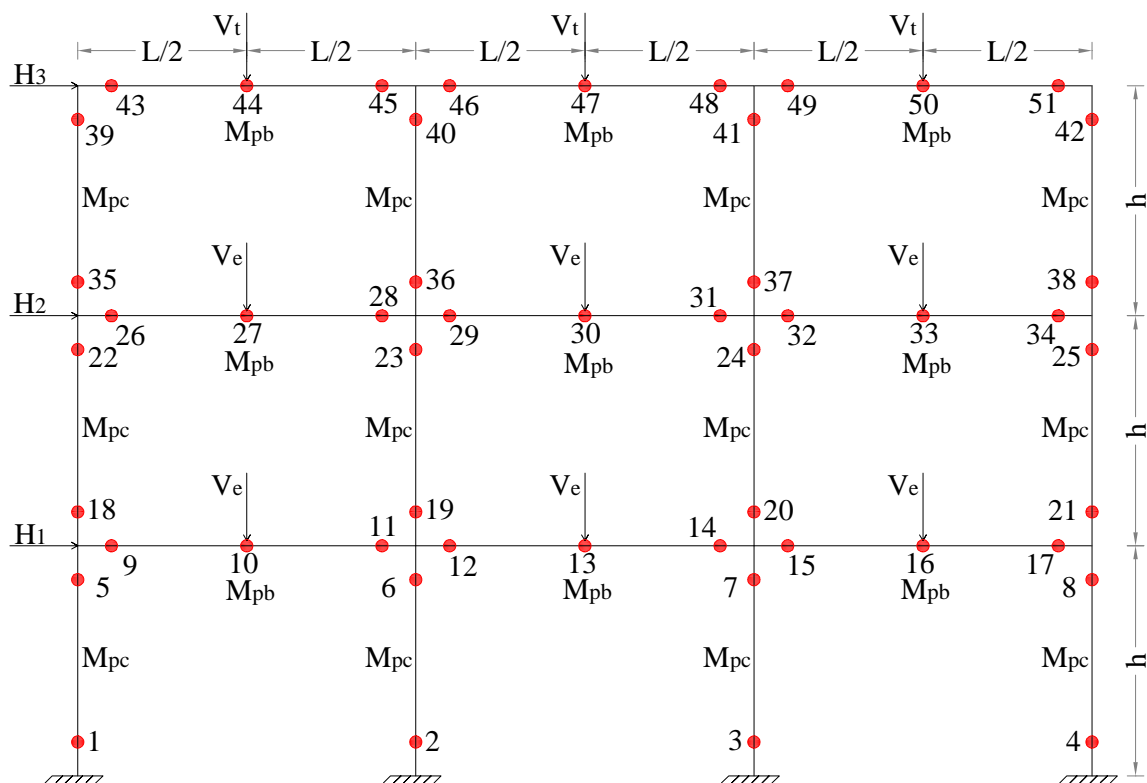


Figure (3.18) : Caractéristique de portique

M_{pc} : le moment de plastification du Poteau

M_{pb} : le moment de plastification de la poutre,

La rotule plastique apparait dans l'élément de faible inertie c'est-à-dire de faible de moment plastique.

$$r = k - j \tag{3.43}$$

r : degré d'hyperstaticité

k : nombre de barres

j : nombre de rotules mécaniques

$$r = 27 - 0 = 27$$

Le portique est vingt-sept fois hyperstatiques avec cinquante-et-un sections critiques, les sections critiques sont représentées dans la figure (3.18) et sont numérotées de 1 à 51.

a- Mécanisme 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9 : Mécanisme de poutre

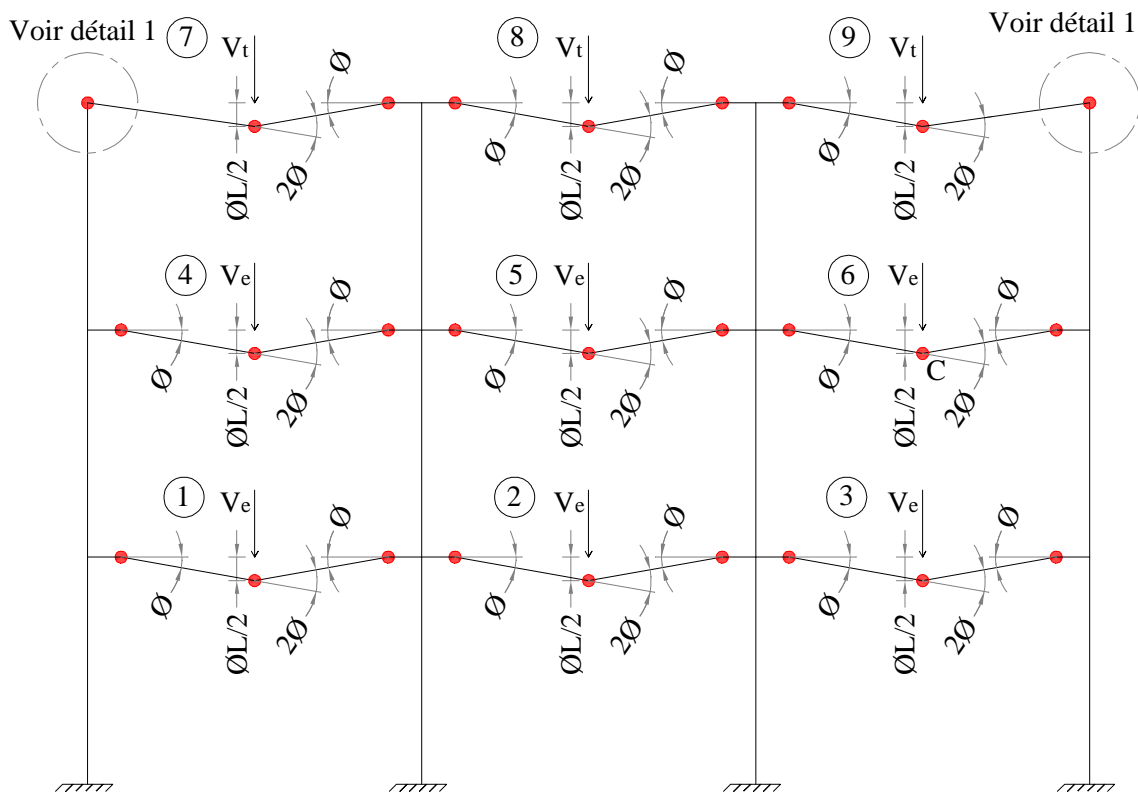


Figure (3.19) : Mécanisme de poutre

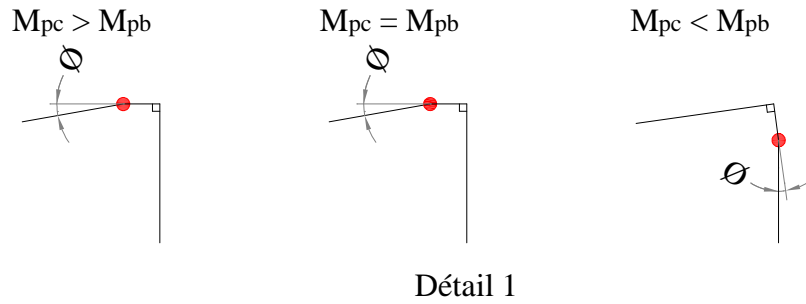


Figure (3.20) : Détail 1 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

a.1- Cas $M_{pc} \geq M_{pb}$

- Pour les mécanismes 1, 2, 3, 4, 5 et 6

$$V_e = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.44)$$

- Pour les mécanismes 7, 8 et 9

$$V_t = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.45)$$

a.2- Cas $M_{pc} < M_{pb}$

- Pour les mécanismes 1, 2, 3, 4, 5 et 6

$$V_e = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.46)$$

- Pour les mécanismes 7 et 9

$$V_t = \frac{2 \cdot M_{pc} + 6 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.47)$$

- Pour le mécanisme 8

$$V_t = \frac{8 \cdot M_{pb}}{L} \quad (3.48)$$

b- Mécanisme 10 : Mécanisme de Panneau de 3^{ème} niveau

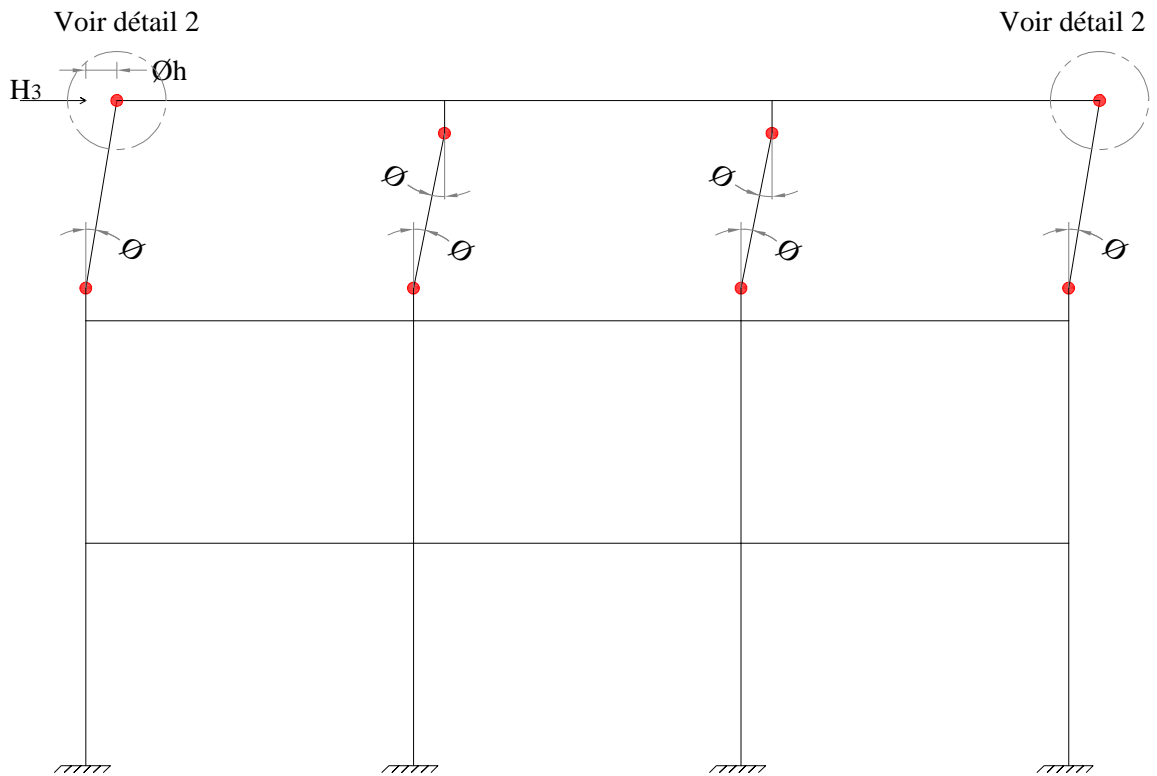


Figure (3.21) : Mécanisme de panneau 3^{ème} niveau

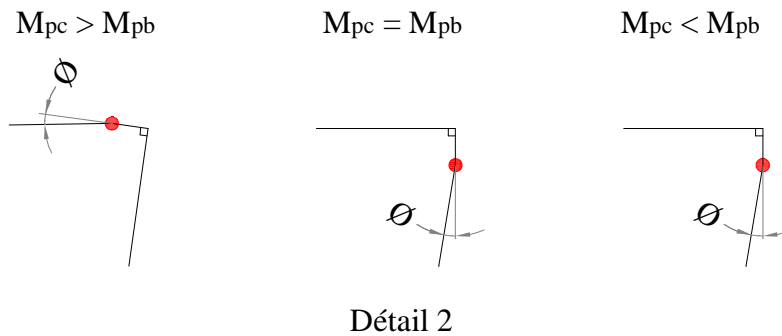


Figure (3.22) : Détail 2 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

b.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 2 \cdot M_{pb}}{h} \quad (3.49)$$

b.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc}}{h} \quad (3.50)$$

c- Mécanisme 11 : Mécanisme de Panneau de 2^{ème} niveau

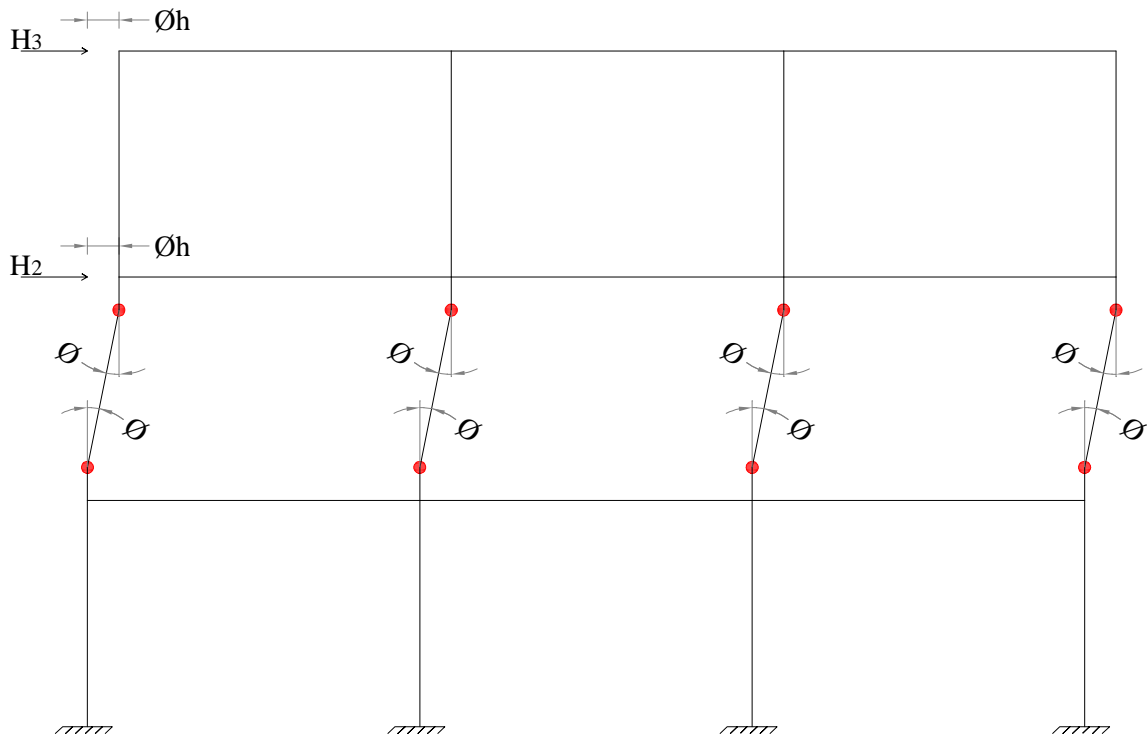


Figure (3.23) : Mécanisme de panneau 2^{ème} niveau

$$H_2 + H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc}}{h} \quad (3.51)$$

d- Mécanisme 12 : Mécanisme de Panneau de 1^{er} niveau

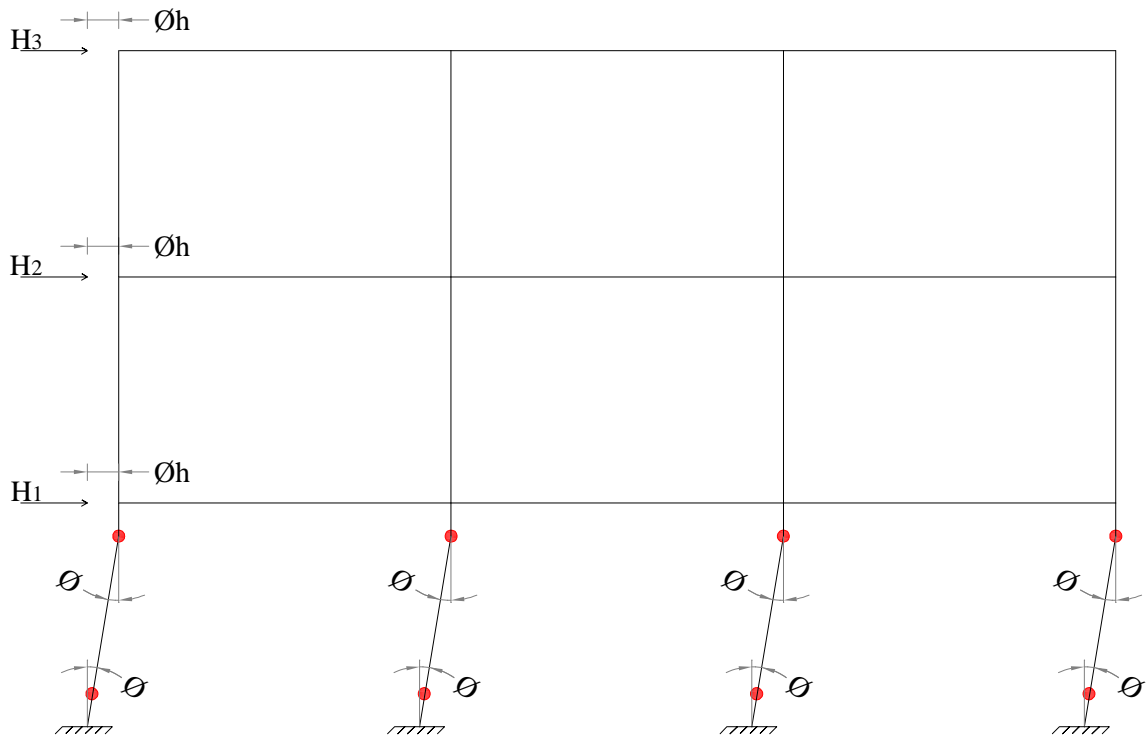


Figure (3.24) : Mécanisme de panneau 1^{er} niveau

$$H_1 + H_2 + H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc}}{h} \quad (3.52)$$

e- Mécanisme 13 : mécanisme de joint

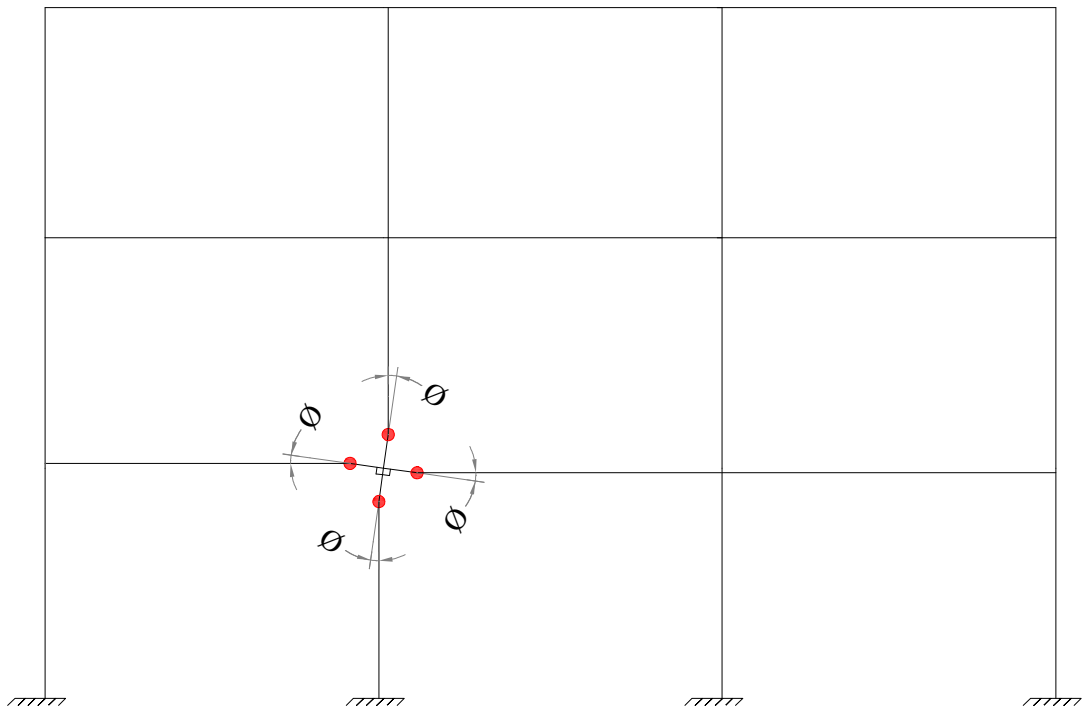


Figure (3.25) : Mécanisme de joint

f- Mécanisme 14 : 10+11+13

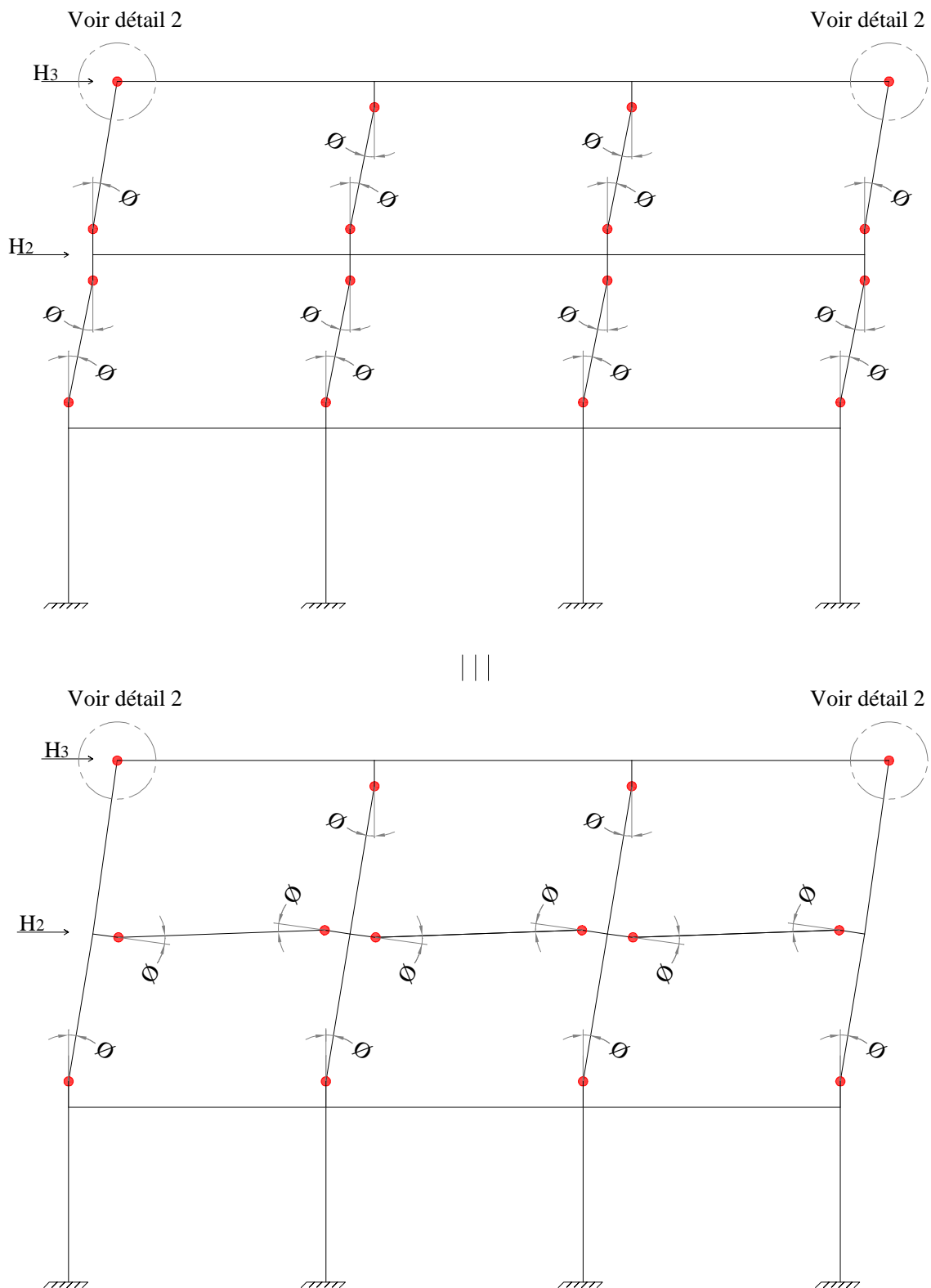


Figure (3.26) : Mécanisme 14 : 10+11+13

f.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_2 + 2 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 8 \cdot M_{pb}}{h} \quad (3.53)$$

f.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_2 + 2 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 6 \cdot M_{pb}}{h} \quad (3.54)$$

g- Mécanisme 15 : 12+13+14

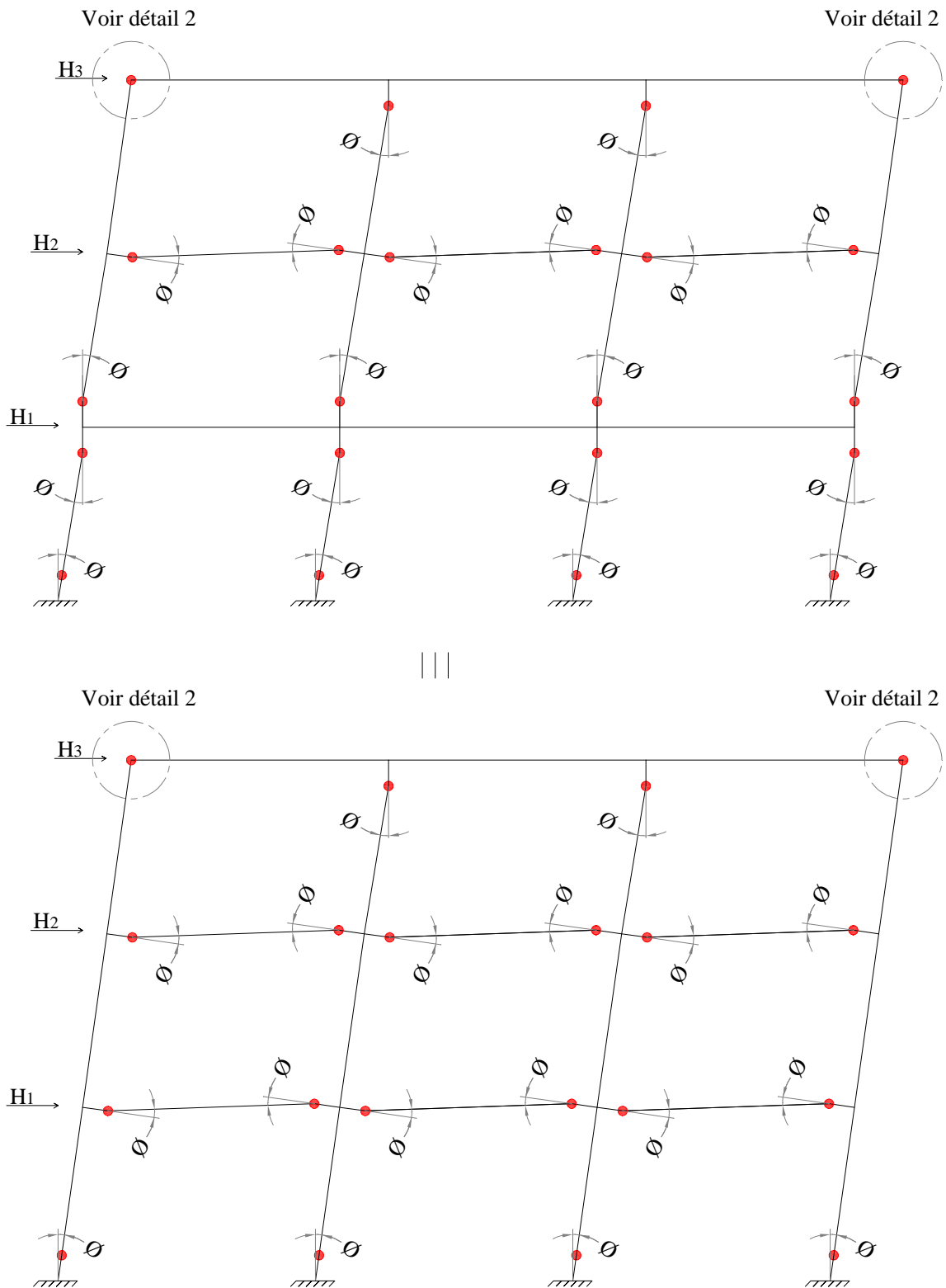


Figure (3.27) : Mécanisme 15 : 12+13+14

g.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 14 \cdot M_{pb}}{h} \quad (3.55)$$

g.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 12 \cdot M_{pb}}{h} \quad (3.56)$$

h- Mécanisme 16 : 15+1

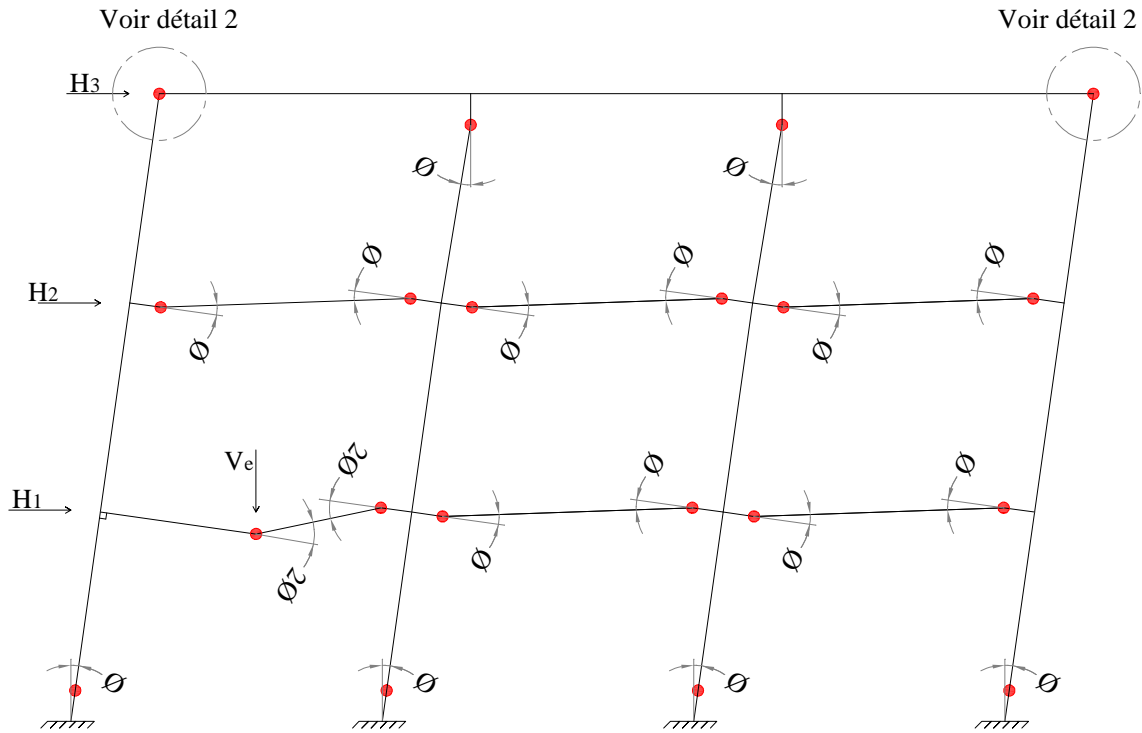


Figure (3.28) : Mécanisme 15 : 15+1

h.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 16 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.57)$$

h.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 14 \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.58)$$

i- Mécanisme 17 : 16+2

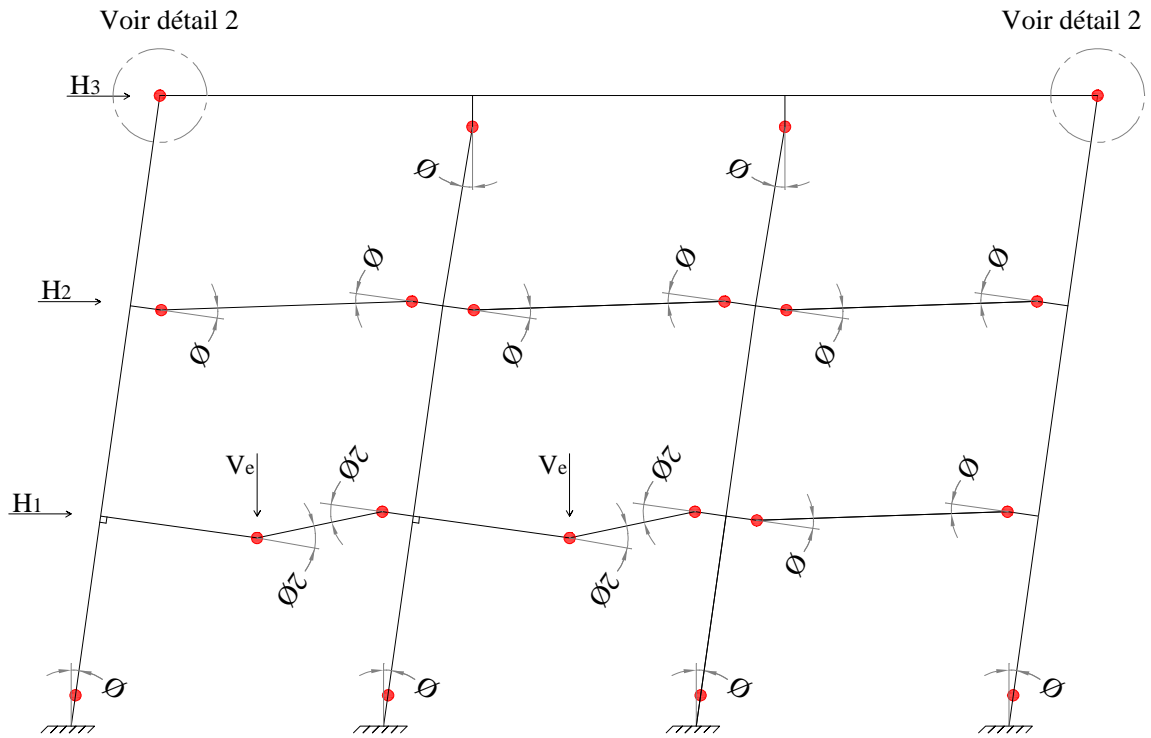


Figure (3.29) : Mécanisme 17 : 16+2

i.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 18 \cdot M_{pb} - V_e \cdot L}{h} \quad (3.59)$$

i.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 16 \cdot M_{pb} - V_e \cdot L}{h} \quad (3.60)$$

j- Mécanisme 18 : 17+3

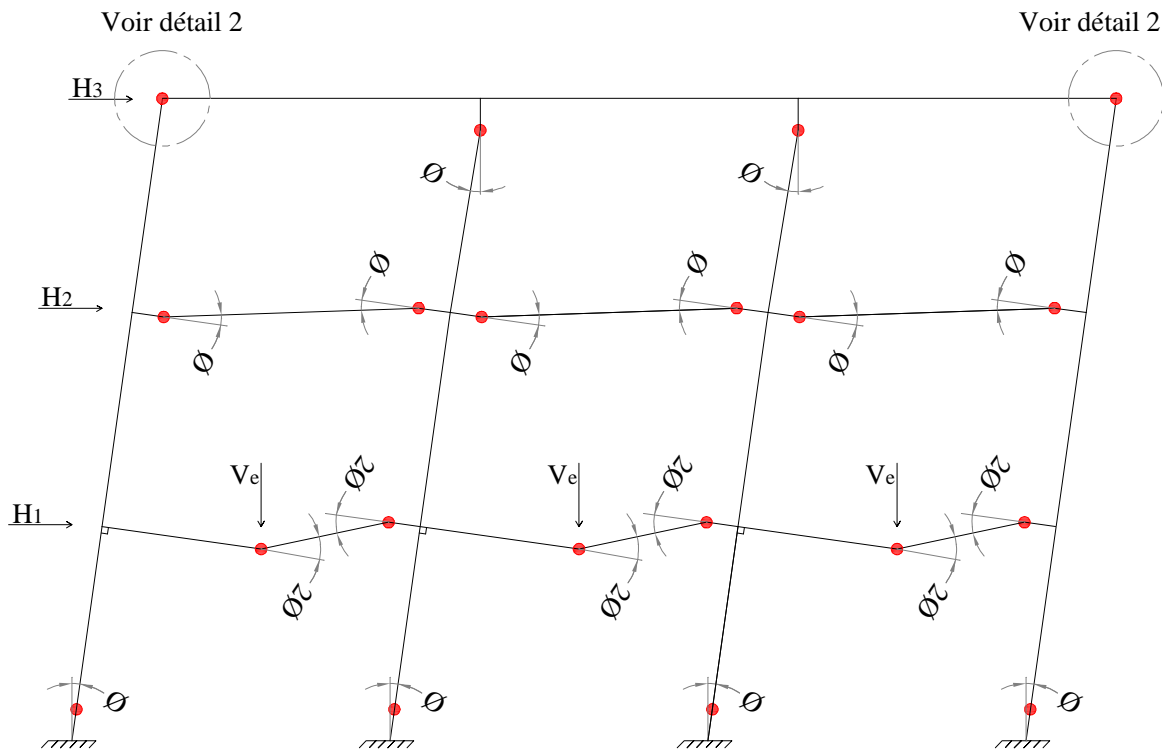


Figure (3.30) : Mécanisme 18 : 17+3

j.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 20 \cdot M_{pb} - 1.5 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.61)$$

j.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 18 \cdot M_{pb} - 1.5 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.62)$$

k- Mécanisme 19 : 18+4

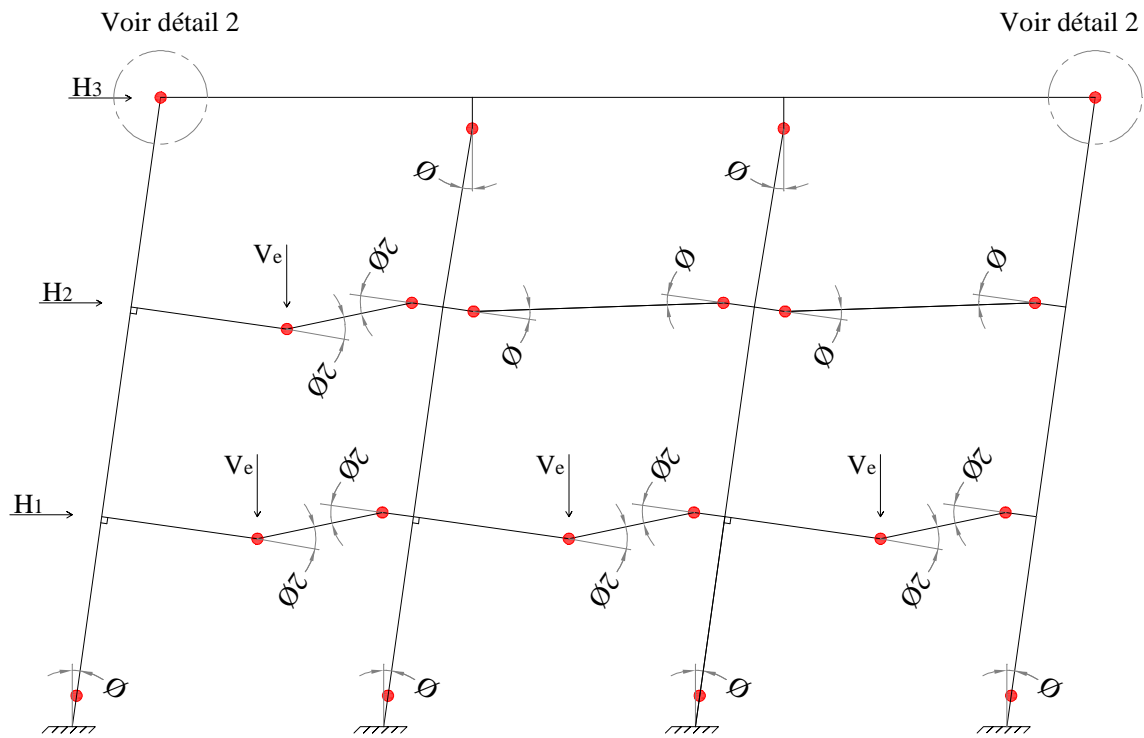


Figure (3.31) : Mécanisme 19 : 18+4

k.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 22 \cdot M_{pb} - 2 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.63)$$

k.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 20 \cdot M_{pb} - 2 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.64)$$

1- Mécanisme 20 : 19+5

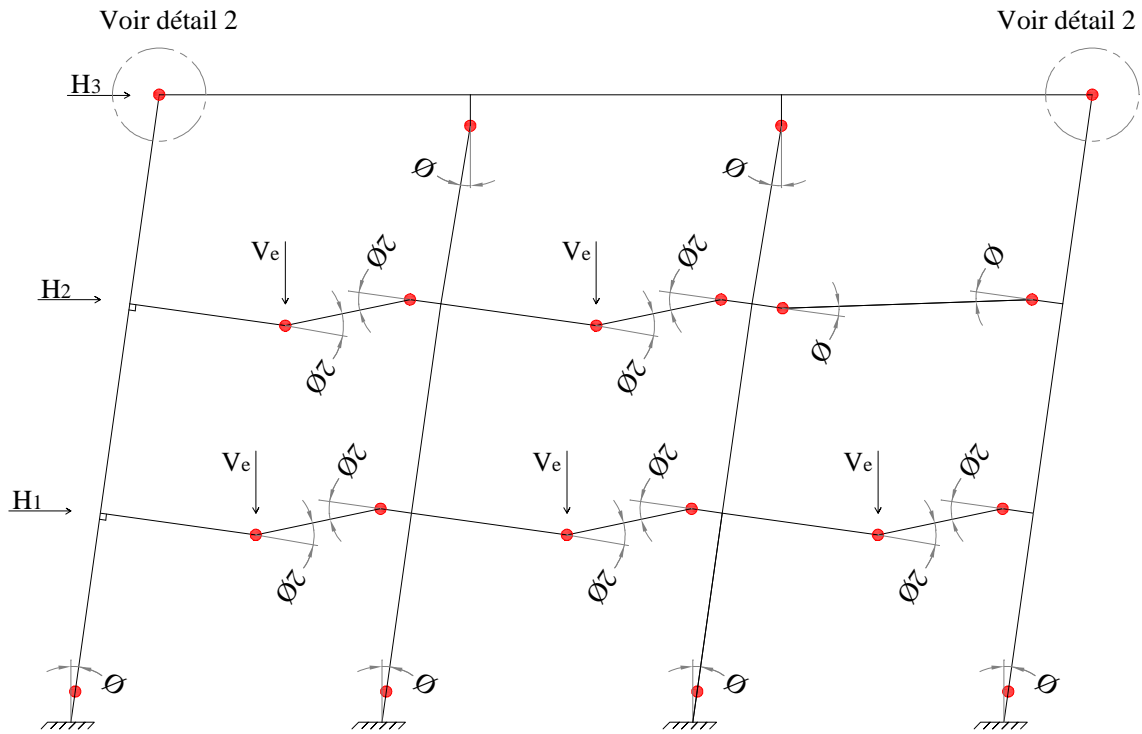


Figure (3.32) : Mécanisme 20 : 19+5

1.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 24 \cdot M_{pb} - 2.5 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.65)$$

1.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 22 \cdot M_{pb} - 2.5 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.66)$$

m- Mécanisme 21 : 20+6

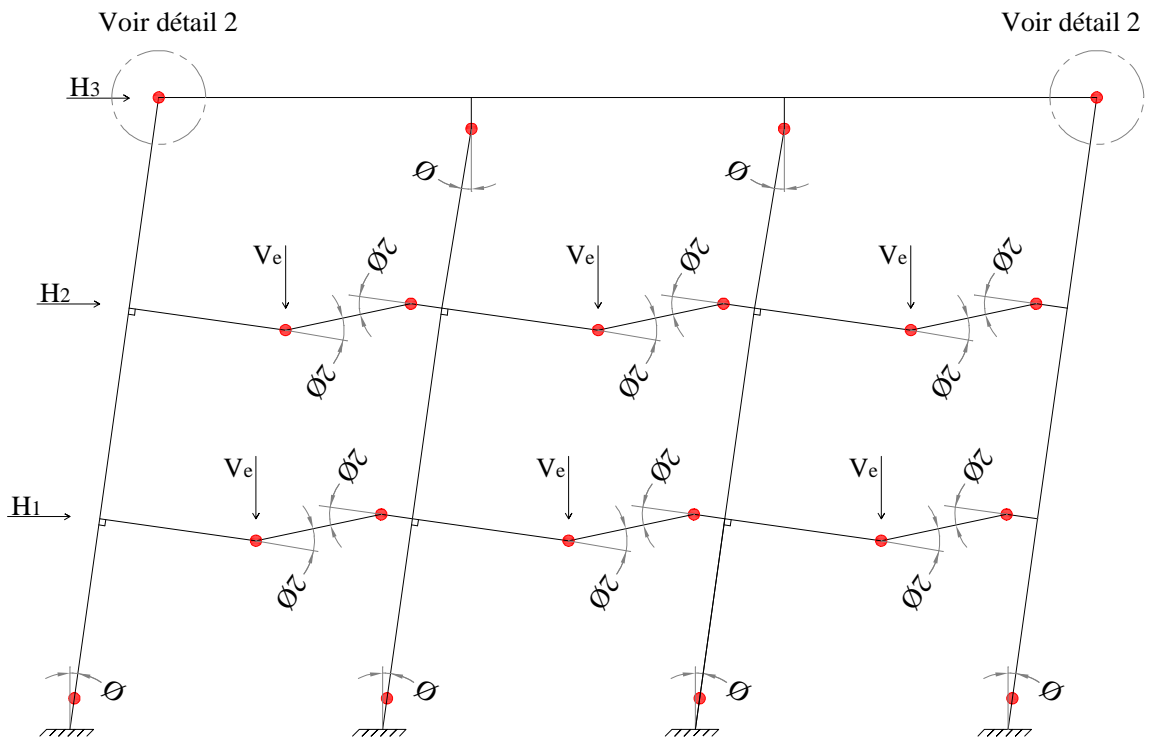


Figure (3.33) : Mécanisme 21 : 20+6

m.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 26 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.67)$$

m.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{8 \cdot M_{pc} + 24 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L}{h} \quad (3.68)$$

n- Mécanisme 22 : 21+7

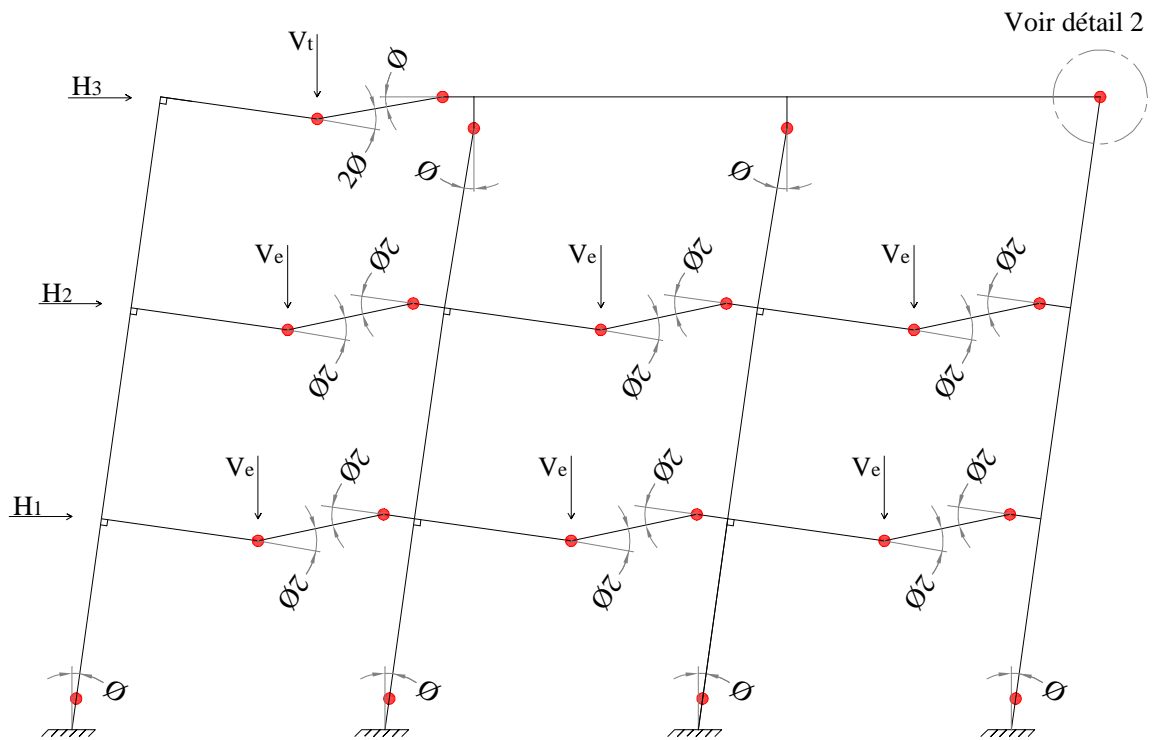


Figure (3.34) : Mécanisme 22 : 21+7

n.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 28 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.69)$$

n.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{7 \cdot M_{pc} + 27 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L - 0.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.70)$$

o- Mécanisme 23 : 22+8+13

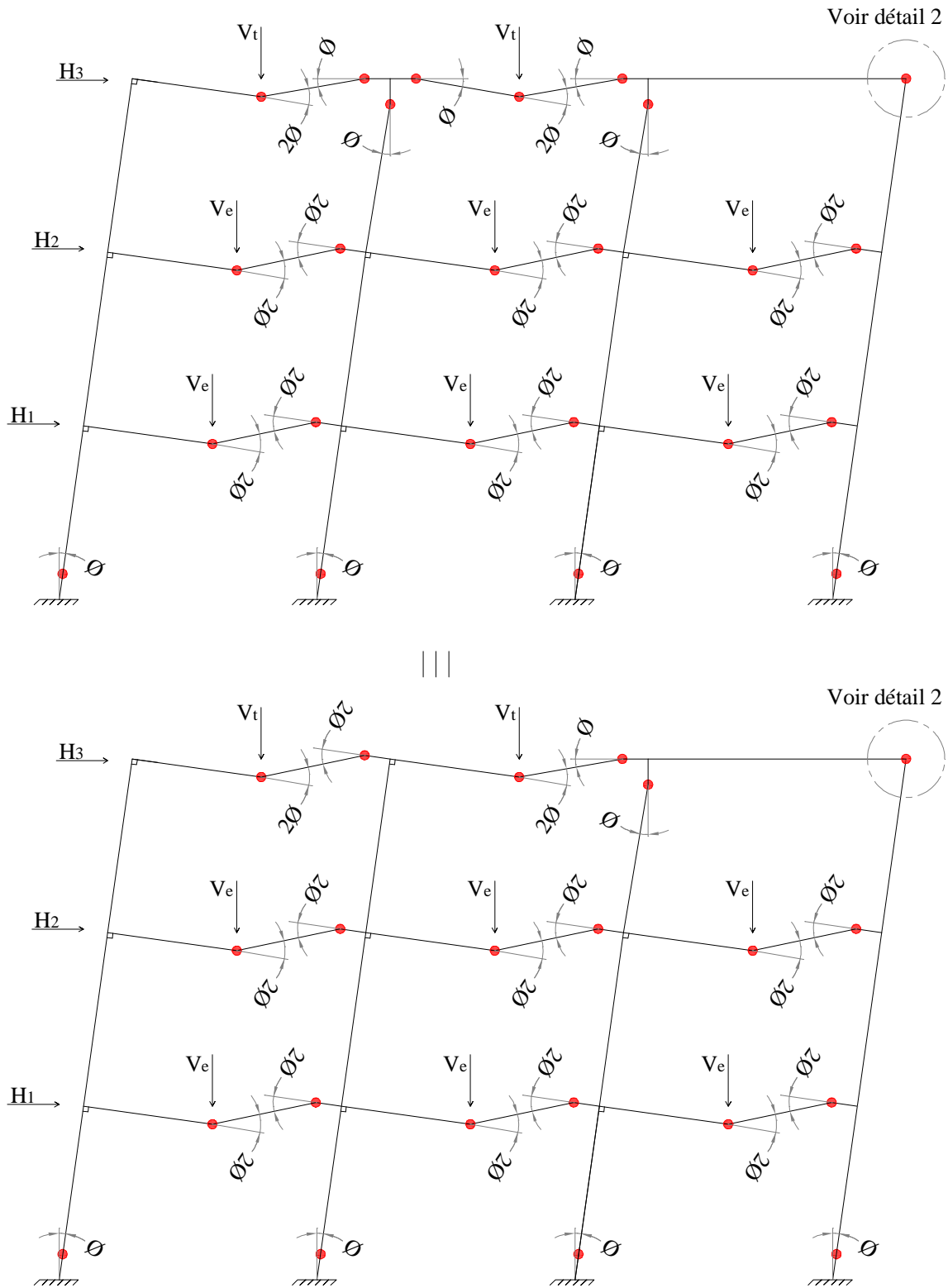


Figure (3.35) : Mécanisme 23 : 22+8+13

o.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{5 \cdot M_{pc} + 32 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L - V_t \cdot L}{h} \quad (3.71)$$

o.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 31 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L - V_t \cdot L}{h} \quad (3.72)$$

p- Mécanisme 24 : 23+9+13

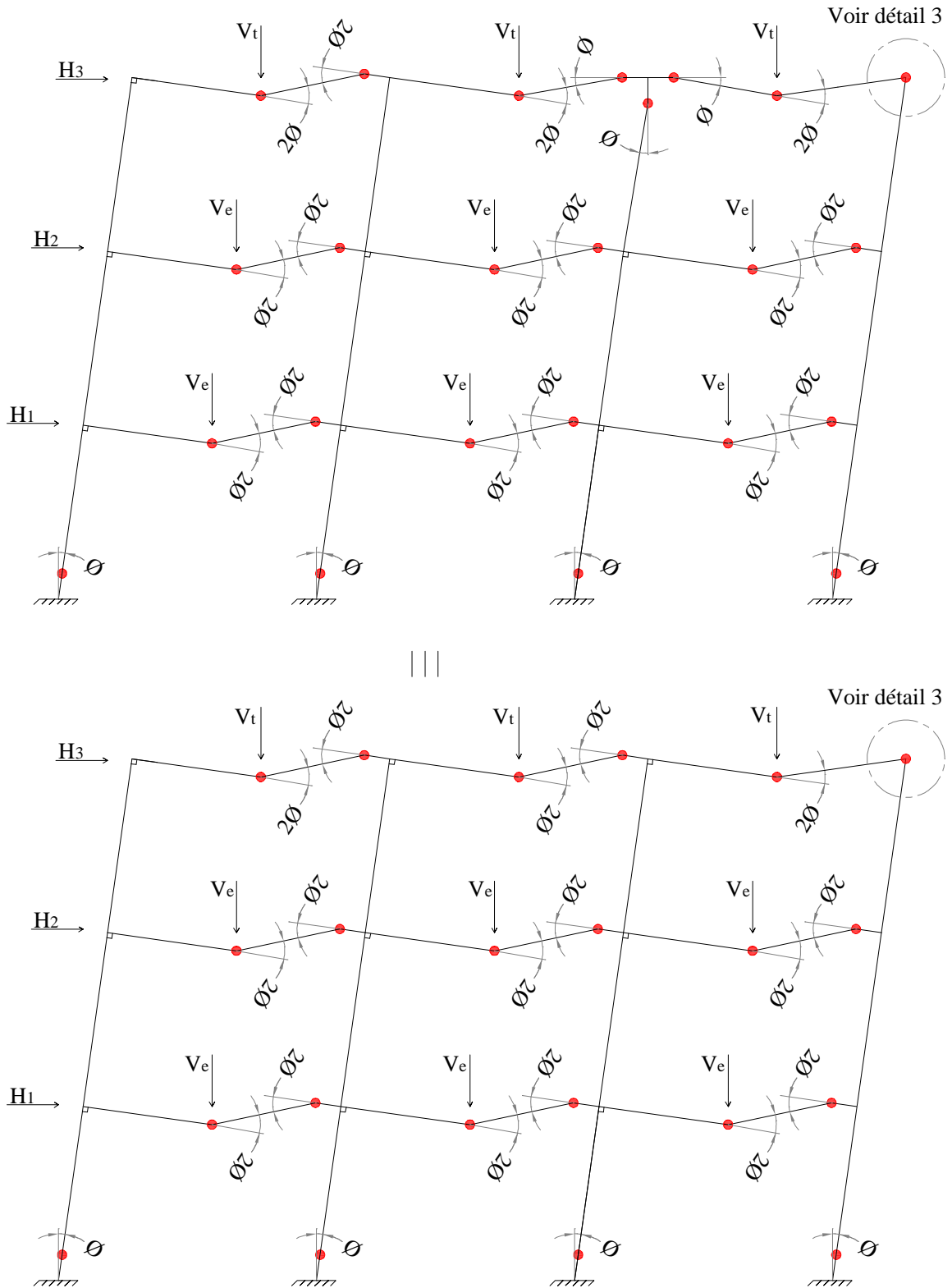


Figure (3.36) : Mécanisme 24 : 23+9+13

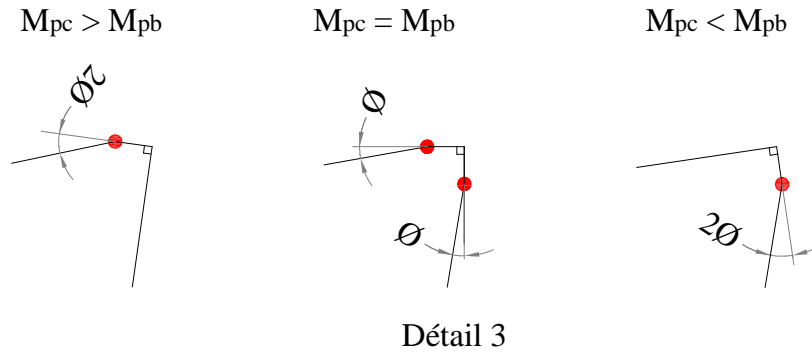


Figure (3.37) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

o.1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{4 \cdot M_{pc} + 36 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L - 1.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.73)$$

o.2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 34 \cdot M_{pb} - 3 \cdot V_e \cdot L - 1.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.74)$$

3.5 PORTIQUE A CINQ NIVEAUX TROIS TRAVEES (5N-3T)

Considérons figure (3.38) le portique encasté à sa base, soumis à des charges verticales concentrées V_t au terrasse et V_e au étage courant au milieu de travée des poutres et des charges concentrées horizontales H_1, H_2, H_3, H_4 et H_5 , appliquées au niveau des jonctions poteaux-poutres.

L'objectif premier est la détermination et l'identification de l'ensemble de mécanismes de ruine possibles et les différentes charges de ruine.

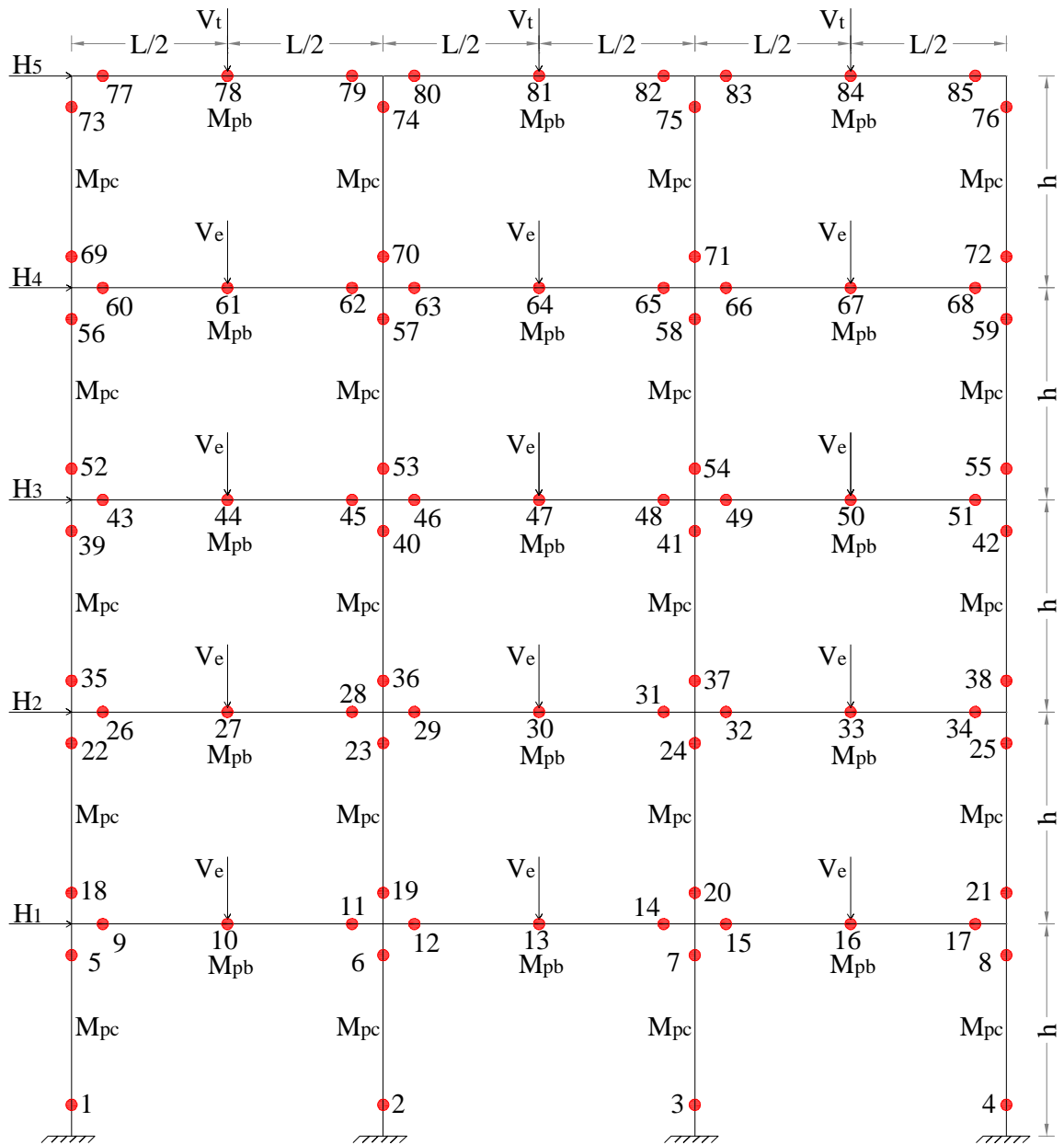


Figure (3.38) : Caractéristique de portique

M_{pc} : Le moment de plastification du poteau

M_{pb} : Le moment de plastification de la poutre,

La rotule plastique apparait dans l'élément de faible inertie c'est-à-dire de faible de moment plastique.

$$r = k - j \tag{3.75}$$

r : degré d'hyperstaticité

k : nombre de barres

j : nombre de rotules mécaniques

$$r = 45 - 0 = 45$$

Le portique est quarante-cinq fois hyperstatiques avec quatre-vingt-cinq sections critiques, les sections critiques sont représentées dans la figure (3.38) et sont numérotées de 1 à 85.

La même procédure précédente on a :

- Mécanisme 40 :

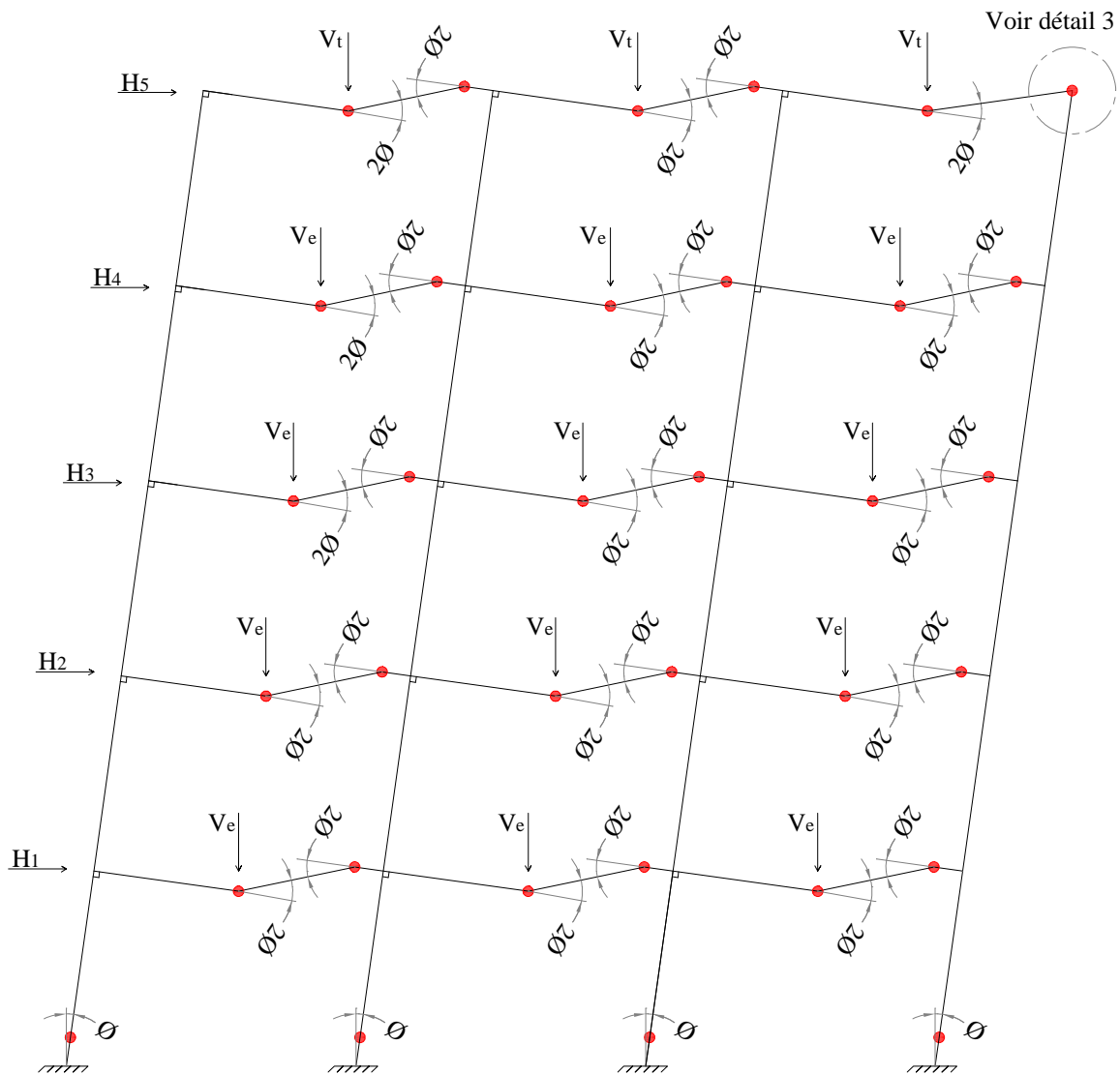


Figure (3.39) : Mécanisme 40

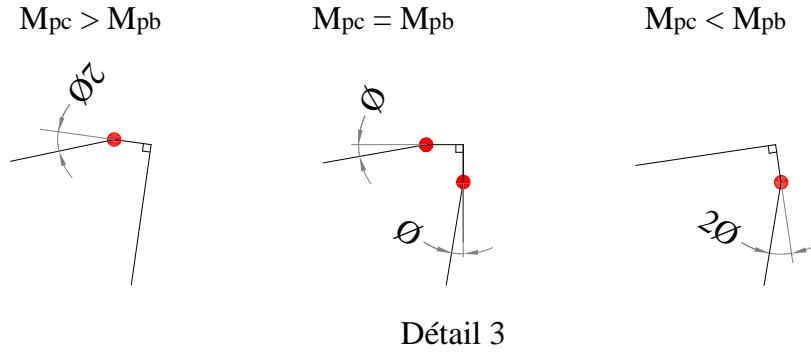


Figure (3.40) : Détail 3 (Rotule plastique dans les jonctions poteaux-poutres)

1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 + 4 \cdot H_4 + 5 \cdot H_5 = \frac{4 \cdot M_{pc} + 60 \cdot M_{pb} - 6 \cdot V_e \cdot L - 1.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.76)$$

2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$H_1 + 2 \cdot H_2 + 3 \cdot H_3 + 4 \cdot H_4 + 5 \cdot H_5 = \frac{6 \cdot M_{pc} + 58 \cdot M_{pb} - 6 \cdot V_e \cdot L - 1.5 \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.77)$$

3.6 PORTIQUE A N NIVEAUX M TRAVEES (nN-mT)

Pour : $m > 1$ ou $n > 1$

Mécanisme : $2 \cdot n \cdot (m + 1)$

1- Cas $M_{pc} > M_{pb}$

$$\sum_{n=1}^N n \cdot H_n = \frac{(m+1) \cdot M_{pc} + 4 \cdot n \cdot m \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot (n-1) \cdot m \cdot V_e \cdot L - 0.5 \cdot m \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.78)$$

2- Cas $M_{pc} \leq M_{pb}$

$$\sum_{n=1}^N n \cdot H_n = \frac{(m+3) \cdot M_{pc} + (4 \cdot n \cdot m - 2) \cdot M_{pb} - 0.5 \cdot (n-1) \cdot m \cdot V_e \cdot L - 0.5 \cdot m \cdot V_t \cdot L}{h} \quad (3.79)$$

CHAPITRE 4

INTERPRETATION DES RESULTATS

INTERPRETATION DES RESULTATS

4.1 INTRODUCTION

L'objectif primordial de l'étude plastique des structures est la détermination des 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 hyperstatiques 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.

Évidemment 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 $(r+1)^{\text{ième}}$ rotule plastique.

Pour cela, plusieurs cas de portiques avec des caractéristiques géométriques et mécaniques ont été étudiés.

4.2 PORTIQUE A UN NIVEAU UNE TRAVEE (1N-1T)

Les caractéristiques géométrique et mécanique ainsi que les charges sont représentées ci-dessous :

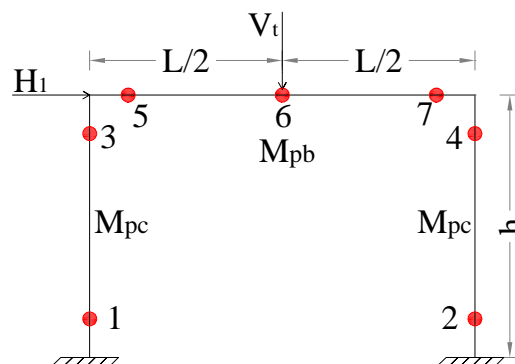


Figure (4.1) : Caractéristique de portique 1N-1T

- Caractéristique géométrique : $L = 4.00$ m, $h = 3.40$ m
- Caractéristique mécanique : $f_y = 235$ MPa

Le nombre de rotules nécessaires pour avoir un mécanisme de ruine est $n = r + 1 = 4$

4.2.1 Dimensionnement de portique

Le portique est dimensionné en élasticité pour plus de détails concernant la méthode, voir la méthode de dimensionnement dans l'Annexe A.

Niv.	dimension		Charge Horizontale		Combinaison		Moment fléchissant	
	L	h	G (KN)	Q (KN)	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	4.00	3.40	101	16.0	ELU, ELS G+Q±E	ELU, ELS G+Q±1.2E	130 -31.7	28.0 -34.2
Niv.	Effort Normal		Effort Tranchant		Dimensionnement		Moment Plastique	
	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	0.00 0.00	81.3 66.2	80.2 64.2	12.2 17.4	IPE 300	IPE 200	148	52

Tableau (4.1) : Dimensionnement de portique

- Condition de poteau fort - poutre faible :

$$M_{pc} \geq 1.25 \cdot M_{pb}, \text{ donc le profil de poteaux deviendra : IPE 330}$$

- Périodes calculées ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques (RPA) appropriées de plus 30% :

$$T_{calc.} \leq 1.30 \cdot T_{RPA} = 1.30 \cdot 0.085 \cdot 3.40^{3/4} = 0.276$$

Donc le profil de poteau deviendra : IPE 300

4.2.2 Détermination des charges horizontales $H_{plastique}$ par l'analyse plastique

On va étudier les trois cas (portique avec trois profils de poteau).

Poteau		Poutre		Méc. 1	Méc. 2	Mécanisme 3	
Profil	M_{pc}	Profil	M_{pc}	V	H	$V_t = G+Q$	H_1
IPE 200	52	IPE 300	148	200	61	117	79
IPE 300	148			295	174	117	192
IPE 330	189			295	198	117	216

Tableau (4.2) : Charges horizontales $H_{plastique}$

4.2.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales H_{modale} ont été déterminées par la méthode modale et qui seront à leur tour comparées avec les charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ calculées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	Période	Charge Horizontale Modale	Charge Verticale	Charge Horizontale Plastique	Rapport
Profil	T	H_{modale}	$V_t = G + Q$	$H_{\text{plastique}}$	$H_{\text{mod}}/H_{\text{pl}}$
IPE 200	0.448	14.0	117	61	0.23
IPE 300	0.253	14.0	117	174	0.08
IPE 330	0.225	14.0	117	198	0.07

Tableau (4.3) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ varient en fonction de la section du profilé du poteau, puisque en augmentant la section du profilé le moment plastique résistant augmente. Ceci implique donc que les charges horizontales de ruine augmentent, par contre, les charges horizontales H_{modale} sont constantes car la période T_2 du spectre de calcul est supérieure aux périodes calculées ($0 \leq T \leq T_2$).

Il faut remarquer aussi que le rapport entre les charges horizontales données par le calcul modale H_{modale} et la charge de ruine donnée par le calcul plastique $H_{\text{plastique}}$, $\left(\frac{H_{\text{modale}}}{H_{\text{plastique}}}\right)$ est compris entre 0.23 pour la section du profilé du poteau IPE 200 et 0.07 pour la section de profilé du poteau IPE 330.

Donc, une structure dimensionnée en élasticité présente toute la garantie d'être en sécurité même après un séisme d'intensité supérieure celle de calcul. Ceci est dû au fait que le rapport entre la charge horizontale modale et la charge de ruine du portique est de plus égale à 0.23, mais est loin d'être économique.

4.2.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales H_{SAP} ont été déterminées par le logiciel SAP2000 et sont comparées alors aux charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ qui sont déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	Charge Verticale	analyse plastique	Début de plastification des rotules	Plastification totale des rotules	Rapport	
Profil	V_t	$H_{plastique}$	$H_{SAP.début}$	$H_{SAP.fin}$	$H_{pl}/H_{SAP.début}$	$H_{pl}/H_{SAP.fin}$
IPE 200	117	61	63	68	0.97	0.90
IPE 300		174	181	190	0.96	0.91
IPE 330		198	208	218	0.95	0.91

Tableau (4.4) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{plastique}$

Les charges horizontales de ruine $H_{plastique}$ et H_{SAP} varient en fonction de la section du profilé du poteau, puisque en augmentant la section du profilé le moment plastique résistant augmente lui aussi et donc les charges horizontales de ruine.

Il est à remarquer également que le rapport entre les charges horizontales données par le calcul plastique $H_{plastique}$ et la charge de ruine donnée par le calcul de logiciel SAP2000 H_{SAP} , $\left(\frac{H_{plastique}}{H_{SAP}}\right)$ est compris entre 0.95 et 0.97 pour le début de plastification des section et 0.90 et 0.91 pour la plastification totale des rotules plastiques, ceci pour les différentes sections du profilé de poteau.

Il faut remarquer aussi qu'il y a une légère différence entre les charges horizontales obtenues par l'analyse plastique manuelle et les charges horizontales obtenues par l'analyse plastique par le logiciel SAP2000.

4.3 PORTIQUE A UN NIVEAU TROIS TRAVEES (1N-3T)

Les caractéristique géométrique et mécanique ainsi que les charges sont représenté au dessous :

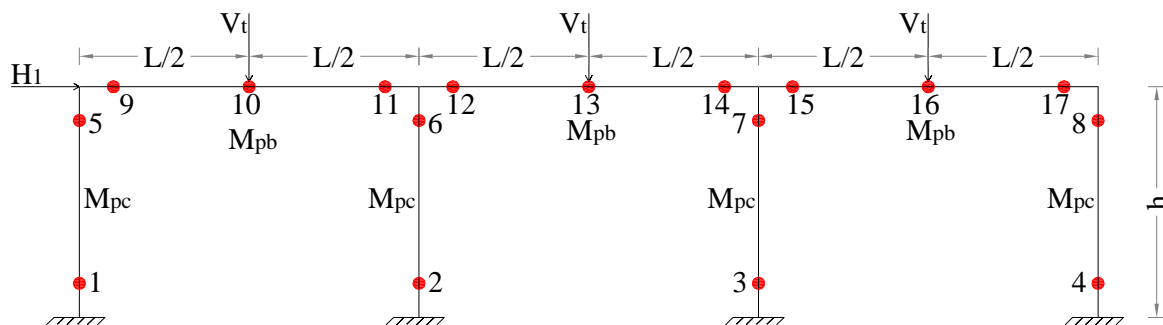


Figure (4.2) : Caractéristique de portique 1N-3T

- Caractéristique géométrique : $L = 4.00$ m, $h = 3.40$ m
- Caractéristique mécanique : $f_y = 235$ MPa

Le nombre de rotules nécessaires pour avoir un mécanisme de ruine est $n = 9 + 1 = 10$

4.3.1 Dimensionnement de portique

Le portique est dimensionné en élasticité, voir la méthode de dimensionnement dans l'Annexe A.

Niv.	dimension		Charge Horizontale		Combinaison		Moment fléchissant	
	L	h	G (KN)	Q (KN)	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	4.00	3.40	101	16.0	ELU, ELS G+Q±E	ELU, ELS G+Q±1.2E	100 -93.5	30.8 -37.2
Niv.	Effort Normal		Effort Tranchant		Dimensionnement		Moment Plastique	
	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	0.00 0.00	54.1 54.1	63.2 97.1	20.0 20.0	IPE 270	IPE 200	114	52

Tableau (4.5) : Dimensionnement de portique

- Condition de poteau fort - poutre faible :
 $M_{pc} \geq 1.25 \cdot M_{pb}$, donc le profile de poteaux deviendra : IPE 300
- Périodes calculées ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques (RPA) appropriées de plus 30% :
 $T_{calc.} \leq 1.30 \cdot T_{RPA} = 1.30 \cdot 0.085 \cdot 3.40^{3/4} = 0.276$
 Donc le profile de poteau deviendra : IPE 330

4.3.2 Détermination des charges horizontales $H_{plastique}$ par l'analyse plastique

Il est question d'étudier trois cas (portique avec trois profilés de poteau).

Poteau		Poutre		Méc. 1	Méc. 4	Mécanisme 8	
type	M_{pc}	type	M_{pc}	V	H	$V_t (G+Q)$	H
IPE 200	52	IPE 270	114	197	122	117	220
				227			
IPE 300	148			227	327	117	369
IPE 330	189			227	400	117	417

Tableau (4.6) : Charges horizontales $H_{plastique}$

4.3.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales H_{modale} sont déterminées par la méthode modale et qui sont alors comparées aux charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	Période	Charge Horizontale Modale	Charge Verticale	Charge Horizontale Plastique	Rapport
Profil	T	H_{modale}	$V_t = G+Q$	$H_{\text{plastique}}$	$H_{\text{mod}}/H_{\text{pl}}$
IPE 200	0.551	39.6	117	122	0.32
IPE 300	0.311	42.1	117	327	0.13
IPE 330	0.276	42.1	117	400	0.11

Tableau (4.7) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ varient en fonction de la section du profilé de poteau, puisque en augmentant la section du profilé le moment plastique résistant augmente et ainsi les charges horizontales de ruine augmentent, par contre, les charges horizontales H_{modale} ont une légère variation.

Il faut remarquer aussi que le rapport entre les charges horizontales données par le calcul modale H_{modale} et la charge de ruine donnée par le calcul plastique $H_{\text{plastique}}$, $\left(\frac{H_{\text{modale}}}{H_{\text{plastique}}}\right)$ est de 0.32 pour la section de profil de poteau IPE 200 et de 0.11 pour la section de profil de poteau IPE 330.

Donc une structure dimensionnée en élasticité présente toute la garantie d'être en sécurité même d'après un séisme d'intensité supérieure celle de calcul, par ce que le rapport entre la charge horizontale modale et la charge de ruine de portique est de plus égale à 0.32.

4.3.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales H_{SAP} calculées par le logiciel SAP2000 et qui sont alors comparées aux charges horizontales $H_{\text{plastique}}$ déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	Poutre	analyse plastique	Début de plastification des rotules	Plastification totale des rotules	Rapport	
Profil	V_t	$H_{\text{plastique}}$	$H_{\text{SAP.début}}$	$H_{\text{SAP.fin}}$	$H_{\text{pl}}/H_{\text{SAP.début}}$	$H_{\text{pl}}/H_{\text{SAP.fin}}$
IPE 200	117	122	122	134	1.00	0.91
IPE 300		327	333	344	0.98	0.95
IPE 330		400	402	419	1.00	0.96

Tableau (4.8) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales de ruine $H_{\text{plastique}}$ et H_{SAP} varient en fonction de la section du profilé du poteau, puisque en augmentant la section du profilé le moment plastique résistant augmente ainsi que les charges horizontales de ruine.

Il faut remarquer que le rapport entre les charges horizontales données par le calcul plastique $H_{\text{plastique}}$ et la charge de ruine donnée par le calcul de logiciel SAP2000 H_{SAP} , $\left(\frac{H_{\text{plastique}}}{H_{\text{SAP}}}\right)$ est compris entre 0.98 et 1.00 pour le début de plastification des section et 0.91 et 0.96 pour la plastification totale des rotules plastiques, ceci pour les différentes sections de profil de poteau.

Il faut noter aussi qu'il y a une légère différence entre les charges horizontales obtenues par l'analyse plastique manuelle et les charges horizontales obtenues par l'analyse plastique par le logiciel SAP2000.

4.4 PORTIQUE A TROIS NIVEAUX TROIS TRAVEES (3N-3T)

Les caractéristiques géométrique et mécanique ainsi que les charges sont représentées ci dessous :

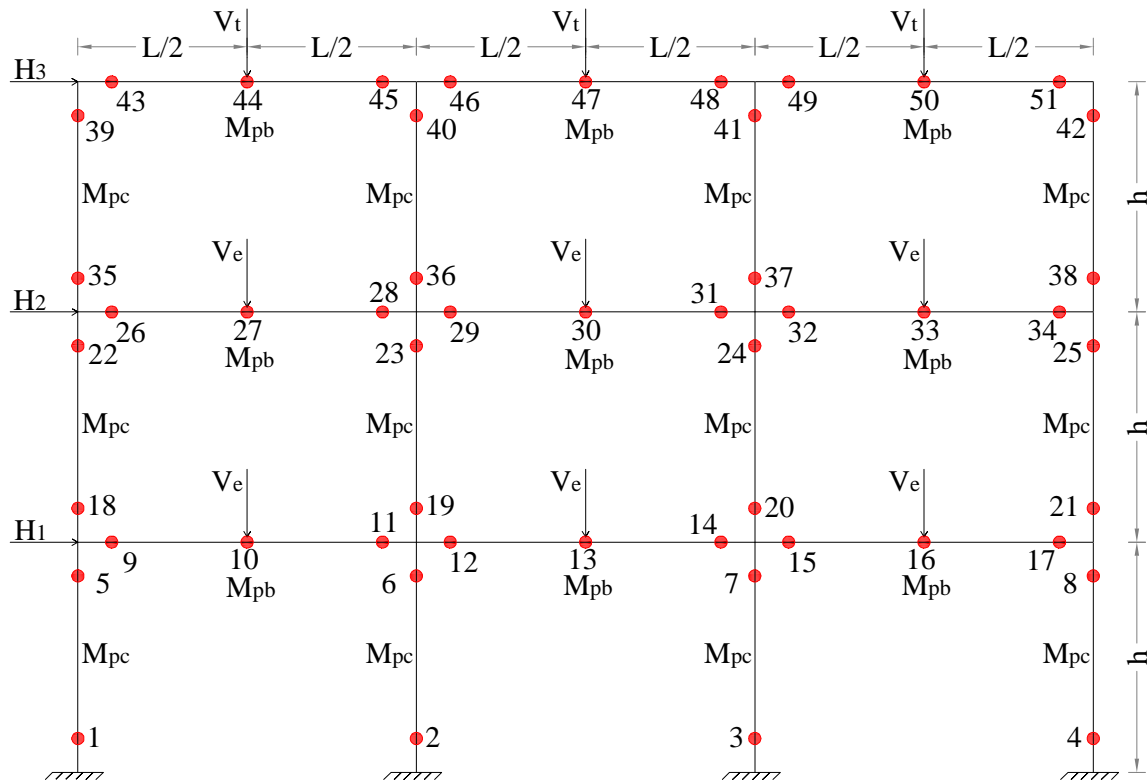


Figure (4.3) : Caractéristique de portique 3N-3T

- Caractéristique géométrique : $L = 4.00$ m, $h = 3.40$ m
- Caractéristique mécanique : $f_y = 235$ MPa

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

4.4.1 Dimensionnement du portique

Le portique est dimensionné en élasticité, voir la méthode dans l'Annexe A.

Niv.	dimension		Charge Horizontale		Combinaison		Moment fléchissant	
	L	h	G (KN)	Q (KN)	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	4.00	3.40	88.0	24.0	ELU ELS G+Q±E	ELU ELS G+Q±1.2E	94.0 -94.8	50.1 -50.6
2	4.00	3.40	88.0	24.0				
3	4.00	3.40	101	16.0				
Niv.	Effort Normal		Effort Tranchant		Dimensionnement		Moment Plastique	
	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	0.00 0.00	203 58.7	69.7 80.1	27.3 25.7	IPE 270	IPE 240	114	86
2								
3								

Tableau (4.9) : Dimensionnement de portique

- Condition de poteau fort - poutre faible :
 $M_{pc} \geq 1.25 \cdot M_{pb}$, donc le profile de poteaux deviendra : IPE 300
- Périodes calculées ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques (RPA) appropriées de plus 30% :
 $T_{calc.} \leq 1.30 \cdot T_{RPA} = 1.30 \cdot 0.085 \cdot 10.20^{3/4} = 0.631$
 Donc le profile de poteau deviendra : IPE 400

4.4.2 Détermination des charges horizontales H_{plastique} par l'analyse plastique

Trois cas (portique avec trois profils de poteau) sont étudiés.

On a : $V_e = 0.95 \cdot V_t$, $H_1 = 0.30 \cdot H_3$, $H_2 = 0.60 \cdot H_3$

Poteau		Poutre		Méc. 1	Méc. 15	Mécanisme 24	
type	M _{pc}	type	M _{pc}	V	H ₃	V _t = G+Q	H ₃
IPE 240	86	IPE 270	114	214	134	117	154
				227			
IPE 300	148			227	162	117	173
IPE 400	307			227	225	117	215

Tableau (4.10) : Charges horizontales H_{plastique}

4.4.3 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{modale} avec $H_{plastique}$

Comme pour les autres cas les charges horizontales H_{modale} sont déterminées par la méthode modale. Ces efforts horizontaux sont comparés aux charges horizontales $H_{plastique}$ déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	Période	Charge Horizontale Modale	Charge Verticale	Charge Horizontale Plastique	Rapport
Profil	T	H_{modale}	$V_t = G+Q$	$H_{plastique}$	H_{mod}/H_{pl}
IPE 240	1.063	75.6	117	255	0.30
IPE 300	0.949	75.6	117	308	0.25
IPE 400	0.694	80.8	117	427	0.19

Tableau (4.11) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{plastique}$

Les charges horizontales $H_{plastique}$ varient en fonction de la section du profilé du poteau, puisque en augmentant la section de profil le moment plastique résistant augmente donc les charges horizontales de ruine augmentent elles aussi, par contre, les charges horizontales H_{modale} varient très peu.

Il faut remarquer aussi que le rapport entre les charges horizontales données par le calcul modale H_{modale} et la charge de ruine donnée par le calcul plastique $H_{plastique}$, $\left(\frac{H_{modale}}{H_{plastique}}\right)$ est de 0.30 pour la section de profil de poteau IPE 240 et de 0.19 pour la section de profil de poteau IPE 400.

Donc une structure dimensionnée en élasticité présente toute la garantie d'être en sécurité même d'après un séisme d'intensité supérieure celle de calcul, par ce que le rapport entre la charge horizontale modale et la charge de ruine du portique est bien e plus de 0.30.

4.4.4 Détermination et comparaison des charges horizontales H_{SAP} avec $H_{plastique}$

La détermination des charges horizontales H_{SAP} est réalisée par le logiciel SAP2000 et les résultats obtenus sont comparés avec les charges horizontales $H_{plastique}$ déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	charge verticale	analyse plastique	Début de plastification des rotules	Plastification totale des rotules	Rapport	
Profil	V_t	$H_{\text{plastique}} (H_3)$	$H_{\text{SAP.début}} (H_3)$	$H_{\text{SAP.fin}} (H_3)$	$H_{\text{pl}}/H_{\text{SAP.début}}$	$H_{\text{pl}}/H_{\text{SAP.fin}}$
IPE 240	117	134	138	145	0.97	0.92
IPE 300		162	168	178	0.96	0.91
IPE 400		225	233	233	0.96	0.96

Tableau (4.12) : Charges horizontales HSAP et $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales de ruine $H_{\text{plastique}}$ et H_{SAP} varient en fonction de la section du profilé du poteau, puisque en augmentant la section du profilé le moment plastique résistant augmente ainsi que les charges horizontales de ruine.

Il faut remarquer que le rapport entre les charges horizontales données par le calcul plastique $H_{\text{plastique}}$ et la charge de ruine donnée par le calcul de logiciel SAP2000 H_{SAP} , $\left(\frac{H_{\text{plastique}}}{H_{\text{SAP}}}\right)$ est compris entre 0.96 et 0.97 pour le début de plastification des section et 0.91 et 0.96 pour la plastification totale des rotules plastiques, ceci pour les différentes sections de profil de poteau.

Il faut noter aussi qu'il y a une légère différence entre les charges horizontales obtenues par l'analyse plastique manuelle et les charges horizontales obtenues par l'analyse plastique par le logiciel SAP2000.

4.5 PORTIQUE A CINQ NIVEAUX TROIS TRAVEES (5N-3T)

Les caractéristiques géométrique et mécanique ainsi que les charges sont représentées ci dessous :

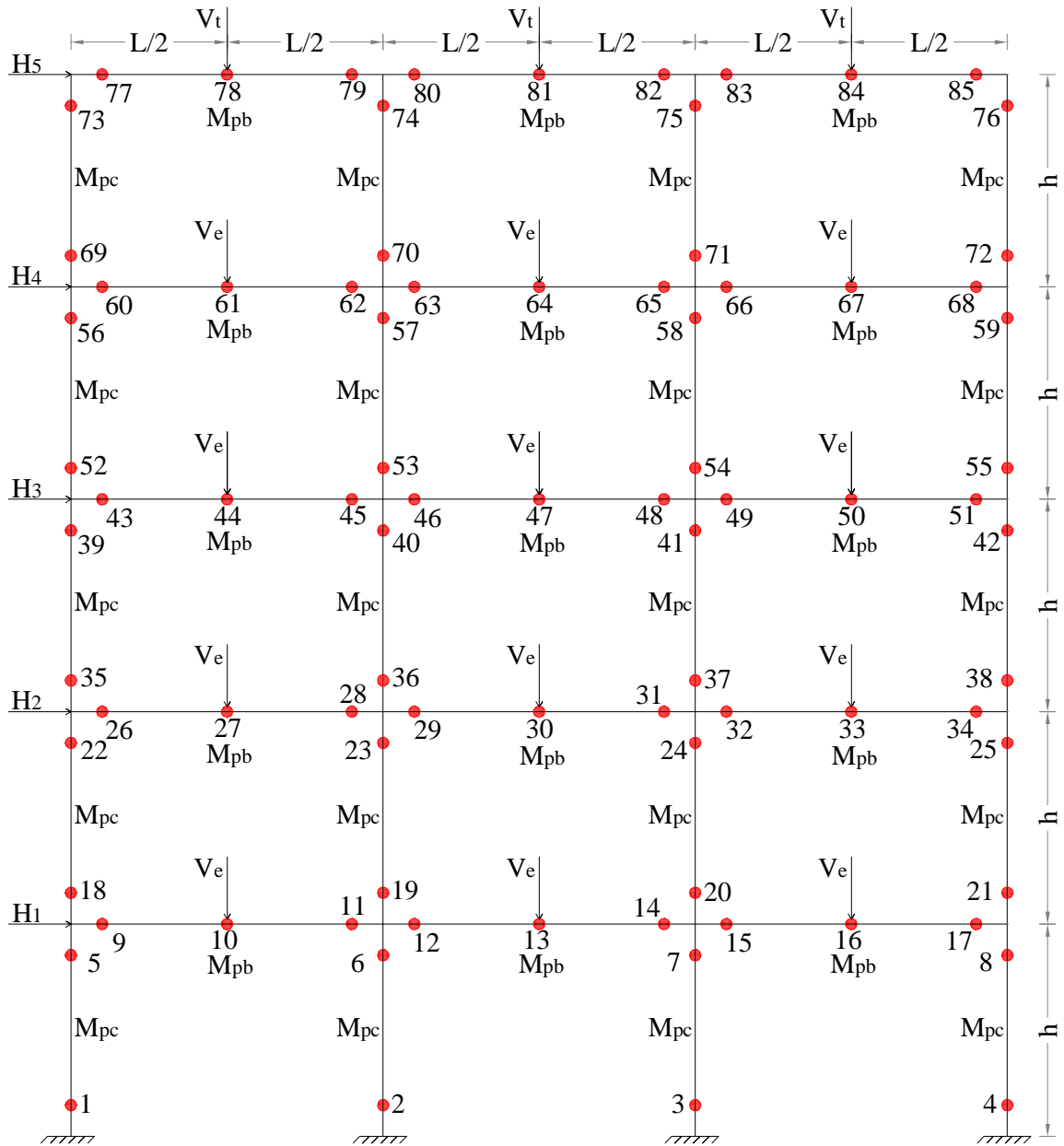


Figure (4.4) : Caractéristique de portique 5N-3T

Le nombre de rotules nécessaires pour avoir un mécanisme de ruine est $n = r + 1 = 46$

4.5.1 Dimensionnement de portique

Le portique est dimensionné en élasticité, voir la méthode dans l'Annexe A.

Niv.	dimension		Charge Horizontale		Combinaison		Moment fléchissant	
	L	h	G (KN)	Q (KN)	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	4.00	3.40	88	24.0	ELU ELS G+Q±E	ELU ELS G+Q±1.2E	31.6 -86.0	78.4 59.7
2	4.00	3.40	88	24.0				
3	4.00	3.40	88	24.0				
4	4.00	3.40	88	24.0				
5	4.00	3.40	101	16.0				
Niv.	Effort Normal		Effort Tranchant		Dimensionnement		Moment Plastique	
	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau	Poutre	Poteau
1	0.00 0.00	582 457	0.60 80.7	34.1 35.9	IPE 270	IPE 330	114	189
2								
3								
4								
5								

Tableau (4.13) : Dimensionnement de portique

- Périodes calculées ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques (RPA) appropriées de plus 30% :

$$T_{calc.} \leq 1.30 \cdot T_{RPA} = 1.30 \cdot 0.085 \cdot 17.00^{3/4} = 0.925$$

Donc le profile de poteau deviendra : IPE 600

4.5.2 Détermination des charges horizontales H_{plastique} par l'analyse plastique

On va étudier les deux cas (portique avec deux profils de poteau).

On a : $V_e = 0.95 \cdot V_t$ $H_1 = 0.18 \cdot H_5$
 $H_2 = 0.36 \cdot H_5$ $H_3 = 0.54 \cdot H_5$ $H_4 = 0.72 \cdot H_5$

Poteau		Poutre		Méc. 1	Méc. 25	Mécanisme 40	
Type	M _{pc}	Type	M _{pc}	V	H ₃	V _t	H ₅
IPE 330	189	IPE 270	114	227	116	117	119
IPE 600	825			227	224	117	191

Tableau (4.14) : Charges horizontales H_{plastique}

4.5.3 Détermination et comparaison les charges horizontales H_{modale} avec $H_{plastique}$

Les charges horizontales H_{modale} sont déterminées par la méthode modale et les résultats sont comparés avec les charges horizontales $H_{plastique}$ déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	Période	Charge Horizontale Modale	Charge Verticale	Charge Horizontale Plastique	Rapport
Profil	T	H_{modale}	$V_t = G+Q$	$H_{plastique}$	H_{mod}/H_{pl}
IPE 330	1.337	100	117	324	0.31
IPE 600	0.958	103	117	626	0.16

Tableau (4.15) : Charges horizontales H_{modale} et $H_{plastique}$

Les charges horizontales $H_{plastique}$ varient en fonction de la section de profil de poteau, puisque on augmente la section de profil le moment plastique résistant augmente donc les charges horizontales de ruine augmentent, par contre, les charges horizontales H_{modale} ont une légère variation.

On remarque aussi que le rapport entre les charges horizontale donnée par le calcul modale H_{modale} et la charge de ruine donnée par le calcul plastique $H_{plastique}$, $\left(\frac{H_{modale}}{H_{plastique}}\right)$ compris entre 0.31 pour la section de profil de poteau IPE 330 et 0.16 pour la section de profil de poteau IPE 600.

Donc une structure dimensionnée en élasticité présente toute la garantie d'être en sécurité même après un séisme d'intensité supérieure celle de calcul, par ce que le rapport entre la charge horizontale modale et la charge de ruine de portique est de plus égale à 0.31.

4.5.4 Détermination et comparaison les charges horizontales H_{SAP} avec $H_{plastique}$

Les charges horizontales H_{SAP} sont calculées par le logiciel SAP2000 et qui sont q leur tour comparées aux charges horizontales $H_{plastique}$ qui sont déterminées précédemment par l'analyse plastique.

Poteau	charge verticale	analyse plastique	Début de plastification des rotules	Plastification totale des rotules	Rapport	
Profil	V_t	$H_{\text{plastique}} (H_5)$	$H_{\text{SAP.début}} (H_5)$	$H_{\text{SAP.fin}} (H_5)$	$H_{\text{pl}}/H_{\text{SAP.début}}$	$H_{\text{pl}}/H_{\text{SAP.fin}}$
IPE 330	117	324	348	360	0.93	0.90
IPE 600		626	680	703	0.92	0.89

Tableau (4.16) : Charges horizontales H_{SAP} et $H_{\text{plastique}}$

Les charges horizontales de ruine $H_{\text{plastique}}$ et H_{SAP} varient en fonction de la section de profil de poteau, puisque on augmente la section de profil le moment plastique résistant augmente donc les charges horizontales de ruine augmentent.

On remarque que le rapport entre les charges horizontale donnée par le calcul plastique $H_{\text{plastique}}$ et la charge de ruine donnée par le calcul de logiciel SAP2000 H_{SAP} , $\left(\frac{H_{\text{plastique}}}{H_{\text{SAP}}}\right)$ est compris entre 0.92 et 0.93 pour le début de plastification des section et 0.89 et 0.90 pour la plastification totale des rotules plastiques, ceci pour les différentes sections de profil de poteau.

On remarque aussi qu'il y a une légère différence entre les charges horizontales obtenu par l'analyse plastique manuelle et les charges horizontales obtenu par l'analyse plastique par le logiciel SAP2000.

CONCLUSION

CONCLUSION

Le travail entrepris lors de cette recherche a montré comment est obtenue la détermination des mécanismes de ruine et les charges de ruine des structures métalliques composées de différents portiques par l'analyse plastique en utilisant les théorèmes fondamentaux et aussi par le logiciel SAP2000 tout en faisant varier la section des profilés de poteaux. La condition de mécanisme conformément aux théorèmes de la plasticité c'est à dire le développement du nombre de rotules nécessaires pour la transformation du portique en un mécanisme $n=r+1$ n'est pas obligatoirement satisfaite pour les portiques à plus d'un niveau. Cette non satisfaction de la condition de mécanisme a été observée pour les cas où un mécanisme élémentaire où la combinaison de deux ou plusieurs mécanismes élémentaires se seront développés, et ainsi la ruine engendrée par écoulement quand la charge verticale augmente (condition d'écoulement conformément aux théorèmes de la plasticité). Une structure dimensionnée en élasticité présente toute la garantie d'être en sécurité même après un séisme d'intensité supérieure à celle de calcul et présente ainsi une capacité portante d'absorber l'énergie dissipée pour un séisme major (une grande marge de sécurité). L'analyse plastique a donnée une vue largement plus réaliste du comportement des structures à la ruine et du degré de sécurité réel que la méthode élastique bien qu'elle conduise à un dimensionnement plus économique (gain non négligeable de poids) et à des calculs souvent plus simples. On observe une légère variation entre les résultats obtenue par l'analyse limite basée sur les théorèmes fondamentaux (cinématique et statique) et les résultats obtenue par l'analyse plastique en utilisant le logiciel SAP2000, cela grâce à l'écrouissage de l'acier (L'écrouissage assure donc une réserve de résistance supplémentaire) car le logiciel SAP2000 est basé sur le diagramme « élasto-plastique » (FEMA-356), contrairement à la méthode d'analyse plastique manuelle (théorèmes fondamentaux) qui basée sur le diagramme « rigide-plastique ».

Ce travail de recherche n'est qu'une initiation au calcul en plasticité des ossatures métalliques et a permis aussi de mettre en exergue les méthodes pratiques et les méthodes numériques ainsi que les hypothèses utilisées et les limites de ces techniques de calcul.

ANNEXE

ANNEXE A

A.1 DETERMINATION DES CHARGES VERTICALES

A.1.1 Charge permanente et Surcharges d'exploitation

Charge permanente

Pour plancher terrasse inaccessible : $G = 6.30 \text{ KN/m}^2$

Pour plancher d'étage courant : $G = 5.50 \text{ KN/m}^2$

Surcharges d'exploitation

Pour plancher terrasse inaccessible : $Q = 1.00 \text{ KN/m}^2$

Pour plancher d'étage courant : $Q = 1.50 \text{ KN/m}^2$

Pour étage courant :

Par m^2 :

$$G = 5.50 \text{ KN/m}^2$$

$$Q = 1.50 \text{ KN/m}^2$$

Par ml :

$$G = 5.50 \times 4.00 = 22.0 \text{ KN/m}$$

$$Q = 1.50 \times 4.00 = 6.00 \text{ KN/m}$$

Concentre : $l = 4.00 \text{ m}$

$$G = 22.0 \times 4.00 = 88.0 \text{ KN}$$

$$Q = 6.00 \times 4.00 = 24.0 \text{ KN}$$

Pour terrasse

Par m^2 :

$$G = 6.30 \text{ KN/m}^2$$

$$Q = 1.00 \text{ KN/m}^2$$

Par ml :

$$G = 6.30 \times 4.00 = 25.2 \text{ KN/m}$$

$$Q = 1.00 \times 4.00 = 4.00 \text{ KN/m}$$

Concentre : $l = 4.00 \text{ m}$

$$G = 25.2 \times 4.00 = 101 \text{ KN}$$

$$Q = 4.00 \times 4.00 = 16.0 \text{ KN}$$

A.2 DETERMINATION DES CHARGES HORIZONTALES

A.2.1 Méthode modale spectrale

Par cette méthode, il est recherché pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de

réponse de calcul. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

A.2.1.1 Facteur de participation

$$\Gamma_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}^2}$$

i : désigné pour l'Etage

j : désigné pour Mode

n : nombre d'étage

k : nombre du mode

Φ_{ij} : La matrice modale

m_i : La masse du niveau i

A.2.1.2 Masses modales effectives

La masse modale est définie comme suite :

$$\bar{m}_j = \frac{\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}^2} \cdot \sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}$$

$$\bar{m}_j = \frac{\left(\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij} \right)^2}{\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}^2} = \Gamma_j \times \sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}$$

\bar{m}_j : Masse modale effective de mode j

Remarque :

La somme de toutes les masses modales effectives est égale à la masse totale de la structure.

$$\sum_{j=1}^k \bar{m}_j = \sum_{i=1}^n m_i$$

A.2.1.3 Effort tranchant sismique modale

$$V_{ij} = \sum_{i=1}^n F_{ij}$$

A.2.1.4 Effort tranchant sismique modale à la base

$$V_j = Sa \times \left(\Gamma_j \cdot \sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij} \right)$$

$$V_j = Sa \cdot \bar{m}_j$$

$$V_j = Sa_j \times \Gamma_j \times \sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij} = Sa_j \times \bar{m}_j$$

Forces latérales Modales :

Lorsqu'en commence de calcul par l'effort tranchant à la base, les forces latérales modales peuvent être obtenues celui-ci comme suite :

$$F_{ij} = C_{ij} \times V_j \text{ avec :}$$

$$C_{ij} = \frac{m_i \times \Phi_{ij}}{\sum_{i=1}^n m_i \times \Phi_{ij}}$$

A.2.1.5 Déplacements modaux

Le déplacement modal de DDLi est :

$$d_{ij} = \Gamma_j \cdot g_{j,\max} \cdot \Phi_{ij}$$

D'une autre façon on peut utiliser l'accélération spectrale pour le calcul des déplacements modaux :

$$d_{ij} = \frac{F_{ij}}{m_i \times w_j^2}$$

A.2.1.6 Déplacement relatif modale

Le déplacement relatif modal dans l'étage i est donnée par :

$$\Delta d_{ij} = d_{ij} - d_{(i-1)j}$$

A.2.1.7 Moment de renversement

Le moment de renversement à la base :

$$M_j = \sum_{i=1}^n F_{ij} \cdot h_i$$

A.2.1.3 Nombre de modes à considérer

- Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions orthogonales, le nombre de modes de vibration à retenir dans chacune des deux directions d'excitation doit être tel que :
- la somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit égale à 90 % au moins de la masse totale de la structure.
- ou que tous les modes ayant une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale de la structure soient retenus pour la détermination de la réponse totale de la structure.

Le minimum de modes à retenir est de trois (03) dans chaque direction considérée.

- Dans le cas où les conditions décrites ci-dessus ne peuvent pas être satisfaites à cause de l'influence importante des modes de torsion, le nombre minimal de modes (K) à retenir doit être tel que :

$$K \geq 3 \cdot \sqrt{N} \quad \text{Avec} \quad T_K \leq 0.20 \text{ sec}$$

Où : N est le nombre de niveaux au dessus du sol et T_K la période du mode K.

A.2.1.3 Combinaison des réponses modales

- Les réponses de deux modes de vibration i et j de périodes T_i , T_j et d'amortissement ζ_i , ζ_j sont considérées comme indépendantes si le rapport r vérifie :

$$r = \frac{T_i}{T_j} \leq \frac{10}{10 + \sqrt{\zeta_i \cdot \zeta_j}} \quad \text{Avec} \quad T_i \leq T_j$$

- Dans le cas où toutes les réponses modales retenues sont indépendantes les unes des autres, la réponse totale est donnée par

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k E_i^2}$$

E : effet de l'action sismique considéré

E_i : valeur modale de E selon le mode « i »

K : nombre de modes retenus

- Dans le cas où deux réponses modales ne sont pas indépendantes ; E_1 et E_2 par exemple, la réponse totale est donnée par :

$$E = \sqrt{(|E_1| + |E_2|) + \sum_{i=3}^k E_i^2}$$

a- Spectre de réponse de calcul

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25 \cdot A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5 \cdot \eta \cdot \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5 \cdot \eta \cdot (1.25 \cdot A) \left(\frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5 \cdot \eta \cdot (1.25 \cdot A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5 \cdot \eta \cdot (1.25 \cdot A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases}$$

b- Coefficient d'accélération de zone A

Donné par le tableau 4.1 (RPA99 ver2003) suivant la zone sismique et le groupe d'usage du bâtiment.

Groupe 2 ; Zone IIA, donc : A = 0.15

c- Facteur de correction d'amortissement η

Donné par la formule :

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0.7$$

Où ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

On a les portiques en avec un remplissage dense $\Rightarrow \xi = 5 \Rightarrow \eta = 1$.

d- Période caractéristique T1 et T2

Associée à la catégorie du site et donnée par le tableau 4.7 (RPA99 ver.2003).

Catégories du sol est S3 $\Rightarrow T1 = 0.15$ s ; $T2 = 0.30$ s.

e- Facteur d'amplification dynamique moyen D

Fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T).

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(T_2/T)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0 \text{ s} \\ 2.5\eta(T_2/3.0)^{\frac{2}{3}} (3.0/T)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0\text{s} \end{cases}$$

f- Estimation de la période fondamentale de la structure

La valeur de la période fondamentale (T) de la structure peut être estimée à partir de formules empiriques ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

La formule empirique à utiliser selon les cas est la suivante :

$$T = C_T h_N^{3/4}$$

h_N : Hauteur mesurée en mètres à partir de la base de la structure jusqu'au dernier niveau (N).

C_T : Coefficient, fonction du système de contreventement, du type de remplissage et donné par le tableau 4.6 (RPA 99 ver.2003).

$$C_T = 0.085$$

g- Coefficient de comportement global de la structure R

Sa valeur unique est donnée par le tableau 4.3 (RPA99 ver.2003) en fonction du système de contreventement tel que défini dans le chapitre III.3.4 (RPA99 ver.2003).

Structure en acier avec portique auto-stables ordinaires donc $R = 4$.

h- Facteur de qualité Q

Le facteur de qualité de la structure est fonction de :

- La redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent ;
- La régularité en plan et en élévation
- La qualité du contrôle de la construction

La valeur de Q est déterminée par la formule :

$$Q = 1 + \sum_1^5 P_q$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q "est satisfait ou non".

Sa valeur est donnée au tableau 4.4 (RPA99 ver.2003).

i- Poids total de la structure W

W est égal à la somme des poids W_i , calculés à chaque niveau (i) :

$$W = \sum_{i=1}^n W_i \quad \text{avec} \quad W_i = W_{Gi} + \beta \cdot W_{Qi}$$

W_{Gi} : Poids dû aux charges permanentes et à celles des équipements fixes éventuels, solidaires de la structure

W_{Qi} : Charges d'exploitation.

β : Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le tableau 4.5 $\Rightarrow \beta = 0.2$.

j- Calcul de la force sismique totale

La force sismique totale V, appliquée à la base de la structure, doit être calculée successivement dans deux directions horizontales selon la formule :

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} \cdot W$$

D'autre part on remarque que on a une structure présente une forme en plan semblable à un rectangulaire, et que la rigidité n'est pas la même dans les deux directions, donc on calcul la force sismique pour les deux directions.

k- Résultante des forces sismiques de calcul

La résultante des forces sismiques à la base V_t obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à 80 % de la résultante des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente V pour une valeur de la période fondamentale donnée par la formule empirique appropriée.

Si $V_t < 0.80 V$, il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements, moments,...) dans le rapport $0.8 V/V_t$.

A.3 DIMENSIONNEMENT DU PORTIQUE

A.3.1 Combinaisons des charges

- Comb.1 : $G + Q$
- Comb.2 : $1.35G + 1.5Q$
- Comb.3 : $G + Q \pm E$
- Comb.4 : $G + Q \pm 1.2E$

A.3.2 Dimensionnement des Poutres en Flexion simple

La résistance de calcul d'un élément fléchi non maintenu latéralement au déversement doit être prise égal à :

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \beta_w W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}$$

Où : $\beta_w = 1$ Pour les sections de classe 1 ou 2

$\beta_w = W_{el,y} / W_{pl,y}$ Pour les sections de classe 3

Et χ_{LT} est le coefficient de réduction pour le déversement.

La valeur de χ_{LT} pour l'élanement réduit $\bar{\lambda}_{LT}$ peut être déterminée par la formule :

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \left[\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]^{0.5}} \quad \text{Mais } \chi_{LT} \leq 1$$

$$\text{Ou } \varphi_{LT} = 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \left(\bar{\lambda}_{LT} - 0.2 \right) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right]$$

Il convient d'adopter la valeur suivante du facteur d'imperfection α_{LT} pour le déversement.

$\alpha_{LT} = 0.21$ Pour les profils laminés

$\alpha_{LT} = 0.49$ Pour les sections soudées

Les valeurs de coefficient de réduction χ_{LT} Pour l'élanement réduit approprié $\bar{\lambda}_{LT}$

peuvent être obtenues à partir du tableau de Eurocode avec $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_{LT}$ et $\chi = \chi_{LT}$ en utilisant :

- Pour les profils laminés, la courbe a ($\alpha = 0.21$).
- Pour les sections soudées, la courbe c ($\alpha = 0.49$).

La valeur de $\bar{\lambda}_{LT}$ peut être déterminée par la formule :

$$\bar{\lambda}_{LT} = \left[\beta_w W_{pl,y} f_y / M_{cr} \right]^{0.5} = \left[\lambda_{LT} / \lambda_1 \right] \left[\beta_w \right]^{0.5}$$

Où

$$\lambda_1 = \pi \left[E / f_y \right]^{0.5} = 93.9 \varepsilon$$

$$\varepsilon = \left[235 / f_y \right]^{0.5} \quad [f_y \text{ en N/mm}^2]$$

Et M_{cr} = moment critique élastique de déversement.

Il n'est pas nécessaire de vérifier la résistance au déversement d'une poutre effectivement maintenue sur toute sa longueur.

A.3.3 Dimensionnement des Poteaux en flexion composée

Les éléments à section transversale de classe 1 ou 2 sollicités en flexion et en compression axiale, satisfaire à la condition suivante :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{\min} \times A \times f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y \times M_{y,Sd}}{W_{pl,y} \times f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z \times M_{z,Sd}}{W_{pl,z} \times f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\text{Où } k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{Sd}}{\chi_y \cdot A \cdot f_y} \quad \text{Mais } k_y \leq 1.5$$

$$\mu_y = \overline{\lambda}_y \cdot (2\beta_{M,y} - 4) + \left(\frac{W_{pl,y} - W_{el,y}}{W_{el,y}} \right) \quad \text{Mais } \mu_y \leq 0.90$$

$$k_z = 1 - \frac{\mu_z N_{Sd}}{\chi_z A f_z} \quad \text{Mais } k_z \leq 1.5$$

$$\mu_z = \overline{\lambda}_z (2\beta_{M,z} - 4) + \left(\frac{W_{pl,z} - W_{el,z}}{W_{el,z}} \right) \quad \text{Mais } \mu_z \leq 0.90$$

χ_{\min} est la plus petite des valeurs de χ_y et χ_z

Où χ_y et χ_z sont les coefficients de réduction pour les axes y-y et z-z respectivement.

et $\beta_{M,y}$ et $\beta_{M,z}$ sont les facteurs de moment uniforme équivalents pour le flambement par flexion.

Les éléments à section transversale de classe 1 ou 2 pour lesquels le déversement représente un mode potentiel de ruine doivent également satisfaire à la condition :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} M_{y,Sd}}{\chi_{LT} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

$$\text{Ou } k_{LT} = 1 - \frac{\mu_y N_{Sd}}{\chi_z A f_y} \quad \text{Mais } k_{LT} \leq 1$$

$$\mu_{LT} = 0.15 \overline{\lambda}_z \beta_{M,LT} - 0.15 \quad \text{Mais } \mu_{LT} \leq 0.90$$

Où $\beta_{M,LT}$ est un facteur de moment uniforme équivalent pour le déversement

Les éléments à section transversale de classe 3 sollicités en flexion et compression axiale doivent satisfaire à la condition :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_{\min} A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_y M_{y,Sd}}{W_{el,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

Ou k_y , k_z et χ_{\min} sont donnés en

$$\mu_y = \overline{\lambda}_y (2\beta_{M,y} - 4)$$

$$\text{Mais } \mu_y \leq 0.90$$

$$\mu_z = \overline{\lambda}_z (2\beta_{M,z} - 4)$$

$$\text{Mais } \mu_z \leq 0.90$$

Les éléments à section transversale de classe 3 pour lesquels le déversement représente un mode potentiel de ruine doivent également satisfaire à la condition :

$$\frac{N_{Sd}}{\chi_z A f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_{LT} M_{y,Sd}}{\chi_{LT} W_{el,y} f_y / \gamma_{M1}} + \frac{k_z M_{z,Sd}}{W_{el,z} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1$$

REFERENCES
BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1]. Analyse des structures et milieux continus : mécanique des structures, François Frey
- [2]. Plastic Design of Frames : 1 fundamentals, Baker J.F. and Heyman J. , Cambridge University Press, 1969.
- [3]. Plastic Methods for Steel and Concrete Structures, Stuart S. J. Moy - University of Southampton, 1981.
- [4]. Analyse des structures et milieux contenus, Mécanique des Structures. François Frey, Traité de génie civil, Volume 2.
- [5]. Calcul des Structure Métalliques selon l'Eurocode 3, Jean Morel - Eyrolles 1996.
- [6]. Etude des mécanismes de ruine pour des structures multi-étagées, Boukeloua. S, Thèse de Magister, Université de Skikda, Algérie (Juillet 2008).
- [7]. Règles parasismique Algériennes RPA 99 Version 2003.
- [8]. Calcul plastique des ossatures en béton, Tichy M. et Rakosnik J. - Eyrolles 1975.
- [9]. Comportement des structures dans le domaine plastique, Lorin P. A - Eyrolles 1978.
- [10]. Comportement post-élastique des structures en béton armé, Fuentes A. - Eyrolles 1980.
- [11]. Structural analyses, Coates R.C, Coutie M.G and Kong F.K. - Nelson 1980.
- [12]. The plastic methods of structural analysis, Neal, B.G. London, Chapman & Hall 1956.
- [13]. Recherche sur les poutres encastés dans les murs, Kazinczy G. Betonszemle2 1914.
- [14]. The steel Skeleton : 2. Plastic bhaviour and Design Baker J.F., Horne M.R and Heyman J. - Cambridge University Press, 1969.
- [15]. Calcul plastique des ossatures en Béton, Tichy M. et Rakosnik J, Eyrolles 1975.
- [16]. Plastic analysis of structures. HODGE, PH.G. New York-Toronto-London, McGraw-Hill book company Inc, 1959.
- [17]. Plastic methods for steel and concrete structures. MOY, .S.J. London, The MacMillan Press. LTD, 1981.

- [18]. Eurocode 3 : Calcul des structures en acier, Comité de rédaction de l'EC3, Eyrolles 1996.
- [19]. The steel Skeleton : 2. Plastic Behaviour and Design, Baker, J.F., Horne, M.R., and Heyman, J., Cambridge University press, 1969.
- [20]. Structure Analysis, Ghali, A., and Neville, A.M , Chapman and hall, 1983.