

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche scientifique

UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

Mémoire de Magister

Spécialité : Génie Civil

Option : Modélisation et Calcul Non Linéaire

Présenté par :

Mr. SAHOUI Hamza

Sujet :

Influence des caractéristiques mécaniques des matériaux mis en œuvre sur le comportement sismique de structures en portique en béton armé

Soutenu devant le jury d'examen suivant :

- Mr. MEHADDENE Rachid	Maître de Conférences A – U.M.M.T.O.	Président
- Mr. ABED Ahmed	Maître de Conférences A – U.M.M.T.O.	Promoteur
- Mr. FARSI Med Naboussi	Directeur de Recherches – C.G.S. / Alger	Examineur
- Mr. DERRADJ Mohamed	Maître de Conférences A – U.M.M.T.O.	Examineur
- Mme. HADDAD Ouardia	Maître de Conférences B – U.M.M.T.O.	Examinatrice
- Mme. AIT-MESBAH Saliha	Directrice de la Recherche et de la Construction au Ministère de l'Habitat et de l'Urbanisme	Invitée

Le : 09 Mai 2012

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements à mon promoteur **Dr. ABED Ahmed**, Maître de Conférences A au département de génie civil, faculté du génie de la construction, U.M.M.T.O, pour le sujet qu'il m'a proposé et dirigé avec rigueur ainsi que pour sa disponibilité et pour tous les moyens mis à ma disposition pour l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie aussi **Mr LOUZAI Amar**, Maître Assistant A et Doctorant au département de génie civil (sous la direction de Dr. ABED A.), faculté du génie de la construction, U.M.M.T.O, pour son dévouement et les connaissances qu'il m'a prodiguées.

Je tiens également à remercier **les membres du jury** qui me font l'honneur de juger mon travail.

Enfin, mes remerciements à tous ceux qui ont apporté une contribution, petite soit elle, pour l'élaboration de cette étude.

Table des matières

Chapitre 1 : Introduction

1.1. Définition de la problématique.....	1.1
1.2. Objectifs du mémoire.....	1.3
1.3. Méthodologie d’investigation.....	1.4
1.4. Plan du mémoire.....	1.5

Chapitre 2 : Structures étudiées

2.1. Géométrie et configuration des portiques étudiés	2.1
2.2. Dimensionnement des portiques étudiés.....	2.2
2.2.1. Prédimensionnement des sections de béton des poutres et des poteaux.....	2.2
2.2.1.1. Les poutres.....	2.2
2.2.1.2. Les poteaux.....	2.3
2.2.1.3. Prédimensionnement vérifiant le critère de <i>rotules plastiques dans les poutres et pas dans les poteaux</i>	2.4
2.2.2. Charges appliquées.....	2.5
2.2.2.1. Charges gravitaires.....	2.5
2.2.2.2. Charges sismiques.....	2.5
2.2.3. Ferrailage des portiques.....	2.10
2.2.3.1. Introduction.....	2.10
2.2.3.2. Ferrailage des poutres.....	2.11
2.2.3.3. Ferrailage des poteaux.....	2.11
2.2.3.4. Sections de béton et d’acier des poutres et des poteaux.....	2.12

Chapitre 3 : Analyse Pushover

3.1. Introduction.....	3.1
3.2. Distribution verticale des charges horizontales.....	3.2
3.3. Définition du déplacement cible de la structure.....	3.3

Chapitre 4 : Modélisation des structures étudiées

4.1. Introduction.....	4.1
4.2. Modélisation des poutres et poteaux du portique.....	4.1
4.2.1. Loi <i>Force – Déplacement généralisé</i> associée aux poutres et poteaux du portique...	4.1
4.2.1.1. Loi <i>Moment – Rotation</i> associée aux poutres.....	4.3
4.2.1.1.1. Plastification par flexion – Rotule plastique.....	4.3
4.2.1.1.2. Plastification par cisaillement.....	4.5
4.2.1.2. Loi <i>Moment – Rotation</i> associée aux poteaux.....	4.7
4.2.1.2.1. Plastification par flexion – Rotule plastique.....	4.7
4.2.1.2.2. Plastification par cisaillement.....	4.8
4.2.2. Récapitulation des rotules plastiques attribuées aux poutres et poteaux.....	4.8

Chapitre 5 : Méthodologie d'analyse et Résultats de l'étude

5.1. Introduction.....	5.1
5.1.1. Données des paramètres de l'étude	5.1
5.1.2. Méthodologie d'analyse	5.2
5.1.2. Résultats présentés et discutés	5.3
5.2. Résultats du portique $P - H_{RDC} 3m$	5.4
5.2.1. Portique de référence.....	5.4
5.2.1.1. <i>Courbe de capacité du portique</i>	5.4
5.2.1.2. <i>Mécanisme de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.5
5.2.2. Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux est réduite.....	5.6
5.2.2.1. <i>Courbes de capacité du portique</i>	5.6
5.2.2.2. <i>Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.8
5.2.3. Portique dont la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux est réduite.....	5.8
5.2.3.1. <i>Courbes de capacité du portique</i>	5.9
5.2.3.2. <i>Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.10
5.2.4. Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ainsi que la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux sont simultanément réduites.....	5.12
5.2.4.1. <i>Courbes de capacité du portique</i>	5.12
5.2.4.2. <i>Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.14

5.3. Résultats du portique $P - H_{RDC} 4m$	5.17
5.3.1. Portique de référence.....	5.17
5.3.1.1. <i>Courbe de capacité du portique</i>	5.17
5.3.1.2. <i>Mécanisme de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.18
5.3.2. Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux est réduite..	5.19
5.3.2.1. <i>Courbes de capacité du portique</i>	5.19
5.3.2.2. <i>Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.21
5.3.3. Portique dont la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux est réduite.	5.22
5.3.3.1. <i>Courbes de capacité du portique</i>	5.22
5.3.3.2. <i>Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.24
5.3.4. Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ainsi que la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux sont simultanément réduites.....	5.25
5.3.4.1. <i>Courbes de capacité du portique</i>	5.25
5.3.4.2. <i>Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques</i>	5.27
5.4. Analyse comparative des résultats obtenus pour les portiques étudiés.....	5.30
5.4.1. Comparaison des résultats relatifs aux portiques de référence.....	5.30
5.4.2. Comparaison des résultats relatifs aux portiques dont les caractéristiques.....	
mécaniques du béton et des aciers longitudinaux dans les poteaux sont réduites... 5.33	5.33
5.4.2.1. Analyse comparative de leurs résistances ultimes et leurs sur-résistances.....	5.34
5.4.2.2. Analyse comparative de leurs ductilités globales.....	5.35
5.4.2.3. Analyse comparative de leurs mécanismes de ruine.....	5.37

Chapitre 6 : Conclusions et Recommandations

6.1. Rétrospective.....	6.1
6.2. Conclusions principales.....	6.2
6.3. Recommandations.....	6.5
6.4. Perspectives.....	6.5

Bibliographie

Chapitre 1 : **INTRODUCTION**

1.1 Définition de la problématique

Après un événement sismique majeur, les observations et constats établis sur des bâtiments endommagés par le séisme font ressortir comme causes des dégâts, entre autres, la mauvaise qualité des matériaux mis en œuvre lors de la réalisation de l'ouvrage, en particulier les bétons de faible résistance [1].

Cela, sans évoquer les dépassements et autres pratiques de certaines parties intervenant dans la construction qui, malheureusement, se trouvent préoccupées, parfois, par les aspects contractuels liés au prix et aux délais de réalisation de l'ouvrage au détriment de la qualité de sa réalisation, de sa sécurité et de sa durabilité.

La résistance d'un ouvrage à l'action sismique dépend essentiellement des résistances caractéristiques des matériaux constitutifs. Ainsi, pour une structure en béton armé, une éventuelle insuffisance des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier dans les éléments structuraux principaux, constatée à l'issue de la réalisation de l'ouvrage, aurait comme incidence une diminution des résistances des sections béton armé des éléments structuraux (diminution du moment résistant, de l'effort normal résistant et de la résistance au cisaillement), ce qui aurait une influence négative sur la résistance de la structure globale à l'action sismique. Plus précisément, cela aurait une incidence négative sur sa capacité à dissiper de l'énergie sismique par déformations plastiques (sans se rompre), traduisant sa capacité en ductilité (locale et globale), capacité liée à la formation et la distribution des rotules plastiques dans la structure et à son mécanisme de ruine.

Le contexte ayant suscité l'intérêt du thème de la présente investigation, c'est dans le cas pratique où après réalisation d'un ouvrage, partiellement ou totalement, l'on s'aperçoit, suite à des essais sur chantier ou en laboratoire, que les résistances caractéristiques des matériaux béton et aciers constitutifs des éléments principaux de la structure, **en particulier les poteaux**, sont inférieures aux valeurs nominales de dimensionnement, valeurs sur la base desquelles a été dimensionné l'ouvrage. Suite à ce constat, la question qui se pose en général est de savoir s'il

faut quand même garder l'ouvrage tel quel et achever sa construction et donc le mettre en service, ou bien le renforcer ou alors, le cas échéant, le démolir et reconstruire (?). Sans s'étaler sur la réponse à cette question – ce n'est pas l'objet du présent mémoire – , cette dernière dépend de la réponse à plusieurs autres questions, entre autres :

- L'insuffisance de résistance caractéristique concerne-t-elle seulement la résistance à la compression du béton (f_{c28}) ou bien aussi la limite élastique des aciers (f_y) ?
- Si cette insuffisance concerne les deux matériaux (le béton et l'acier), de combien leurs résistances caractéristiques mises en œuvre sur chantier sont-elles inférieures aux valeurs de dimensionnement ?
- Quelle est l'incidence de cette insuffisance des caractéristiques mécaniques des deux matériaux sur la résistance de l'ouvrage à l'action sismique ?

Pour tenter une réponse à la dernière question, l'étude de l'influence de la réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux mis en œuvre sur le comportement sismique de structures en portique en béton armé est l'objet du présent mémoire.

Notons que la **valeur minimale** de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , **tolérée par le Règlement Parasismique Algérien, RPA99/version 2003 [8]**, article 7.2.1, pour les éléments principaux d'une structure en béton armé, **est de 20 MPa**. Et **La limite d'élasticité (f_y)** pour leurs armatures longitudinales doit être, selon le même règlement (article 7.2.2), **inférieure ou égale à 500 MPa, c'est-à-dire que la valeur minimale de f_y peut être de 400 MPa**.

Les règles de construction parasismique françaises, PS92 [11], tolèrent, quant à elles, pour les mêmes éléments principaux, **une valeur minimale de 22 MPa pour f_{c28}** , et inférieure ou égale à 500 MPa pour la limite élastique (f_y) des aciers longitudinaux.

Notre présente investigation a aussi comme objectif de définir des seuils minima pour les deux paramètres cités précédemment, en comparaison aux valeurs minimales définies par le RPA99/version 2003, mentionnées ci-dessus.

1.2 Objectifs du mémoire

Le présent travail consiste en l'étude de l'influence de la réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux mis en œuvre sur le comportement sismique de structures en portique en béton armé.

Plus précisément, l'objet de notre mémoire est d'étudier l'incidence de la réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier constitutifs des éléments principaux verticaux, **les poteaux**, sur la résistance à l'action sismique de structures en portique en béton armé.

Nous ciblons particulièrement les poteaux pour les structures considérées, car une éventuelle insuffisance de leurs résistances (de leurs capacités portantes) réduirait sensiblement la résistance de la structure globale à l'action sismique, et pourrait conduire inévitablement à son effondrement en cas de séisme.

Les objectifs visés dans le cadre de notre investigation consistent à :

- évaluer les capacités des structures considérées en termes de résistance ultime à l'action sismique, de ductilité globale et de raideur latérale initiale (élastique), pour différentes valeurs réduites de la résistance à la compression du béton, f_{c28} , dans les poteaux de la structure et de la limite d'élasticité, f_y , de leurs armatures longitudinales.

Les valeurs (dégressives) considérées pour ces deux paramètres sont situées dans la fourchette 25 à 15 MPa pour f_{c28} et 500 à 300 MPa pour f_y .

- déterminer les mécanismes de ruine desdites structures ;
- définir des seuils minima pour la résistance caractéristique à la compression du béton (f_{c28}) et la limite élastique (f_y) à mettre en œuvre (sur chantier) pour les éléments principaux d'une structure en portiques auto-stables en béton armé en zone sismique, seuils en-deça desquels la sécurité d'une structure pourrait ne pas être assurée, et en comparaison aux valeurs minimales définies par le RPA99/version2003, mentionnées plus haut au §1.1.

1.3 Méthodologie d'investigation

L'étude est menée en considérant deux portiques plans de cinq étages (R+5) en béton armé, de même configuration structurale, ayant le même nombre de travées (3 travées identiques de 5m), mais avec des rez-de-chaussée de hauteurs différentes : l'un a un rez-de-chaussée de 3m de hauteur et l'autre de 4m. Dans le présent mémoire on les désigne par $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, respectivement. Les deux portiques sont présentés et dimensionnés au chapitre 2 du présent mémoire. Les deux portiques sont dimensionnés sur la base d'une résistance caractéristique du béton (f_{c28}) égale à 25 MPa et une limite d'élasticité (f_y) pour les armatures longitudinales et transversales égale à 500 MPa tant pour les poteaux que pour les poutres.

Après le dimensionnement des deux portiques suivant les deux codes de calculs utilisés, le code de calcul de béton armé aux états limites, BAEL91 [9], et le Règlement Parasismique Algérien, RPA99/version 2003 [8], on effectue, pour chaque portique, à l'aide du logiciel SAP2000 [10], des analyses non-linéaires en poussée progressive (analyse *pushover*) sous des forces sismiques horizontales progressivement croissantes, en faisant varier, à chaque analyse, de manière dégressive, la résistance caractéristique à la compression du béton (f_{c28}) dans les poteaux du portique et la limite élastique (f_y) de leurs armatures longitudinales.

Les valeurs (en MPa) considérées pour ces deux derniers paramètres, variant de manière dégressive, sont :

- pour f_{c28} : 25, 23, 20, 18 et 15 MPa ;
- pour f_y : 500, 450, 400, 350 et 300 MPa.

Les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers constitutifs des poutres, sont maintenues à leurs valeurs nominales (de dimensionnement) :

- béton : $f_{c28} = 25$ MPa ;
- aciers (longitudinaux et transversaux) : $f_y = 500$ MPa.

Au terme de ces analyses non-linéaires des portiques considérés, on procède à une discussion des résultats obtenus, relatifs aux paramètres étudiés : la résistance ultime du portique à l'action sismique, sa sur-résistance, sa ductilité globale, sa raideur latérale et son mode de ruine.

1.4 Plan du mémoire

Notre mémoire comprend **6 chapitres** et est structuré comme suit :

La présente introduction constitue le **premier chapitre**.

Le **chapitre 2** consiste en le dimensionnement des deux portiques $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$ considérés.

Au **chapitre 3**, on donne un résumé succinct sur le principe de l'analyse *pushover* effectuée pour chaque portique étudié.

Le **chapitre 4** est consacré à la modélisation non-linéaire des poutres et poteaux du portique en béton armé.

Au **chapitre 5**, on décrit la méthodologie d'analyse et on présente et discute les résultats des analyses *pushover* effectuées pour chaque portique étudié, en considérant, à chaque analyse, une réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier (f_{c28} et f_y) constitutifs des poteaux du portique, couvrant la fourchette des valeurs dégressives des deux paramètres f_{c28} et f_y définie précédemment au §1.3.

Enfin, au **chapitre 6**, on résume les conclusions principales des résultats obtenus dans le cadre de cette investigation, suivies de recommandations relatives aux valeurs minimales des caractéristiques des matériaux béton et acier constitutifs des éléments principaux d'une structure en portiques auto-stables en béton armé, en zone sismique, à satisfaire sur chantier lors de la réalisation de l'ouvrage. Enfin, on suggère des perspectives de recherches futures comme suite à ce travail.

Chapitre 2: STRUCTURES ÉTUDIÉES

2.1 Géométrie et configuration des portiques étudiés

Deux portiques plans de même nombre d'étages, 5 étages (R+5), et de même nombre de travées, 3 travées, mais de hauteurs de rez-de-chaussée différentes sont considérés dans cette étude : l'un a une hauteur du rez-de-chaussée de $3m$ et l'autre de $4m$ (figure 2.1). On les désigne par $P-H_{RDC}3m$ et $P-H_{RDC}4m$, respectivement.

Ces deux structures sont supposées encastrées à leurs bases.

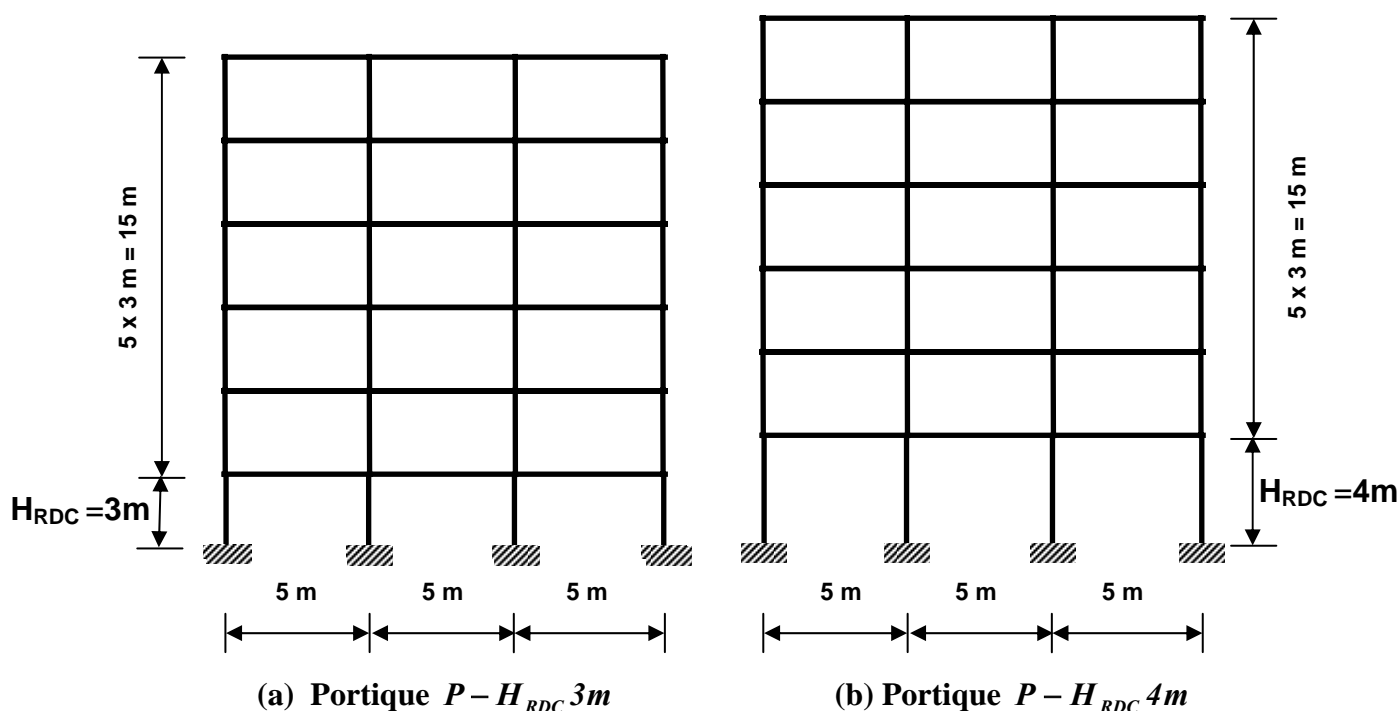


Figure 2.1 : Portiques $P-H_{RDC}3m$ et $P-H_{RDC}4m$ étudiés.

Les deux portiques $P-H_{RDC}3m$ et $P-H_{RDC}4m$ étudiés font partie de 2 bâtiments de 5 étages, de hauteur de rez-de-chaussée de $3m$ et $4m$, respectivement. Ces deux derniers sont à usage d'habitation, à plancher en corps creux de type (16+4), et présentant une même vue en plan (figure 2.2). Cette vue en plan comporte cinq travées identiques de $4m$ dans la direction longitudinale (direction X-X, figure 2.2) et trois travées de $5m$ dans la direction transversale (direction Y-Y, figure 2.2).

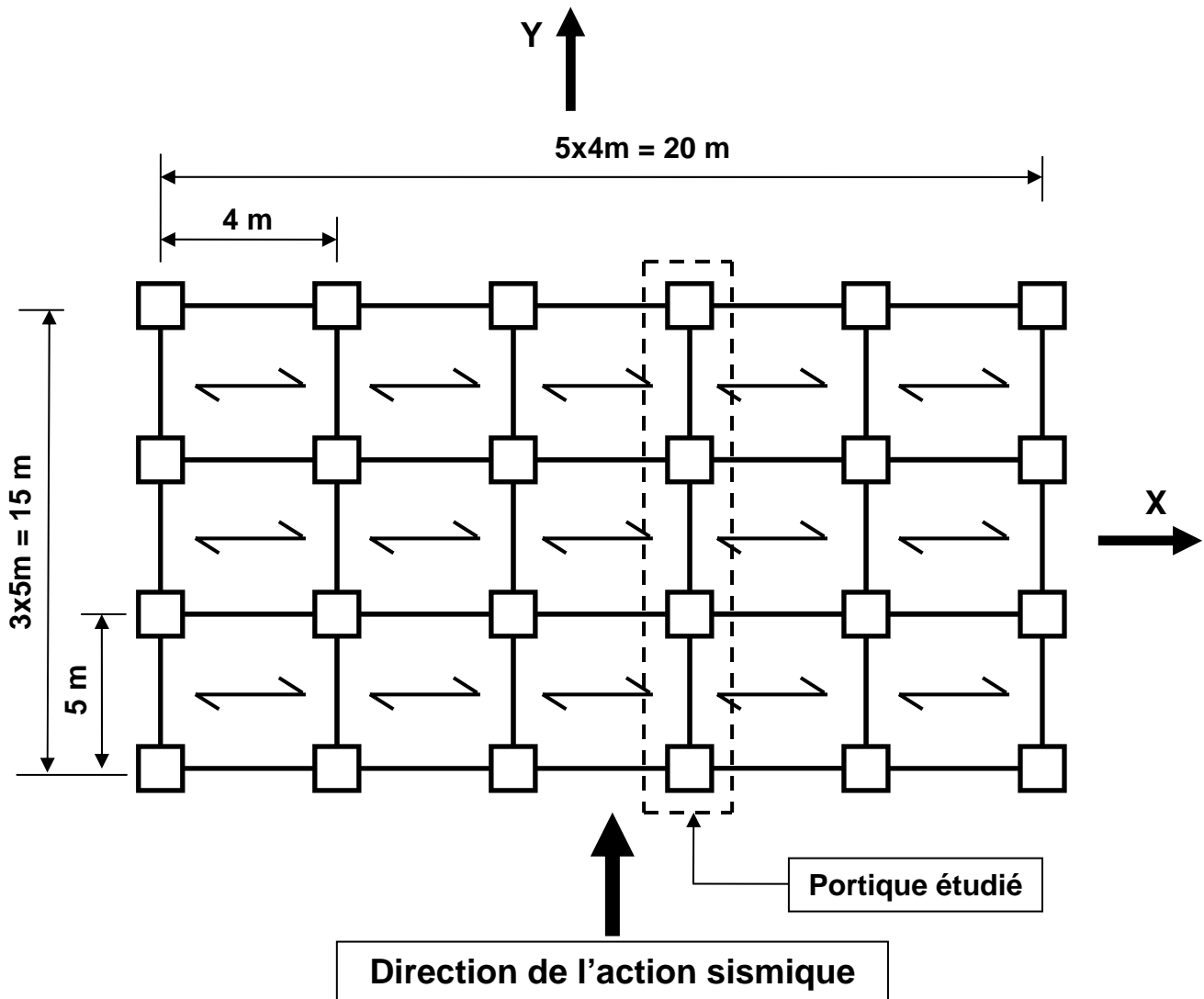


Figure 2.2 : Vue en plan des deux bâtiments comportant les portiques étudiés.

Les sections de béton des poutres et des poteaux ainsi que leurs ferrailages sont obtenus après un calcul de dimensionnement des deux portiques, que nous présentons au paragraphe suivant.

2.2 Dimensionnement des portiques étudiés

2.2.1 Prédimensionnement des sections de béton des poutres et des poteaux

2.2.1.1 Les poutres

Les poutres des portiques étudiés sont celles porteuses des deux bâtiments. Elles sont prédimensionnées selon les formules suivantes :

La hauteur h de la poutre est donnée par la formule suivante :

$$\frac{L}{15} \leq h \leq \frac{L}{10} \quad (2.1)$$

où L = Longueur de la poutre

La largeur b de la poutre principale est donnée comme suit :

$$0.4h \leq b \leq 0.7h \quad (2.2)$$

Nota : Les poutres perpendiculaires aux portiques étudiés sont aussi prédimensionnées par les mêmes relations (2.1) et (2.2); elles contribueront au calcul des masses "sismiques" des deux bâtiments.

2.2.1.2 Les poteaux

La section de béton des poteaux, B_c , est prédimensionnée en vérifiant la condition suivante :

- **à l'état limite ultime de résistance**, le règlement RPA99 / version 2003, §7.4.3.1, stipule que dans le but d'éviter ou limiter le risque de rupture fragile d'un poteau en béton armé (éclatement ou écrasement du béton) sous sollicitation d'ensemble dues au séisme, l'effort normal de compression de calcul, noté N_d , exprimé sous forme réduite (effort normal réduit, ν), est limité par la condition suivante :

$$\nu = \frac{N_d}{B_c \cdot f_{c28}} \leq 0.30$$

où : B_c = Section de béton du poteau ;

f_{c28} = Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours ; dans notre cas :

$$f_{c28} = 25 \text{ MPa.}$$

C'est-à-dire que, la section de béton, B_c , du poteau doit satisfaire la condition suivante :

$$B_c \geq N_d / (0.30 \cdot f_{c28}) \quad (2.3)$$

Ainsi, **au stade de prédimensionnement de la section de béton (B_c) des poteaux**, N_d doit être **au moins** égal à l'effort normal dans le poteau le plus chargé sous les charges gravitaires (permanentes (G) et d'exploitation (Q)) pondérées et combinées, $1.35G + 1.5Q$, obtenu par descente de ces charges.

2.2.1.3 Prédimensionnement vérifiant le critère de rotules plastiques dans les poutres et pas dans les poteaux

Après un prédimensionnement des sections de béton des poutres et des poteaux des deux portiques selon les relations (2.1), (2.2) et (2.3) d'une part, et après un calcul de leurs ferrailages d'autre part, nous avons constaté que l'article 7.6.2 du RPA99 / version 2003 [8] relatif au dimensionnement d'un nœud poutre – poteau vis-à-vis du moment fléchissant, article qui se traduit par les relations (2.4) et (2.5) suivantes, n'était pas satisfait. Ce critère conditionne la formation de rotules plastiques plutôt dans les poutres que dans les poteaux, concept "poteaux forts – poutres faibles".

$$|M_n| + |M_s| \geq 1.25(|M_e| + |M_w|) \quad (2.4)$$

$$|M'_n| + |M'_s| \geq 1.25(|M'_e| + |M'_w|) \quad (2.5)$$

La figure 2.3 illustre les différents moments résistants définis dans les relations (2.4) et (2.5) [8].

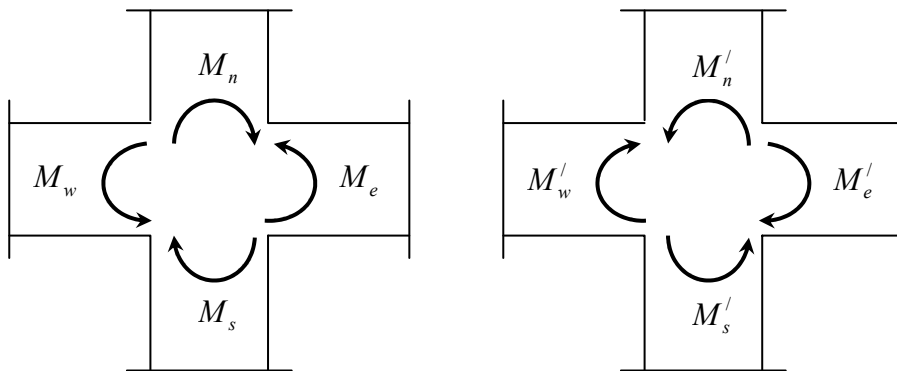


Figure 2.3 : Dimensionnement d'un nœud poutre – poteau [8].

Les deux inéquations (2.4) et (2.5) tendent à faire en sorte que les rotules plastiques se forment dans les poutres plutôt que dans les poteaux.

Pour que ces deux inéquations soient vérifiées, nous avons adopté les sections de béton des poutres et des poteaux présentées à la figure 2.4, pour les 2 portiques étudiés.

Poutres	Poteaux
<p>40 cm</p> <p>40 cm</p>	<p>40 cm</p> <p>40 cm</p>
Pour tous les niveaux	Pour tous les étages

Figure 2.4 : Dimensions des sections de béton des poutres et des poteaux des 2 portiques étudiés.

2.2.2 Charges appliquées

2.2.2.1 Charges gravitaires

On rappelle que les deux bâtiments considérés sont à usage d'habitation à planchers en corps creux de type (16+4) ; les charges gravitaires sont évaluées comme suit :

- Les charges permanentes (G) du plancher terrasse sont évaluées à 5.8 kN/m^2 et celles du plancher courant à 5.1 kN/m^2 .

- Les charges d'exploitation (Q) du plancher terrasse sont de 1 kN/m^2 et celles du plancher courant de 1.5 kN/m^2 .

2.2.2.2 Charges sismiques

Les charges sismiques agissant sur chaque portique étudié sont des forces latérales appliquées aux différents niveaux du portique comme illustré à la figure 2.5.

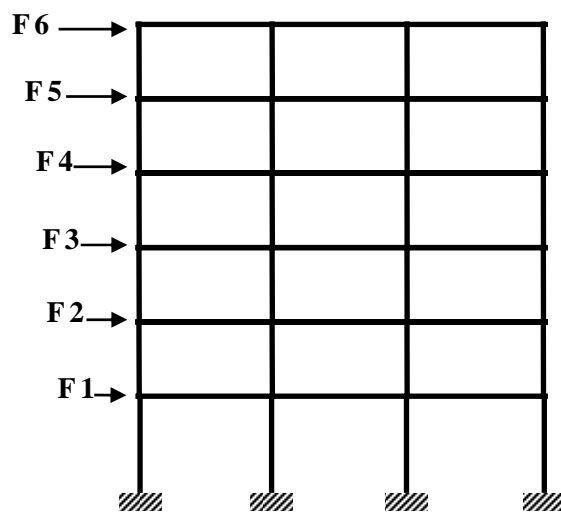


Figure 2.5 : Illustration schématique des forces sismiques appliquées aux différents niveaux de chaque portique étudié.

Ces forces sismiques, agissant sur un portique, représentent une fraction des forces sismiques globales agissant sur l'ensemble du bâtiment comportant ce portique. Cette fraction des forces sismiques globales est proportionnelle à la raideur latérale de ce dernier.

Les forces sismiques globales agissant sur l'ensemble du bâtiment sont calculées sur la base d'une analyse modale spectrale de ce dernier à l'aide du logiciel SAP2000 [10] et en utilisant comme action sismique le spectre de réponse de calcul défini dans le RPA99/version 2003 [8].

Les deux bâtiments sont supposés être localisés dans une zone de forte sismicité, à savoir la zone III selon le règlement parasismique algérien RPA99 / version 2003 [8].

a) Action sismique

L'action sismique est représentée par le spectre de réponse de calcul donné par le RPA 99/ version 2003 [8], qui est un spectre de réponse en accélération :

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

avec :

S_a : Accélération spectrale associée au mode de vibration de période T du bâtiment.

A : Coefficient d'accélération de zone.

Dans notre cas, les deux bâtiments considérés sont supposés être localisés en zone sismique III et sont de groupe d'usage 2 : $A = 0.25$.

η : Facteur de correction d'amortissement pour un amortissement différent de 5 %.

η est donné par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{7+2}} \geq 0.7$$

où ξ est le pourcentage d'amortissement critique.

Pour un portique en béton armé avec remplissage dense, $\xi = 7\%$, d'où η est égal à :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{7+2}} = 0.88.$$

R : Coefficient de comportement de la structure.

Pour des portiques autostables avec remplissages en maçonnerie rigide, ce qui est notre cas :

$$R = 3.5.$$

Q : Facteur de qualité.

Q est donné par la relation suivante :

$$Q = 1 + \sum_1^6 P_q$$

où P_q est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité ‘q’ est satisfait ou non.

Dans notre cas, on considère le cas défavorable où les contrôles de la qualité des matériaux et celle de l’exécution ne sont pas satisfaits, ce qui nous donne $Q = 1.15$.

T_1 et T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie du site.

Dans notre cas, le site est de type S_3 (sol meuble), d’où : $T_1 = 0.15s$ et $T_2 = 0.50s$.

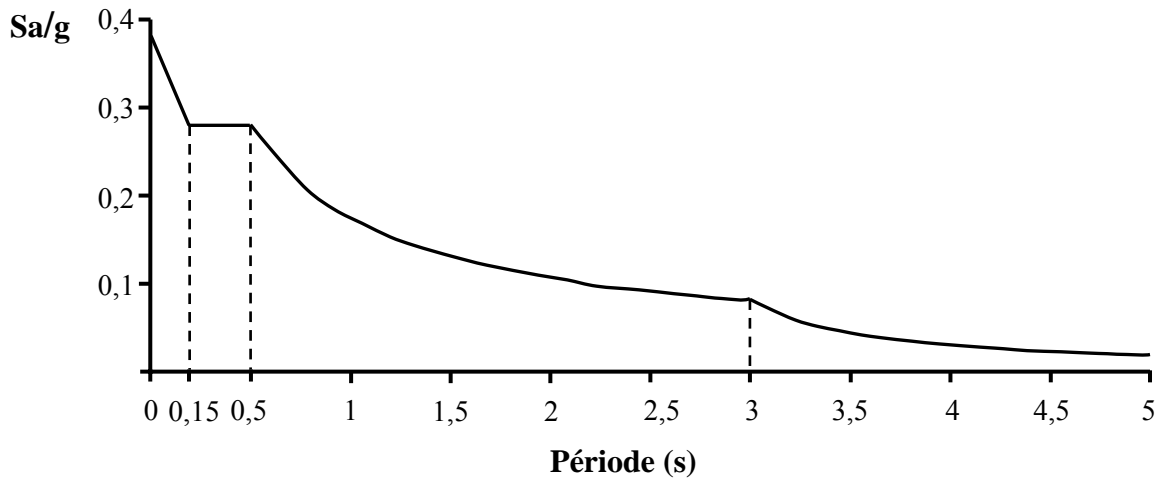


Figure 2.6 : Spectre de réponse de calcul [8].

b) Masses "sismiques" concentrées des bâtiments considérés

La masse "sismique" concentrée par niveau du bâtiment est calculée comme suit [8] :

A un niveau i (plancher i) du bâtiment, cette masse est donnée par :

$$M_i = M_{Gi} + \beta M_{Qi}$$

avec :

M_{Gi} = Masse relative aux charges permanentes (G) ;

M_{Qi} = Masse relative aux charges d'exploitation (Q) ;

β = Coefficient de pondération des charges d'exploitation ; dans notre cas, les bâtiments considérés sont à usage d'habitation, d'où $\beta = 0.2$ (RPA 99/2003, Tableau 4.5).

Les masses "sismiques" concentrées aux différents niveaux des deux bâtiments considérés sont données au tableau 2.1.

Masses "sismiques" des modèles "brochette" associés aux bâtiments étudiés.			Modèle " brochette" associé aux deux bâtiments étudiés $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$
Masses, M_i (tonnes)	$P-H_{RDC} 3m$	$P-H_{RDC} 4m$	
M_6 (t)	272	272	
M_5 (t)	292	292	
M_4 (t)	292	292	
M_3 (t)	292	292	
M_2 (t)	292	292	
M_1 (t)	292	300	

Tableau 2.1 : Masses "sismiques" des modèles "brochette " associés aux bâtiments $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$ étudiés.

c) Périodes propres et Modes propres de vibration des bâtiments

Les propriétés modales des deux bâtiments étudiés, périodes propres, modes propres et le pourcentage de masse modale participante, sont données dans les tableaux 2.2 et 2.3 suivants :

Bâtiment $P-H_{RDC} 3m$				
Propriétés modales du bâtiment $P-H_{RDC} 3m$ dans sa direction transversale, y-y				
	Mode 1 de translation	Mode 2 de translation	Mode 3 de translation	
Période, T(s)	0,77	0,25	0,14	
Pourcentage de masse modale participante, α	84%	10%	4%	$\sum \alpha = 98\%$

Tableau 2.2 : Propriétés modales du bâtiment $P - H_{RDC} 3m$.

Bâtiment $P-H_{RDC} 4m$				
Propriétés modales du bâtiment $P-H_{RDC} 4m$ dans sa direction transversale, y-y				
	Mode 1 de translation	Mode 2 de translation	Mode 3 de translation	
Période, T(s)	0,87	0,28	0,15	
Pourcentage de masse modale participante, α	90%	8%	2%	$\sum \alpha = 100\%$

Tableau 2.3 : Propriétés modales du bâtiment $P - H_{RDC} 4m$.

d) Forces sismiques revenant au portique

Les forces sismiques revenant au portique sont proportionnelles à sa raideur à l'effort latéral. Comme tous les portiques du bâtiment présentent les mêmes dimensions et les mêmes sections de béton des poutres et des poteaux, leurs raideurs latérales sont identiques. Etant donné que le bâtiment est régulier en plan et symétrique dans ses deux directions orthogonales X-X et Y-Y d'une part, et qu'on a 6 portiques dans la direction de l'action sismique (direction Y-Y) d'autre part, alors chaque portique reprendra $1/6$ des forces sismiques globales agissant sur le bâtiment. Ainsi, les forces sismiques agissant sur le portique sont données au tableau 2.4 suivant.

Valeurs des forces sismiques agissant sur les deux portiques étudiés <i>P-H_{RDC} 3m</i> et <i>P-H_{RDC} 4m</i> .		
Forces, F_i (kN)	<i>P-H_{RDC} 3m</i>	<i>P-H_{RDC} 4m</i>
F_6 (kN)	114.5	115.6
F_5 (kN)	112.3	114.2
F_4 (kN)	101.1	102.7
F_3 (kN)	83.5	84.7
F_2 (kN)	61.2	62.1
F_1 (kN)	30.7	31.2

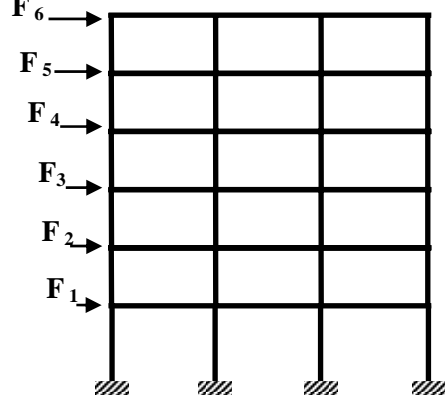


Tableau 2.4 : Valeurs des forces sismiques agissant sur les portiques étudiés.

2.2.3 Ferrailage des portiques

2.2.3.1 Introduction

Le calcul des armatures longitudinales et transversales dans les poutres et poteaux est effectué en considérant les sollicitations dues aux charges gravitaires (charges permanentes et d'exploitation) et sismiques selon les combinaisons d'actions définies dans les deux codes de calcul utilisés à cet effet, le code de calcul en béton armé aux états limites BAEL91 [9] et le Règlement Parasismique Algérien RPA99/version 2003 [8].

Les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier utilisés pour le ferrailage des poutres et poteaux des deux portiques étudiés sont :

- **pour le béton** : la résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours est

$$f_{c28} = 25 \text{ MPa.}$$

- **pour l'acier** : les aciers longitudinaux et transversaux utilisés sont de nuance FeE500, de limite d'élasticité $f_y = 500 \text{ MPa}$.

2.2.3.2 Ferrailage des poutres

a) Armatures longitudinales

Les armatures longitudinales des poutres sont calculées en flexion simple en considérant les combinaisons d'actions définies dans les deux codes de calcul utilisés :

pour le **BAEL 91** : $1.35G + 1.5Q$ à l'état limite ultime (ELU)
 $G + Q$ à l'état limite de service (ELS)

où G : Charges permanentes et Q : Charges d'exploitation

pour le **RPA 99 / Version 2003** : $G + Q \pm E$; avec E = Action sismique
 $0.8G \pm E$

b) Armatures transversales

Les armatures transversales sont calculées à l'effort tranchant, lequel est calculé en considérant les mêmes combinaisons d'actions que celles considérées pour les armatures longitudinales.

2.2.3.3 Ferrailage des poteaux

a) Armatures longitudinales

Les armatures longitudinales des poteaux sont calculées en flexion composée en considérant les combinaisons d'actions définies également dans les deux codes de calcul utilisés:

pour le **BAEL 91** : $1.35G + 1.5Q$ à l'état limite ultime (ELU)
 $G + Q$ à l'état limite de service (ELS)

pour le **RPA 99 / Version 2003** : $G + Q \pm 1.2 E$
 $0.8G \pm E$

b) Armatures transversales

Les armatures transversales sont calculées à l'effort tranchant, lequel est calculé en considérant les mêmes combinaisons d'actions que celles considérées pour les armatures longitudinales.

2.2.3.4 Sections de béton et d'acier des poutres et des poteaux

Les sections de béton et d'acier des poutres et des poteaux sont présentées aux figures 2.7 et 2.8 pour les deux portiques étudiés, $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, respectivement.

Précision :

- Les sections d'acier des poutres présentées aux figures 2.7 et 2.8 représentent le ferrailage des sections d'extrémité de ces éléments structuraux pour les 2 portiques étudiés, car ces sections d'extrémité sont les plus sollicitées sous séisme et aussi sous les combinaisons d'actions les plus défavorables utilisées pour les poutres ($G + Q \pm E$ et $0.8G \pm E$). Etant donné que ces sections d'extrémité sont les plus sollicitées, elles constituent les zones de formation de rotules plastiques.
- Les sections de béton des poutres et des poteaux et leurs ferrailages présentés aux figures 2.7 et 2.8 satisfont l'article 7.6.2 du code RPA99/version 2003 [8], qui stipule que les rotules plastiques doivent se former dans les poutres plutôt que dans les poteaux.

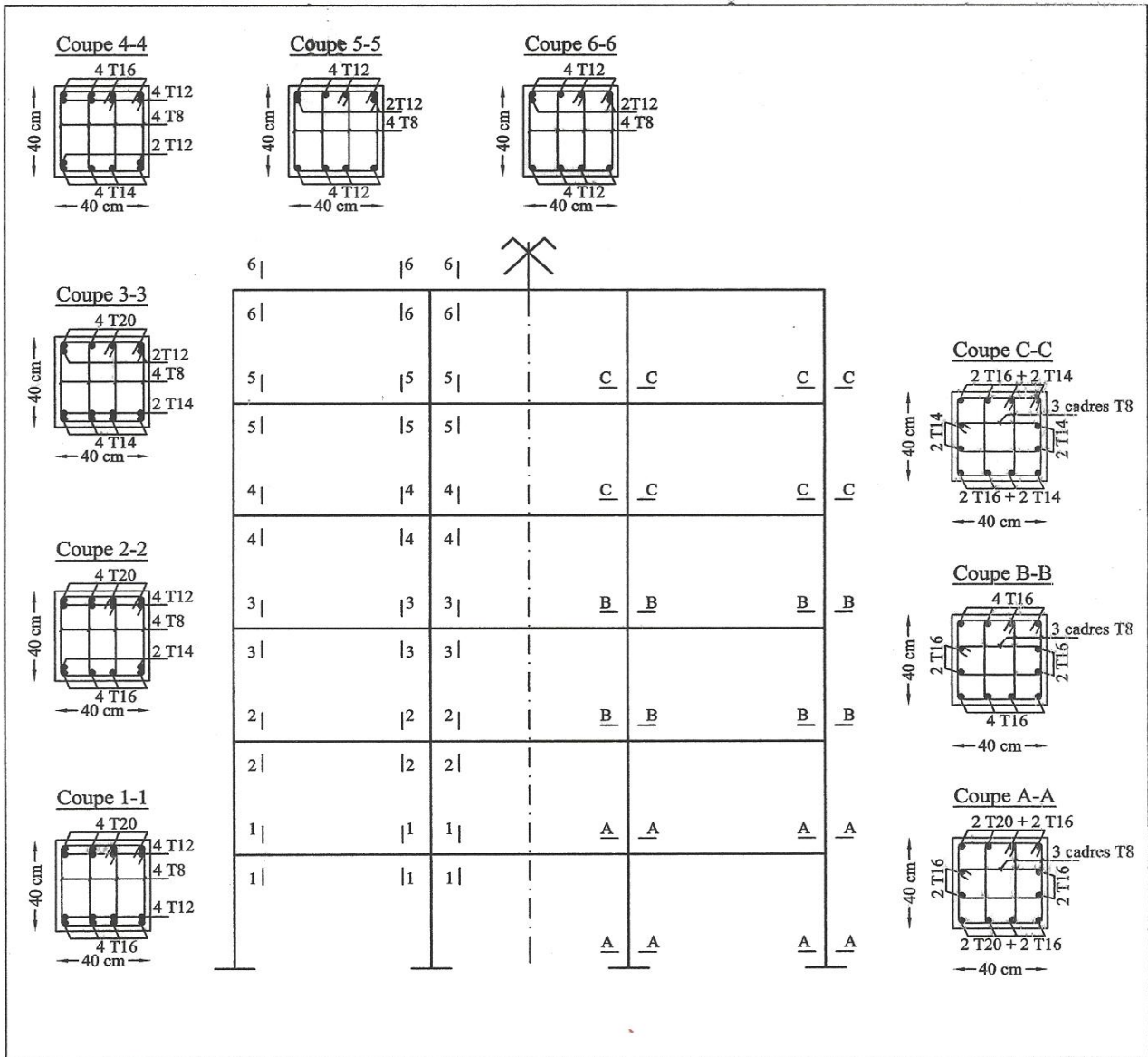


Figure 2.7 : Ferrailage du portique $P-H_{RDC} 3m$.

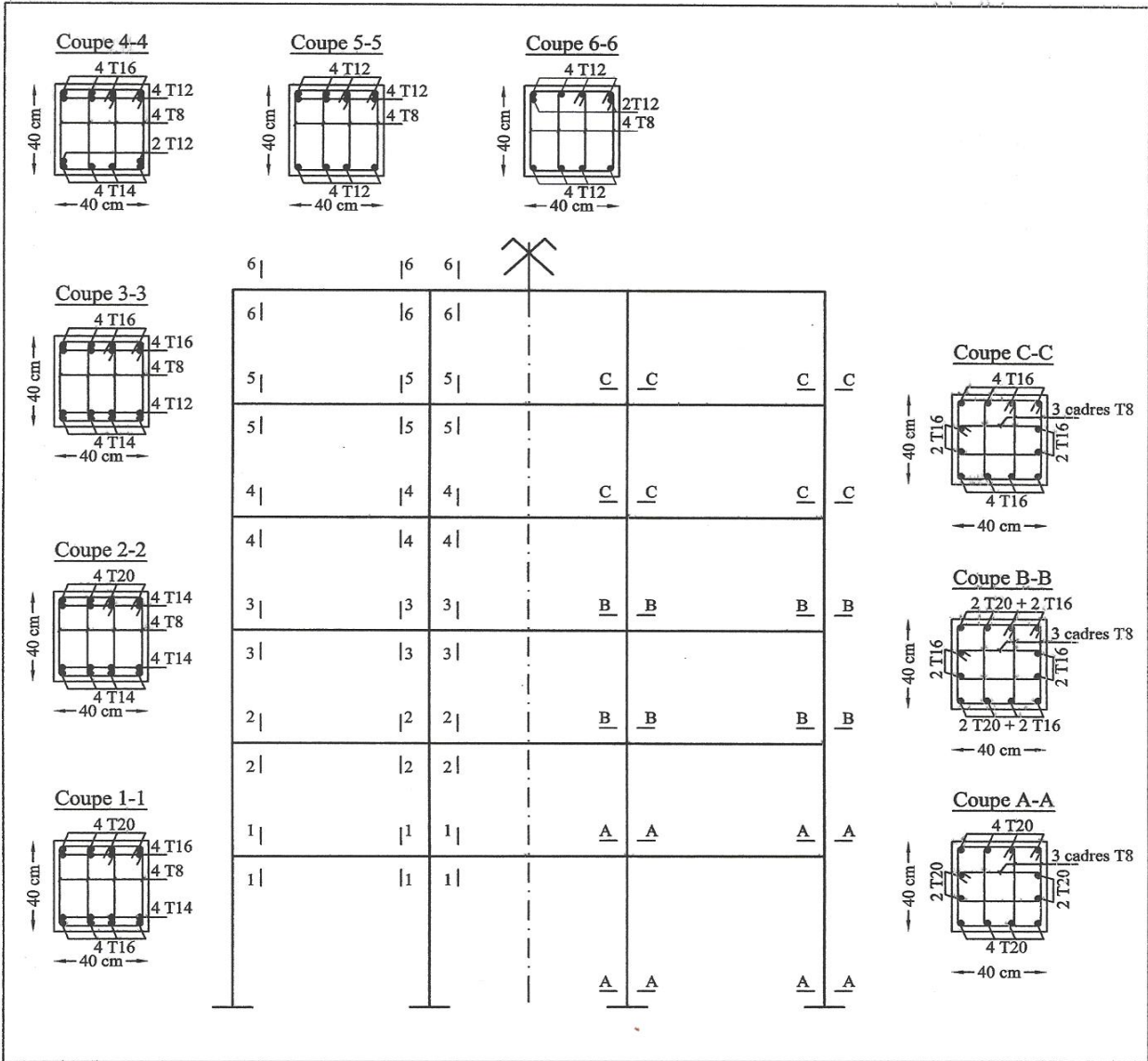


Figure 2.8 : Ferrailage du portique $P-H_{RDC} 4m$.

Chapitre 3 : ANALYSE PUSHOVER

3.1 Introduction

L'analyse en poussée progressive (*pushover* en anglais) est une analyse statique nonlinéaire. Elle est exécutée en imposant des charges horizontales distribuées sur la hauteur de la structure, croissant de façon monotone de zéro jusqu'à l'état limite ultime correspondant à l'initiation de l'effondrement de la structure. Les charges gravitaires demeurent constantes durant l'analyse.

L'analyse *pushover* est appliquée pour vérifier la performance sismique des structures, en particulier pour :

- évaluer les mécanismes plastiques attendus et les dommages en déterminant la formation et la distribution des rotules plastiques successives conduisant à un mécanisme de ruine ;
- évaluer les forces et les déplacements post-élastiques de la structure ;
- évaluer la performance sismique des structures existantes ou renforcées.

Le résultat de l'analyse *pushover* est une courbe de " capacité " de la structure (appelée aussi courbe *pushover*), qui donne une relation graphique entre l'effort tranchant à la base (V) de cette dernière et le déplacement de contrôle (d), qui, en général, pour un bâtiment, est choisi comme étant le déplacement en tête de ce dernier (figure 3.1).

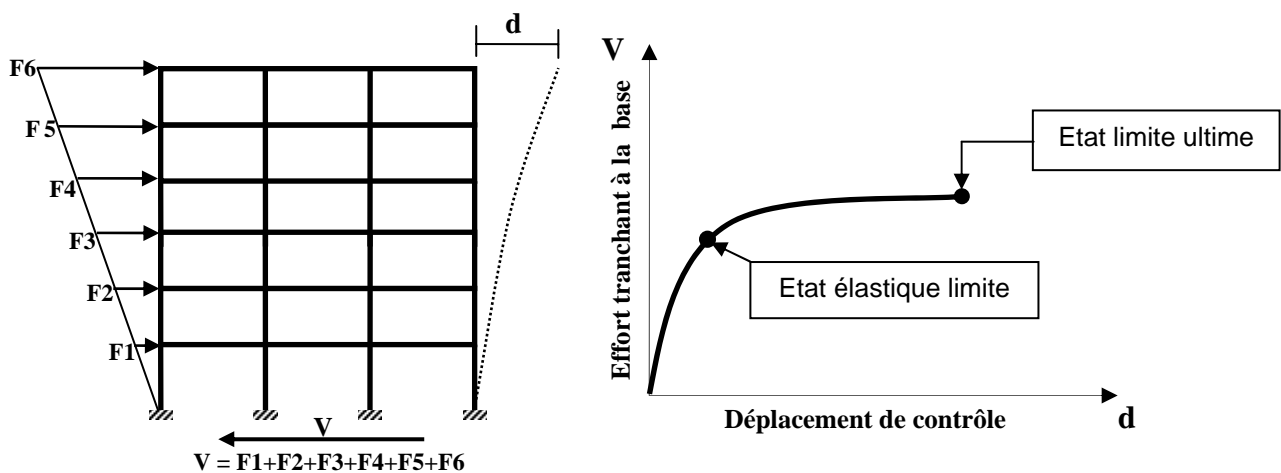


Figure 3.1 : Courbe de capacité de la structure.

Deux types de contrôle pour l'analyse :

Deux types de contrôle sont disponibles pour l'application des charges. Le choix dépend de la nature physique de celles-ci et du comportement attendu de la structure.

Analyse à force contrôlée : ce type de contrôle est utilisé lorsque les charges sont connues, et lorsque la structure est supposée pouvoir supporter ces charges. Ce type de contrôle est en général utilisé pour contrôler l'application des charges de gravité.

Analyse à déplacement contrôlé : on contrôle un déplacement type d'un point de la structure. Dans ce cas, l'amplitude de la combinaison de charges est augmentée par le programme jusqu'à ce que le déplacement cible atteigne la valeur spécifiée. On utilise le déplacement cible lorsque des déplacements spécifiques sont recherchés, et lorsque l'amplitude des charges n'est pas connue à l'avance. Ce type de contrôle est en général utilisé pour l'application des forces sismiques.

Les étapes nécessaires pour réaliser une analyse *pushover* sont :

1. Définition et attribution de rotules plastiques aux éléments du modèle de la structure ;
2. Définition de la distribution verticale des charges horizontales ;
3. Définition d'un déplacement cible comme référence du déplacement attendu de la structure lors du séisme ;
4. Application des charges de gravité comme conditions initiales de l'analyse *pushover*, qui doivent être maintenues constantes durant l'analyse ;
5. Application des charges horizontales représentant le séisme, que l'on fait croître de façon monotone jusqu'à l'atteinte de l'état limite ultime correspondant à l'initiation de l'effondrement de la structure.

3.2 Distribution verticale des charges horizontales

Les charges horizontales doivent être appliquées suivant une distribution verticale approchant celle des forces d'inertie de la structure pendant un événement sismique. Cependant, à cause du changement de la rigidité de la structure et de l'influence de ses différents modes propres de vibration pendant un séisme, la distribution des forces horizontales ne peut pas être clairement définie.

Dans notre cas, les bâtiments considérés ont une configuration géométrique simple, régulière en plan et en élévation. Cette configuration est choisie de manière à éviter l'influence des modes supérieurs de translation et les modes de torsion. Par conséquent, les structures de bâtiment analysées dans notre étude sont exclusivement influencées par le 1^{er} mode de vibration (qui est un mode de translation dans notre cas), voir tableaux 2.2 et 2.3 du chapitre 2 du présent mémoire.

Ainsi, la distribution des forces horizontales utilisée dans notre étude est celle correspondant au 1^{er} mode de translation élastique de la structure, qui correspond à un schéma de forces triangulaire.

3.3 Définition du déplacement cible de la structure

On définit un déplacement cible comme référence du déplacement attendu de la structure lors du séisme, de manière à associer les résultats de l'analyse *pushover* caractérisant la capacité de déformation de la structure à la "demande de déformation" correspondant au déplacement cible.

Le point de contrôle du déplacement peut être pris au centre de gravité de la structure ou à son point le plus haut. Dans notre analyse, il sera pris comme étant situé au niveau le plus haut du portique, c'est-à-dire en tête de ce dernier.

Chapitre 4 : **MODÉLISATION DES STRUCTURES ÉTUDIÉES**

4.1 Introduction

Ce chapitre est consacré à la modélisation des éléments principaux, poutres et poteaux, des portiques étudiés, présentés et dimensionnés au chapitre 2. Cette modélisation est effectuée en tenant compte du comportement non-linéaire des poutres et poteaux du portique en béton armé.

4.2 Modélisation des poutres et poteaux du portique

Les poutres et poteaux du portique en béton armé sont modélisés en tenant compte de leur comportement non-linéaire en flexion et en cisaillement. Les poutres sont modélisées par des éléments poutres élastiques avec des rotules plastiques concentrées à chacune de leurs extrémités. Les poteaux sont modélisés de la même façon, en tenant compte de la loi de la variation du moment résistant de la section droite du poteau en fonction de l'effort normal sollicitant ce dernier.

Les propriétés des rotules plastiques pour les poutres et les poteaux sont déterminées en utilisant les codes FEMA 273 [13] et ACI 318-95 [17].

4.2.1 Loi Force – Déplacement généralisé associée aux poutres et poteaux du portique

La figure 4.1 illustre la courbe non-linéaire typique idéalisée utilisée pour définir les paramètres de modélisation des poutres et poteaux du portique ainsi que les critères d'acceptation liés aux niveaux de performance de la structure [13].

La courbe est composée d'un segment linéaire entre les points **A** et **B**. La pente entre les points **B** et **C** est, en général, prise comme étant un faible pourcentage de la pente élastique (pente du segment AB). Ce pourcentage prend une valeur variant entre 0 et 10% [13] ; dans notre cas, il est pris égal à 5%.

Le point **C** a une ordonnée qui présente la résistance limite ultime de l'élément structural et une abscisse égale à la déformation à partir de laquelle la dégradation de la résistance de l'élément s'initie (ligne **CD**). Au-delà du point **D**, l'élément structural répond avec une résistance réduite jusqu'au point **E** où elle vaut **c**. Pour des déformations supérieures au point **E**, la résistance de l'élément est considérée nulle.

La figure 4.1 montre également les déformations généralisées **a** et **b** en relation avec la courbe non-linéaire idéalisée, qui sont jugées acceptables pour les différents niveaux de performance de la structure, lesquels sont désignés par les paramètres **IO**, **LS** et **CP** qui sont définis ci-après.

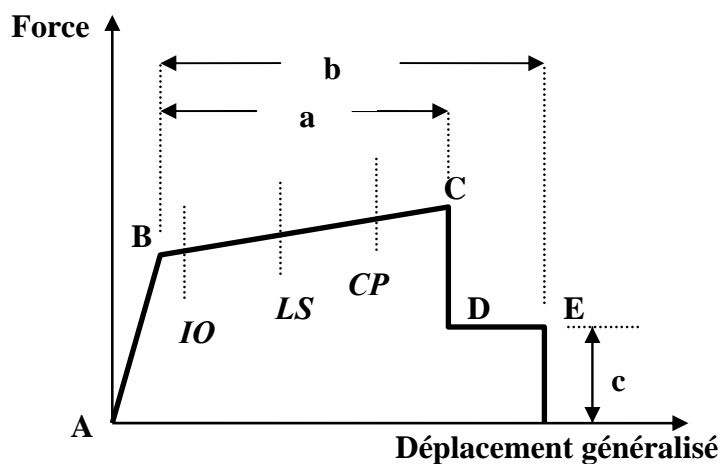


Figure 4.1 : Loi *Force - Déplacement non linéaire idéalisée* utilisée pour les poutres et poteaux du portique [13].

Critères d'acceptation et niveaux de performance de la structure

Pour différentes amplitudes de l'excitation sismique, il s'ensuit des niveaux de déformations dans une structure, de sorte que des éléments de cette dernière vont atteindre et dépasser leur limite élastique. Par conséquent, la structure va subir des dommages sous forme de fissurations, d'instabilités, de ruptures de certains de ses éléments. Et lorsqu'un élément structural subit des dommages, sa raideur diminue, et s'ensuit souvent une perte de sa résistance. Lorsque la réponse d'une structure est dans le domaine post-élastique, cette dernière ne reviendra pas à sa condition initiale, et des déformations permanentes subsisteront.

Dans les analyses effectuées dans le cadre de la présente investigation, trois points présentant trois niveaux de dommages (appelés niveaux de performance) sont définis sur la courbe *force-déplacement* de la figure 4.1 :

- Niveau **IO** = *Immediate Occupancy* (Occupation Immédiate)
- Niveau **LS** = *Life Safety* (Sécurité de la Vie)
- Niveau **CP** = *Collapse Prevention* (Prévention de la Ruine)

Au niveau *Immediate Occupancy*, les dommages sont relativement limités. La structure garde une grande partie de sa raideur initiale et de sa résistance.

Au niveau *Life Safety*, la structure a subi des dommages importants, qui pourraient induire une perte significative de sa raideur.

Au niveau *Collapse Prevention*, la structure a subi des dommages extrêmes. Et si elle est encore soumise à des déplacements latéraux, elle peut subir une instabilité et s'effondrer.

4.2.1.1 Loi *Moment – Rotation* associée aux poutres

4.2.1.1.1 Plastification par flexion – Rotule plastique

La figure 4.2 présente le diagramme *moment – rotation* associé à la plastification par flexion pour les poutres [13].

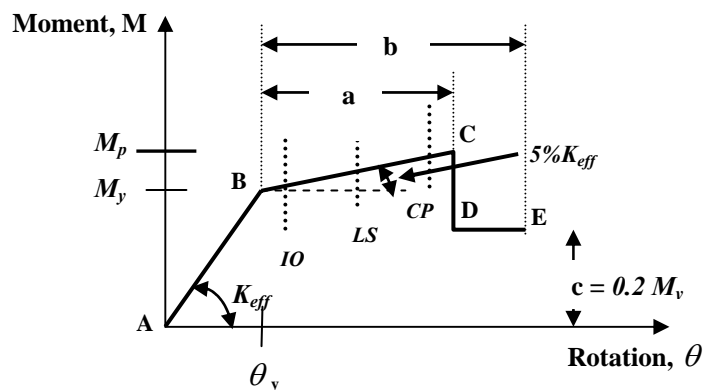


Figure 4.2 : Diagramme *moment – rotation* associé à la plastification des poutres par flexion [13].

Les paramètres présentés sur la figure 4.2 sont définis comme suit :

- K_{eff} : rigidité initiale à la flexion de la section de béton de la poutre. Elle est donnée par la formule suivante [13] :

$$K_{eff} = 0.5 E_c I_g \quad (4.1)$$

où I_g : Moment d'inertie de la section de béton de la poutre.

E_c : Module d'élasticité du béton. Dans notre cas, il est pris égal à 32164 MPa.

- M_y : moment élastique limite de la section de béton armé de la poutre, et est donné par la relation suivante [17] :

$$M_y = 0,5 f'_c Bkd \left(\frac{kd}{3} - d' \right) + f_y Bd (d - d') \rho \quad (4.2)$$

où, dans notre cas : $f'_c = f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$.

ρ et ρ' sont les pourcentages des armatures longitudinales tendues et comprimées, respectivement.

k est le facteur de la hauteur de l'axe neutre correspondant à l'état élastique limite, et est donné par la formule suivante [17] :

$$k = \sqrt{(\rho + \rho')^2 \eta_{sc}^2 + 2 \left(\rho + \rho' \frac{d'}{d} \right) \eta_{sc} + (\rho + \rho')} \quad (4.3)$$

formule dans laquelle $\eta_{sc} = \frac{E_s}{E_c}$ où E_c et E_s sont respectivement les modules d'élasticité du béton et de l'acier, avec $E_{acier} = E_s = 2.10^5 \text{ MPa}$.

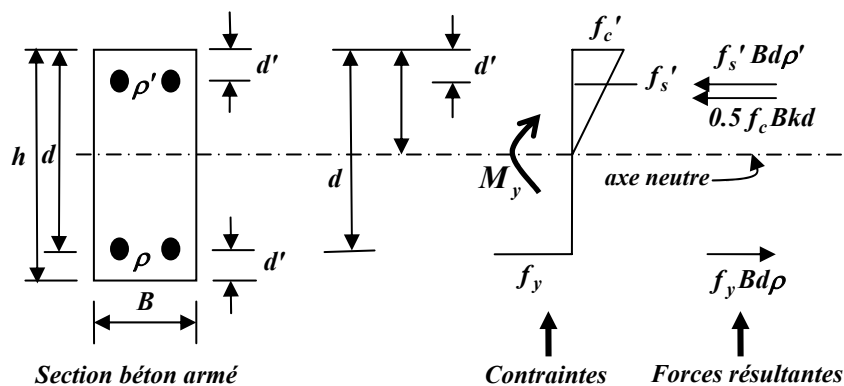


Figure 4.3 : Section doublement armée à son état élastique limite.

- θ_y : rotation élastique limite de la section en béton armé de la poutre. Elle est calculée sur la base d'une hypothèse utilisée par Saidi et Sozen [18]. Dans cette hypothèse, le moment est supposé avoir une variation linéaire le long de la poutre avec un point d'inflexion à la mi-longueur de cette dernière. θ_y est donnée par la formule suivante :

$$\theta_y = \frac{M_y}{E_c I_g} \cdot \frac{L}{6} \quad (4.4)$$

où L est la longueur de la poutre.

- M_p : moment plastique (moment résistant) de la section de béton armé de la poutre. Il est calculé par la formule suivante, en référence à la figure 4.2.

$$M_p = M_y + 5\% K_{eff} a \quad (4.5)$$

où a est la portion de la partie plastique avec écrouissage du diagramme *moment-rotation*.

- Paramètres a , b et c et critères d'acceptation IO , LS et CP :

Les paramètres a et b représentent les valeurs de rotation plastique et c celui de la résistance résiduelle (en flexion) de la poutre.

Les critères d'acceptation et les niveaux de performance IO , LS et CP sont définis précédemment au paragraphe 4.2.1.

Les paramètres a , b et c ainsi que les critères d'acceptation IO , LS et CP sont donnés par le code FEMA 273 [13].

4.2.1.1.2 Plastification par cisaillement

La figure 4.4 présente le diagramme *effort tranchant – rotation* associé à la plastification par cisaillement pour les poutres [13].

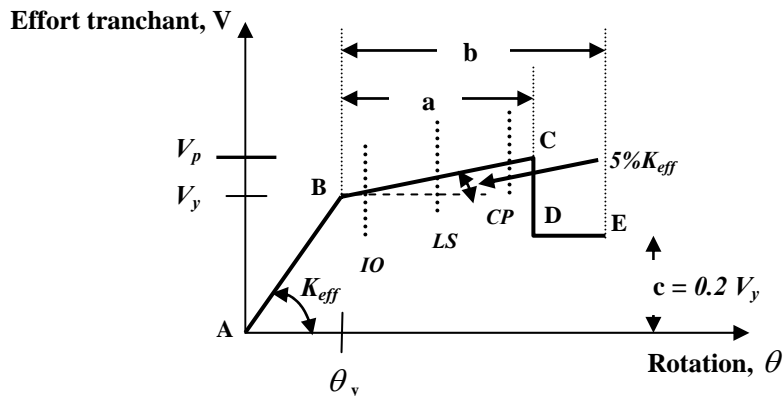


Figure 4.4 : Diagramme *effort tranchant – rotation* associé à la plastification des poutres par cisaillement [13].

Les paramètres présentés sur la figure 4.4 sont définis comme suit :

- K_{eff} : rigidité initiale au cisaillement de la section de béton de la poutre. Elle est donnée par la formule suivante [13] :

$$K_{eff} = 0.4E_c A_w \quad (4.6)$$

où A_w : Aire de la section de béton de la poutre.

$0.4E_c$: Module de cisaillement transversal, G , de la section de béton.

- V_y : effort tranchant élastique limite de la section de béton armé de la poutre. Il est donné par la formule suivante [17] :

$$V_y = \frac{A_t f_y d}{S_t} + \frac{\sqrt{f'_c} B d}{6} \quad (4.7)$$

- θ_y : rotation élastique limite de la section de béton armé de la poutre :

$$\theta_y = \frac{V_y}{K_{eff}} \quad (4.8)$$

- V_p : effort tranchant plastique de la section de béton armé. Il est calculé par la relation suivante, en référence à la figure 4.4.

$$V_p = V_y + 5\% K_{eff} a \quad (4.9)$$

où a est la portion de la partie plastique avec écrouissage du diagramme *effort tranchant-rotation*.

- Paramètres **a**, **b** et **c** et critères d'acceptation **IO**, **LS** et **CP** :

Les paramètres **a** et **b** représentent les valeurs de rotation plastique et **c** celui de la résistance résiduelle (en cisaillement) de la poutre.

Les paramètres **a**, **b** et **c** ainsi que les critères d'acceptation **IO**, **LS** et **CP** sont donnés par le code FEMA 273 [13].

4.2.1.2 Loi *Moment – Rotation* associée aux poteaux

4.2.1.2.1 Plastification par flexion – Rotule plastique

La figure 4.5 présente le diagramme *moment – rotation* associé à la plastification par flexion pour les poteaux [13].

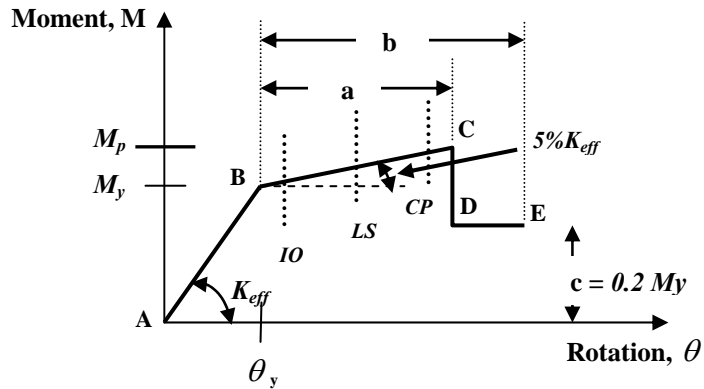


Figure 4.5 : Diagramme *moment – rotation* associé à la plastification des poteaux par flexion [13].

avec :

- K_{eff} : rigidité initiale à la flexion de la section de béton du poteau. Elle est donnée par la formule suivante [13] :

$$K_{eff} = 0.7 E_c I_g \quad (4.10)$$

avec : I_g : Moment d'inertie de la section de béton du poteau.

E_c : Module d'élasticité du béton. Dans notre cas, il est donné en fonction de la valeur de f_{c28} considérée dans les analyses *pushover* : $E_c = 11000 \cdot \sqrt[3]{f_{c28}}$ [9].

- M_y : moment élastique limite de la section de béton armé du poteau.
Les valeurs des moments élastiques limites des poteaux sont calculés par le programme SAP2000 [10] en tenant compte de l'interaction *moment de flexion (M) – effort normal (N)*.
- θ_y : rotation élastique limite de la section de béton armé du poteau. Elle est calculée avec la même formule que pour les poutres (Cfr.relation 4.4).

$$\theta_y = \frac{M_y}{E_c I_g} \cdot \frac{L}{6}$$

où L est la Longueur du poteau.

- M_p : moment plastique de la section de béton armé du poteau, donné par la relation suivante, en référence à la figure 4.5.

$$M_p = M_y + 5\% K_{eff} a \quad (4.11)$$

avec a la portion de la partie plastique avec écrouissage du diagramme moment-rotation.

- Paramètres a , b et c et critères d'acceptation IO , LS et CP :

Les paramètres a et b représentent les valeurs de rotation plastique et c celui de la résistance résiduelle (en flexion) du poteau.

Les paramètres a , b et c ainsi que les critères d'acceptation IO , LS et CP sont donnés par le code FEMA 273 [13].

4.2.1.2.2 Plastification par cisaillement

La modélisation de la plastification des poteaux par cisaillement est effectuée de la même manière que pour les poutres (Cfr. Paragraphe 4.2.1.1.2).

4.2.2 Récapitulation des rotules plastiques attribuées aux poutres et poteaux

La figure 4.6 récapitule les différentes rotules plastiques attribuées aux poutres et poteaux du portique.

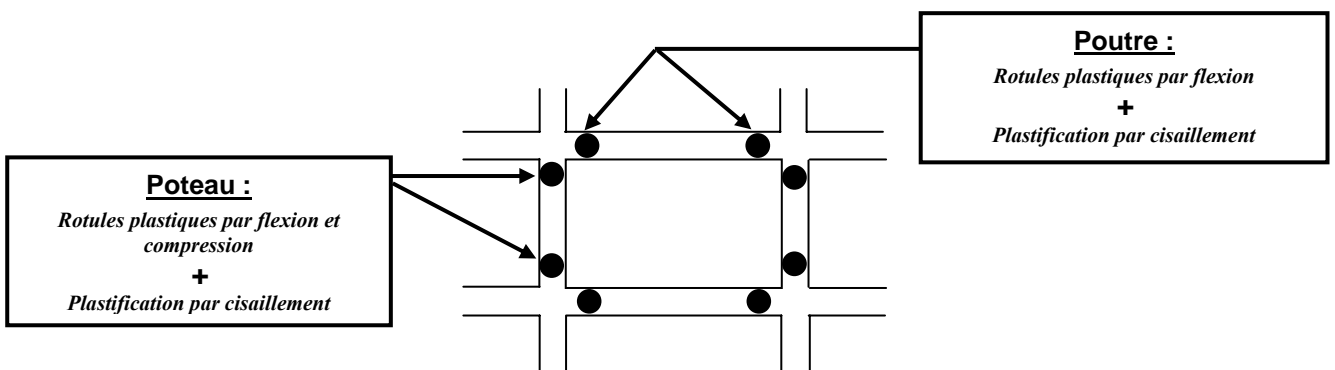


Figure 4.6 : Rotules plastiques attribuées aux poutres et poteaux du portique.

Chapitre 5 : MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE ET RÉSULTATS DE L'ÉTUDE

5.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente et on discute les résultats des analyses *pushover* effectuées sur les deux portiques étudiés, $P-H_{RDC}3m$ et $P-H_{RDC}4m$, présentés et dimensionnés au chapitre 2.

5.1.1 Données des paramètres de l'étude

Pour chaque portique considéré, les analyses *pushover* sont effectuées en considérant différentes valeurs des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier constitutifs des poteaux du portique, à savoir la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , et la limite élastique des aciers longitudinaux, f_y . Les valeurs (en *MPa*) considérées pour ces deux paramètres, variant de manière dégressive, sont :

- pour f_{c28} : 25, 23, 20, 18 et 15 *MPa* ;
- pour f_y : 500, 450, 400, 350 et 300 *MPa*.

Nous rappelons que les valeurs $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$ sont les valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier sur la base desquelles ont été dimensionnés les deux portiques étudiés.

La limite élastique des armatures transversales des poteaux est maintenue à sa valeur nominale, 500 *MPa*. Ce paramètre a été fixé à cette valeur suite aux résultats non significatifs obtenus des analyses *pushover* effectuées en considérant des valeurs réduites de ce paramètre. En effet, nous avons constaté que la réduction de la limite élastique des armatures transversales des poteaux, dans la même fourchette que celle pour les armatures longitudinales, mentionnée ci-dessus (de 500 à 300 *MPa*), n'avait pas d'effet sur la réponse sismique du portique : la plastification des sections critiques des poteaux, en pied et en tête de ceux-ci, a toujours lieu par flexion et compression et non par cisaillement. Ces résultats non significatifs, liés à la réduction de la limite élastique des armatures transversales des poteaux, ne sont pas présentés ici car ne présentant aucune conclusion importante.

En ce qui concerne les poutres des deux portiques étudiés, et comme précisé dans la méthodologie d'investigation, au chapitre 1, §1.3, les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier sont maintenues à leurs valeurs nominales (de dimensionnement):

- béton : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$;
- aciers (longitudinaux et transversaux) : $f_y = 500 \text{ MPa}$.

5.1.2 Méthodologie d'analyse

Pour chaque portique étudié, les analyses *pushover* sont effectuées comme suit :

a) Analyse du portique aux valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier aussi bien pour les poteaux que pour les poutres :

- béton : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$;
- aciers (longitudinaux et transversaux) : $f_y = 500 \text{ MPa}$.

b) Analyse du portique en considérant, pour les poteaux, les différentes valeurs réduites séparément de la résistance caractéristique à la compression du béton sus-mentionnées au §5.1.1 : $f_{c28} = 23, 20, 18$ puis 15 MPa ; la limite élastique de leurs armatures longitudinales et transversales étant maintenue à sa valeur nominale : $f_y = 500 \text{ MPa}$.

Concernant les poutres, les caractéristiques mécaniques du béton et des aciers (longitudinaux et transversaux) sont maintenues à leurs valeurs nominales : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$.

c) Analyse du portique en considérant, pour les poteaux, les différentes valeurs réduites séparément de la limite élastique des aciers longitudinaux considérées : $f_y = 450, 400, 350$ puis 300 MPa ; la limite élastique de leurs aciers transversaux étant maintenue à sa valeur nominale, $f_y = 500 \text{ MPa}$. La résistance caractéristique à la compression du béton est maintenue à sa valeur nominale : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.

Pour les poutres, les caractéristiques mécaniques du béton et des aciers (longitudinaux et transversaux) sont maintenues à leurs valeurs nominales : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$.

d) Analyse du portique en considérant, pour les poteaux, les différentes valeurs réduites simultanément de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , et de la limite élastique des aciers longitudinaux, f_y .

Les combinaisons considérées de valeurs réduites de ces deux paramètres, que l'on désigne ici par le terme $(f_{c28} - f_y)$, et dont les résultats des analyses *pushover* sont présentés dans ce chapitre, sont :

$$(f_{c28} - f_y) [\text{en MPa}] = (23 - 450), (23 - 400), (23 - 350), \\ (20 - 450), (20 - 400), (20 - 350), \\ (18 - 450), (18 - 400), (18 - 350).$$

Note: Signification des combinaisons $(f_{c28} - f_y)$:

Exemple : $(f_{c28} - f_y) = (23 - 450)$ veut dire : $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$.

La limite élastique des armatures transversales des poteaux est maintenue à sa valeur nominale, 500 MPa .

Concernant les poutres, les caractéristiques mécaniques du béton et des aciers (longitudinaux et transversaux) sont maintenues à leurs valeurs nominales : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$.

5.1.3 Résultats présentés et discutés

On montre d'abord les courbes de capacité des deux portiques étudiés, $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, obtenues par les analyses *pushover*, donnant, chacune, l'effort tranchant à la base du portique en fonction de son déplacement latéral en tête. Puis, on présente et on analyse leurs mécanismes de ruine.

Ensuite, on discute les résultats obtenus, relatifs aux paramètres étudiés : la résistance ultime du portique à l'action sismique, sa sur-résistance et sa ductilité globale.

Enfin, on procède à une analyse comparative des comportements sismiques des deux portiques en comparant leurs caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance.

5.2 Résultats du portique $P - H_{RDC} 3m$

La figure 5.1 montre le portique $P - H_{RDC} 3m$ et les forces sismiques appliquées à ses différents niveaux.

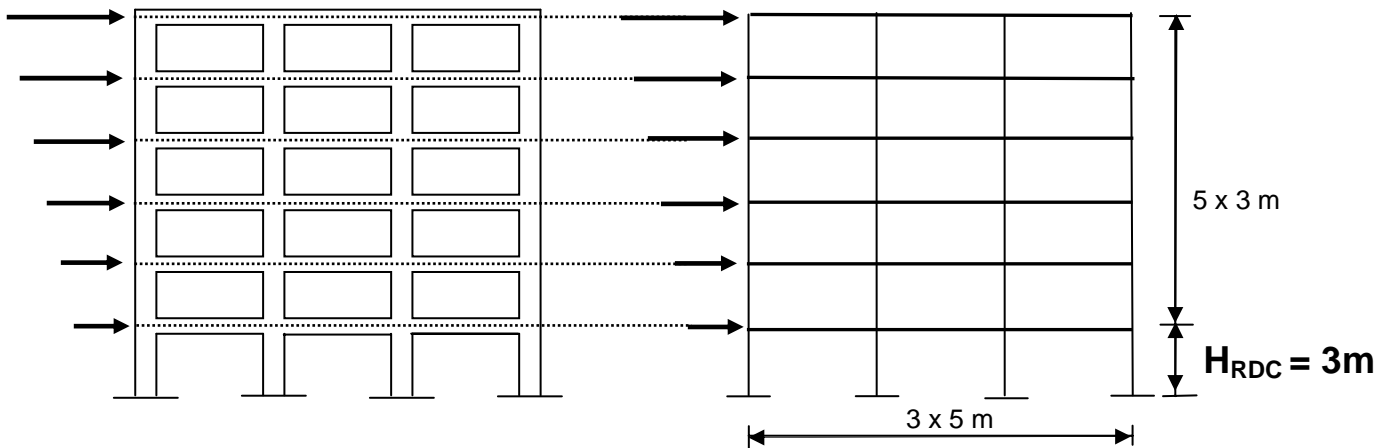


Figure 5.1 : Portique $P - H_{RDC} 3m$ et sa modélisation.

5.2.1 Portique de référence

Le portique de référence est celui dont les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier sont à leurs valeurs nominales tant pour les poteaux que pour les poutres :

- béton : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$;
- aciers (longitudinaux et transversaux) : $f_y = 500 \text{ MPa}$.

5.2.1.1 Courbe de capacité du portique

La courbe de capacité du portique de référence (figure 5.2) est caractérisée par :

- **Un état élastique limite** défini par le point 1 correspondant à la formation de la première rotule plastique dans le portique et où l'on a une résistance élastique limite $V_y = 474 \text{ kN}$ et un déplacement élastique limite correspondant $d_y = 3.9 \text{ cm}$ et une raideur latérale initiale $K_0 = V_y / d_y = 12154 \text{ kN/m}$;
- **Un état limite ultime de résistance** défini par le point point 2 où l'on a une résistance ultime $V_u = 704 \text{ kN}$ et un déplacement ultime $d_u = 38.6 \text{ cm}$.

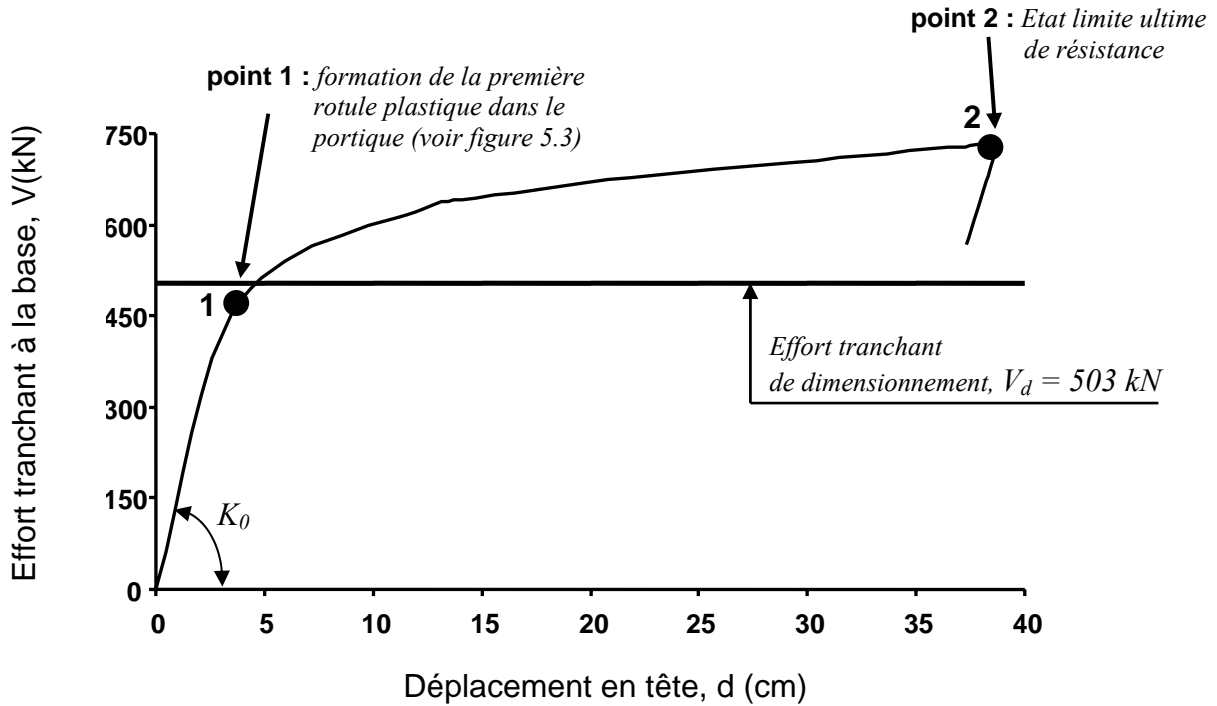


Figure 5.2 : Courbe de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$ de référence ($f_{c28} = 25$ MPa et $f_y = 500$ MPa).

5.2.1.2 Mécanisme de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

La figure 5.3 montre le mécanisme de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ de référence ainsi que les rotules plastiques formées à ce stade. Le mécanisme de ruine est un mécanisme plastique global. Les rotules plastiques se forment successivement dans les poutres et en pied des poteaux du rez-de-chaussée.

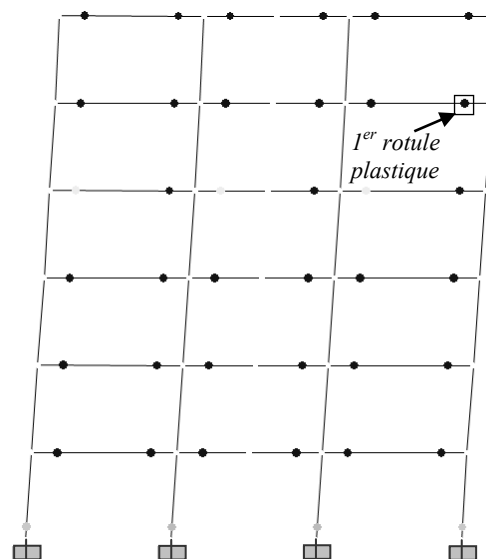


Figure 5.3 : Mécanisme de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ de référence ($f_{c28} = 25$ MPa et $f_y = 500$ MPa) et distribution des rotules plastiques.

5.2.2 Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux est réduite

Les analyses *pushover* sont effectuées en réduisant, à chaque analyse, pour le portique, la valeur de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , dans les poteaux en considérant les valeurs réduites définies dans le §5.1.2.b. La limite élastique f_y de leurs armatures longitudinales étant maintenue à sa valeur nominale, 500 MPa . Le portique est ensuite analysé suivant la méthodologie définie également dans le même paragraphe 5.1.2.b.

5.2.2.1 Courbes de capacité du portique

La figure 5.4 montre que les courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$, obtenues pour les différentes valeurs considérées de f_{c28} du béton dans les poteaux, présentent une même allure plus ou moins identique à celle du portique de référence ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$), avec des paliers plastiques distincts.

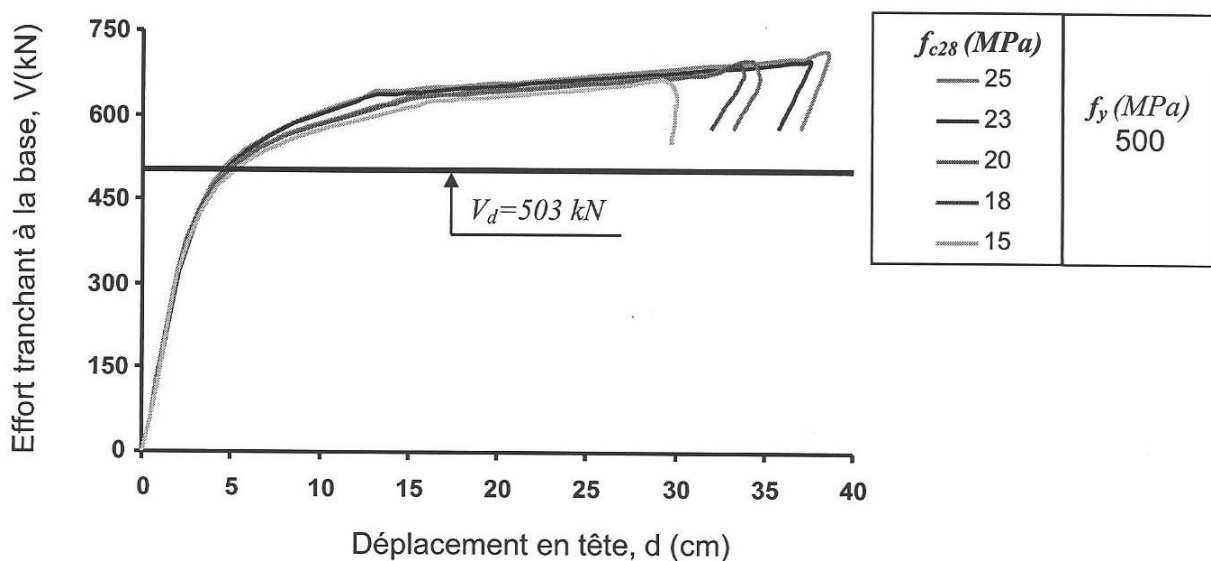


Figure 5.4 : Courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ; $f_y = 500 \text{ MPa}$.

Ces courbes de capacité sont caractérisées, chacune, par un état élastique limite et un état limite ultime de résistance. Les valeurs des différents paramètres caractérisant ces deux états limites associés aux courbes de capacité, sont données au tableau 5.1 en fonction des valeurs considérées de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux.

PORTIQUE $P - H_{RDC} 3m$								
Acier f_y (MPa)	Béton f_{c28} (MPa)	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u/d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u/V_d$ ($V_d = 503$ kN)
		V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y/d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
500	25	474	3.9	12154	704	38.6	9.9	1.40
	23	475	3.9	12180	695	37.6	9.6	1.38
	20	474	4.0	11850	680	34.7	8.7	1.35
	18	474	4.1	11560	676	33.8	8.2	1.34
	15	473	4.2	11262	658	29.7	7.1	1.31

Tableau 5.1 : Propriétés du portique $P - H_{RDC} 3m$ à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance en fonction de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ; $f_y = 500$ MPa.

- **A l'état élastique limite**, à mesure que la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux diminue (tableau 5.1), la raideur initiale K_0 du portique $P - H_{RDC} 3m$ diminue aussi mais légèrement. Ainsi, pour $f_{c28} = 20$ MPa, soit une diminution de 20% par rapport à la valeur nominale 25 MPa, la raideur K_0 ne décroît que de 2.5% (de 12154 kN/m à 11850 kN/m). Et pour $f_{c28} = 15$ MPa, soit une réduction de 40% par rapport à la valeur nominale (25 MPa), K_0 décroît de seulement 7% (de 12154 kN/m à 11262 kN/m) – (tableau 5.1).

La résistance élastique limite V_y reste, quant à elle, presque constante quelle que soit la valeur réduite considérée de f_{c28} , et le déplacement élastique correspondant d_y varie légèrement (tableau 5.1).

- **A l'état limite ultime de résistance**, la résistance ultime V_u , le déplacement ultime correspondant d_u ainsi que la ductilité globale $\mu = d_u/d_y$ du portique diminuent avec la diminution de f_{c28} (tableau 5.1). Toutefois, la diminution de la résistance ultime (V_u) est relativement faible (de l'ordre de 6% pour la plus faible valeur considérée de f_{c28} , 15 MPa) comparée à celle du déplacement ultime d_u donc de la ductilité globale (μ). En effet, pour une réduction de 20% de f_{c28} ($f_{c28} = 20$ MPa), la ductilité décroît de 12% (de 9.9 à 8.7). Et pour une réduction de 40% de f_{c28} ($f_{c28} = 15$ MPa) elle décroît de 28% (de 9.9 à 7.1) – (tableau 5.1). Enfin, le coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u/V_d$, lié directement à la résistance ultime (V_u) subit aussi une légère diminution avec la réduction de f_{c28} (de l'ordre de 6% pour la plus faible valeur considérée de f_{c28} , 15 MPa,) – (tableau 5.1).

5.2.2.2 Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

La figure 5.5 montre les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ obtenus pour les différentes valeurs considérées de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux. Le mécanisme de ruine montré à la figure 5.5a est un mécanisme plastique global et est le même pour les 3 valeurs réduites de f_{c28} , 23 MPa, 20 MPa et 18 MPa. Celui relatif à $f_{c28} = 15$ MPa est présenté à la figure 5.5b. Ce dernier n'est pas un mécanisme plastique global car des rotules plastiques se sont formées en tête des deux poteaux centraux des deux premiers étages.

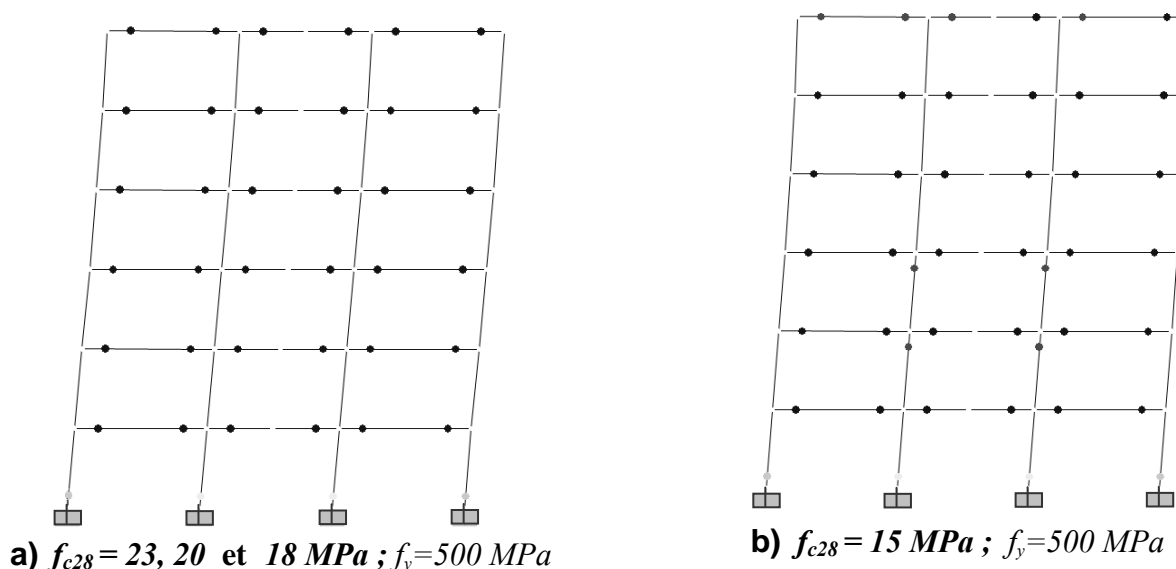


Figure 5.5 : Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ; $f_y = 500$ MPa.

5.2.3 Portique dont la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux est réduite

Dans ce cas, les analyses *pushover* sont effectuées en réduisant, à chaque analyse, la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux en considérant les valeurs réduites définies dans le §5.1.2.c. La résistance caractéristique à la compression du béton étant maintenue à sa valeur nominale : $f_{c28} = 25$ MPa. Le portique est ensuite analysé suivant la méthodologie définie aussi dans le même paragraphe 5.1.2.c.

5.2.3.1 Courbes de capacité du portique

La figure 5.6 présente les courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction de la limite élastique des aciers longitudinaux des poteaux. Ces courbes *pushover* sont similaires, mais avec des paliers plastiques bien distincts. On remarque que le palier plastique diminue sensiblement avec la diminution de la limite élastique f_y des aciers des poteaux.

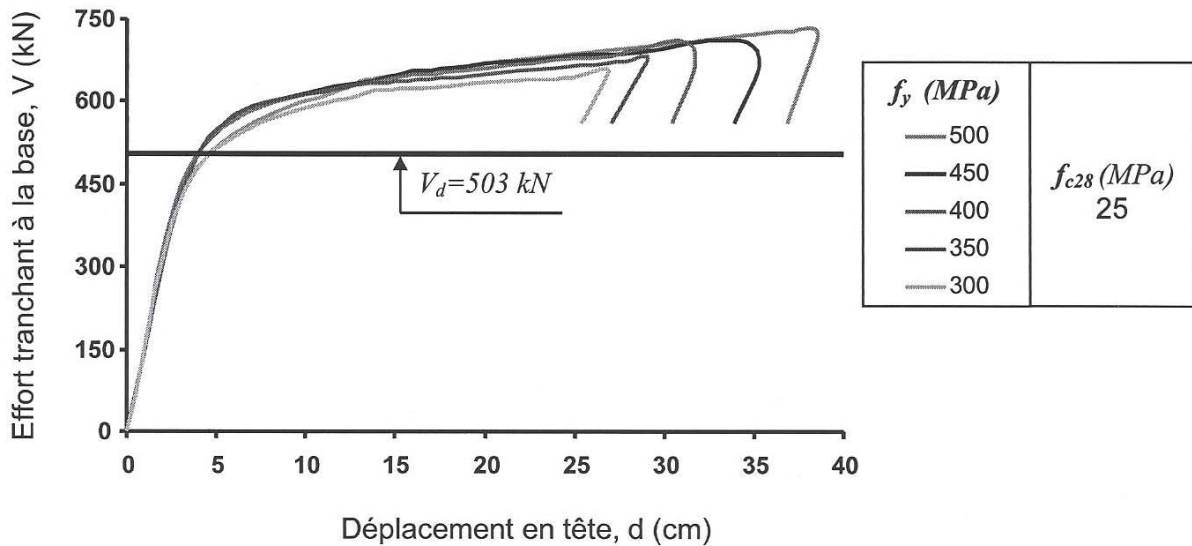


Figure 5.6 : Courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.

Les valeurs des paramètres caractérisant l'état élastique limite et l'état limite ultime de résistance pour chaque courbe de capacité, sont consignées dans le tableau 5.2.

PORTIQUE $P-H_{RDC} 3m$								
Béton f_{c28} (MPa)	Acier f_y (MPa)	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u/d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u/V_d$ ($V_d=503 \text{ kN}$)
		V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y/d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
25	500	474	3.9	12154	704	38.6	9.9	1.40
	450	517	4.2	12309	704	35.3	8.4	1.40
	400	518	4.3	12046	692	31.7	7.4	1.37
	350	518	4.3	12046	677	29.1	6.8	1.34
	300	478	3.9	12256	648	26.8	6.9	1.29

Tableau 5.2 : Propriétés du portique $P-H_{RDC} 3m$ à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance en fonction de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.

- **A l'état élastique limite**, à mesure que la limite élastique f_y des aciers des poteaux diminue (tableau 5.2), La raideur initiale K_0 du portique reste presque constante. Aussi, la résistance élastique limite V_y , ainsi que le déplacement élastique correspondant d_y varient légèrement, de sorte qu'en moyenne, ils restent pratiquement constants.

- **A l'état limite ultime de résistance**, la résistance ultime V_u diminue légèrement avec la diminution de f_y , par contre, le déplacement ultime d_u donc la ductilité globale μ , subit une diminution importante (tableau 5.2). En effet, pour $f_y = 400 \text{ MPa}$, soit une réduction de 20% par rapport à la valeur nominale, 500 MPa, diminue de 1.7% (de 704 à 692 kN), tandis que la ductilité globale μ décroît de 25% (de 9.9 à 7.4). Et pour $f_y = 300 \text{ MPa}$, la plus faible valeur réduite considérée de f_y , soit une diminution de 40% par rapport à la valeur nominale (500 MPa), V_u diminue de 8% (de 704 à 648 kN), alors que la ductilité μ décroît de 30% (de 9.9 à 6.9) – (tableau 5.2).

Le coefficient de sur-résistance Ω subit aussi une légère diminution avec la réduction de f_y (de l'ordre de 8% pour la plus faible valeur considérée de f_y , 300 MPa) – (tableau 5.2).

5.2.3.1 Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

La figure 5.7 montre les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC}3m$ obtenus pour différentes valeurs réduites considérées de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux, à savoir : 450, 400, 350 et 300 MPa. On remarque que ces mécanismes ne sont pas des mécanismes plastiques globaux comme c'est le cas pour le même portique aux valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$) - (figure 5.3).

En effet, pour $f_y = 450 \text{ MPa}$ (figure 5.7.a), outre les rotules plastiques formées aux extrémités des poutres des différents niveaux du portique et en pied des poteaux du rez-de-chaussée, des rotules plastiques se développent également en tête des poteaux centraux du 2^{ème}, 3^{ème} et du 4^{ème} étage. Et pour $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figure 5.7.b) et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.7.c), outre les rotules plastiques précitées, d'autres rotules plastiques se développent également en tête des poteaux centraux du 1^{er} étage et de l'ensemble des poteaux du 3^{ème} et du 4^{ème} étage. Enfin, pour $f_y = 300 \text{ MPa}$ (figure 5.7.d), la plus faible valeur réduite considérée de f_y , la situation

devient plus défavorable pour le comportement du portique en ce sens qu'outre les rotules plastiques précitées, d'autres rotules plastiques se développent en pied des poteaux centraux du 1^{er} et du 2^{ème} étage, ce qui conduit à la formation d'un mécanisme plastique d'étage englobant le rez-de-chaussée et les deux premiers étages du portique (figure 5.7.d).

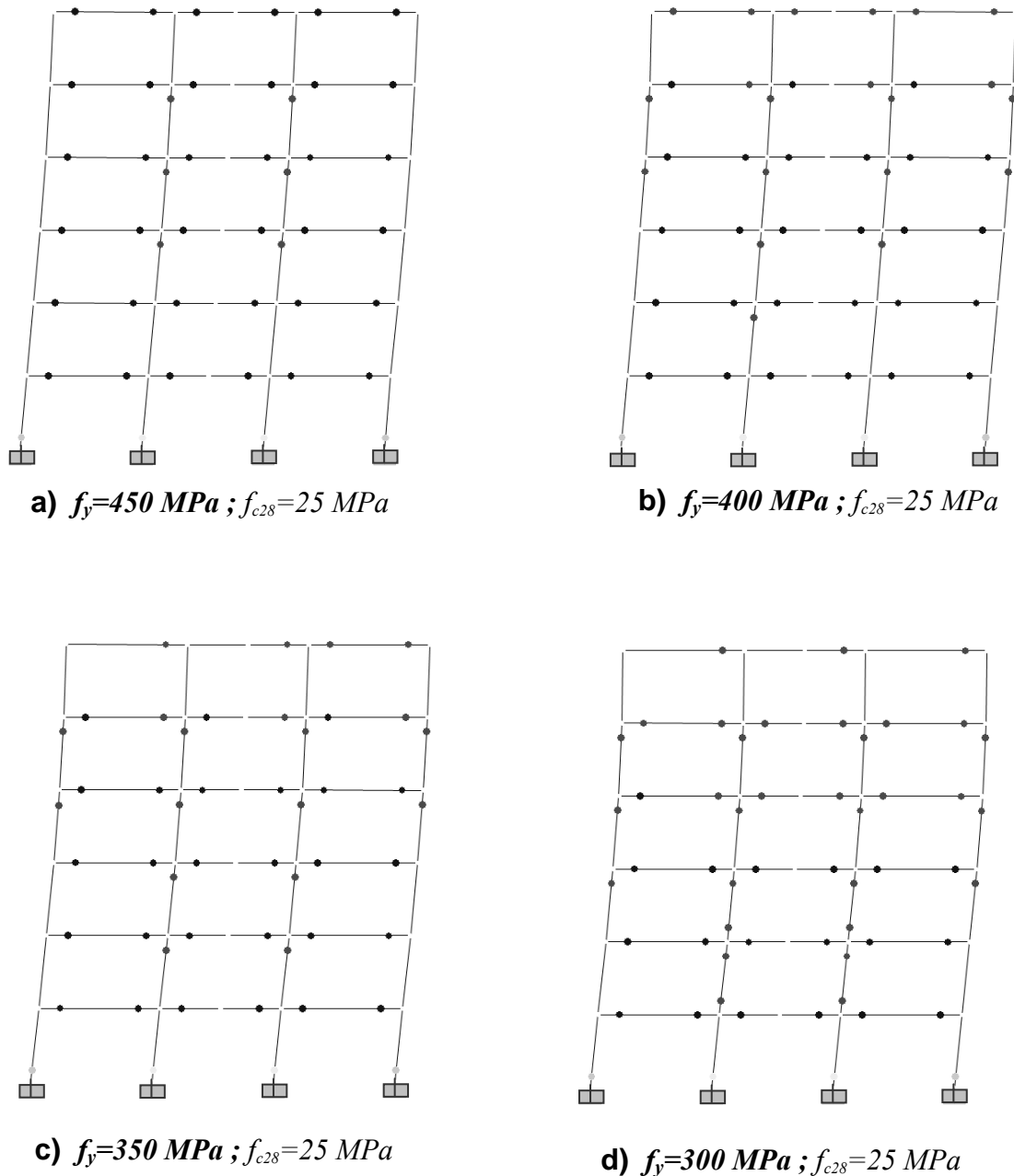


Figure 5.7 : Mécanismes de ruine du portique $P - H_{RDC} 3m$ en fonction de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.

5.2.4 Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ainsi que la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux sont simultanément réduites

Dans ce cas, les analyses *pushover* sont effectuées en réduisant simultanément la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , dans les poteaux ainsi que la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux, et ce, en considérant les valeurs réduites de ces deux paramètres définies dans le §5.1.2.d. Le portique est ensuite analysé suivant la méthodologie définie également dans le même paragraphe 5.1.2.d.

5.2.4.1 Courbes de capacité du portique

La figure 5.8 présente les courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction des valeurs réduites simultanément de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , et de la limite élastique des aciers longitudinaux, f_y , considérées. Ces courbes de capacité sont similaires, mais avec des paliers plastiques bien distincts. On constate que le palier plastique diminue avec la diminution simultanée de f_{c28} dans les poteaux et de f_y de leurs aciers longitudinaux.

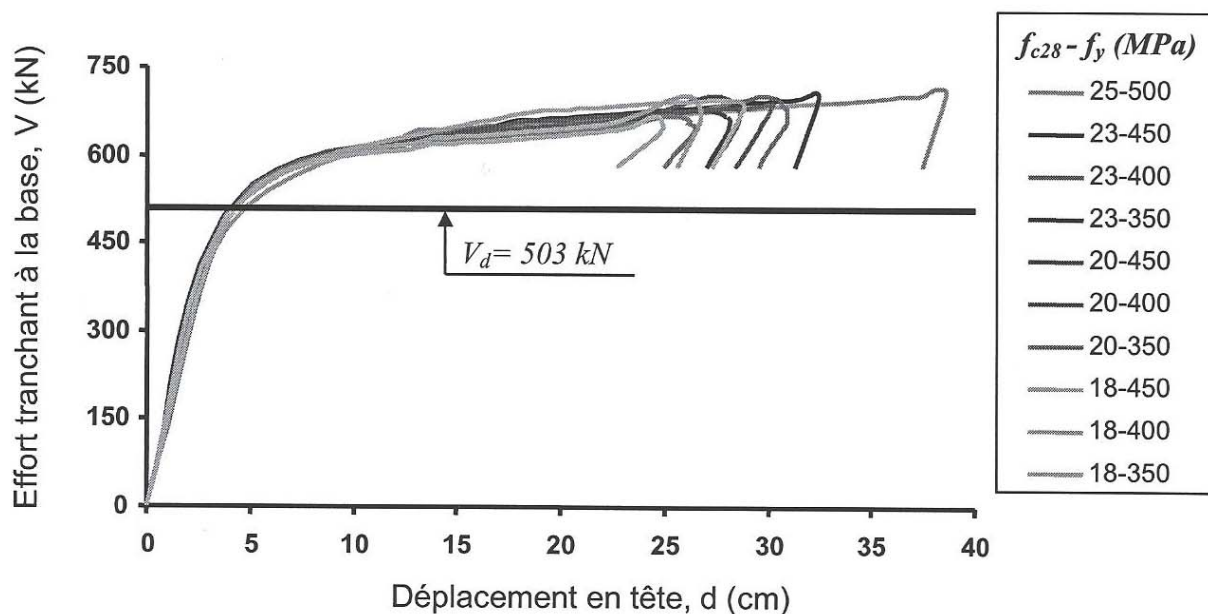


Figure 5.8 : Courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction de la diminution simultanée de f_{c28} et de f_y dans les poteaux.

Les valeurs des paramètres caractérisant l'état élastique limite et l'état limite ultime de résistance pour chaque courbe de capacité, sont données dans le tableau 5.3.

PORTIQUE $P - H_{RDC} 3m$							
Béton-Acier $f_{c28} - f_y$ (MPa)	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u / d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u / V_d$ ($V_d = 503$ kN)
	V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y / d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
25-500	474	3.9	12154	704	38.6	9.9	1.40
23-450	517	4.3	12023	698	32.4	7.5	1.39
23-400	517	4.3	12023	687	30.7	7.1	1.36
23-350	516	4.3	12000	666	28.0	6.5	1.32
20-450	516	4.4	11727	687	30.2	6.9	1.36
20-400	516	4.4	11727	676	28.5	6.5	1.34
20-350	514	4.3	11953	658	26.3	6.1	1.31
18-450	513	4.4	11659	680	28.8	6.5	1.35
18-400	513	4.4	11659	668	26.7	6.1	1.33
18-350	513	4.4	11659	649	24.9	5.7	1.29

Tableau 5.3 : Propriétés du portique $P - H_{RDC} 3m$ à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance en fonction de la valeur du couple ($f_{c28} - f_y$) dans les poteaux.

- **A l'état élastique limite**, La raideur initiale K_0 diminue légèrement avec la diminution simultanée de la résistance caractéristique f_{c28} du béton et de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux (tableau 5.3). Ainsi, pour ($f_{c28} - f_y$) = (18-350) MPa, la plus faible valeur considérée pour le couple, correspondant à respectivement 28% et 30% de réduction de f_{c28} et de f_y la raideur K_0 ne diminue que de 4%. Aussi, la résistance élastique limite V_y et le déplacement élastique correspondant d_y varient également légèrement, de quelques pourcents, quelle que soit la valeur réduite considérée pour le couple ($f_{c28} - f_y$) – (tableau 5.3).

- **A l'état limite ultime de résistance**, la résistance ultime V_u diminue légèrement avec la diminution simultanée de f_{c28} et f_y , tandis que le déplacement ultime correspondant d_u donc la ductilité globale μ subit une décroissance importante (tableau 5.3). En effet, pour

$(f_{c28} - f_y) = (20 - 400) \text{ MPa}$, soit une réduction de 20% pour chacune des deux caractéristiques mécaniques (f_{c28} et f_y) par rapport à leurs valeurs nominales respectives, 25 MPa et 500 MPa, la résistance ultime V_u diminue de 4% (de 704 à 676 kN), alors que la ductilité globale μ décroît de 34% (de 9.9 à 6.5). Et pour $(f_{c28} - f_y) = (18 - 350) \text{ MPa}$, la plus faible valeur considérée pour le couple ($f_{c28} - f_y$), V_u diminue d'environ 8% (de 704 à 649 kN), tandis que la ductilité μ décroît de 42% (de 9.9 à 5.7) – (tableau 5.3). Le coefficient de sur-résistance Ω subit aussi une légère diminution avec la réduction simultanée de f_{c28} et f_y , de l'ordre de 3% pour $(f_{c28} - f_y) = (20 - 400) \text{ MPa}$ et d'environ 8% pour $(f_{c28} - f_y) = (18 - 350) \text{ MPa}$ – (tableau 5.3).

5.2.4.2 Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

Les figures 5.9 et 5.10 montrent les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ obtenus pour différentes valeurs réduites simultanément de la résistance caractéristique du béton, f_{c28} , dans les poteaux et de la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux. On constate que ces mécanismes ne sont pas des mécanismes plastiques globaux comme c'est le cas pour le même portique aux valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$) - (figure 5.3).

En effet, pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$ (figure 5.9.a), $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figure 5.9.b), $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.9.c), $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$ (figure 5.10.a) et $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figure 5.10.b) outre les rotules plastiques formées aux extrémités des poutres des différents niveaux du portique et en pied des poteaux du rez-de-chaussée, d'autres rotules plastiques se développent également en tête des poteaux centraux du 1^{er} et du 2^{ème} étage et de l'ensemble des poteaux du 3^{ème} et du 4^{ème} étage. Et pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 300 \text{ MPa}$ (figure 5.9.d), $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.10.c) et $f_{c28} = 18 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.10.d), la situation devient plus défavorable pour le comportement du portique en ce sens qu'outre les rotules plastiques précitées, d'autres rotules plastiques se développent en pied et en tête des poteaux centraux soit du 1^{er} étage (figure 5.9.d), soit du 2^{ème} (figure 5.10.d), selon les valeurs réduites de f_{c28} et f_y .

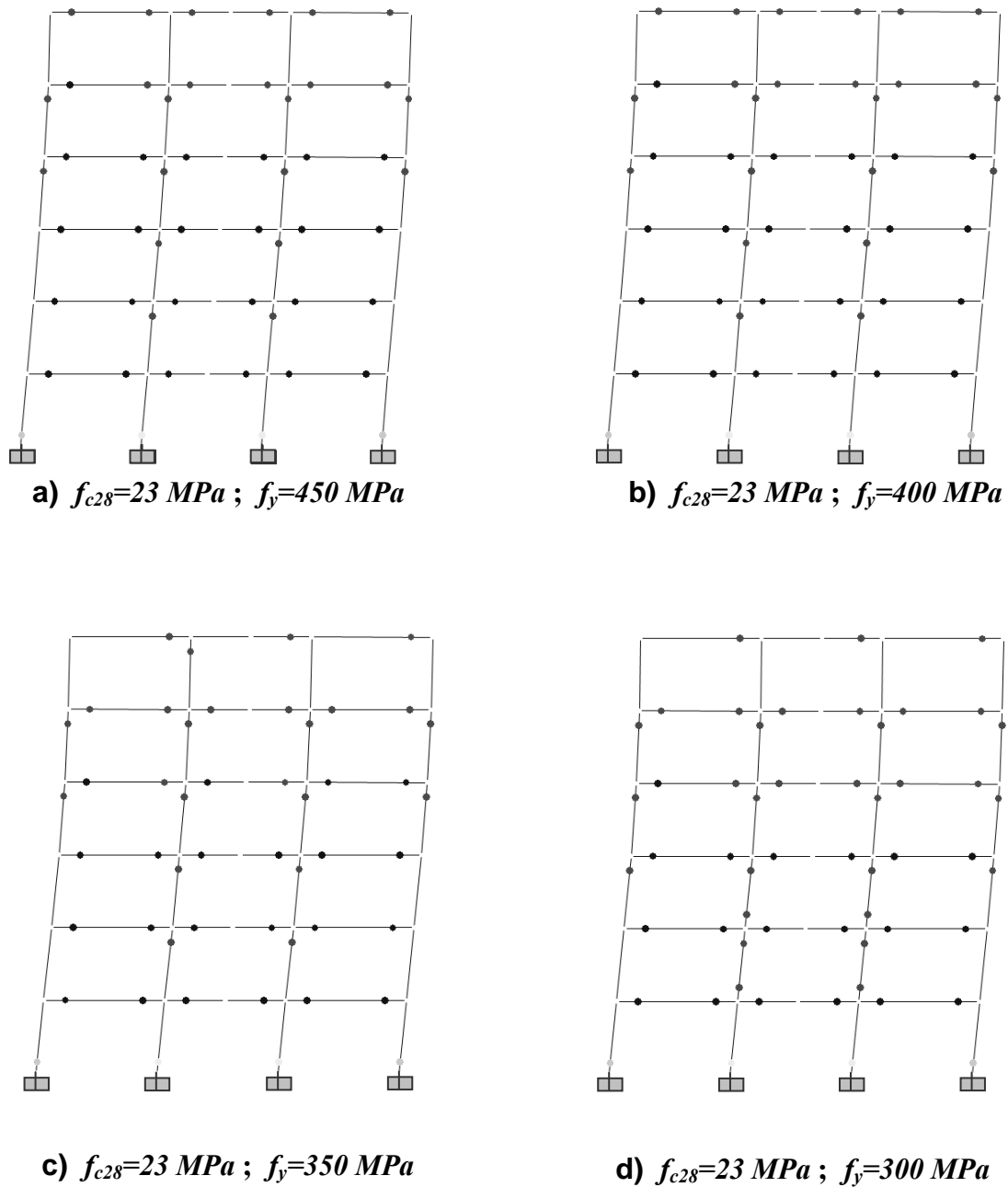


Figure 5.9 : Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ en fonction des valeurs réduites du couple ($f_{c28} - f_y$) dans les poteaux, avec $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$.

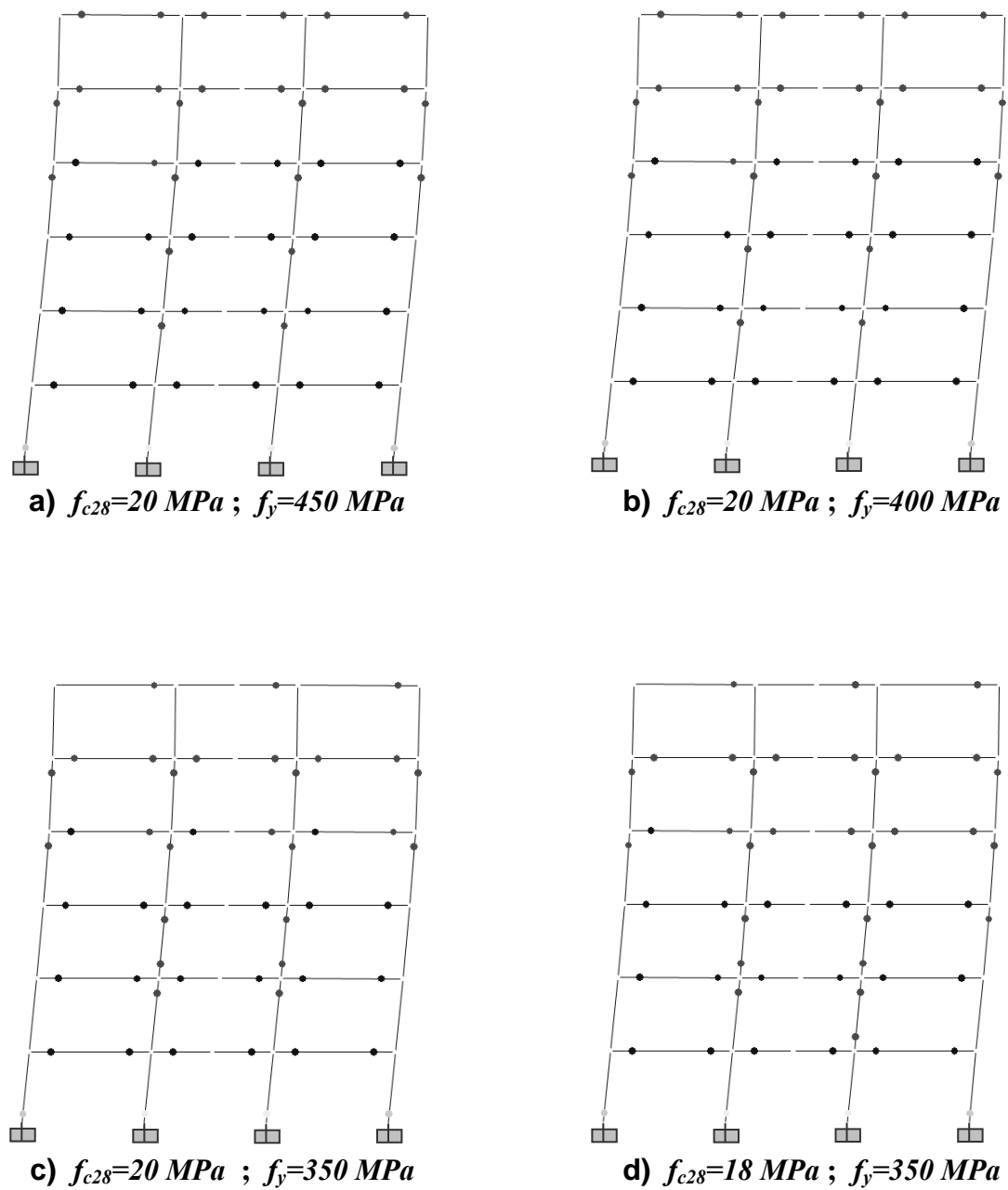


Figure 5.10 : Mécanismes de ruine du portique $P - H_{RDC} 3m$ en fonction des valeurs réduites du couple ($f_{c28} - f_y$) dans les poteaux, avec $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ puis 18 MPa .

5.3 Résultats du portique $P - H_{RDC} 4m$

La figure 5.11 montre le portique $P - H_{RDC} 4m$ et les forces sismiques appliquées à ses différents niveaux.



Figure 5.11 : Portique $P - H_{RDC} 4m$ et sa modélisation.

5.3.1 Portique de référence

Le portique de référence est celui dont les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier sont à leurs valeurs nominales tant pour les poteaux que pour les poutres :

- béton : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$;
- aciers (longitudinaux et transversaux) : $f_y = 500 \text{ MPa}$.

5.3.1.1 Courbe de capacité du portique

La courbe de capacité du portique de référence (figure 5.12) est caractérisée par :

- **Un état élastique limite** défini par le point **1**, correspondant à la formation de la première rotule plastique dans le portique et où l'on a une résistance élastique limite $V_y = 555 \text{ kN}$ et un déplacement élastique limite correspondant $d_y = 5.3 \text{ cm}$ et une raideur latérale initiale $K_0 = V_y / d_y = 10471 \text{ kN/m}$;
- **Un état limite ultime de résistance** défini par le point **2** où l'on a une résistance ultime $V_u = 720 \text{ kN}$ et un déplacement ultime $d_u = 30.8 \text{ cm}$.

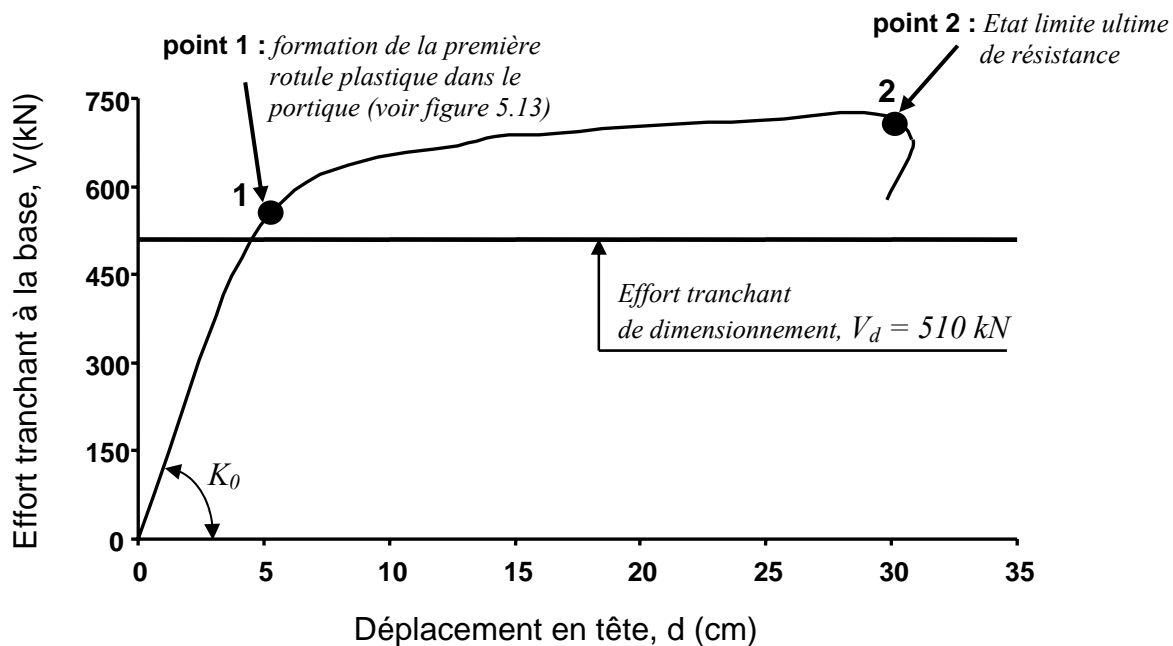


Figure 5.12 : Courbe de capacité du portique $P - H_{RDC} 4m$ de référence ($f_{c28} = 25$ MPa et $f_y = 500$ MPa).

5.3.1.2 Mécanisme de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

La figure 5.13 montre le mécanisme de ruine du portique $P - H_{RDC} 4m$ de référence ainsi que les rotules plastiques formées à ce stade. Le mécanisme de ruine est un mécanisme plastique global. Les rotules plastiques se forment successivement dans les poutres et en pied des poteaux du rez-de-chaussée.

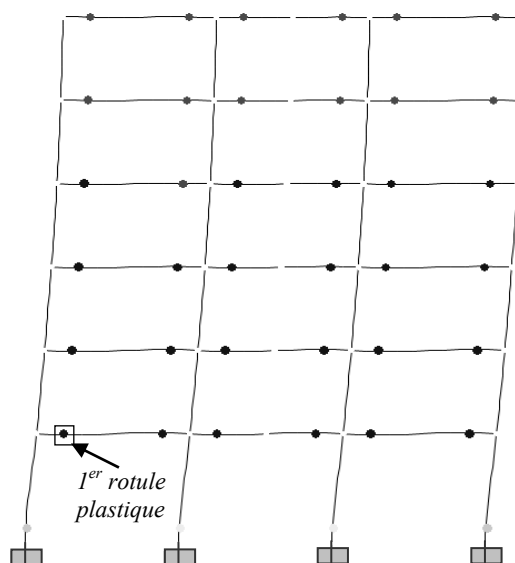


Figure 5.13 : Mécanisme de ruine du portique $P - H_{RDC} 4m$ de référence ($f_{c28} = 25$ MPa et $f_y = 500$ MPa) et distribution des rotules plastiques.

5.3.2 Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux est réduite

Les analyses *pushover* sont effectuées en réduisant, à chaque analyse, pour le portique, la valeur de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , dans les poteaux en considérant les valeurs réduites définies dans le §5.1.2.b. La limite élastique f_y de leurs armatures longitudinales étant maintenue à sa valeur nominale, 500 MPa . Le portique est ensuite analysé suivant la méthodologie définie aussi dans le même paragraphe 5.1.2.b.

5.3.2.1 Courbes de capacité du portique

La figure 5.14 montre que les courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 4m$, obtenues pour les différentes valeurs considérées de f_{c28} du béton dans les poteaux, présentent une même allure plus ou moins identique à celle du portique de référence ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$), avec des paliers plastiques distincts.

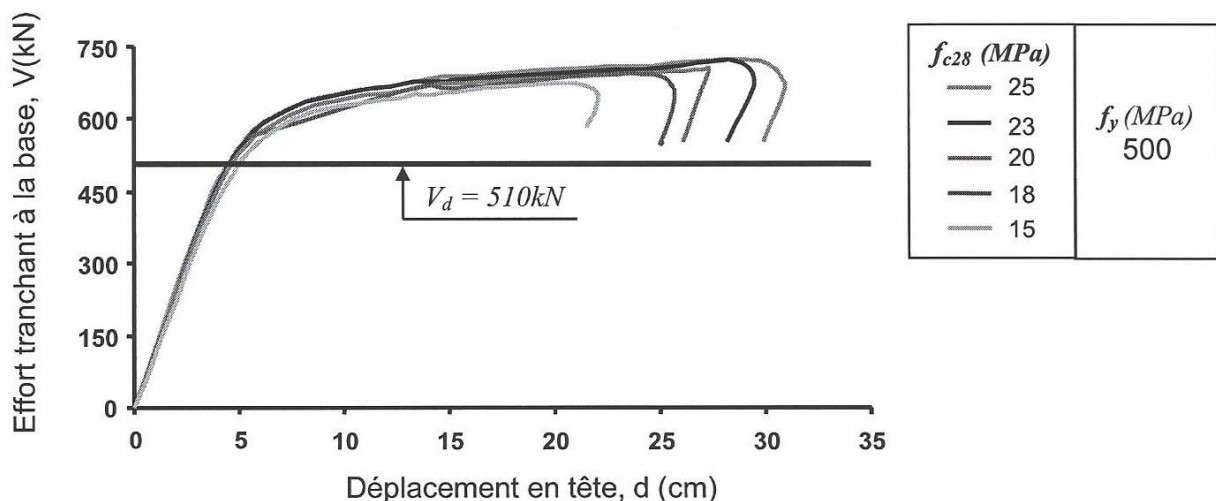


Figure 5.14 : Courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ; $f_y = 500 \text{ MPa}$.

Ces courbes de capacité sont caractérisées, chacune, par un état élastique limite et un état limite ultime de résistance. Les valeurs des différents paramètres caractérisant ces deux états limites associés aux courbes de capacité, sont données au tableau 5.4 en fonction des valeurs considérées de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux.

PORTIQUE $P - H_{RDC} 4m$								
Acier f_y (MPa)	Béton f_{c28} (MPa)	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u/d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u/V_d$ ($V_d=510$ kN)
		V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y/d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
500	25	555	5.3	10471	720	30.8	5.8	1.41
	23	552	5.3	10415	715	29.5	5.5	1.40
	20	547	5.4	10130	703	27.3	5.0	1.38
	18	543	5.4	10056	689	25.0	4.6	1.35
	15	536	5.5	9745	668	25.5	3.9	1.31

Tableau 5.4 : Propriétés du portique $P - H_{RDC} 4m$ à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance en fonction de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ; $f_y = 500$ MPa.

- **A l'état élastique limite**, à mesure que la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux diminue (tableau 5.4), la raideur initiale K_0 du portique $P - H_{RDC} 3m$ diminue aussi mais légèrement. Ainsi, pour $f_{c28} = 20$ MPa, soit une diminution de 20% par rapport à la valeur nominale 25 MPa, la raideur K_0 ne décroît que de 3 % (de 10471 kN/m à 10130 kN/m). Et pour $f_{c28} = 15$ MPa, soit une réduction de 40% par rapport à la valeur nominale (25 MPa), K_0 décroît de seulement 7% (de 10471 kN/m à 9745 kN/m) – (tableau 5.4).

La résistance élastique limite V_y diminue légèrement, et le déplacement élastique correspondant d_y reste, quant à lui, presque constant quelle que soit la valeur réduite considérée de f_{c28} (tableau 5.4).

- **A l'état limite ultime de résistance**, la résistance ultime V_u , le déplacement ultime correspondant d_u ainsi que la ductilité globale μ du portique diminuent avec la diminution de f_{c28} (tableau 5.4). Toutefois, la diminution de la résistance ultime V_u est relativement faible (de l'ordre de 7% pour la plus faible valeur considérée de f_{c28} , 15 MPa) comparée à celle du déplacement ultime d_u donc de la ductilité globale μ . En effet, pour une réduction de 20% de f_{c28} ($f_{c28} = 20$ MPa), la ductilité décroît de 13.8% (de 5.8 à 5.0). Et pour une réduction de 40% de f_{c28} ($f_{c28} = 15$ MPa) elle décroît de 33% (de 5.8 à 3.9) – (tableau 5.4). Enfin, le coefficient de sur-résistance Ω subit aussi une légère diminution avec la réduction de f_{c28} (de l'ordre de 7% pour la plus faible valeur considérée de f_{c28} , 15 MPa,) – (tableau 5.4).

5.3.2.2 Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

La figure 5.5 montre les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ obtenus pour les différentes valeurs considérées de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux. Pour $f_{c28} = 23 MPa$ (figure 5.5.a) et $f_{c28} = 20 MPa$ (figure 5.5.b), le mécanisme de ruine est un mécanisme plastique global.

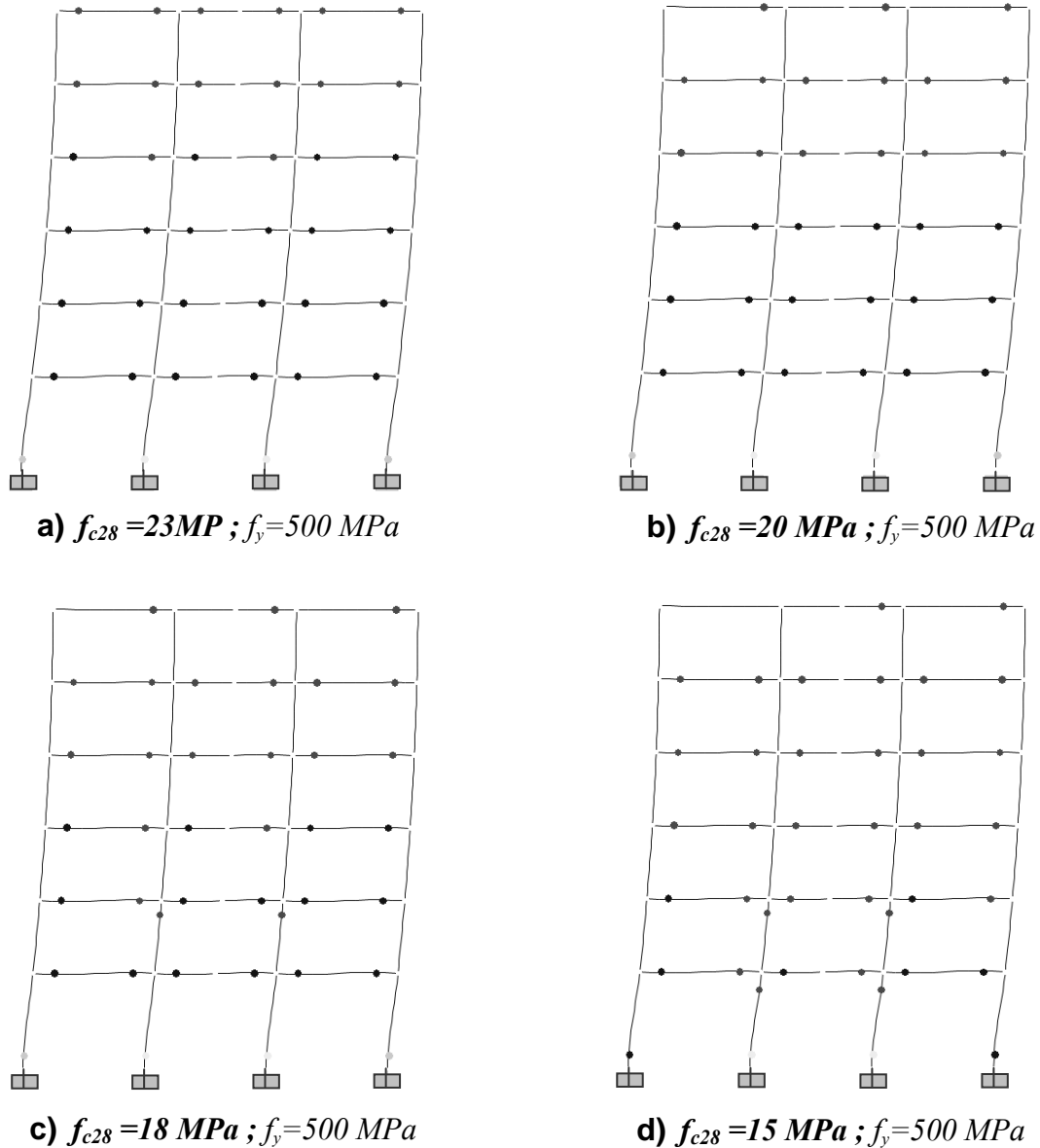


Figure 5.15 : Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ; $f_y = 500 MPa$.

Par contre, pour les autres valeurs considérées de f_{c28} (18 MPa et 15 MPa), le mécanisme n'est pas un mécanisme plastique global. En effet, outre les rotules plastiques formées aux extrémités des poutres des différents niveaux du portique et en pied des poteaux du rez-de-chaussée, d'autres rotules plastiques se développent également en tête des poteaux centraux du 1^{er} étage pour $f_{c28} = 18$ MPa (figure 5.5.c) ; et pour $f_{c28} = 15$ MPa, en plus de celles précitées, des rotules plastiques se développent en tête des poteaux centraux du rez-de-chaussée (figure 5.5.d).

5.3.3 Portique dont la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux est réduite

Dans ce cas, les analyses *pushover* sont effectuées en réduisant, à chaque analyse, la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux en considérant les valeurs réduites définies dans le §5.1.2.c. La résistance caractéristique à la compression du béton étant maintenue à sa valeur nominale, $f_{c28} = 25$ MPa. Le portique est ensuite analysé suivant la méthodologie définie aussi dans le même paragraphe 5.1.2.c.

5.3.3.1 Courbes de capacité du portique

La figure 5.16 présente les courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction de la limite élastique des aciers longitudinaux des poteaux. Ces courbes *pushover* sont similaires, mais avec des paliers plastiques bien distincts. On remarque que le palier plastique diminue sensiblement avec la diminution de la limite élastique f_y des aciers des poteaux.

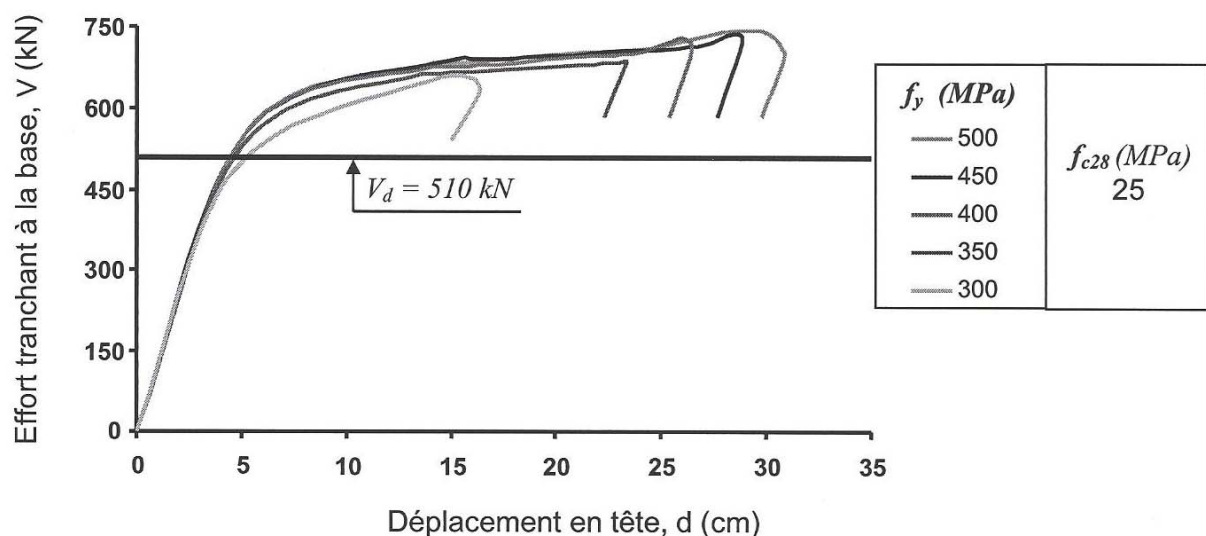


Figure 5.16 : Courbes de capacité du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux ; $f_{c28} = 25$ MPa.

Les valeurs des paramètres caractérisant l'état élastique limite et l'état limite ultime de résistance pour chaque courbe de capacité, sont consignées dans le tableau 5.5.

PORTIQUE $P - H_{RDC} 4m$								
Béton f_{c28} (MPa)	Acier f_y (MPa)	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u/d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u/V_d$ ($V_d=510$ kN)
		V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y/d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
25	500	555	5.3	10471	720	30.8	5.8	1.41
	450	555	5.3	10471	718	28.8	5.4	1.41
	400	555	5.3	10471	705	26.4	5.0	1.38
	350	534	5.0	10680	683	23.4	4.6	1.34
	300	479	4.5	10644	643	16.3	3.6	1.26

Tableau 5.5 : Propriétés du portique $P - H_{RDC} 4m$ à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance en fonction de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux ; $f_{c28} = 25$ MPa.

- **A l'état élastique limite**, à mesure que la limite élastique f_y des aciers des poteaux diminue (tableau 5.5), La raideur initiale K_0 du portique reste presque constante. Aussi, la résistance élastique limite V_y ainsi que le déplacement élastique correspondant d_y restent pratiquement constants sauf pour la plus faible valeur réduite considérée de f_y , 300 MPa où ils subissent une légère diminution (de l'ordre de 14% pour V_y et de 15% pour d_y).

- **A l'état limite ultime de résistance**, la résistance ultime V_u diminue légèrement avec la diminution de f_y , par contre, le déplacement ultime d_u donc la ductilité globale μ subit une diminution importante (tableau 5.5). En effet, pour $f_y = 400$ MPa, soit une réduction de 20% par rapport à la valeur nominale, 500 MPa, V_u diminue de 2% (de 720 à 705 kN), tandis que la ductilité globale μ décroît de 13.8% (de 5.8 à 5.0). Et pour $f_y = 300$ MPa, la plus faible valeur réduite considérée de f_y , soit une diminution de 40% par rapport à la valeur nominale (500 MPa), V_u diminue de 10.7% (de 720 à 643 kN), alors que la ductilité μ décroît de 38% (de 5.8 à 3.6) – (tableau 5.5).

Le coefficient de sur-résistance Ω subit aussi une légère diminution avec la réduction de f_y (de l'ordre de 10.6% pour la plus faible valeur considérée de f_y , 300 MPa) – (tableau 5.5).

5.3.3.2 Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ et distribution des rotules plastiques

La figure 5.17 montre les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ obtenus pour différentes valeurs réduites considérées de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux, à savoir : 450, 400, 350 et 300 MPa. On remarque que ces mécanismes ne sont pas des mécanismes plastiques globaux comme c'est le cas pour le même portique aux valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$) - (figure 5.13).

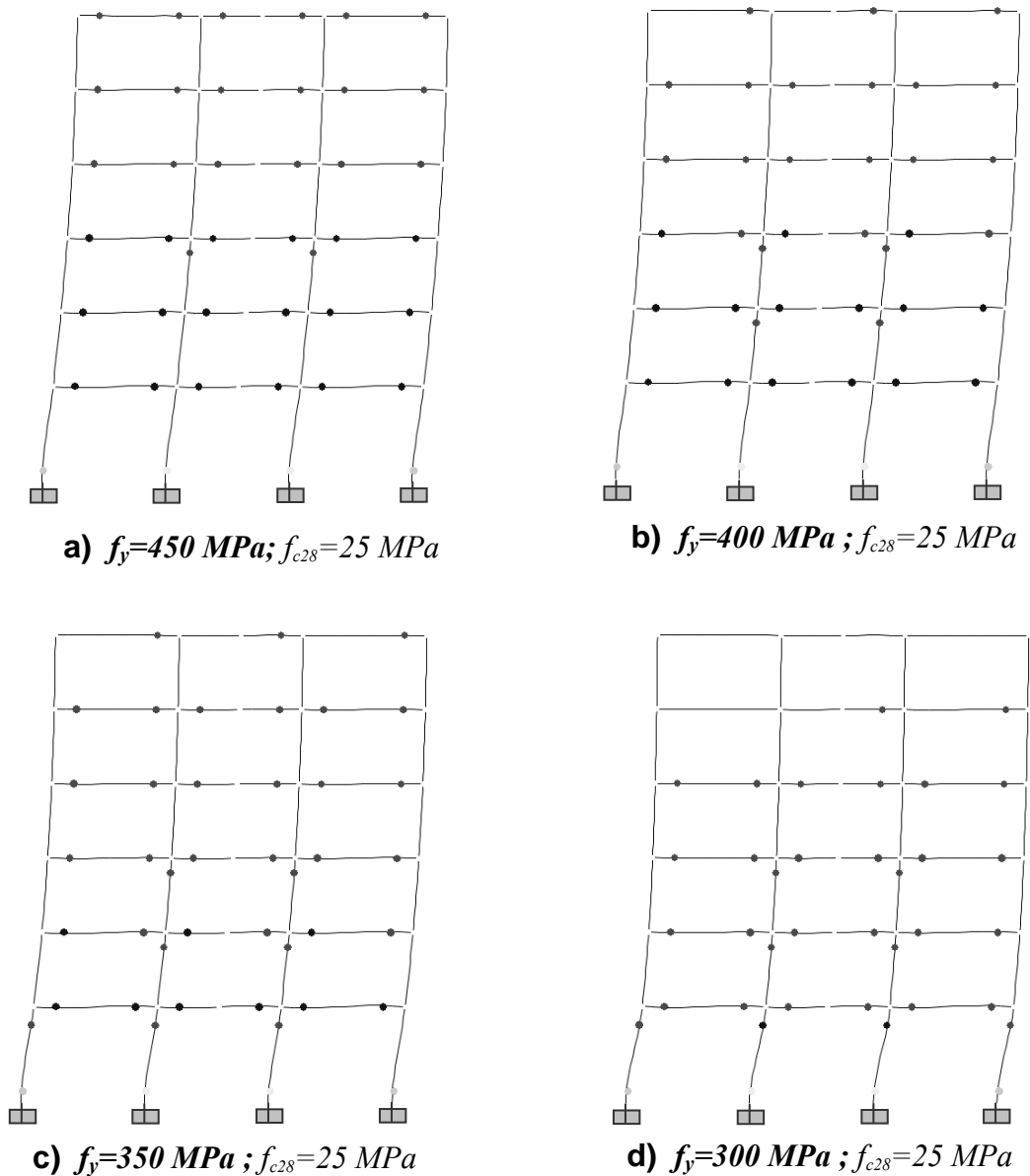


Figure 5.17 : Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux ; $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$.

En effet, pour $f_y = 450 \text{ MPa}$ (figure 5.17.a), deux rotules plastiques se forment en tête des deux poteaux centraux du 2^{ème} étage ; pour $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figure 5.17.b), deux autres rotules plastiques se forment en tête des poteaux du 1^{er} étage ; et pour $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.17.c), la situation devient plus défavorable pour le comportement du portique : outre les quatre rotules plastiques indiquées précédemment, presque dans l'ensemble des poteaux du rez-de-chaussée sauf un, d'autres rotules plastiques se développent en pied et en tête de ceux-ci, ce qui conduit à la formation d'un mécanisme plastique d'étage au rez-de-chaussée pour $f_y = 300 \text{ MPa}$ (figure 5.17.d).

5.3.4 Portique dont la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux ainsi que la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux sont simultanément réduites

Dans ce cas, les analyses *pushover* sont effectuées en réduisant simultanément la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , dans les poteaux ainsi que la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux, et ce, en considérant les valeurs réduites de ces deux paramètres définies dans le §5.1.2.d. Le portique est ensuite analysé suivant la méthodologie définie aussi dans le même paragraphe 5.1.2.d.

5.3.4.1 Courbes de capacité du portique

La figure 5.18 présente les courbes de capacité du portique $P - H_{RDC} 3m$ en fonction des valeurs réduites simultanément de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , et de la limite élastique des aciers longitudinaux, f_y , considérées. Ces courbes de capacité sont similaires mais avec des paliers plastiques bien distincts. On constate que le palier plastique diminue avec la diminution simultanée de f_{c28} dans les poteaux et de f_y de leurs aciers longitudinaux.

Les valeurs des paramètres caractérisant l'état élastique limite et l'état limite ultime de résistance pour chaque courbe de capacité, sont données dans le tableau 5.6.

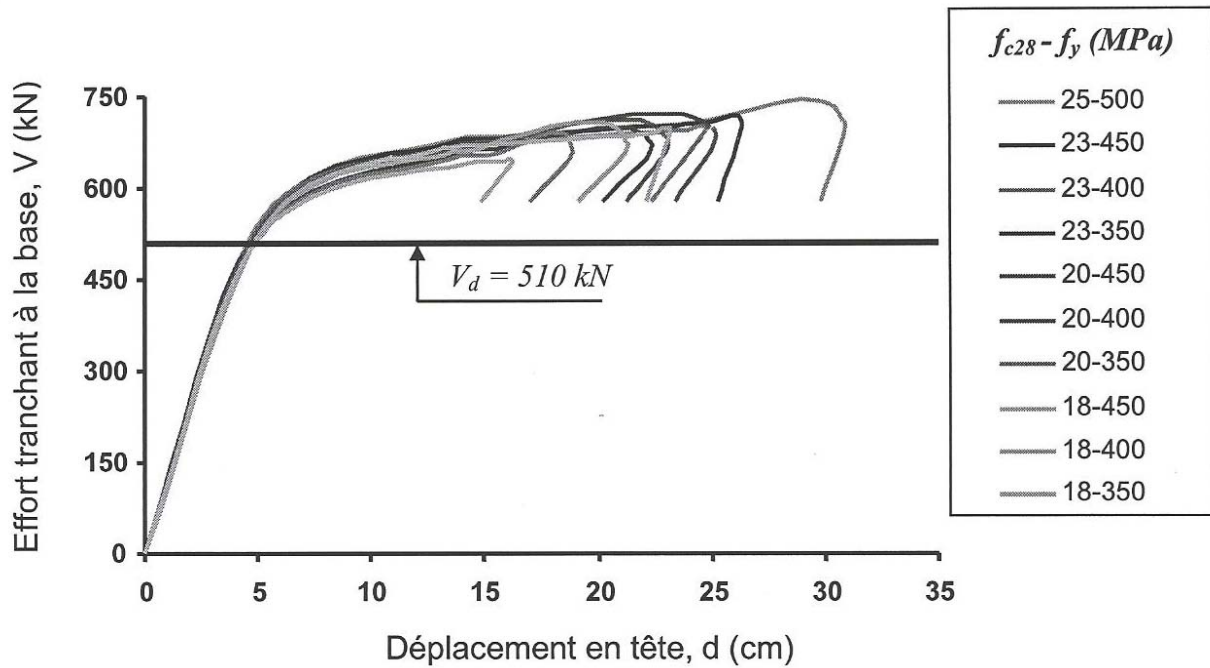


Figure 5.18 : Courbes de capacité du portique $P - H_{RDC} 4m$ en fonction de la diminution simultanée de f_{c28} et de f_y dans les poteaux.

PORTIQUE $P - H_{RDC} 4m$							
Béton-Acier $f_{c28} - f_y$ (MPa)	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u / d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u / V_d$ ($V_d = 510$ kN)
	V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y / d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
25-500	555	5.3	10471	720	30.8	5.8	1.41
23-450	552	5.3	10415	706	26.3	5.0	1.39
23-400	552	5.3	10415	694	24.8	4.7	1.36
23-350	531	5.1	10412	677	22.3	4.4	1.33
20-450	547	5.4	10130	698	24.9	4.6	1.37
20-400	547	5.4	10130	684	22.9	4.2	1.34
20-350	528	5.2	10154	659	18.9	3.6	1.29
18-450	543	5.4	10055	689	23.2	4.3	1.35
18-400	543	5.4	10055	674	21.2	3.9	1.32
18-350	526	5.2	10115	643	16.2	3.1	1.26

Tableau 5.6 : Propriétés du portique $P - H_{RDC} 4m$ à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance en fonction de la valeur du couple ($f_{c28} - f_y$) dans les poteaux.

- **A l'état élastique limite,** La raideur initiale K_0 diminue légèrement avec la diminution simultanée de la résistance caractéristique f_{c28} du béton et de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux (tableau 5.6). Ainsi, pour ($f_{c28} - f_y$) = (18-350) MPa, la plus faible valeur considérée pour le couple ($f_{c28} - f_y$), correspondant à respectivement 28% et

30% de réduction de f_{c28} et de f_y , la raideur K_0 ne diminue que de 3.4%. Aussi, la résistance élastique limite V_y et le déplacement élastique correspondant d_y varient également légèrement, de quelques pourcents, quelle que soit la valeur réduite considérée pour le couple $(f_{c28} - f_y)$ – (tableau 5.6).

- **A l'état limite ultime de résistance**, la résistance ultime V_u diminue légèrement avec la diminution simultanée de f_{c28} et f_y , tandis que le déplacement ultime correspondant d_u donc la ductilité globale μ subit une décroissance importante (tableau 5.6). En effet, pour $(f_{c28} - f_y) = (20 - 400) \text{ MPa}$, soit une réduction de 20% pour chacune des deux caractéristiques mécaniques (f_{c28} et f_y) par rapport à leurs valeurs nominales respectives, 25 MPa et 500 MPa, la résistance ultime V_u diminue de 5% (de 720 à 684 kN), alors que la ductilité globale décroît de 27.6% (de 5.8 à 4.2). Et pour $(f_{c28} - f_y) = (18 - 350) \text{ MPa}$, la plus faible valeur considérée pour le couple $(f_{c28} - f_y)$, V_u diminue d'environ 11% (de 720 à 643 kN), tandis que la ductilité μ décroît de 46.5% (de 5.8 à 3.1) – (tableau 5.6). Le coefficient de sur-résistance Ω subit aussi une légère diminution avec la réduction simultanée de f_{c28} et f_y , de l'ordre de 5% pour $(f_{c28} - f_y) = (20 - 400) \text{ MPa}$ et d'environ 11% pour $(f_{c28} - f_y) = (18 - 350) \text{ MPa}$ – (tableau 5.6).

5.3.4.2 Mécanismes de ruine du portique et distribution des rotules plastiques

Les figures 5.19 et 5.20 montrent les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ obtenus pour différentes valeurs réduites simultanément de la résistance caractéristique du béton, f_{c28} , dans les poteaux et de la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux. On constate que ces mécanismes ne sont pas des mécanismes plastiques globaux comme c'est le cas pour le même portique aux valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$) - (figure 5.13).

En effet, pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$ (figure 5.19.a), deux rotules plastiques se forment en tête des deux poteaux centraux du 1^{er} et du 2^{ème} étage ; pour $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$ (figure 5.20.a) et pour $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figure 5.20.b), deux autres rotules plastiques se forment en tête des poteaux du rez-de-chaussée ; et aussi pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figure 5.19.b), deux autres rotules plastiques se forment en tête des poteaux du 4^{ème} étage. Enfin, pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.19.c), la

situation devient plus défavorable pour le comportement du portique : outre les rotules plastiques précitées précédemment, presque dans l'ensemble des poteaux du rez-de-chaussée sauf un, d'autres rotules plastiques se développent en pied et en tête de ceux-ci, ce qui conduit à la formation d'un mécanisme plastique d'étage au rez-de-chaussée pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 300 \text{ MPa}$ (figure 5.19.d), $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.20.c) et $f_{c28} = 18 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$ (figure 5.20.d).

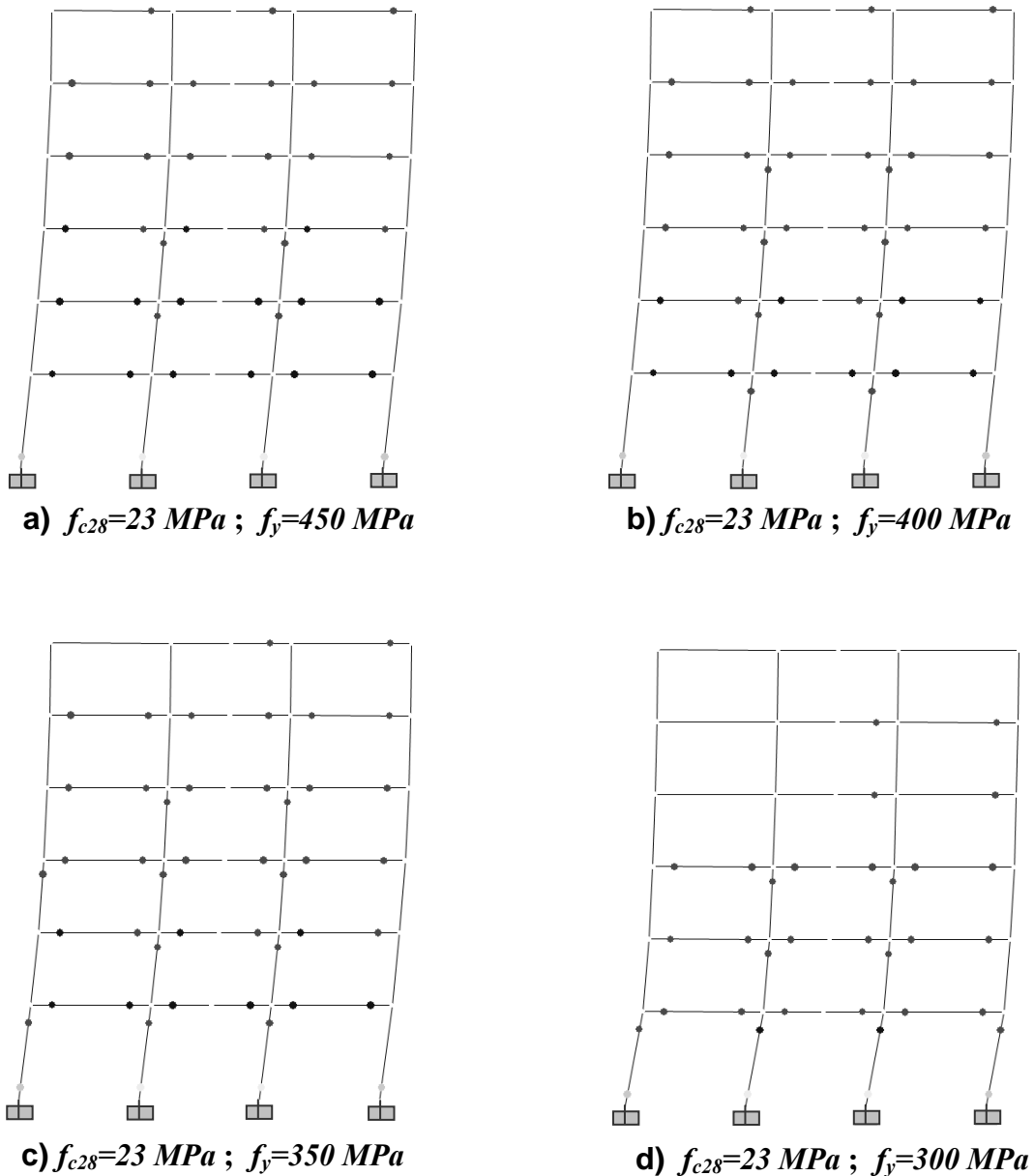


Figure 5.19 : Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction des valeurs réduites du couple ($f_{c28} - f_y$) dans les poteaux, avec $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$.

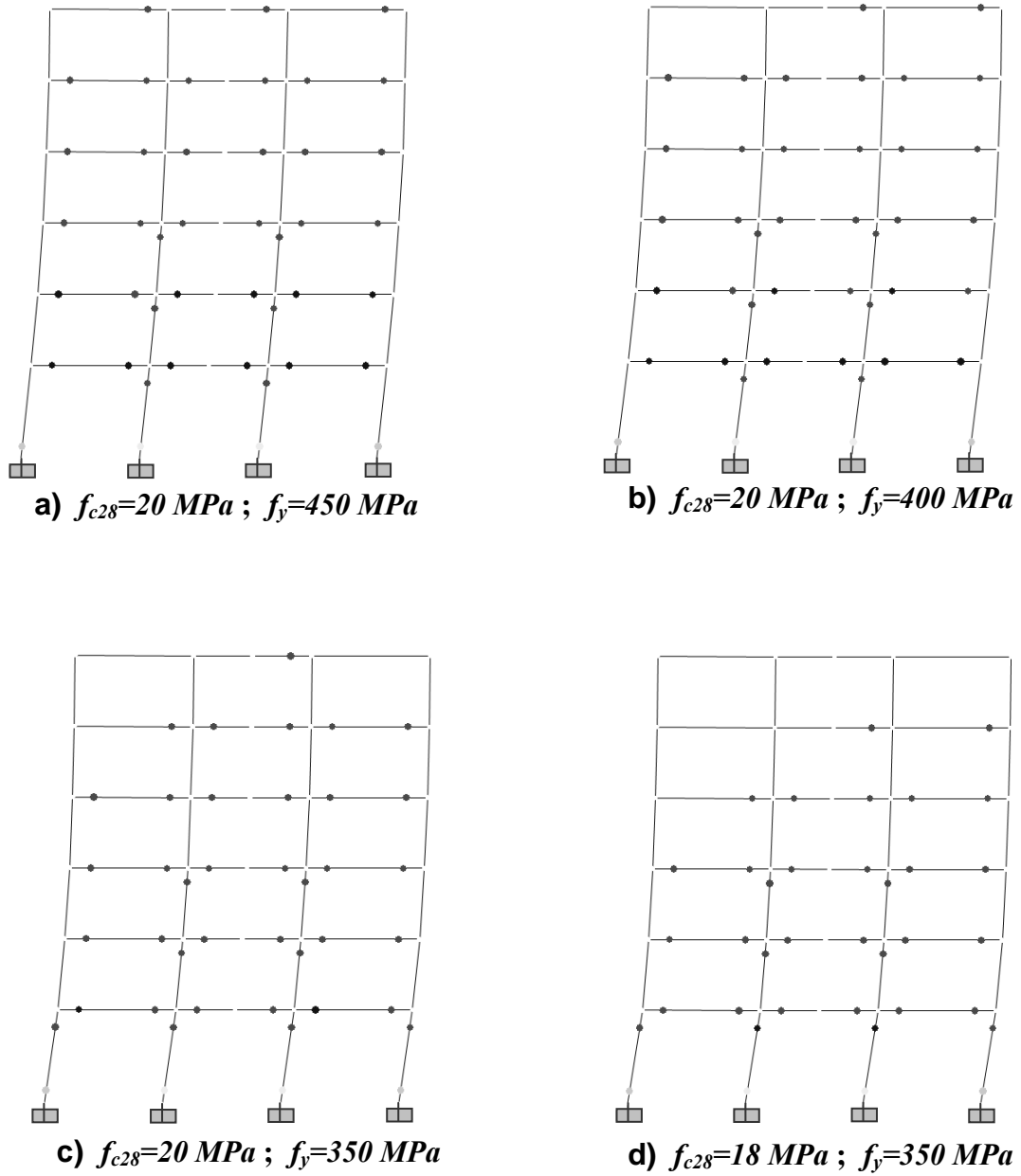


Figure 5.20 : Mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ en fonction des valeurs réduites du couple ($f_{c28} - f_y$) dans les poteaux, avec $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ puis 18 MPa .

5.4 Analyse comparative des résultats obtenus pour les portiques étudiés

Dans ce paragraphe, on effectue une comparaison des résultats des différents paramètres obtenus par les analyses *pushover* effectuées pour les deux portiques étudiés, $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$. Plus précisément, et dans le but de mettre en évidence l'influence de la hauteur du rez-de-chaussée du portique sur son comportement sismique, les résultats obtenus pour le portique $P-H_{RDC} 4m$ sont comparés à ceux relatifs au portique $P-H_{RDC} 3m$.

5.4.1 Comparaison des résultats relatifs aux portiques de référence

La comparaison porte sur les réponses sismiques des deux portiques $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$ de référence, dont les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier sont à leurs valeurs nominales tant pour les poteaux que pour les poutres:

- béton : $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$;
- aciers (longitudinaux et transversaux) : $f_y = 500 \text{ MPa}$.

A cet effet, on a, d'une part, repris les courbes de capacité des deux portiques sur un même graphique (figure 5.21) et, d'autre part, donné les paramètres caractérisant leurs états élastiques limites et leurs états limites ultimes de résistance au tableau 5.7.

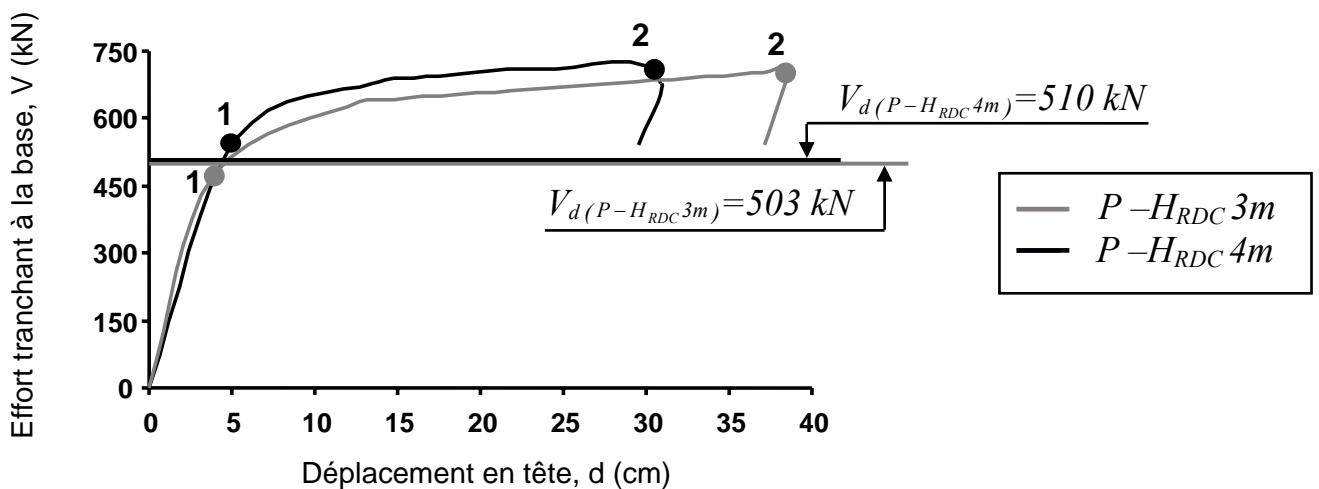


Figure 5.21: Comparaison des courbes de capacité des deux portiques étudiés, $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, de référence ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$).

Cette comparaison porte essentiellement sur les résultats relatifs à l'état élastique limite et sur ceux relatifs à l'état limite ultime de résistance des deux portiques étudiés, qui, rappelons-le, sont de même configuration structurale et présentent des sections de béton identiques de leurs éléments structuraux, tant pour les poutres que pour les poteaux, et de pourcentages d'acier similaires, mais de hauteurs de rez-de-chaussée différentes. Cette analyse nous permet de voir l'influence de la hauteur du rez-de-chaussée sur le comportement des deux portiques.

L'effet de l'augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée se manifeste sous les aspects suivants dans les réponses sismiques des deux portiques :

a) à l'état élastique limite :

- Diminution de la raideur latérale initiale, K_0 , du portique. En effet, la raideur initiale du portique $P - H_{RDC} 4m$ ($K_0 = 10471 \text{ kN/m}$) est 14% plus petite que celle du portique $P - H_{RDC} 3m$ ($K_0 = 12154 \text{ kN/m}$) - (figure 5.22 et tableau 5.7) ;
- Augmentation de la résistance élastique, V_y , et le déplacement élastique correspondant, d_y . En effet, V_y et d_y du portique $P - H_{RDC} 4m$ ($V_y = 555 \text{ kN}$; $d_y = 5.3 \text{ cm}$) sont respectivement 17% et 36% plus grands que ceux du portique $P - H_{RDC} 3m$ ($V_y = 474 \text{ kN}$; $d_y = 3.9 \text{ cm}$) - (tableau 5.7).

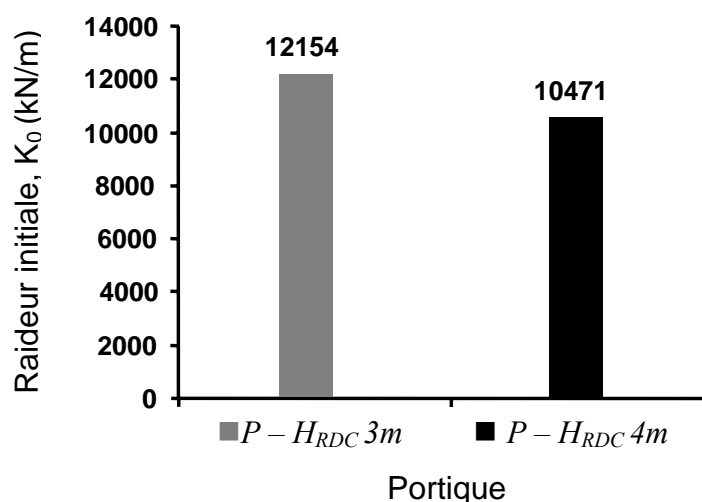


Figure 5.22 : Diminution de la raideur latérale initiale du portique due à l'augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée.

Portique	Etat élastique limite			Etat limite ultime de résistance		Ductilité globale $\mu = d_u / d_y$	Coefficient de sur-résistance $\Omega = V_u / V_d$
	V_y (kN)	d_y (cm)	$K_0 = V_y / d_y$ (kN/m)	V_u (kN)	d_u (cm)		
$P - H_{RDC} 3m$	474	3.9	12154	704	38.6	9.9	1.40
$P - H_{RDC} 4m$	555	5.3	10472	720	30.8	5.8	1.41

Tableau 5.7: Propriétés des deux portiques $P - H_{RDC} 3m$ et $P - H_{RDC} 4m$ de référence ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$) à l'état élastique limite et à l'état limite ultime de résistance.

b) à l'état limite ultime de résistance :

- La hauteur du rez-de-chaussée n'a pratiquement pas d'influence sur la résistance ultime, V_u , du portique. La différence de résistances ultimes des deux portiques est insignifiante : de l'ordre de 2% ($V_{u(P-H_{RDC}3m)} = 704 \text{ kN}$; $V_{u(P-H_{RDC}4m)} = 720 \text{ kN}$) - (figure 5.23 et tableau 5.7) ;

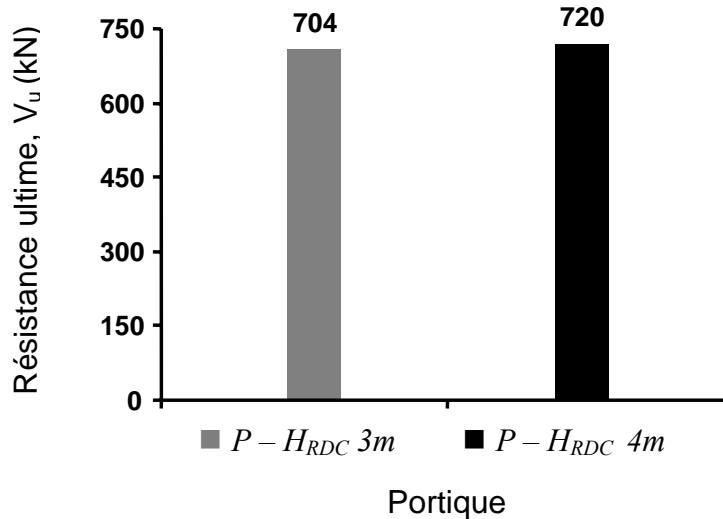


Figure 5.23 : Très faible variation de la résistance ultime du portique due à l'augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée.

- Diminution substantielle de la ductilité globale, μ , du portique. En effet, la ductilité globale du portique $P-H_{RDC} 4m$ ($\mu=5.8$) est 41% plus petite que celle du portique $P-H_{RDC} 3m$ ($\mu=9.9$) - (figure 5.24 et tableau 5.7).

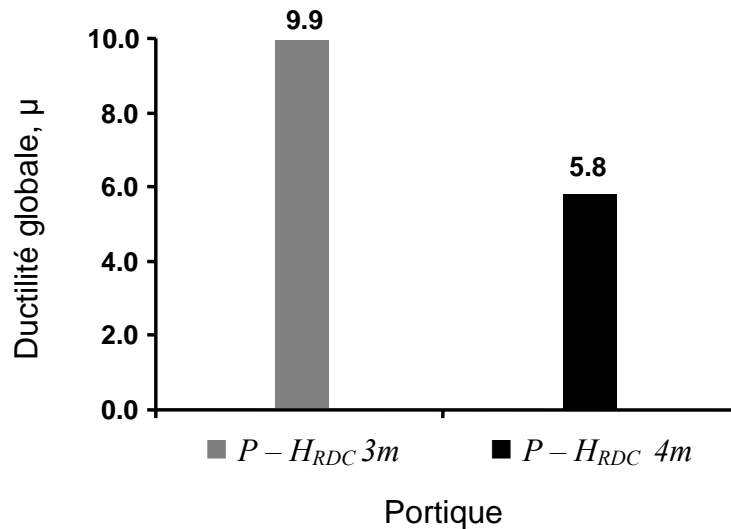


Figure 5.24: Diminution importante de la ductilité globale du portique due à l'augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée.

5.4.2 Comparaison des résultats relatifs aux portiques dont les caractéristiques mécaniques du béton et des aciers longitudinaux dans les poteaux sont réduites

La comparaison porte sur les réponses sismiques des deux portiques $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, dont les caractéristiques mécaniques du béton et des aciers longitudinaux dans les poteaux sont réduites, d'abord séparément, puis simultanément.

Cette comparaison porte sur les résultats relatifs à l'état limite ultime de résistance des deux portiques, à savoir leurs résistances ultimes, leurs sur-résistances, leurs ductilités globales et leurs mécanismes de ruine.

5.4.2.1 Analyse comparative de leurs résistances ultimes et leurs sur-résistances

Comme on l'a montré précédemment au point b) du paragraphe 5.4.1 et illustré à la figure 5.23, pour les deux portiques étudiés dont les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers longitudinaux dans les poteaux sont à leurs valeurs nominales ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$), la hauteur du rez-de-chaussée du portique n'a pas d'influence sur sa résistance ultime (V_u) ni sur sa sur-résistance ($\Omega = V_u/V_d$) même avec des valeurs réduites des caractéristiques du béton et des aciers longitudinaux dans les poteaux (tableau 5.8). En effet, la différence entre les valeurs de V_u d'une part, et de $\Omega = V_u/V_d$ d'autre part, des deux portiques étudiés, $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, est insignifiante ($\leq 2.3\%$ aussi bien pour la différence de V_u que pour celle de Ω) - (tableau 5.8).

Béton-Acier $f_{c28} - f_y$ (MPa)	Portique $P - H_{RDC} 3m$		Portique $P - H_{RDC} 4m$		Différence de V_u (en %)	Différence de Ω (en %)
	V_u (kN)	$\Omega = V_u/V_d$ ($V_d = 503 \text{ kN}$)	V_u (kN)	$\Omega = V_u/V_d$ ($V_d = 510 \text{ kN}$)		
25-500	704	1.40	720	1.41	2.3	0.7
23-450	698	1.39	706	1.39	1.1	0.0
23-400	687	1.36	694	1.36	1.0	0.0
23-350	666	1.32	677	1.33	1.6	0.7
20-450	687	1.36	698	1.37	1.6	0.7
20-400	676	1.34	684	1.34	1.2	0.0
20-350	658	1.31	659	1.29	0.1	1.5
18-450	680	1.35	689	1.35	1.3	0.0
18-400	668	1.33	674	1.32	0.9	0.7
18-350	649	1.29	643	1.26	0.9	2.3

Tableau 5.8: Comparaison des résistances ultimes et sur-résistances des portiques $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$.

5.4.2.2 Analyse comparative de leurs ductilités globales

Les figures 5.25a, 5.25b et 5.25c montrent une nette différence entre la ductilité globale du portique $P-H_{RDC} 3m$ et celle du portique $P-H_{RDC} 4m$ quelle que soit la valeur réduite considérée de la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , (figure 5.25a) ou celle de la limite élastique f_y des aciers longitudinaux des poteaux (figure 5.25b) et aussi quelles que soient les valeurs réduites simultanément de ces deux paramètres (figure 5.25c). Ces figures montrent que la ductilité du portique $P-H_{RDC} 4m$ demeure nettement inférieure à celle du portique $P-H_{RDC} 3m$. Autrement dit, l'augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée du portique a pour effet de réduire sa ductilité globale. En effet, la ductilité globale du portique $P-H_{RDC} 4m$ est 32 % à 48% plus faible que celle du portique $P-H_{RDC} 3m$ (tableau 5.9).

Caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers longitudinaux dans les poteaux			Ductilité globale μ		Différence des ductilités globales (en %)
			Portique $P-H_{RDC} 3m$	Portique $P-H_{RDC} 4m$	
Acier : $f_y=500$ (MPa)	Béton : f_{c28} (MPa)	25	9.9	5.8	- 41
		23	9.6	5.5	- 43
		20	8.7	5.0	- 42
		18	8.2	4.6	- 44
		15	7.1	3.9	- 45
Béton : $f_{c28}=25$ (MPa)	Acier : f_y (MPa)	500	9.9	5.8	- 41
		450	8.4	5.4	- 36
		400	7.4	5.0	- 32
		350	6.8	4.6	- 32
		300	6.9	3.6	- 48
Béton - Acier $f_{c28} - f_y$ (MPa)	25-500	9.9	5.8	- 41	
	23-450	7.5	5.0	- 33	
	23-400	7.1	4.7	- 34	
	23-350	6.5	4.4	- 32	
	20-450	6.9	4.6	- 33	
	20-400	6.5	4.2	- 35	
	20-350	6.1	3.6	- 41	
	18-450	6.5	4.3	- 34	
	18-400	6.1	3.9	- 36	
18-350	5.7	3.1	- 46		

Tableau 5.9: Comparaison des ductilités globales des portiques $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$.

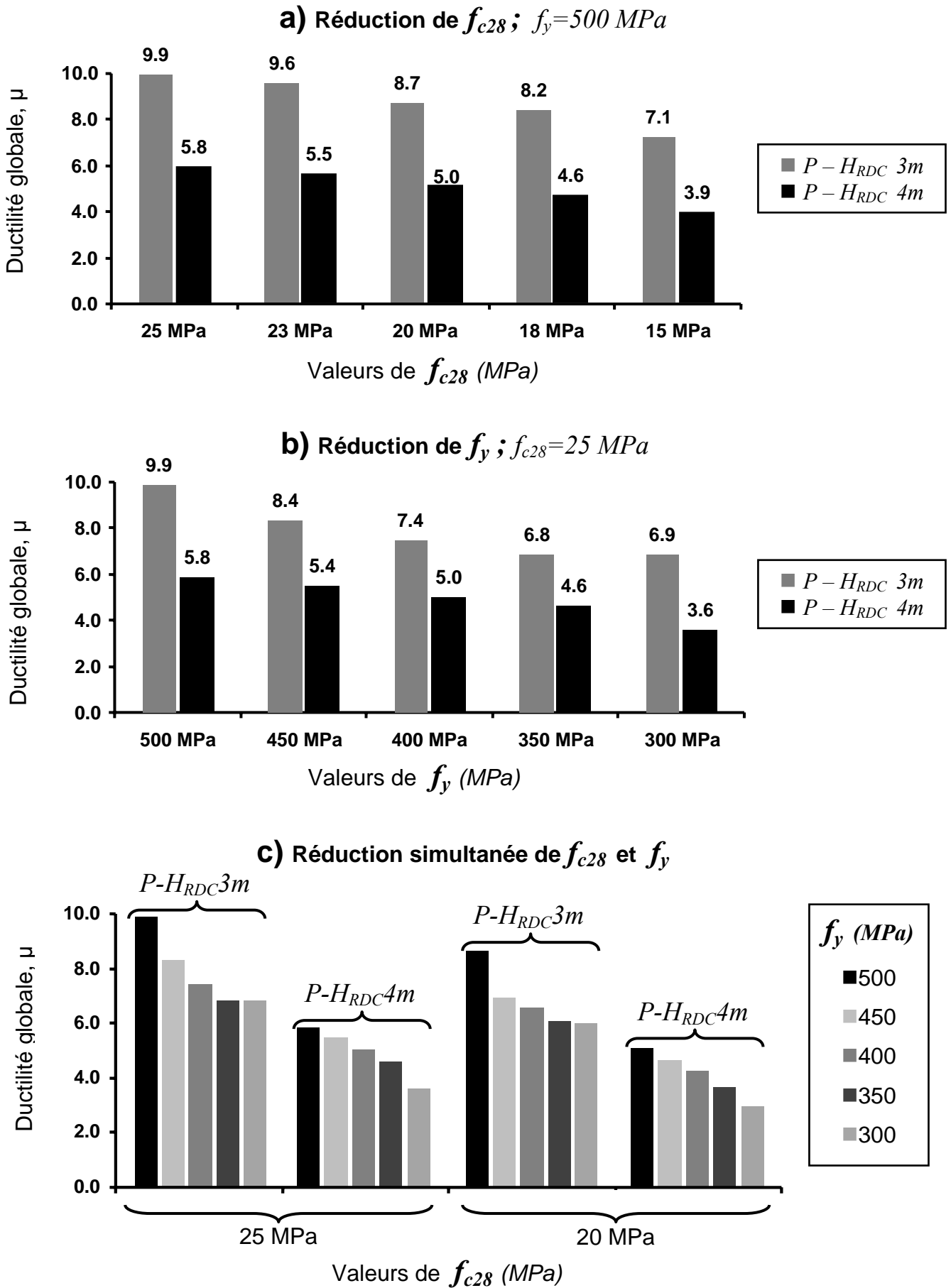


Figure 5.25 : Comparaison des ductilités globales des deux portiques $P - H_{RDC} 3m$ et $P - H_{RDC} 4m$.

5.4.2.3 Analyse comparative de leurs mécanismes de ruine

La figure 5.26 présente les mécanismes de ruine des deux portiques $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$ pour différentes valeurs réduites simultanément des caractéristiques mécaniques du béton (f_{c28}) et des aciers longitudinaux (f_y) dans les poteaux.

Ces mécanismes de ruine ne sont pas des mécanismes plastiques globaux comme c'est le cas pour les mêmes portiques mais aux valeurs nominales des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier, $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$ (figures 5.3 et 5.13). En outre, les mécanismes de ruine du portique $P-H_{RDC} 3m$ sont différents de ceux du portique $P-H_{RDC} 4m$ (figure 5.26).

En effet, pour $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$, concernant le portique $P-H_{RDC} 3m$ (figure 5.26.a1), outre les rotules plastiques formées aux extrémités des poutres des différents niveaux du portique et en pied des poteaux du rez-de-chaussée, plusieurs rotules se développent également en tête des poteaux centraux du premier et du deuxième étage et de l'ensemble des poteaux du 3^{ème} et du 4^{ème} étage. Par contre, pour le portique $P-H_{RDC} 4m$ (figure 5.26.a2), les rotules plastiques formées dans les poteaux se concentrent seulement au rez-de-chaussée et en tête des poteaux centraux du premier et du 2^{ème} étage. Aucune rotule plastique ne s'est formée aux étages supérieurs (3^{ème}, 4^{ème} et 5^{ème} étages). En outre, les deux poteaux centraux du rez-de-chaussée, c'est-à-dire la moitié des poteaux de ce niveau, sont le siège de rotules plastiques en pied et en tête, constituant l'initiation de la formation d'un mécanisme plastique d'étage au rez-de-chaussée.

Pour $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 350 \text{ MPa}$, s'agissant du portique $P-H_{RDC} 3m$ (figure 5.26.b1), des rotules plastiques se développent toujours dans les poteaux des quatre premiers étages, et, au 2^{ème} étage, elles se forment en pied et en tête des deux poteaux centraux, ce qui constitue l'initiation d'un mécanisme plastique d'étage à ce niveau. Par contre, pour le portique $P-H_{RDC} 4m$ (figure 5.26.b2), les déformations plastiques se concentrent au niveau du rez-de-chaussée comme l'attestent les rotules plastiques formées en pied et en tête de l'ensemble des poteaux de ce niveau, se traduisant par la formation d'un mécanisme plastique d'étage au rez-de-chaussée.

On peut alors conclure que la réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier dans les poteaux conjuguée à une augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée,

Portique $P-H_{RDC}$ 3m

Portique $P-H_{RDC}$ 4m

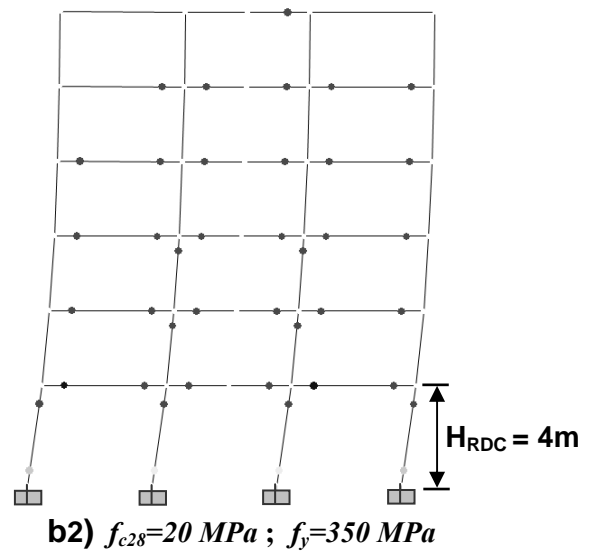
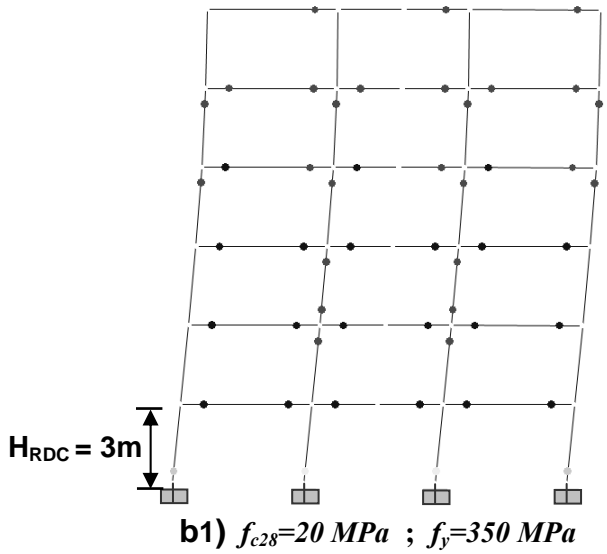
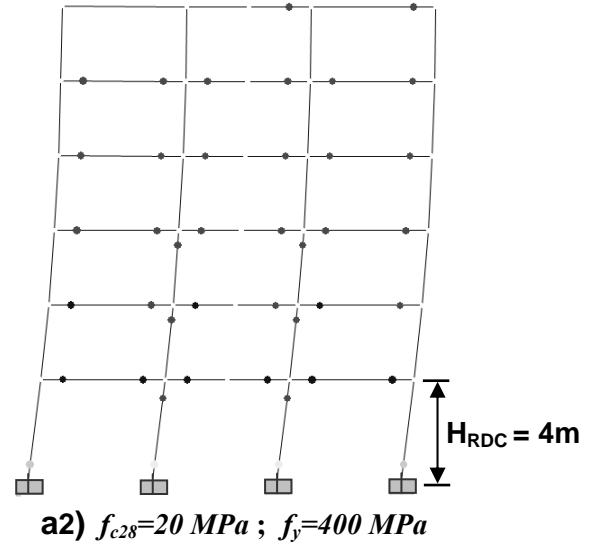
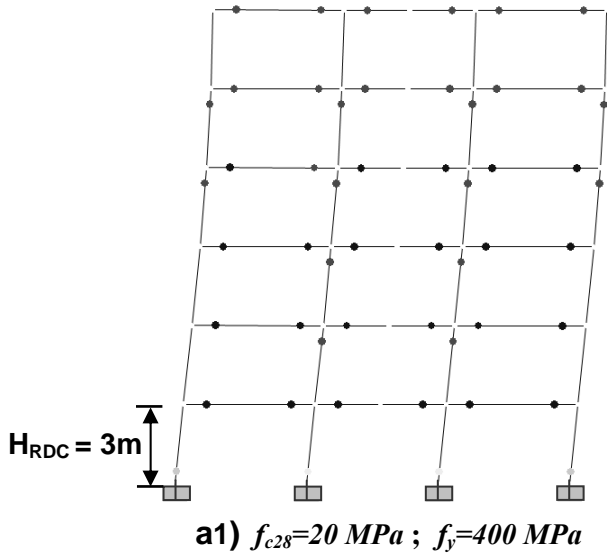


Figure 5.26 : Comparaison des mécanismes de ruine des deux portiques $P - H_{RDC}3m$ et $P - H_{RDC}4m$.

dont la section de béton des poteaux est égale à celle des poteaux des étages supérieurs d'une part, et de pourcentage d'aciers longitudinaux égal à celui des poteaux du premier étage d'autre part, conduit à un rez-de-chaussée relativement plus souple (mou) que les étages supérieurs, qui serait ainsi le siège de concentration des déformations plastiques, conduisant à la formation d'un mécanisme plastique d'étage à ce niveau, limitant ainsi la capacité de dissipation d'énergie du portique par déformations plastiques, c'est-à-dire limitant sa ductilité, et, par conséquent, entraînant sa ruine.

Chapitre 6 : CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

6.1 Rétrospective

L'étude de l'influence de la réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux mis en œuvre sur le comportement sismique de structures en portique en béton armé était l'objet du présent mémoire.

Cette étude a été menée en effectuant des analyses statiques non-linéaires en poussée progressive (analyse *pushover*) sur deux portiques R+5 de même configuration structurale mais de hauteurs de rez-de-chaussée différentes : l'un a un rez-de-chaussée de $3m$ de hauteur et l'autre de $4m$. Dans le présent mémoire, on les a désignés par $P-H_{RDC}3m$ et $P-H_{RDC}4m$, respectivement.

Les analyses *pushover* ont été effectuées en faisant varier, à chaque analyse, de manière dégressive, les caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers constitutifs des poteaux du portique, à savoir la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , et la limite élastique des aciers longitudinaux, f_y . Les valeurs (dégressives) considérées pour ces deux paramètres sont situées dans la fourchette 25 à $15 MPa$ pour f_{c28} et 500 à $300 MPa$ pour f_y . Rappelons que les valeurs $f_{c28} = 25 MPa$ et $f_y = 500 MPa$ sont les valeurs nominales des caractéristiques mécaniques respectivement du béton et des aciers, tant pour les poteaux que pour les poutres, sur la base desquelles ont été dimensionnés les deux portiques étudiés (Cf. Chapitre 2).

La limite élastique des armatures transversales des poteaux a été maintenue à sa valeur nominale, $500 MPa$. Ce paramètre a été fixé à cette valeur suite aux résultats non significatifs obtenus des analyses *pushover* effectuées en considérant des valeurs réduites de ce paramètre.

Notons aussi que dans l'ensemble des analyses effectuées, les caractéristiques mécaniques du béton et des aciers constitutifs des poutres des deux portiques étudiés, sont maintenues constantes, à leurs valeurs nominales de dimensionnement : $f_{c28} = 25 MPa$ pour le béton et $f_y = 500 MPa$ pour les aciers (longitudinaux et transversaux).

6.2 Conclusions principales

De l'ensemble des analyses effectuées, on peut tirer les conclusions principales suivantes :

1. La réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers constitutifs des poteaux du portique, n'a pratiquement pas d'influence sur sa raideur latérale initiale (élastique).

2. La résistance ultime, tout comme la sur-résistance du portique diminuent légèrement avec la diminution des caractéristiques mécaniques du béton et des aciers longitudinaux dans les poteaux, contrairement à une décroissance importante de la ductilité globale de celui-ci, ce qui induirait une limitation de sa capacité de déformation dans le domaine plastique et, par conséquent, limitant sa capacité de dissipation (hystérétique) de l'énergie induite par le séisme.

En effet, rien que pour $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$ dans les poteaux du portique, soit une réduction de 20% pour chacune des deux caractéristiques mécaniques par rapport aux valeurs nominales de dimensionnement ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$), la ductilité globale du portique diminue de l'ordre de 27% pour le portique $P-H_{RDC} 3m$ et de 34% pour celui $P-H_{RDC} 4m$.

3. L'augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée du portique a une influence négative sur la ductilité globale de ce dernier. En effet, une surélévation de 1m du rez-de-chaussée (en passant du portique $P-H_{RDC} 3m$ ayant un rez-de-chaussée de 3m à celui $P-H_{RDC} 4m$ avec un rez-de-chaussée de 4m) induit une diminution substantielle de la ductilité du portique, dépassant les 30%, et ce, quelles que soient les valeurs des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers longitudinaux dans les poteaux.

4. Le mode de ruine observé pour les deux portiques étudiés, $P-H_{RDC} 3m$ et $P-H_{RDC} 4m$, aux valeurs nominales de dimensionnement des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier constitutifs des poteaux, $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$,

respectivement, obtenu par analyse *pushover* au chapitre 5, est conforme à leur dimensionnement, à savoir un mécanisme plastique global où les rotules plastiques se forment successivement dans les poutres et en pied des poteaux du rez-de-chaussée (figures 5.3 et 5.13). Ce type de mécanisme est celui préconisé par le RPA99 / version 2003, qui stipule, dans son article 7.6.2, que les rotules plastiques doivent se former dans les poutres et pas dans les poteaux.

Par contre, pour les mêmes portiques mais avec des caractéristiques mécaniques du béton et des aciers longitudinaux dans les poteaux inférieures aux valeurs nominales de dimensionnement, la ruine se produit par des mécanismes plastiques qui ne sont pas de type global.

En effet, lorsque uniquement la résistance caractéristique à la compression du béton, f_{c28} , dans les poteaux qui est réduite par rapport à la valeur nominale (25 MPa), jusqu'à une valeur minimale de 20 MPa pour le portique $P-H_{RDC}4m$, voire jusqu'à 18 MPa pour le portique $P-H_{RDC}3m$, le mode de ruine est un mécanisme plastique global (figures 5.5.a et 5.15.b).

Par contre, si la réduction de caractéristique mécanique concerne les deux matériaux en même temps, c'est-à-dire une diminution simultanée de la résistance caractéristique f_{c28} du béton dans les poteaux et de la limite élastique f_y de leurs aciers longitudinaux, **les valeurs minimales 20 et 18 MPa de f_{c28} ne seraient pas sécuritaires pour la résistance du portique à l'action sismique.**

En effet, rien que pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$ dans les poteaux du portique, soit une réduction de 8% pour f_{c28} et de 10% pour f_y par rapport à leurs valeurs nominales de dimensionnement respectives ($f_{c28} = 25 \text{ MPa}$ et $f_y = 500 \text{ MPa}$), outre les rotules plastiques formées aux extrémités des poutres des différents niveaux du portique et à la base des poteaux du rez-de-chaussée, d'autres rotules plastiques se développent également dans des poteaux de plusieurs étages des deux portiques étudiés, $P-H_{RDC}3m$ et $P-H_{RDC}4m$ (figures 5.9.a et 5.19.a). Le même constat est fait pour $f_{c28} = 23 \text{ MPa}$ et $f_y = 400 \text{ MPa}$ (figures 5.9.b et 5.19.b). Et pour $f_{c28} = 20 \text{ MPa}$ et $f_y = 450 \text{ MPa}$ ou 400 MPa , la situation devient plus défavorable pour le comportement du portique en ce sens qu'outre les rotules plastiques précitées, d'autres rotules plastiques se forment en tête des deux poteaux centraux du rez-de-chaussée pour le portique $P-H_{RDC}4m$ (figures 5.20.a et 5.20.b), constituant ainsi l'initiation de la formation d'un mécanisme plastique d'étage à ce niveau. Et à mesure que la résistance caractéristique à la

compression du béton (f_{c28}) et la limite élastique (f_y) des aciers longitudinaux des poteaux diminuent simultanément, le mécanisme de ruine du portique $P-H_{RDC} 4m$ passe d'un mécanisme plastique global ductile pour les valeurs nominales (de dimensionnement) de f_{c28} et f_y à un mécanisme plastique d'étage **non ductile** pour les valeurs réduites (figures 5.19.a, 5.20.c et 5.20.d).

5. La réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et acier dans les poteaux conjuguée à une augmentation de la hauteur du rez-de-chaussée, dont la section de béton des poteaux est égale à celle des poteaux des étages supérieurs, d'une part, et de pourcentage d'aciers longitudinaux égal à celui des poteaux du premier étage, d'autre part, cas du portique $P-H_{RDC} 4m$ étudié ici, conduit à un rez-de-chaussée relativement plus souple (mou) que les étages supérieurs, et serait le siège de concentration des déformations plastiques, conduisant à la formation d'un mécanisme plastique d'étage à ce niveau, limitant ainsi la capacité de dissipation d'énergie du portique par déformations plastiques, c'est-à-dire limitant sa ductilité, et, par conséquent, entraînant sa ruine.

On peut alors conclure qu'une réduction uniquement de la résistance caractéristique à la compression du béton (f_{c28}) jusqu'à une valeur de 20 MPa par rapport à la valeur de dimensionnement, 25 MPa , pourrait n'avoir qu'une influence (négative) relativement faible sur la réponse sismique d'une structure en portique, du moins pour les portiques étudiés ici. **Par contre, la diminution simultanée** de ce paramètre et de la limite élastique (f_y) des aciers longitudinaux dans les poteaux, même dans des proportions à priori « acceptables », **f_{c28} jusqu'à 20 MPa et f_y jusqu'à 400 MPa , valeurs tolérées par le RPA99 / version 2003** (Cf. Articles 7.2.1 et 7.2.2 du règlement), **serait néfaste pour les structures en portiques en béton armé en zone sismique.** Car cela engendrerait, sous l'action sismique, **une réduction considérable de la ductilité de la structure et conduirait à une ruine prématurée** de cette dernière par mécanisme plastique d'étage, **non ductile**, autre que celui préconisé par les codes parasismiques, notamment par le RPA99 / version 2003, à savoir un mécanisme de type plastique global ductile. Le comportement de la structure serait d'autant plus défavorable que la hauteur rez-de-chaussée de la structure est plus élevée que celle des étages supérieurs.

6.3 Recommandations

Compte tenu des résultats obtenus et des conclusions tirées de la présente investigation, nos recommandations concernant les valeurs **minimales** des résistances caractéristiques des matériaux béton et acier constitutifs des éléments structuraux principaux, **en particulier les poteaux**, se résument comme suit :

1. Le béton mis en œuvre sur chantier doit avoir une résistance caractéristique à la compression, f_{c28} , **au moins égale à 23 MPa** (et NON *20 MPa*, valeur minimale tolérée par le RPA99 / version 2003), **en s'assurant, en outre, que** la limite élastique f_y des aciers mis en œuvre, n'est pas inférieure à la valeur nominale de dimensionnement ; dans le cas des structures étudiées ici, $f_y = 500 \text{ MPa}$.

2. Si l'on constate sur chantier que la limite élastique des aciers mis en œuvre est inférieure à la valeur nominale de dimensionnement – dans notre cas étudié ici, si $f_y < 500 \text{ MPa}$ avec $450 \text{ MPa} < f_y < 500 \text{ MPa}$ –, alors le béton mis en œuvre doit avoir une résistance f_{c28} **au moins égale à 25 MPa**.

Remarque importante: Rappelons que la valeur minimale de f_{c28} tolérée par le règlement parasismique français PS92 [11] pour les éléments principaux d'une structure est égale à 22 MPa , ce qui est supérieur à $f_{c28, \text{min RPA}} = 20 \text{ MPa}$, pourtant la France est un pays de loin moins sismique que le nord de l'Algérie, d'est à l'ouest, où l'on a une vaste zone de forte et de moyenne sismicité, et où sont concentrées d'importantes infrastructures socio-économiques et pratiquement la majorité de la population du pays !

6.4 Perspectives

Notre étude a porté sur l'influence de la réduction des caractéristiques mécaniques des matériaux béton et aciers longitudinaux dans les poteaux, mis en œuvre sur chantier, sur le comportement sismique de structures en portiques en béton armé. En perspective, une étude similaire mais en considérant d'autres types de structure, telles que celles en portiques + voiles ou en voiles, pourrait faire l'objet d'une recherche future.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Victor Davidovici, 2003, *Rapport de mission suite au séisme de Boumerdes du 21 mai 2003*.
- [2] Final Report, 2003, *Nonlinear Pushover Analysis of Reinforced Concrete Structures*, Colorado Advanced Software Institute.
- [3] Manuel Alfredo Lopez Menjivar, 2004, *A Review of Existing Pushover Methods for 2-D Reinforced Concrete Buildings*, European School of Advanced Studies in Reduction of Seismic Risk, Rose School.
- [4] R. Bento, S. Falcao, F. Rodrigues, 2004, *Nonlinear Static Procedures in Performance Based Seismic Design*, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 2522.
- [5] Peter Fajfar, 2000, *A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design*, Earthquake spectra, Vol. 16, pp.573-592.
- [6] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, 1999, *Capacity - Demand - Diagram Methods for Estimating Seismic Deformation of Inelastic Structures: SDF Systems*. Pacific Earthquake Engineering Research Center.
- [7] Paulay T. and Priestley, 1992, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, Edition John Wiley and Sons, Inc.
- [8] *Règles Parasismiques Algériennes (RPA99/version 2003)*, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique, Algérie.
- [9] BAEL 91, 1992, *Règles Techniques de Conception et de Calcul des Ouvrages et Constructions en Béton Armé suivant la Méthode des Etats Limites*, Edition Eyrolles.

- [10]** Computers and Structures Inc. (CSI), 1995, *SAP2000 Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures V8.08N*, Berkeley, California.
- [11]** *Règles de Construction Parasismiques françaises – Règles PS applicables aux bâtiments – PS92*, Editions Eyrolles, Paris, France, 1992.
- [12]** EN 1998-1, Eurocode 8: *Design for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Action and Rules for Buildings*, Commission of the European Communities (CEN), Brussels, Belgium, September 2005.
- [13]** Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997, *NEHRP the Seismic Rehabilitation of Buildings*, FEMA273.
- [14]** Applied Technology Council, ATC-40, 1996, *Seismic Evaluation and Retrofit of Concrete Buildings*, Volume 1-2, Redwood City, California.
- [15]** Federal Emergency Management Agency (FEMA), 2000, *Prestandard and Commentary for the Rehabilitation of Buildings*, FEMA-356.
- [16]** Albert Fuentes, 2005, *Béton Armé: Fissuration-Flèches, Redistribution d'efforts et Formation des Mécanismes de Ruptures*, OPU.
- [17]** ACI, 1995, *Building code requirements for reinforced Concrete (ACI 318-95), Mechanics and Design*, Third Edition American Concrete Institute, Detroit, Michigan, U.S.A.
- [18]** Saiidi M. and Sozen M.A., 1981, *Simple Nonlinear Seismic Response of R/C Structures*, *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol. 107, 937-952.
- [19]** Luis F. Ibarra and Helmut Krawinkler, 2005, *Global Collapse of Frame Structures Under Seismic Excitations*, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Stanford University.

- [20] Nie Jianguo, Qin Kai, Xiao Yan, 2006, *Pushover Analysis of the Seismic Behavior of a Concrete-Filled Rectangular Tubular Frame Structure*, Tsinghua Science and Technology, ISSN 1007-0214 20/21, Vol. 11, No. 1, pp.124-130.
- [21] Bachmann H., 2003, *Seismic Conceptual Design of Building-Basic principles for Engineers, Architects, Buildings Owners, and Authorities*, Swiss Federal for Water and Geology.
- [22] Jaswant N. Arlekar, Sudhir K. Jain and C. V. R. Murty, 1997, *Seismic Response of RC Frame Building with Soft First Storeys*, Proceedings of CBRI Golden Jubilee Conference on National Hazards in Urban Habitat, New Delhi.
- [23] George G. Penelis, Andreas J. Kappos, 1997, *Earthquake Resistant Concrete Structures*, Edition E and SPON, London.
- [24] Victor Davidovici, 1999, *La Construction en Zone Sismique*, Edition le Moniteur, Paris, France.
- [25] Dr. Cosmini G. Chioren, 2003, *Application of Pushover Analysis of Reinforced Concrete Bridge Model*, Part I-Numerical Models, Project Pocti/36019/99.
- [26] Chopra A.K., 1995, *Dynamics of Structures-Theory and Application to Earthquake Engineering*, Prentice Hall, New Jersey.
- [27] M. Belazougui, 2000, *Le Béton Armé aux Etats Limites*, OPU, Alger.
- [28] Mario Paz and William Leigh, 2004, *Structural Dynamic: Theory and Computation, Updated with SAP2000*, Fifth Edition, Kluwer Academic Publishers.
- [29] Sigmund A. Freeman, 2004, *Review of the Development of the Capacity Spectrum Method*, ISET Journal of Earthquake Technology, Paper No.438, vol. 41, No. 1, pp. 1-13.
- [30] Ashraf Habibullah, S.E., and Stephen Pyle, S.E., 1998, *Practical Three Dimensional Nonlinear Static Pushover Analysis*, Structure Magazine.

- [31]** Peter Fajfar, 1999, *Capacity Spectrum Method Based on Inelastic Demand Spectra*, The Journal of the International Association for Earthquake Engineering and of the International Association for Structure Control, Vol. 28, No. 9, pp.979-993.
- [32]** Alain Capra et Victor Davidivici, 1984, *Calcul Dynamique des Structures en Zone Sismique*, Edition Eyrolles.
- [33]** André Filiatrault, 1996, *Eléments de Génie Parasismique et de Calcul Dynamique des Structures*, Edition de l'école Polytechnique de Montréal.
- [34]** M. Zacek, 1996, *Construire Parasismique*, Edition Parenthèses, Marseille, France.