

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**Faculté de génie de la construction**  
**Département de Génie Civil**

# Mémoire de Magister

**Spécialité : Génie Civil**

**Option : Structures et Matériaux**

**Présenté par : Mr ANKIK Djamel**



## Thème

**Incidence des périodes fondamentales proposées par les différents règlements parasismiques sur la performance sismique des bâtiments**

Devant le jury suivant :

|                      |   |            |
|----------------------|---|------------|
| Mr AIT TAHAR Kamal   | Professeur – U.M.M.T.O.                     | Président  |
| Mr HAMIZI Mohand     | Maitre de conférences classe A – U.M.M.T.O. | Rapporteur |
| Mr KACHI Mohand Said | Professeur– U.M.M.T.O.                      | Examineur  |
| Mr DAHMANI Lahlou    | Professeur– U.M.M.T.O.                      | Examineur  |
| Mr HAMOUM Hocine     | Maitre de conférences classe B– U.M.M.T.O.  | Examineur  |

# Remerciements

Je tiens à signifier ma profonde reconnaissance à mon rapporteur, Monsieur HAMIZI Mohand, Maître de conférences à l'Université de Tizi-Ouzou, pour l'excellent suivi et les conseils pertinents apportés durant la réalisation de ce mémoire ainsi que pour la grande confiance qu'il a pu m'accorder.

Mes plus vifs remerciements pour Mr. AIT TAHAR Kamal qui ma fait l'honneur de présider le jury, Mr. KACHI Mohand Said, Mr DAHMANI Lahlou et Mr. HAMMOUM Hocine pour avoir bien voulu examiner mon travail et participer au jury.

Je dois un grand merci à tous mes amis pour leur soutien amical et avec qui j'ai passé d'agréables moments.

Je remercie de tout mon cœur mes parents, mes sœurs, ainsi que toute ma grande famille qui m'ont apporté, de près comme de loin, les témoignages de leur soutien et de leurs encouragements.

## RESUME

La période fondamentale des structures de type bâtiment constitue un paramètre essentiel pour la détermination de la réponse des structures à un chargement sismique. Pour cela les codes parasismiques donnent la possibilité d'estimer cette valeur pour les différentes typologies de structures à l'aide des formules empiriques qui sont, souvent, déduites de données statistiques. Ces formules diffèrent d'un règlement à un autre, même pour un même type de structure. L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact des périodes fondamentales proposées par les différents règlements parasismiques sur le dimensionnement et la performance sismique des bâtiments en portiques en béton armé.

Afin de monter l'impact des périodes fondamentales sur le dimensionnement, deux bâtiments en portique en béton armé de 5 et 8 étages sont considérés. Des analyses statiques linéaires sont effectuées en considérant plusieurs formules empiriques données par les différents règlements en vigueur (le règlement parasismique Algérien RPA 2003, Euro code 8, et le code américain ASCE 7-05). Pour évaluer leurs performances sismiques, des analyses statiques non linéaires (Pushover) sont appliquées à l'aide du logiciel de calcul ETABS v 9.7. Les paramètres retenus pour les analyses sont : l'effort tranchant ultime à la base, les déplacements inter-étages, les demandes en ductilité et les distributions des rotules plastiques dans les poutres et poteaux.

Les résultats des analyses linéaires montrent clairement le caractère conservatif des formules proposées par le règlement parasismique Algérien RPA, qui conduisent à un dimensionnement plus sécuritaire. Par ailleurs, l'analyse comparative des résultats de calcul non linéaire montrent que le règlement parasismique Algérien RPA limite le degré d'incursion des structures dans le domaine plastique.

**Mots clés :** Périodes fondamentales, structures auto-stables, dimensionnement, méthode Pushover, performance sismique.

## ABSTRACT

The fundamental period of building structures is an essential parameter for determining the response of structures to seismic loading. For this, the seismic codes provide the opportunity to estimate this value for different types of structures using empirical formulas which are often derived from statistical data. These formulas vary from code to code, even for the same type of structure. The objective of this study is to evaluate the impact of fundamental periods proposed by different codes on seismic design and seismic performance of the reinforced concrete frame structures.

To evaluate the impact of fundamental periods on seismic design, two framed buildings with 5 and 8 stories are considered. Linear static analyses are performed considering several empirical formulas given by different codes (Algerian seismic code RPA 2003, Euro code 8 and the American code ASCE 7-05). To assess their seismic performance, non-linear static Pushover analyses are applied using the software ETABS v 9.7. Specific results were examined such as: the ultimate base shear, inter-story displacements, ductility demand and distribution of plastic hinges in beams and columns.

The results of linear analysis show clearly the conservative nature of formulas proposed by the Algerian seismic code RPA, which lead to a safer design. Moreover, the comparative results of non-linear analysis show that the Algerian seismic code RPA limits the degree of incursion of structures in the plastic domain.

**Key words:** Fundamental periods, frame structures, design, Pushover method, seismic performance.

# Tables des matières

|   |     |
|---|-----|
| Liste des figures .....   | I   |
| Liste des tableaux .....  | III |
| <b>Introduction générale</b> .....  | 1   |
| <br>  |     |
| <b>Chapitre 1 : Revue des différents codes parasismiques</b>  |     |
| 1.1. Introduction .....   | 3   |
| 1.2. Calcul de la période selon le RPA 99 version 2003 .....  | 3   |
| 1.3. Calcul de la période selon le RPS 2002 Marocain .....  | 4   |
| 1.4. Calcul de la période selon le code national du bâtiment-Canada NBCC 95 .....                               | 6   |
| 1.5. Calcul de la période selon le code Américain UBC 97 .....  | 6   |
| 1.6. Calcul de la période selon l'Eurocode 8.....   | 7   |
| 1.7. Calcul de la période propre selon le code Américain ASCE 7-05 .....  | 8   |
| 1.8. Récapitulatif des formules empiriques exposées dans ce chapitre.....                                       | 10  |
| <br>  |     |
| <b>Chapitre 2 : Impact des périodes propres fondamentales sur le dimensionnement parasismique des bâtiments</b> |     |
| 2.1. Introduction .....   | 12  |
| 2.2. Présentation et description des structures.....  | 13  |
| 2.3. Caractéristiques mécaniques des matériaux .....  | 15  |
| 2.4. Charges gravitaires .....  | 15  |
| 2.5. Pré dimensionnement des sections de béton pour les poutres et les poteaux.....                             | 15  |
| 2.6. Charges sismiques .....  | 16  |
| 2.6.1. Aperçu sur la méthode statique équivalente présentée dans présentée dans le RPA 99/ V 2003 .....         | 16  |
| a) Principe .....   | 16  |
| b) Modélisation .....   | 16  |
| c) Condition d'application de la méthode statique équivalente .....   | 16  |
| d) Calcul de la force sismique total à la base .....  | 17  |
| e) Distribution de la résultante des forces selon la hauteur .....  | 19  |
| f) Distribution horizontale des forces sismiques .....  | 20  |
| 2.6.2. Application de la méthode sur les bâtiments.....   | 20  |
| 2.6.2.1. Modélisation.....  | 21  |
| 2.6.2.2. Calcul des forces sismiques totales à la base .....  | 21  |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 21  |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 21  |
| 2.6.2.3. Distribution des résultantes des forces selon la hauteur.....  | 22  |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 22  |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 22  |

|   |    |
|---|----|
| 2.6.2.4. Comparaison entre les efforts tranchants de niveau « $V_k$ » ..... | 23 |
| 2.6.2.5. Diagrammes des efforts tranchants de niveau « $V_k$ » .....        | 24 |
| 2.7. Vérification aux exigences du RPA 99/ V 2003 .....                     | 25 |
| 2.7.1. Vérification de l'effort normale réduit .....                        | 25 |
| 2.7.2. Justification vis à vis des déformations .....                       | 26 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 26 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 27 |
| 2.7.3. Justification vis à vis de l'effet $P - \Delta$ .....                | 29 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 29 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 31 |
| 2.8. Ferrailage des éléments structuraux des bâtiments étudiés .....        | 32 |
| 2.8.1. Ferrailage des poutres .....   | 32 |
| 2.8.2. Ferrailage des poteaux .....   | 32 |
| 2.9. Vérification des contraintes admissibles dans les éléments structuraux |    |
| poutres et poteaux.....   | 33 |
| 2.9.1. Vérification des poteaux au flambement .....                         | 33 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 34 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 35 |
| 2.9.2. Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes .....          | 36 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 36 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 37 |
| 2.9.3. Vérification des contraintes de compression dans les poteaux         |    |
| à l'état limite de service .....  | 38 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 40 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 41 |
| 2.9.4. Justification sous sollicitation d'effort tranchant dans les poutres |    |
| à l'état limite ultime .....  | 44 |
| 2.9.5. Vérification des contraintes de compression dans les poutres         |    |
| à l'état limite de service .....  | 44 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 45 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 46 |
| 2.10. Vérification des zones nodales .....                                  | 47 |
| a) Bâtiment (R+5).....  | 47 |
| b) Bâtiment (R+8) .....   | 49 |
| 2.11. Conclusions .....   | 52 |

### **Chapitre 3 : Présentation de l'analyse Pushover**

|   |    |
|---|----|
| 3.1. Introduction .....                                 | 53 |
| 3.2. Concepts fondamentaux d'une analyse Pushover ..... | 53 |
| 3.2.1. Description de l'analyse Pushover .....          | 53 |
| 3.2.2. Principe de l'analyse Pushover .....             | 54 |
| 3.2.3. But de l'analyse Pushover .....                  | 55 |

|  |    |
|--|----|
| 3.2.4. Le déplacement cible .....  | 55 |
| 3.2.5. Distribution des charges latérales.....   | 56 |
| 3.2.6. Idéalisations de la courbe de capacité.....   | 57 |
| 3.3. Approche du code utilisé pour cette étude .....                                       | 58 |
| 3.3.1. Approche du code ATC 40.....  | 58 |
| 3.3.1.1. Conversion de la courbe de capacité en spectre de capacité .....                  | 58 |
| 3.3.1.2. Conversion du spectre de la demande au format<br>accélération – déplacement ..... | 59 |
| 3.3.1.3. Procédure d'évaluation du point de performance.....                               | 61 |

## **Chapitre 4 : Impact des périodes propres fondamentales sur le la performance sismique des bâtiments**

|   |           |
|---|-----------|
| 4.1. Introduction .....   | 66        |
| 4.2. Paramètres de modélisation et critères d'acceptation de l'analyse Pushover ..... | 66        |
| 4.2.1. Définition du comportement non linéaire des poutres et poteaux .....           | 66        |
| 4.2.2. Critères d'acceptation et niveau de performance de la rotule plastique.....    | 67        |
| 4.3. Distribution des charges latérales.....  | 68        |
| 4.4. Résultats des analyses Pushover .....  | 69        |
| 4.4.1. Bâtiment en (R+5).....   | 69        |
| 4.4.1.1. Courbes de capacité.....   | 69        |
| 4.4.1.2. Détermination des points de performance.....                                 | 72        |
| 4.4.1.3. Déplacements relatifs inter-étages au point de performance.....              | 73        |
| 4.4.1.4. Demande en ductilité ( $\mu_D$ ).....  | 75        |
| 4.4.1.5. Distribution des rotules plastiques dans les éléments structuraux .....      | 75        |
| 4.4.2. Bâtiment en (R+8).....   | 78        |
| 4.4.2.1. Courbes de capacité.....   | 78        |
| 4.4.2.2. Détermination des points de performance.....                                 | 82        |
| 4.4.2.3. Déplacements relatifs inter-étages au point de performance.....              | 82        |
| 4.4.2.4. Demande en ductilité ( $\mu_D$ ).....  | 84        |
| 4.4.2.5. Distribution des rotules plastiques dans les éléments structuraux .....      | 84        |
| 4.5. Conclusions .....  | 87        |
| <b>Conclusion générale .....</b>  | <b>88</b> |

### **Références bibliographiques**

### **Annexes**

# Liste des figures

|   |    |
|---|----|
| Figure 2.1 : Dimensions en plan des deux bâtiments .....  | 14 |
| Figure 2.2 : Vues en 3D des deux bâtiments .....  | 14 |
| Figure 2.3 : Distribution de la résultante des forces sur les différents niveaux .....  | 20 |
| Figure 2.4 : Diagrammes des efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+5) .....   | 24 |
| Figure 2.5 : Diagrammes des efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+8) .....   | 25 |
| Figure 2.6 : Section d'un poteau. ....  | 39 |
| Figure 2.7 : La zone nodale. ....   | 47 |
| Figure 3.1 : Courbe de capacité (Pushover) d'une structure. ....  | 53 |
| Figure 3.2 : Niveaux d'endommagement décrits par une courbe de capacité.....  | 54 |
| Figure 3.3 : Idéalisations de la courbe de capacité .....   | 57 |
| Figure 3.4 : Conversion de la courbe de capacité en spectre de capacité.....  | 59 |
| Figure 3.5 : Conversion du spectre élastique ( $S_a - T$ ) au format ( $S_a - S_d$ ). ....  | 60 |
| Figure 3.6 : Critère d'égalité des déplacements maximaux .....  | 61 |
| Figure 3.7 : Représentation bilinéaire du spectre de capacité .....   | 62 |
| Figure 3.8 : Types de comportement de structure .....   | 63 |
| Figure 3.9 : Détermination du point de performance .....  | 64 |
| Figure 4.1 : Courbe Force – Déformation. ....   | 67 |
| Figure 4.2 : Courbe Force – Déformation et critères d'acceptation d'une<br>rotule plastique .....   | 68 |
| Figure 4.3 : Courbes de capacité du bâtiment en (R+5) direction (xx).....   | 69 |
| Figure 4.4 : Courbes de capacité du bâtiment en (R+5) direction (yy).....   | 71 |
| Figure 4.5 : Détermination du point de performance du bâtiment en (R+5) pour le<br>cas de dimensionnement par la formule du RPA (T1)<br>dans la direction (xx)..... | 73 |
| Figure 4.6 : Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du<br>bâtiment en (R+5) direction (xx).....  | 74 |
| Figure 4.7 : Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du<br>bâtiment en (R+5) direction (yy).....  | 74 |
| Figure 4.8 : Demande en ductilité du bâtiment en (R+5).....   | 75 |
| Figure 4.9 : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment<br>en (R+5) direction (xx).....   | 76 |

|  |    |
|--|----|
| Figure 4.10 : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment<br>en (R+5) direction (yy).....   | 77 |
| Figure 4.11 : Courbes de capacité du bâtiment en (R+8) direction (xx).....   | 78 |
| Figure 4.12 : Courbes de capacité du bâtiment en (R+8) direction (yy).....   | 80 |
| Figure 4.13 : Détermination du point de performance du bâtiment en (R+8) pour le<br>cas de dimensionnement par la formule du RPA (T1)<br>dans la direction (xx)..... | 82 |
| Figure 4.14 : Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du<br>bâtiment en (R+8) direction (xx).....  | 83 |
| Figure 4.15 : Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du<br>bâtiment en (R+8) direction (yy).....  | 83 |
| Figure 4.16 : Demande en ductilité du bâtiment en (R+8).....   | 84 |
| Figure 4.17 : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment<br>en (R+8) direction (xx).....   | 85 |
| Figure 4.18 : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment<br>en (R+8) direction (yy).....   | 86 |

# Liste des tableaux

|  |    |
|--|----|
| Tableau 1.1 : Valeurs du coefficient $C_t$ .....   | 3  |
| Tableau 1.2 : Valeurs des paramètres $C_t$ et $x$ .....  | 9  |
| Tableau 1.3 : Formules empiriques propose par les codes parasismiques .....  | 10 |
| Tableau 2.1 : Dimensions des sections de béton des poutres et des poteaux des<br>deux bâtiments. ....  | 15 |
| Tableau 2.2 : Formules empiriques utilisées dans cette étude. ....   | 20 |
| Tableau 2.3 : Forces sismiques totales à la base du bâtiment en (R+5)... ..  | 21 |
| Tableau 2.4 : Forces sismiques totales à la base du bâtiment en (R+8). ....  | 21 |
| Tableau 2.5 : Forces sismiques et efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+5)... ..  | 22 |
| Tableau 2.6 : Forces sismiques et efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+8)... ..  | 23 |
| Tableau 2.7 : Comparaison entre les efforts tranchants de niveau<br>« $V_k$ » du bâtiment en (R+5). ....                                       | 23 |
| Tableau 2.8 : Comparaison entre les efforts tranchants de niveau<br>« $V_k$ » du bâtiment en (R+8). ....                                       | 24 |
| Tableau 2.9 : Vérification de l'effort normal réduit pour le bâtiment en (R+5). ....   | 25 |
| Tableau 2.10 : Vérification de l'effort normal réduit pour le bâtiment en (R+8). ....  | 26 |
| Tableau 2.11 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).....         | 26 |
| Tableau 2.12 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).....         | 27 |
| Tableau 2.13 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8. .... | 27 |
| Tableau 2.14 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.....      | 27 |
| Tableau 2.15 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).....         | 28 |
| Tableau 2.16 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).....         | 28 |
| Tableau 2.17 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8. .... | 28 |

|   |    |
|---|----|
| Tableau 2.18 : Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8)<br>obtenus dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.....   | 29 |
| Tableau 2.19 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....          | 30 |
| Tableau 2.20 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....          | 30 |
| Tableau 2.21 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8. ....   | 30 |
| Tableau 2.22 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....       | 30 |
| Tableau 2.23 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....          | 31 |
| Tableau 2.24 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....          | 31 |
| Tableau 2.25 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8. ....   | 31 |
| Tableau 2.26 : Vérification de l'effet $P - \Delta$ pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....       | 32 |
| Tableau 2.27 : Vérification des poteaux aux flambement pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....       | 34 |
| Tableau 2.28 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....        | 34 |
| Tableau 2.29 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8 ..... | 34 |
| Tableau 2.30 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+5)<br>dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....     | 34 |
| Tableau 2.31 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....        | 35 |
| Tableau 2.32 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....        | 35 |
| Tableau 2.33 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8 ..... | 35 |
| Tableau 2.34 : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8)<br>dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....     | 35 |

|  |    |
|--|----|
| Tableau 2.35 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).....                        | 36 |
| Tableau 2.36 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).....                        | 37 |
| Tableau 2.37 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8. .                   | 37 |
| Tableau 2.38 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.....                     | 37 |
| Tableau 2.39 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).....                        | 37 |
| Tableau 2.40 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).....                        | 38 |
| Tableau 2.41 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8. .                   | 38 |
| Tableau 2.42 : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.....                     | 38 |
| Tableau 2.43 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). .....      | 40 |
| Tableau 2.44 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). .....      | 40 |
| Tableau 2.45 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8..... | 41 |
| Tableau 2.46 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....    | 41 |
| Tableau 2.47 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....       | 42 |
| Tableau 2.48 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....       | 42 |

|  |    |
|--|----|
| Tableau 2.49 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8..... | 43 |
| Tableau 2.50 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....    | 43 |
| Tableau 2.51 : Vérification de l'effort tranchant dans les poutres pour le bâtiment en (R+5).....  | 44 |
| Tableau 2.52 : Vérification de l'effort tranchant dans les poutres pour le bâtiment en (R+8).....  | 44 |
| Tableau 2.53 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....       | 45 |
| Tableau 2.54 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....       | 45 |
| Tableau 2.55 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8..... | 45 |
| Tableau 2.56 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....    | 46 |
| Tableau 2.57 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1). ....       | 46 |
| Tableau 2.58 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2). ....       | 46 |
| Tableau 2.59 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8..... | 46 |
| Tableau 2.60 : Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05. ....    | 46 |

|   |    |
|---|----|
| Tableau 2.61 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de RPA (T1).....  | 48 |
| Tableau 2.62 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de RPA (T2).....  | 48 |
| Tableau 2.63 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.....                                      | 49 |
| Tableau 2.64 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05 .....   | 49 |
| Tableau 2.65 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de RPA (T1).....  | 50 |
| Tableau 2.66 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de RPA (T2).....  | 50 |
| Tableau 2.67 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.....                                      | 51 |
| Tableau 2.68 : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05 .....   | 51 |
| Tableau 3.1 : Valeurs du facteur de modification de l'amortissement, $\kappa$ .....   | 63 |
| Tableau 3.2 : Valeurs minimales de $S_{RA}$ et $S_{RV}$ .....   | 64 |
| Tableau 4.1 : Caractéristiques générales du bâtiment en (R+5) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (xx).....              | 69 |
| Tableau 4.2 : Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+5) dans la direction (xx) ..... | 70 |
| Tableau 4.3 : Caractéristiques générales du bâtiment en (R+5) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (yy).....              | 71 |
| Tableau 4.4 : Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+5) dans la direction (yy) ..... | 72 |
| Tableau 4.5 : Points de performances du bâtiment en (R+5) .....   | 73 |
| Tableau 4.6 : Caractéristiques générales du bâtiment en (R+8) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (xx).....              | 79 |
| Tableau 4.7 : Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+8) dans la direction (xx) ..... | 79 |
| Tableau 4.8 : Caractéristiques générales du bâtiment en (R+8) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (yy).....              | 80 |

|  |    |
|--|----|
| Tableau 4.9 : Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et<br>l'état ultime de résistance du bâtiment (R+8) dans la direction (yy) ..... | 81 |
| Tableau 4.10 : Points de performances du bâtiment en (R+8) .....   | 82 |

## Introduction générale

---

# Introduction

Pour se protéger des destructions pouvant être occasionnées par les tremblements de terre, les pays concernés se sont dotés de règles parasismiques. Ces règles proposent un calcul simple avec des méthodes statiques équivalentes caractérisant le mouvement dynamique de la structure moyennant certains coefficients de sécurité. Ces méthodes sont basées sur l'évaluation de la force sismique, qui sollicitera la construction, en fonction de certains paramètres et en particulier les paramètres dynamiques de cette construction, qui sont la période propre fondamentale, l'amortissement et les formes modales.

La période propre fondamentale des structures de type bâtiment constitue un paramètre majeur dans la conception et le dimensionnement de structures en zone sismique. Pour cela les codes parasismiques nous donnent la possibilité d'estimer la valeur de la période fondamentale pour les différentes structures à l'aide des formules empiriques qui sont développées à partir des données statistiques.

Plusieurs formules empiriques pour l'évaluation de la période propre fondamentale sont proposées dans différents règlements parasismiques à travers le monde. Ces formules, en particulier celles des structures en portiques auto-stables en béton armé, sont souvent en fonction des caractéristiques géométriques de la structure (la hauteur  $H$ , la dimension horizontale dans la direction de l'action sismique  $D$ ). Ces formules diffèrent d'un règlement à un autre. Certains codes, et c'est le cas du règlement parasismique algérien (RPA, 2003), prennent en compte l'influence de deux caractéristiques de la structure, à savoir la hauteur et la dimension dans la direction de calcul du séisme. Par contre, d'autres règlements ne prennent en compte que le paramètre hauteur de la structure. Or, cette différence peut avoir un impact significatif sur les forces sismiques sollicitant la structure et conduire ainsi à de différents dimensionnement de celle-ci.

Le comportement des structures en zones sismiques est de plus en plus évalué par la méthode de performance sismique (*Performance-Based Design*). Cette méthode évite de manière élégante la difficulté du comportement sismique complexe des structures. Au lieu de se focaliser sur les sollicitations, dont la détermination reste très imprécise, il se base sur la capacité de la structure en visant à lui conférer les aptitudes nécessaires à supporter favorablement les sollicitations sismiques par la dissipation de l'énergie sous forme de déformations plastiques. La méthode vise en premier lieu à garantir un comportement ductile adéquat de la structure.

L'objectif de ce travail est d'évaluer l'impact des périodes propres fondamentales proposées par les différents règlements parasismiques sur le dimensionnement et la performance sismique des bâtiments en portiques auto-stables en béton armé.

Afin de montrer l'impact de la période propre sur le dimensionnement des éléments composants la structure et la performance sismique, deux exemples de bâtiments en portique en béton armé de 5 et 8 étages sont considérés. Ces bâtiments sont dimensionnés selon le code de calcul de béton armé aux états limites (BAEL 91), et le règlement parasismique algérien (RPA, 2003) sur la base d'une analyse par la méthode statique équivalente, en considérant plusieurs formules empiriques pour l'estimation de la période fondamentale proposées par différents règlements sismiques. Ensuite, nous effectuons des analyses statiques non linéaires par poussée progressive (analyse Pushover) pour chaque bâtiment dimensionné, afin d'étudier leurs comportements post élastique et d'évaluer leurs performances sismiques.

Au terme de ces analyses non linéaires des bâtiments considérés, nous procéderons à une discussion des résultats de chaque paramètre étudié, tels que l'effort tranchant à la base, les déplacements relatifs inter-étages, les demandes en ductilité et les distributions des rotules plastiques dans les éléments structuraux poutres et poteaux.

Cette thèse est composée de quatre chapitres principaux :

Le **premier chapitre** comprend une revue des différentes méthodes de calcul de la période propre fondamentale d'une structure par les différents règlements parasismiques algérien et étrangers.

Dans le **deuxième chapitre**, nous montrons l'impact des périodes propres fondamentales sur le dimensionnement parasismique des bâtiments en portique en béton armé. A cet effet, deux structures de bâtiments en (R+5) et (R+8) sont considérées, l'étude est effectuée en considérant plusieurs formules empiriques données par les différents règlements en vigueur (RPA 2003, Eurocode 8, et le code américain ASCE 7-05).

Dans le **troisième chapitre**, nous donnons un résumé sur la procédure d'analyse statique non linéaire par poussée progressive (analyse Pushover), tout en présentant l'approche du code ATC 40 (*Applied Technology Council*), qui est désignée par la méthode du spectre de capacité.

Dans le **quatrième chapitre**, nous réalisons des analyses statiques non linéaires (Pushover) pour chaque bâtiment dimensionné à l'aide du logiciel de calcul **Etabs v 9.7**, puis nous procédons à une discussion des résultats obtenus pour chaque paramètre considéré, tels que l'effort tranchant à la base, les déplacements relatifs inter-étages, les demandes en ductilité et les distributions des rotules plastiques dans les éléments structuraux poutres et poteaux.

Finalement une conclusion générale clôture la thèse.

## Chapitre 1

---

### Revue des différents codes parasismiques

## 1.1. Introduction

Tous les codes de calcul parasismiques de part le monde proposent des formules empiriques pour estimer la période propre fondamentale d'une structure. Ces formules empiriques sont basées essentiellement sur des données expérimentales donnant la période fondamentale en fonction du matériau de construction (acier, béton armé, etc.), du type de contreventement (portique, voile, maçonnerie, etc.), et des dimensions du bâtiment (hauteur, dimensions en plan, etc.).

Toutefois, ces codes permettent aussi l'utilisation des formules analytiques (telles que celles de Rayleigh) ou des méthodes numériques, mais précisent que la valeur obtenue par de telles méthodes ne doivent pas être supérieure à celle estimée à partir des formules empiriques appropriées multipliées par un facteur de sécurité. [25]

## 1.2. Calcul de la période selon le RPA 99 version 2003

La formule empirique qui est donnée dans le code parasismique algérien RPA 99 / version 2003 [2] pour le calcul de la période propre de vibration est :

$$T = C_t h_n^{3/4} \quad (1.1)$$

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

$C_t$  : Coefficient donné par le tableau 1.1, il est fonction du système de contreventement et du type de remplissage.

| Cas N° | Système de contreventement  | $C_t$ |
|--------|---|-------|
| 1      | Portiques auto-stables en béton armé sans remplissage en maçonnerie   | 0,075 |
| 2      | Portiques auto-stables en acier sans remplissage en maçonnerie  | 0,085 |
| 3      | Portiques auto-stables en béton armé ou en acier avec remplissage en maçonnerie   | 0,05  |
| 4      | Contreventement assuré partiellement ou totalement par des voiles en béton armé, des palées triangulées et des murs en maçonnerie | 0,05  |

**Tableau 1.1** : Valeurs du coefficient  $C_t$ .

Dans les cas n° 3 et 4, on peut également utiliser aussi la formule :

$$T = 0.09 \frac{h_n}{\sqrt{D}} \quad (1.2)$$

Où :

$D$  : Dimension du bâtiment mesurée à sa base dans la direction de calcul considéré.

Dans ce cas de figure, il y a lieu de retenir dans chaque direction considérée la plus petite des deux valeurs données respectivement par (1.1) et (1.2).

Le code précise également que la période fondamentale peut être calculée en utilisant une méthode rationnelle, telle que la méthode de Rayleigh ou une version simplifiée de celle-ci :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\sum_i^n w_i \delta_i}{g \sum_i^n f_i \delta_i}} \quad (1.3)$$

Où,

$f_i$  : Système de forces horizontales, distribuées selon les formules de répartition de la force sismique totale à la base suivant la verticale.

$\delta_i$  : Flèches horizontales dues aux forces  $f_i$  calculées à partir d'un modèle élastique linéaire de la structure qui prend en compte tous les éléments participant à sa rigidité.

$w_i$  : Poids revenant au niveau  $i$ .

Néanmoins, il existe une version simplifiée de la formule de Rayleigh et qui s'écrit sous la forme suivante :

$$T = 2\sqrt{\delta_N} \quad (1.4)$$

Avec :

$\delta_N$  : Flèche horizontale au sommet du bâtiment, mesurée en mètres, due aux forces gravitaires appliquées horizontalement.

Les valeurs de T, calculées à partir des formules de Rayleigh ou de méthodes numériques ne doivent pas dépasser celles estimées à partir des formules empiriques appropriées de plus de 30%.

### 1.3. Calcul de la période selon le RPS 2002 Marocain

La période fondamentale de vibration T, caractérisant la masse et la rigidité de la structure, peut être évaluée selon le RPS 2002 [3] par un calcul dynamique précis ou par la méthode de Rayleigh.

Aussi, des formules empiriques peuvent être utilisées sous certaines conditions.

La valeur de la période fondamentale de vibration T peut être déterminée par les formules forfaitaires suivantes :

a) Pour une ossature à nœuds :

$$T = 0.085 N \quad (1.5)$$

N : est le nombre d'étages du bâtiment.

b) Pour les autres structures :

$$T = 0.09 \frac{H}{\sqrt{L}} \quad (1.6)$$

Où, H et L exprimés en mètre, sont respectivement la hauteur totale du bâtiment et la longueur du mur ou de l'ossature qui constitue le principal système de contreventement, dans la direction de l'action sismique.

Si le principal système de résistance aux forces latérales n'a pas de longueur bien définie, L désigne la dimension du bâtiment dans la direction parallèle à l'action sismique de calcul.

c) D'autres méthodes de calcul de la période, telles que celles des alinéas a) et b) se basant sur une représentation de la structure tenant compte de ses propriétés physiques peuvent être utilisées sous réserve que la valeur de l'effort sismique V ne soit pas inférieure à 0.80 fois la valeur obtenue à l'aide de la période calculée par 1.5) ou ; 1.6).

d) Pour les bâtiments assimilés à des consoles :

$$T = 1.8 (mH/EI) \quad (1.7)$$

Où :  $m$  : La masse par unité de longueur du bâtiment ;

$H$  : La hauteur totale ;

$EI$  : La rigidité flexionnelle ;

e) Pour les bâtiments en portiques :

$$T = 2N(N + 1)/(M/k)^{1/2} \quad (1.8)$$

$N$  : Est le nombre d'étages,  $M$  et  $k = k_p + k_r$  sont respectivement la masse et la rigidité par niveau.

$k_p$  : La rigidité latérale du portique donnée par l'expression suivante :

$$k_p = 12 \cdot \Sigma (E_c \cdot I_c) / h^3 (L + 2 \lambda)$$

$$\lambda = L \Sigma I_c / \Sigma I_p S \quad \Sigma \text{ sur le nombre de travées}$$

$k_r$  : La rigidité latérale d'un panneau de remplissage donnée par l'expression suivante :

$$k_r = 0,045 m (E_r e \cos \alpha^2)$$

Avec :

$m$  : Nombre de travées ;

$E_r$  : Module d'élasticité ;

$e$  : Epaisseur du panneau ;

$\alpha$  : Est l'angle de la diagonale avec l'horizontale du panneau ;

#### 1.4. Calcul de la période selon le code national du bâtiment-Canada NBCC 95

Les formules empiriques qui sont données dans l'édition 1995 du Code National du Bâtiment du Canada NBCC 95 [4] pour le calcul de la période fondamentale pour des ossatures résistant aux moments sont comme suit :

a) La formule  $T = 0.1 N$  pour toute ossature résistant aux moments, ou par la formule :

$T = 0.085 h_n^{3/4}$  pour ossature en acier résistant aux moments, ou par la formule :

$T = 0.075 h_n^{3/4}$  pour une ossature en béton résistant aux moment, si l'ossature résiste à 100% des forces latérales exigées et si elle n'est pas contreventée par des éléments plus rigides tendant à diminuer sa contribution à la résistance aux forces latérales,  $h_n$  étant en mètres ;

b) La formule  $T = 0.09 \frac{h_n}{\sqrt{D_s}}$  pour les autres structures, où  $h_n$  et  $D_s$  sont exprimés en mètres.

$D_s$  = la longueur du mur ou de l'ossature contreventé qui constitue le principal système de résistance aux forces latérales dans une direction parallèle aux forces exercées ; si le principal système de résistance aux forces latérales n'a pas une longueur bien définie, il faut utiliser  $D$  au lieu de  $D_s$  ;

Le NBCC 95 [4] précise également que la période fondamentale peut être calculée en utilisant une méthode rationnelle, telle que la méthode de Rayleigh ou l'analyse aux valeurs propres, mais l'effort tranchant à la base résultant ne doit pas être inférieur à 0,8 fois l'effort tranchant à la base, calculé avec les formules empiriques.

#### 1.5. Calcul de la période selon le code Américain UBC 97

La période du mode fondamental  $T$  mentionnée doit être déterminée comme suit : [5]

**Méthode A** : Pour tous les bâtiments, la valeur  $T$  peut être approchée à partir de la formule suivante :

$$T = C_t h_n^{3/4} \quad (1.9)$$

Où:

$C_t = 0,0853$  pour les ossatures en portique en acier résistant aux moments ;

$C_t = 0,0731$  pour les ossatures en portique en béton armé résistant aux moments ;

$C_t = 0,0488$  pour toutes les autres structures ;

Alternativement, la valeur de  $C_t$  pour les structures avec des murs de refend en béton ou en maçonnerie peut être pris égale à :

$$C_t = 0.075 / \sqrt{A_c} \quad (1.10)$$

La valeur de  $A_c$  en  $m^2$  est déterminé par la formule suivante :

$$A_c = \sum A_e [0.2 + (D_e/h_n)^2] \quad (1.11)$$

Où,

$A_e$  : Est la section transversale du mur de contreventement dans la direction considérée au premier niveau du bâtiment, en  $m^2$  ;

$D_e$  : Est la longueur du mur de contreventement au premier niveau dans la direction parallèle aux forces appliquées, en m ;

$h_n$  : Est la hauteur du bâtiment (m), depuis les fondations jusqu'au dernier étage ;

La valeur de  $(D_e/h_n)$  utilisées dans la formule (1.11) ne doit pas dépasser 0,9.

**Méthode B** : La période fondamentale T peut être calculée à l'aide des propriétés structurales et les caractéristiques de déformation des éléments résistants par une analyse appropriée. L'analyse doit être en conformité avec les exigences de l'article 1630.1.2. [5]

La valeur de T obtenue à partir de la méthode B ne doit pas dépasser la valeur obtenue à partir de la méthode A de 30% dans la zone sismique 4, et de 40% dans les zones sismiques 1, 2 et 3. [5]

La période fondamentale T peut être calculée en utilisant la formule suivante :

$$T = 2\pi \sqrt{\left( \sum_{i=1}^n w_i \delta_i^2 \right) / \left( g \sum_{i=1}^n f_i \delta_i \right)} \quad (1.12)$$

Les valeurs de  $f_i$  représentent les forces latérales. Le déplacement élastique  $\delta_i$  doit être calculé en utilisant les forces latérales,  $f_i$ .

## 1.6. Calcul de la période selon l'Eurocode 8

La période fondamentale d'un bâtiment doit être calculée pour chaque direction considérée par les méthodes suivantes : [6]

1. Pour déterminer les périodes fondamentales de vibration T des deux modèles plans du bâtiment, des expressions approchées basées sur les méthodes de dynamique des structures (par exemple, méthode de Rayleigh) peuvent être utilisées.

2. Pour les bâtiments jusqu'à 40 m de hauteur, une valeur approchée de  $T$  (en s) peut être obtenue par l'expression suivante :

$$T = C_t h^{3/4} \quad (1.13)$$

Où :

$C_t$  : Est égal à 0,085 dans le cas des portiques spatiaux en acier, égale à 0,075 dans le cas des portiques spatiaux en béton et pour les triangulations excentrées en acier et égale à 0,050 pour toutes les autres structures ;

$h$  : Est la hauteur du bâtiment (m), depuis les fondations ou le sommet d'un soubassement rigide jusqu'au dernier étage ;

3. Par ailleurs, la valeur de  $C_t$  dans l'expression (1.13) pour les structures avec des murs de contreventement en béton ou en maçonnerie, peut être prise égale à :

$$C_t = 0.075/\sqrt{A_c} \quad (1.14)$$

Où :

$$A_c = \sum [A_i (0.2 + (l_{wi}/H))^2] \quad (1.15)$$

$A_c$  : Est l'aire effective totale des sections des murs de contreventement au premier niveau du bâtiment, en  $m^2$  ;

$A_i$  : Est l'aire effective de la section transversale du mur de contreventement dans la direction considérée  $i$  au premier niveau du bâtiment, en  $m^2$  ;

$H$  : Est comme indiqué en (2) du présent paragraphe ;

$l_{wi}$  : Est la longueur du mur de contreventement  $i$  au premier niveau dans la direction parallèle aux forces appliquées, en m, sous la condition que  $l_{wi} / H$  ne dépasse pas 0,9 ;

4. En variante, la valeur de  $T$  (en s) peut être estimée aussi par l'expression suivante :

$$T = 2\sqrt{d} \quad (1.16)$$

Où :

$d$  : Est le déplacement élastique horizontal du sommet du bâtiment (m), dû aux charges gravitaires appliquées horizontalement ;

### 1.7. Calcul de la période propre selon le code Américain ASCE 7-05

Les formules empiriques qui sont données dans le code américain ASCE 7-05 [17] pour le calcul de la période fondamentale sont comme suit :

- La période fondamentale en secondes, doit être déterminée à partir de l'équation suivante :

$$T = C_t h_n^x \quad (1.17)$$

Où :

$h_n$  : Est la hauteur (m) au-dessus de la base au plus haut niveau de la structure et les coefficients  $C_t$  et  $x$  sont déterminés à partir du tableau (1.2) :

| Type de la structure   | $C_t$  | $x$  |
|--|--------|------|
| Système de portique résistant au moment dans lesquels les forces sismiques sont repris par les portiques à 100%. |        |      |
| Portique en acier résistant au moment  | 0.0724 | 0.8  |
| Portique en béton armé résistant au moment   | 0.0466 | 0.9  |
| Portique en acier à triangulations excentrées  | 0.0731 | 0.75 |
| Pour tout les autres structures  | 0.0488 | 0.75 |

**Tableau 1.2 :** Valeurs des paramètres  $C_t$  et  $x$ .

D'autre part, pour les portiques résistant aux moments ne dépassant pas 12 niveaux avec une hauteur d'étage supérieur à 3.04 m, la période fondamentale peut être déterminée par :

$$T = 0.1 N \quad (1.18)$$

Avec :

$N$  : Nombre de niveaux ;

Aussi, la période fondamentale pour des structures en murs de maçonnerie ou en voiles en béton armé peut être déterminée à partir de l'équation suivante :

$$T = \frac{0.0019}{\sqrt{C_w}} h_n \quad (1.19)$$

Où :

$h_n$  : Est la hauteur de la structure en mètres, et  $C_w$  est calculé par l'équation suivante :

$$C_w = \frac{100}{A_B} \sum_{i=1}^x \left( \frac{h_n}{h_i} \right)^2 \frac{A_i}{\left[ 1 + 0.83 \left( \frac{h_i}{D_i} \right)^2 \right]} \quad (1.20)$$

Où :

$A_B$  : Aire de la base de la structure, ( $m^2$ ) ;

$A_i$  : Aire latérale du mur voile  $i$ , ( $m^2$ ) ;

$D_i$  : Longueur d mur voile,  $i$ , ( $m$ ) ;

$h_i$  : Hauteur du mur voile  $i$ , ( $m$ ) ;

$x$  : Nombre de mur voile dans la structure résistant aux forces latérales dans la direction considérée ;

### 1.8. Récapitulatif des formules empiriques exposées dans ce chapitre

Le tableau 1.3 donne une synthèse des formules empiriques donnant la période fondamentale d'une structure dans les différents codes vus précédemment.

| Typologies<br>Codes      | PBA                         | PBA/RM                           | PA                          | PA/RM                      | PAE                              | VBA/M   | Autre                        |
|--------------------------|-----------------------------|----------------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------------|---|------------------------------|
| <b>RPA 99<br/>v.2003</b> | $T = C_t h_n^x$             |                                  |                             |                            |                                  |   | —                            |
|                          | $C_t = 0.075$<br>$x = 0.75$ | $C_t = 0.05$<br>$x = 0.75$       | $C_t = 0.085$<br>$x = 0.75$ | $C_t = 0.05$<br>$x = 0.75$ |                                  |   | —                            |
|                          | —                           | ou,<br>$T = 0.09 h_n / \sqrt{D}$ |                             | —                          | ou,<br>$T = 0.09 h_n / \sqrt{D}$ |   | —                            |
| <b>EC 8,<br/>UBC 97</b>  | $T = C_t h_n^x$             |                                  |                             |                            |                                  |   |                              |
|                          | $C_t = 0.075$<br>$x = 0.75$ |                                  | $C_t = 0.085$<br>$x = 0.75$ |                            | $C_t = 0.075$<br>$x = 0.75$      | $C_t = 0.05$ , ou<br>$C_t = 0.075 / \sqrt{A_c}$<br>$x = 0.75$ | $C_t = 0.05$                 |
| <b>ASCE 7-05</b>         | $T = C_t h_n^x$             |                                  |                             |                            |                                  |   |                              |
|                          | $C_t = 0.0466$<br>$x = 0.9$ |                                  | $C_t = 0.0724$<br>$x = 0.8$ |                            | $C_t = 0.075$<br>$x = 0.75$      | $C_t = 0.0488$<br>$x = 0.75$                                  | $C_t = 0.0488$<br>$x = 0.75$ |
|                          | ou,<br>$T = 0.10 N$         |                                  |                             |                            | —                                | ou,<br>$T = 0.0019 h_n / \sqrt{C_w}$                          |                              |
| <b>NBCC 95</b>           | $T = C_t h_n^x$             |                                  |                             |                            |                                  |   | $T = 0.09 h_n / \sqrt{D}$    |
|                          | $C_t = 0.075$<br>$x = 0.75$ |                                  | $C_t = 0.085$<br>$x = 0.75$ |                            |                                  |   |                              |
|                          | ou,<br>$T = 0.10 N$         |                                  |                             |                            | —                                |   | —                            |

#### Avec la typologie des structures suivantes :

**PBA** : Portique en béton armé sans remplissage en maçonnerie.

**PBA/RM** : Portique en béton armé avec remplissage en maçonnerie.

**PA** : Portique en acier sans remplissage en maçonnerie.

**PA/RM** : Portique en acier avec remplissage en maçonnerie.

**PAE** : Portique en acier à triangulations excentrées.

**VBA/M** : Voile en béton armé ou murs en maçonnerie.

**Tableau 1.3 :** Formules empiriques proposées par les codes parasismiques.

D'après les différents règlements parasismiques cités précédemment, nous constatons que les formules empiriques diffèrent d'un règlement à un autre, et sont généralement fonction de la hauteur et des dimensions en plans dans la direction de l'action sismique, à l'exception de certain types de structures notamment celles contreventées par des voiles aux quelles on associe d'autres paramètres (telles que les dimensions des voiles dans le sens considéré).

Le type de formule ( $T = C_t h_n^x$ ) est utilisé dans de nombreux codes parasismiques. Différentes valeurs des coefficients ( $C_t$ ) et ( $x$ ) sont données selon les codes et les types de bâtiments. L'UBC 97, l'Eurocode 8 et le NBCC 95 utilisent ( $C_t = 0.075$ ) et ( $x = 0.75$ ) pour les bâtiments en portiques en béton armé, l'Eurocode 8 limitant l'emploi de cette formule aux bâtiments de hauteur supérieure à 40m. Tandis que le code ASCE 7-05 utilise d'autres valeurs de ces coefficients sont ( $C_t = 0.0466$ ) et ( $x = 0.9$ ).

Par contre, le code RPA 99/ V 2003 est beaucoup plus explicite sur la valeur du coefficient ( $C_t$ ) à utiliser pour les bâtiments en portiques en béton armé avec ou sans remplissage en maçonnerie, et propose ( $C_t = 0.075$ ) et ( $x = 0.75$ ) pour les portiques sans remplissage en maçonnerie, et ( $C_t = 0.05$ ) et ( $x = 0.75$ ) pour les bâtiments en portiques avec des remplissages en maçonnerie, alors que les autres codes (tels que l'Eurocode 8, l'UBC 97 et le NBCC 95) utilisent la même valeur du coefficient ( $C_t$ ) pour le même type de structure indépendamment des détails sur les remplissages en maçonnerie.

## Chapitre 2

---

Impact des périodes propres fondamentales sur le dimensionnement parasismique des bâtiments

## 2.1. Introduction

Après le parcours des formules forfaitaires, donnant la période fondamentale d'une structure, précisées dans les différents règlements parasismiques à travers le monde, nous avons constaté que ces formules diffèrent d'un règlement à un autre, même pour un même type de structure.

Cependant, cette différence entre ces formules empiriques peut avoir un impact significatif sur les forces sismiques sollicitant la structure et conduire ainsi à de différents dimensionnement de celle-ci.

Ce chapitre a pour but d'évaluer l'impact des périodes fondamentales proposées par les différents règlements parasismiques sur le dimensionnement des structures en portique en béton armé.

Pour cela nous allons étudier deux cas de structures de bâtiment en portique auto-stable en béton armé, en considérant plusieurs formules empiriques pour l'estimation de la période propre fondamentale, proposées par les règlements sismiques RPA 99/ V 2003, l'Eurocode 8 et le code américain ASCE 7-05.

Cependant, l'addenda du règlement parasismique algérien (RPA, 2003) a introduit des limitations de hauteur pour ce genre de structures tel que les bâtiments concernés ne doivent pas, par ailleurs, dépasser cinq (05) niveaux ou dix sept (17) mètres en zone I, quatre (04) niveaux ou quatorze (14) mètres en zone IIa, trois (03) niveaux ou onze (11) mètres en zone IIb et deux (02) niveaux ou (08) mètres en zone III. Par contre, l'Eurocode 8 et le code américain ASCE 7-05 n'exigent aucune limitation de hauteur pour ce type de structures toute en respectant des conditions particulières sur les dispositions constructives et la qualité des matériaux utilisés, pour avoir une ductilité suffisante qui permet des dissipations d'énergie et de limiter le risque de rupture brutale.

L'Eurocode 8 introduit 3 classes de ductilité des structures :

- **DCL** (ductilité limitée) : emploi limité aux zones de faible sismicité.
- **DCM** (ductilité moyenne) : Il s'agit de la classe de ductilité la plus fréquente. Ce niveau de ductilité est obtenu en respectant des conditions minimales sur les matériaux et sur les dispositions constructives.
- **DCH** (haute ductilité) : Niveau de ductilité le plus élevé. Les conditions minimales sur les matériaux, ainsi que les dispositions constructives minimales sont beaucoup plus sévères que pour la classe DCM. Ce niveau de ductilité nécessite l'usage d'une quantité d'armatures beaucoup plus importante que pour la classe DCM.

A l'instar de l'Eurocode 8, le code américain ASCE 7-05 précise aussi les dispositions constructives à respecter et les vérifications à effectuer en fonction des matériaux utilisés, permettant ainsi à la structure d'avoir une grande capacité de dissipation d'énergie sous forme de déformations plastiques.

Afin de lever cette ambiguïté, nous avons considéré deux bâtiments de même dimensions en plan et de nombre d'étages différents : bâtiment en rez-de-chaussée plus 5 étages (R+5) et bâtiment en rez-de-chaussée plus 8 étages (R+8). Le dimensionnement est effectué selon le code de calcul de béton armé aux états limites (BAEL 91), et le règlement parasismique algérien (RPA, 2003) sur la base d'une analyse par la méthode statique équivalente, en considérant quatre formules empiriques pour le calcul de la période propre fondamentale, proposées par les règlements sismiques RPA 99/ V 2003, l'Eurocode 8 et le code américain ASCE 7-05.

Le dimensionnement consiste en le calcul des sections d'armatures longitudinales et transversales des éléments structuraux (poutres et poteaux) sur la base des sollicitations obtenues en considérant chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés. S'ensuit une vérification des contraintes admissibles dans les éléments structuraux.

## **2.2. Présentation et description des structures**

Les structures étudiées sont des bâtiments en (R+5) et (R+8) symétriques et régulières, l'ossature est en portiques auto-stables en béton armé avec des remplissages en maçonnerie, et des dalles en corps creux de (16+4). Ces bâtiments possèdent quatre travées dans les deux directions orthogonales avec un espacement uniforme de 4.50 m, et une hauteur d'étage uniforme de 3.06 m à l'exception du premier niveau qui a une hauteur de 4.00 m (figures 2.1 et 2.2).

Les deux bâtiments sont supposés être localisés dans une zone sismique III (forte sismicité) selon la classification du RPA 99 / version 2003 [2], implantés sur un sol de fondation supposé être ferme, sol de type  $S_2$  selon le même code.

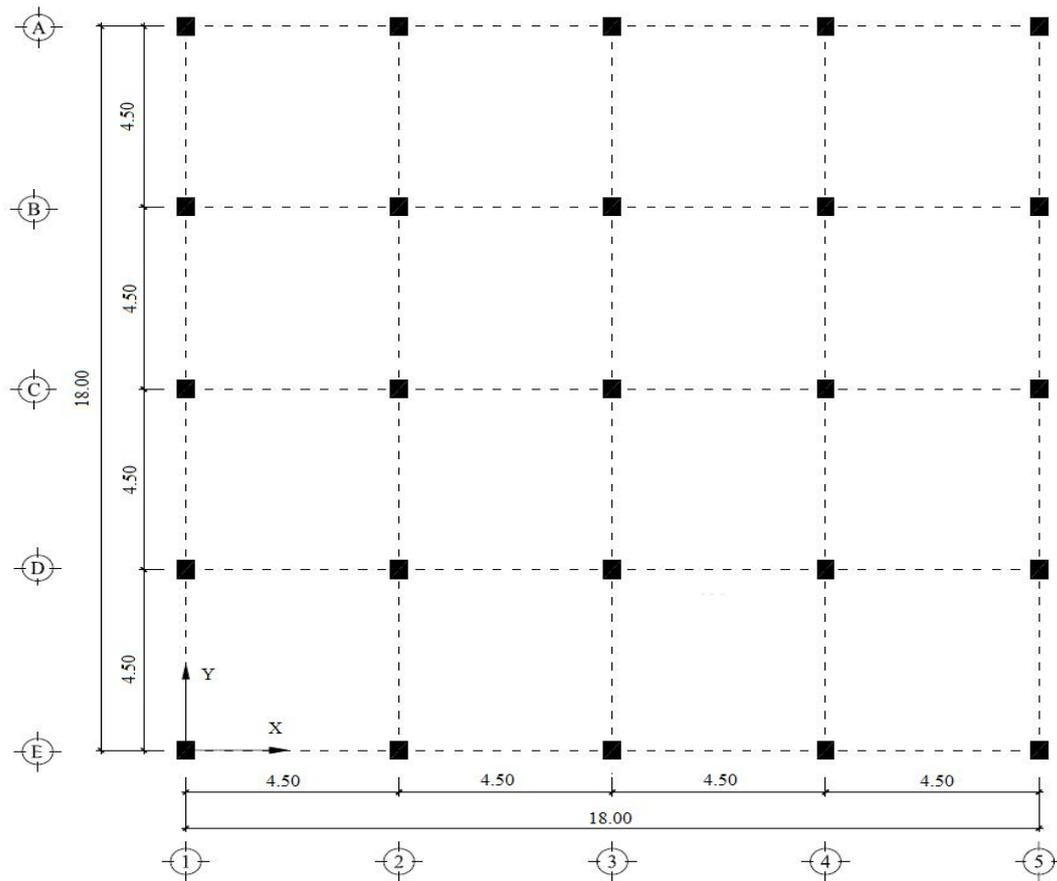
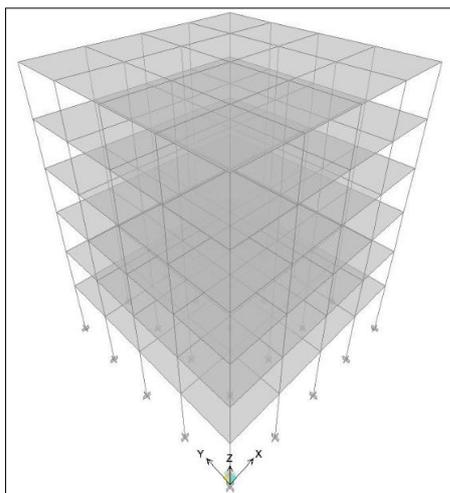
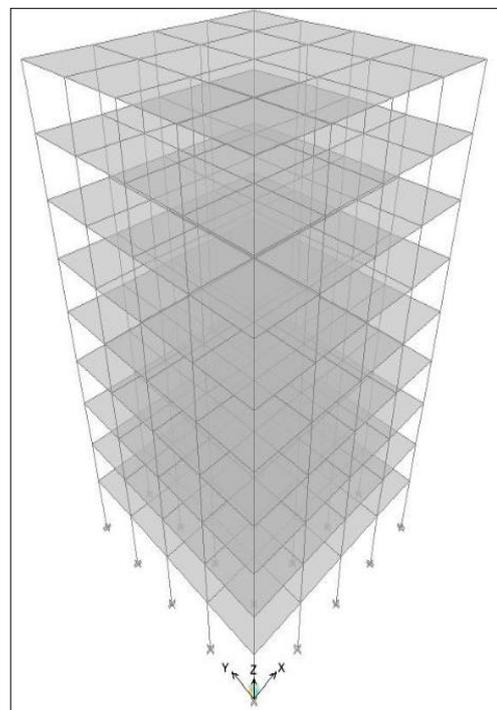


Figure 2.1 : Dimensions en plan des deux bâtiments.



(a) bâtiment en (R+5)



(b) bâtiment en (R+8)

Figure 2.2 : Vues en 3D des deux bâtiments.

### 2.3. Caractéristiques mécaniques des matériaux

- **Le béton :**

- Résistance à la compression.....  $f_{c28} = 25 \text{ Mpa}$
- Résistance à la traction.....  $f_{t28} = 2.1 \text{ Mpa}$
- Module d'élasticité.....  $E = 32164.2 \text{ Mpa}$

- **L'acier :**

- La limite élastique .....  $f_y = 400 \text{ Mpa}$
- Module d'élasticité.....  $E = 210000 \text{ Mpa}$

### 2.4. Charges gravitaires

Les charges gravitaires considérées sont les charges permanentes (G) et d'exploitations (Q), et elles sont évaluées comme suit :

- **Charges permanentes :**

- Plancher terrasse :  $G = 5.83 \text{ KN/m}^2$
- Plancher étage courant :  $G = 5.56 \text{ KN/m}^2$

- **Charges d'exploitations :**

- Plancher terrasse :  $Q = 1 \text{ KN/m}^2$
- Plancher étage courant :  $Q = 1.5 \text{ KN/m}^2$

### 2.5. Pré dimensionnement des sections de béton pour les poutres et les poteaux

Les sections de béton adoptées pour les poutres et les poteaux des deux bâtiments sont résumées dans le tableau 2.1.

| Bâtiments | Poteaux (cm <sup>2</sup> )  | Poutres principales (cm <sup>2</sup> ) | Poutres secondaires (cm <sup>2</sup> ) |
|-----------|---|--|--|
| (R+5)     | Niveaux 1 et 2 : (45 x 45)<br>Niveaux 3 et 4 : (40 x 40)<br>Niveaux 5 et 6 : (35 x 35)                                  | (30 x 45)                              | (30 x 40)                              |
| (R+8)     | Niveaux 1, 2 et 3 : (60 x 60)<br>Niveaux 4 et 5 : (50 x 50)<br>Niveaux 6 et 7 : (40 x 40)<br>Niveaux 8 et 9 : (35 x 35) | (30 x 45)                              | (30 x 40)                              |

**Tableau 2.1 :** Dimensions des sections de béton des poutres et des poteaux des deux bâtiments.

## 2.6. Charges sismiques

Les charges sismiques sont des forces latérales, appliquées aux niveaux des planchers dans les deux directions orthogonales. Ces forces latérales sont déterminées par la méthode statique équivalente présentée dans les RPA 99/ V 2003 [2].

### 2.6.1. Aperçu sur la méthode statique équivalente présentée dans le RPA 99/V 2003

#### a) Principe

Les forces réelles dynamiques qui se développent dans la construction sont remplacées par un système de forces statiques fictives dont les effets sont considérés équivalents à ceux de l'action sismique.

Le mouvement du sol peut se faire dans une direction quelconque dans le plan horizontal. Les forces sismiques horizontales équivalentes seront considérées appliquées successivement suivant deux directions orthogonales caractéristiques choisies par le projeteur. Dans le cas général, ces deux directions sont les axes principaux du plan horizontal de la structure.

#### b) Modélisation

- Le modèle du bâtiment à utiliser dans chacune des deux directions de calcul est plan avec les masses concentrées au centre de gravité des planchers et un seul degré de liberté en translation horizontale par niveau sous réserve que les systèmes de contreventement dans les deux directions puissent être découplés.
- La rigidité latérale des éléments porteurs du système de contreventement est calculée à partir de sections non fissurées pour les structures en béton armé ou en maçonnerie.
- Seul le mode fondamental de vibration de la structure est à considérer dans le calcul de la force sismique totale.

#### c) Condition d'application de la méthode statique équivalente

Le bâtiment doit satisfaire aux conditions de régularité en plan et en élévation, avec une hauteur au plus égale à 65m en zones I et II et 30m en zone II<sub>b</sub> et III.

- **Régularité en plan :**

- 1- Le bâtiment présente sensiblement une symétrie orthogonale aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celle des masses.
- 2- A chaque niveau et pour chaque direction de calcul, la distance entre le centre de gravité et le centre de masses ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.

- 3- La forme du bâtiment doit être compacte avec un rapport (longueur/largeur) du plancher inférieure à 4.
- 4- La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes du bâtiment dans une direction donnée ne doit pas excéder 25% de la dimension totale du bâtiment dans cette direction.
- 5- Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis-à-vis de celle des contreventements verticaux pour être considéré comme indéformables dans leur plan. Pour cela la surface totale des ouvertures de plancher doit rester inférieure à 15% de celle de ce dernier.

• **Régularité en élévation :**

- 1- Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmette pas directement à la fondation.
- 2- Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement, sans changement brusque, de la base au sommet du bâtiment.
- 3- Dans le cas de décrochement en élévation, la variation des dimensions en plan du bâtiment entre deux niveaux successifs ne dépasse pas 20% dans les deux directions de calcul et ne s'effectue que dans le sens d'une diminution avec la hauteur. La plus grande dimension latérale du bâtiment n'excède pas 1.5 fois sa plus petite dimension.

*d) Calcul de la force sismique totale à la base*

La force sismique totale «  $V$  », appliquée à la base de la structure, doit être calculée successivement dans deux directions horizontales et orthogonales, selon la formule suivante :

$$V = \frac{A \cdot D \cdot Q}{R} W \quad (2.1)$$

$A$  : Coefficient d'accélération de zone.

$D$  : Facteur d'amplification dynamique moyen.

$Q$  : Facteur de qualité.

$R$  : Coefficient de comportement global de la structure.

$W$  : Poids total de la structure.

$A$  : Donné par le tableau 4.1 (RPA 99/ V 2003) suivant la zone sismique et le groupe d'usage du bâtiment.

$D$  : En fonction de la catégorie du site, du facteur de correction d'amortissement  $\eta$  et de la période fondamentale ( $T$ ) de la structure.

$$D = \begin{cases} 2.5\eta & 0 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta (T_2/T)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta (T_2/3.0)^{\frac{2}{3}} (3.0/T)^{\frac{5}{3}} & T \geq 3.0s \end{cases} \quad (2.2)$$

$\eta$  : Facteur de correction d'amortissement donné par la formule suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{(2 + \xi)}} \geq 0.7 \quad (2.3)$$

$\xi$  (%) : Le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

$T_2$  : Période caractéristique, associée à la catégorie du site donnée par le tableau 4.7 (RPA 99/ V 2003).

$T$  : Période fondamentale de la structure qui peut être estimée à partir de formules empiriques ou calculée par des méthodes analytiques ou numériques.

$R$  : Dépend du système de contreventement sa valeur est donnée par le tableau 4.3 (RPA 99/ V 2003).

Le facteur de qualité de la structure  $Q$  est en fonction de :

- La redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent la structure.
- La régularité en plan et en élévation.
- Contrôle de la qualité des matériaux.
- La qualité du contrôle de la construction.

La valeur de  $Q$  est déterminée par la formule suivante:

$$Q = 1 + \sum_1^5 P_q \quad (2.4)$$

$P_q$  : Pénalité à retenir selon que le critère de qualité  $q$  est satisfait ou non. Sa valeur est donnée au tableau 4.4 (RPA 99/ V 2003).

$W$  : Est égal à la somme des poids  $w_i$ , calculés à chaque niveau ( $i$ ) :

$$W = \sum_{i=1}^n w_i \quad (2.5)$$

Avec :

$$w_i = w_{Gi} + \beta w_{Qi} \quad (2.6)$$

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

$w_{Qi}$  : Charges d'exploitations.

$\beta$  : Coefficient de pondération, fonction de la nature et de la durée de la charge d'exploitation et donné par le tableau 4.5 (RPA 99/ V 2003).

***e) Distribution de la résultante des forces selon la hauteur***

La résultante des forces sismiques à la base  $V$  doit être distribuée sur la hauteur de la structure selon les formules suivantes :

$$V = F_t + \sum F_i \quad (2.7)$$

$F_t$  : Force concentrée au sommet de la structure (figure 3.3) permet de tenir compte de l'influence des modes supérieurs de vibration, sa valeur ne dépassera en aucun cas  $0.25 V$ , et déterminée par :

$$F_t = \begin{cases} 0.07 T V & \text{si } T > 0.7s \\ 0 & \text{si } T \leq 0.7s \end{cases} \quad (2.8)$$

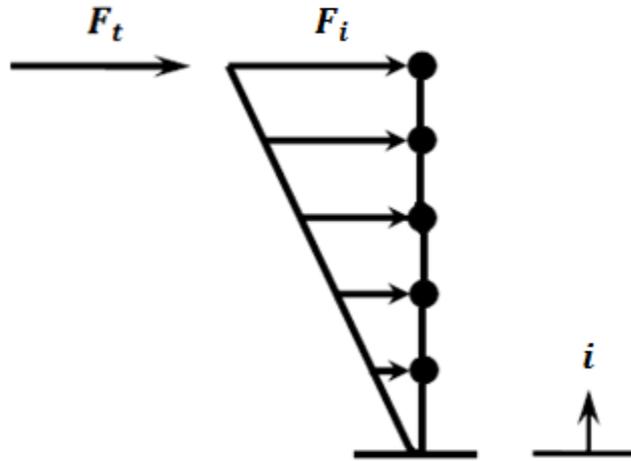
$T$  : Période fondamentale de la structure.

$$F_i = \frac{(V - F_t) w_i h_i}{\sum_{j=1}^n w_j h_j} \quad (2.9)$$

$F_i$  : Effort horizontal revenant au niveau  $i$ .

$h_i$  : Niveau du plancher où s'exerce la force  $F_i$ .

$w_i$  : Poids revenant aux planchers  $i$ .



**Figure 2.3 :** Distribution de la résultante des forces sur les différents niveaux.

*f) Distribution horizontale des forces sismiques*

L'effort tranchant au niveau de l'étage  $k$  :

$$V_k = F_t + \sum_{i=k}^n F_i \tag{2.10}$$

**2.6.2. Application de la méthode sur les bâtiments**

Dans notre cas, les bâtiments étudiés présentent des configurations symétriques vis-à-vis les deux directions orthogonales, aussi bien pour la distribution des masses que celle des rigidités (bâtiments réguliers), donc la méthode statique équivalente est applicable.

Les formules empiriques utilisées dans cette étude pour estimer la période fondamentale de vibration sont données dans le tableau 2.2.

| Codes       | Formules empiriques                                     | Système de contreventement   |
|-------------|---|--|
| RPA 99/2003 | $T(1) = 0.05 h_n^{3/4}$<br>$T(2) = 0.09 h_n / \sqrt{D}$ | Portiques auto-stables en béton armé avec remplissage en maçonnerie. |
| Eurocode 8  | $T = 0.075 h_n^{3/4}$                                   | Portiques spatiaux en béton armé.                                    |
| ASCE 7-05   | $T = 0.0466 h_n^{0.9}$                                  | Portiques en béton armé.   |

**Tableau 2.2 :** Formules empiriques utilisées dans cette étude.

### 2.6.2.1. Modélisation

La structure de chaque bâtiment est modélisée comme une console verticale encadrée à la base, dont les masses sont concentrées au niveau du centre de masse de chaque plancher des bâtiments.

Ce modèle est basé sur l'hypothèse selon laquelle les planchers sont supposés infiniment rigides dans leurs plans. Les degrés de liberté considérés, sous séisme horizontale, sont les déplacements horizontaux des planchers dans les deux directions orthogonales des bâtiments.

### 2.6.2.2. Calcul des forces sismiques totales à la base

#### a) Bâtiment en (R+5)

Les résultats de calcul des forces sismiques totales «  $V$  » à la base obtenues par chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont donnés dans le tableau 2.3.

| Codes      | Période (s) | $W(KN)$ | $V (KN)$ |
|------------|-------------|---------|----------|
| RPA (T1)   | 0.460       | 15525   | 2124.78  |
| RPA (T2)   | 0.410       | 15525   | 2304.34  |
| Eurocode 8 | 0.690       | 15525   | 1616.03  |
| ASCE 7-05  | 0.668       | 15525   | 1675.88  |

**Tableau 2.3 :** Forces sismiques totales à la base du bâtiment en (R+5).

#### b) Bâtiment en (R+8)

Les résultats de calcul des forces sismiques totales «  $V$  » à la base obtenues par chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont donnés dans le tableau 2.4.

| Codes      | Période (s) | $W(KN)$ | $V (KN)$ |
|------------|-------------|---------|----------|
| RPA (T1)   | 0.616       | 24609   | 2762.42  |
| RPA (T2)   | 0.604       | 24609   | 2809.64  |
| Eurocode 8 | 0.924       | 24609   | 2262.38  |
| ASCE 7-05  | 0.949       | 24609   | 2190.65  |

**Tableau 2.4 :** Forces sismiques totales à la base du bâtiment en (R+8).

L'examen des résultats de calcul des périodes propres et des forces sismiques totales à la base des deux bâtiments considérés, nous permet de faire les observations suivantes :

- La force sismique totale à la base d'un bâtiment est inversement proportionnelle à sa période fondamentale de vibration.

- Les périodes fondamentales obtenues par les formules RPA 99/ V 2003 sont plus faibles par rapport à celles résultants des formules de l’Eurocode 8 et du code américain ASCE 7-05. Soit une réduction moyenne de **55%** pour le bâtiment en (R+5) et de **53%** pour le bâtiment en (R+8).
- Les forces sismiques totales à la base résultants de l’utilisation des formules du RPA99/V 2003 sont plus élevés que celles obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation moyenne de **34%** pour le bâtiment en (R+5) et de **24%** pour le bâtiment en (R+8).

### 2.6.2.3. Distribution des résultantes des forces selon la hauteur

#### a) Bâtiment en (R+5)

Les forces sismiques «  $F_i$  » et les efforts tranchants «  $V_k$  » de niveau obtenues par chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont résumés dans le tableau 2.5.

| Niveaux | RPA (T1)   |            | RPA (T2)   |            | Eurocode 8 |            | ASCE 7-05  |            |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|         | $F_i$ (KN) | $V_k$ (KN) |
| 6       | 567.23     | 567.23     | 614.17     | 614.17     | 431.42     | 431.42     | 447.39     | 447.39     |
| 5       | 489.77     | 1057.00    | 531.15     | 1145.32    | 372.49     | 803.91     | 386.30     | 833.69     |
| 4       | 402.28     | 1459.28    | 436.28     | 1581.60    | 305.96     | 1109.87    | 317.29     | 1150.98    |
| 3       | 313.37     | 1772.65    | 339.86     | 1921.46    | 238.35     | 1348.22    | 247.17     | 1398.15    |
| 2       | 221.62     | 1994.27    | 240.34     | 2161.80    | 168.55     | 1516.77    | 147.79     | 1572.94    |
| 1       | 130.51     | 2124.78    | 141.54     | 2303.34    | 99.26      | 1616.03    | 102.94     | 1675.88    |

**Tableau 2.5 :** Forces sismiques et efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+5).

#### b) Bâtiment en (R+8)

Les forces sismiques «  $F_i$  » et les efforts tranchants «  $V_k$  » de niveau obtenues par chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont résumés dans le tableau 2.6.

| Niveaux | RPA (T1)   |            | RPA (T2)   |            | Eurocode 8 |            | ASCE 7-05  |            |
|---------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
|         | $F_i$ (KN) | $V_k$ (KN) |
| 9       | 505.19     | 505.19     | 513.83     | 513.83     | 526.05     | 526.05     | 512.11     | 512.11     |
| 8       | 462.70     | 967.89     | 470.60     | 984.43     | 355.92     | 881.97     | 344.05     | 856.16     |
| 7       | 411.91     | 1379.80    | 418.96     | 1403.39    | 316.85     | 1198.82    | 306.32     | 1162.48    |
| 6       | 360.71     | 1740.51    | 366.87     | 1770.26    | 277.47     | 1476.29    | 268.19     | 1430.67    |
| 5       | 312.40     | 2052.91    | 317.75     | 2088.01    | 240.31     | 1716.60    | 232.31     | 1662.98    |
| 4       | 262.01     | 2314.92    | 266.48     | 2354.49    | 201.55     | 1918.15    | 194.82     | 1857.80    |
| 3       | 208.16     | 2523.08    | 211.72     | 2566.21    | 160.12     | 2078.27    | 154.79     | 2012.59    |
| 2       | 150.76     | 2673.84    | 153.34     | 2719.55    | 115.97     | 2194.24    | 112.10     | 2124.69    |
| 1       | 88.58      | 2762.42    | 90.09      | 2809.64    | 68.14      | 2262.38    | 65.87      | 2190.56    |

**Tableau 2.6 :** Forces sismiques et efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+8).

#### 2.6.2.4. Comparaison entre les efforts tranchants de niveau « $V_k$ »

Dans ce paragraphe, nous effectuons une comparaison des efforts tranchants de niveau «  $V_k$  » obtenus par les formules du RPA 99 et ceux issus des formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05.

| Niveaux | $\frac{V_{kRPA(T1)}}{V_{kEurocode\ 8}}$ | $\frac{V_{kRPA(T1)}}{V_{kASCE\ 7-05}}$ | $\frac{V_{kRPA(T2)}}{V_{kEurocode\ 8}}$ | $\frac{V_{kRPA(T2)}}{V_{kASCE\ 7-05}}$ |
|---------|---|--|---|--|
| 6       | 1.31                                    | 1.26                                   | 1.42                                    | 1.37                                   |
| 5       | 1.31                                    | 1.26                                   | 1.42                                    | 1.37                                   |
| 4       | 1.31                                    | 1.26                                   | 1.42                                    | 1.37                                   |
| 3       | 1.31                                    | 1.26                                   | 1.42                                    | 1.37                                   |
| 2       | 1.31                                    | 1.26                                   | 1.42                                    | 1.37                                   |
| 1       | 1.31                                    | 1.26                                   | 1.42                                    | 1.37                                   |

**Tableau 2.7 :** Comparaison entre les efforts tranchants de niveau «  $V_k$  » du bâtiment en (R+5).

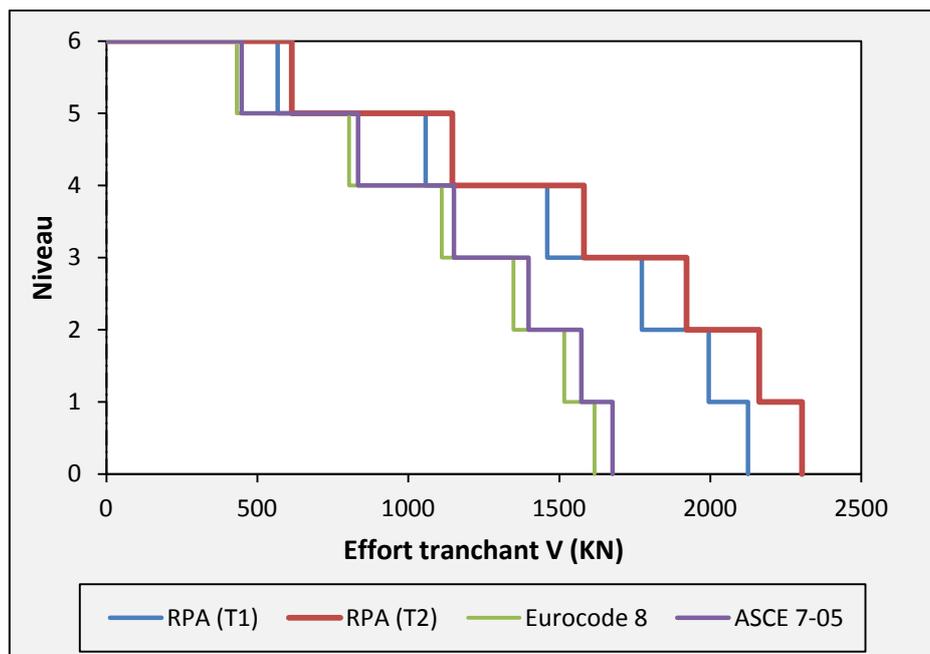
| Niveaux | $\frac{V_{kRPA(T1)}}{V_{kEurocode\ 8}}$ | $\frac{V_{kRPA(T1)}}{V_{kASCE\ 7-05}}$ | $\frac{V_{kRPA(T2)}}{V_{kEurocode\ 8}}$ | $\frac{V_{kRPA(T2)}}{V_{kASCE\ 7-05}}$ |
|---------|---|--|---|--|
| 9       | 0.96                                    | 0.98                                   | 0.97                                    | 1.00                                   |
| 8       | 1.09                                    | 1.13                                   | 1.11                                    | 1.15                                   |
| 7       | 1.15                                    | 1.18                                   | 1.17                                    | 1.20                                   |
| 6       | 1.17                                    | 1.21                                   | 1.19                                    | 1.23                                   |
| 5       | 1.19                                    | 1.23                                   | 1.21                                    | 1.25                                   |
| 4       | 1.20                                    | 1.24                                   | 1.22                                    | 1.26                                   |
| 3       | 1.21                                    | 1.25                                   | 1.23                                    | 1.27                                   |
| 2       | 1.21                                    | 1.25                                   | 1.24                                    | 1.28                                   |
| 1       | 1.22                                    | 1.26                                   | 1.24                                    | 1.28                                   |

**Tableau 2.8 :** Comparaison entre les efforts tranchants de niveau «  $V_k$  » du bâtiment en (R+8).

Nous constatons que les efforts tranchants de niveau «  $V_k$  » obtenus en considérant les formules du RPA 99/ V 2003 sont plus importants que ceux résultants de l’utilisation des formules de l’Eurocode 8 et du code américain ASCE 7-05. Soit une augmentation de l’ordre de **26% à 42%** pour le bâtiment en (R+5) (tableau 2.7) et de l’ordre de **9% à 28%** pour le bâtiment en (R+8) (tableau 2.8).

**2.6.2.5. Diagrammes des efforts tranchants de niveau «  $V_k$  »**

Pour mieux apprécier l’influence de la valeur de la période fondamentale sur l’effort tranchant de niveau «  $V_k$  », nous traçons les diagrammes des efforts tranchants de niveau des deux bâtiments, correspondant à chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés, (figures 2.4, et 2.5).



**Figure 2.4 :** Diagrammes des efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+5).

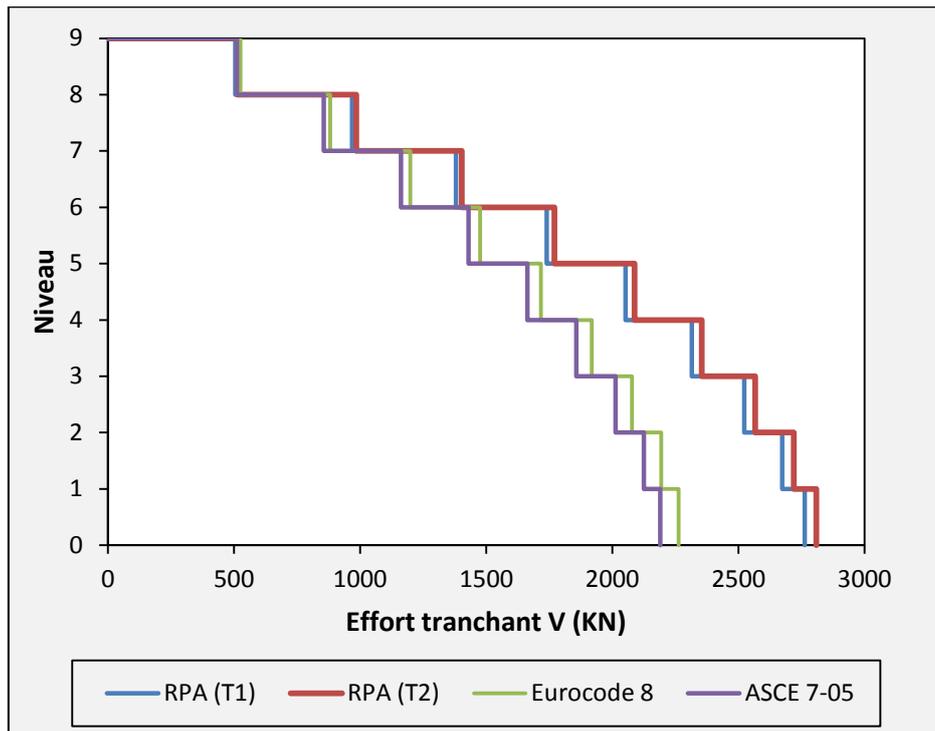


Figure 2.5 : Diagrammes des efforts tranchants de niveau du bâtiment en (R+8).

## 2.7. Vérification aux exigences du RPA 99/ V 2003

### 2.7.1. Vérification de l'effort normale réduit

Le RPA 99/V 2003, **Art 7.4.3.1**, stipule que dans le but d'éviter ou limiter le risque de rupture fragile sous sollicitations d'ensemble dues au séisme, l'effort normal de compression de calcul, noté «  $N_d$  », exprimé sous forme réduite (effort normal réduit,  $\nu$ ), est limité par la condition suivante :

$$\nu = \frac{N_d}{B_c f_{c28}} \leq 0.30 \quad (2.11)$$

Où,  $B_c$  : Section de béton du poteau.

$f_{c28}$  : Résistance caractéristique à la compression du béton.

Tous les résultats de calcul sont résumés dans le tableau 2.9 pour le bâtiments en (R+5), et tableau 2.10 pour le bâtiment en (R+8).

| Etages         | $B_c (cm^2)$ | $N_d (KN)$ | $\nu$ | Observation |
|----------------|--------------|------------|-------|-------------|
| RDC et étage 1 | 45 x 45      | 1410.22    | 0.28  | vérifiée    |
| Etages 2 et 3  | 40 x 40      | 926.86     | 0.23  | vérifiée    |
| Etages 4 et 5  | 35 x 35      | 456.84     | 0.15  | vérifiée    |

Tableau 2.9 : Vérification de l'effort normal réduit pour le bâtiment en (R+5).

| Etages               | $B_c (cm^2)$ | $N_d (KN)$ | $\nu$ | Observation |
|----------------------|--------------|------------|-------|-------------|
| RDC et étages 1 et 2 | 60 x 60      | 2182.92    | 0.27  | vérifiée    |
| Etages 3 et 4        | 50 x 50      | 1410.33    | 0.23  | vérifiée    |
| Etages 5 et 6        | 40 x 40      | 925.62     | 0.23  | vérifiée    |
| Etages 7 et 8        | 35 x 35      | 456.75     | 0.15  | vérifiée    |

**Tableau 2.10 :** Vérification de l'effort normal réduit pour le bâtiment en (R+8).

### 2.7.2. Justification vis à vis des déformations

Selon le RPA99/V 2003, **Art 5.10**, les déplacements relatifs latéraux d'un étage par rapport aux étages qui lui sont adjacents, ne doivent pas dépasser **1%** de la hauteur de l'étage.

Le déplacement relatif au niveau "k" par rapport au niveau "k - 1" est égale, selon le RPA99/V 2003, **Art 4.4.3**, à :

$$\Delta_k = \delta_k - \delta_{k-1} \tag{2.12}$$

$$\delta_k = R \delta_{ek} \tag{2.13}$$

Où,

$\delta_{ek}$  : Déplacement dû aux forces sismiques  $F_i$ .

$R$  : Coefficient de comportement.

#### a) Bâtiment en (R+5)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Niveaux | $\delta_{ek} (cm)$       |                          | $R$ | $R \times \delta_{ek} (cm)$ |                         | $\Delta_k (cm)$ |               | $h_k (cm)$ | $1\%h_k (cm)$ |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx}$ (sens xx) | $\delta_{eky}$ (sens yy) |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 6       | 3.22                     | 2.62                     | 3.5 | 11.27                       | 9.17                    | 0.95            | 0.77          | 306        | 3.06          |
| 5       | 2.95                     | 2.40                     | 3.5 | 10.32                       | 8.40                    | 1.64            | 1.37          | 306        | 3.06          |
| 4       | 2.48                     | 2.01                     | 3.5 | 8.68                        | 7.03                    | 1.89            | 1.50          | 306        | 3.06          |
| 3       | 1.94                     | 1.58                     | 3.5 | 6.79                        | 5.53                    | 2.24            | 1.79          | 306        | 3.06          |
| 2       | 1.30                     | 1.07                     | 3.5 | 4.55                        | 3.74                    | 2.21            | 1.71          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.67                     | 0.58                     | 3.5 | 2.34                        | 2.03                    | 2.34            | 2.03          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.11 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5) obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Niveaux | $\delta_{ek}$ (cm)       |                          | R   | $R \times \delta_{ek}$ (cm) |                         | $\Delta_k$ (cm) |               | $h_k$ (cm) | 1% $h_k$ (cm) |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx}$ (sens xx) | $\delta_{eky}$ (sens yy) |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 6       | 3.49                     | 2.84                     | 3.5 | 12.21                       | 9.94                    | 1.01            | 0.84          | 306        | 3.06          |
| 5       | 3.20                     | 2.60                     | 3.5 | 11.20                       | 9.10                    | 1.79            | 1.47          | 306        | 3.06          |
| 4       | 2.69                     | 2.18                     | 3.5 | 9.41                        | 7.63                    | 2.06            | 1.65          | 306        | 3.06          |
| 3       | 2.10                     | 1.71                     | 3.5 | 7.35                        | 5.98                    | 2.42            | 1.92          | 306        | 3.06          |
| 2       | 1.41                     | 1.16                     | 3.5 | 4.93                        | 4.06                    | 2.38            | 1.86          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.73                     | 0.63                     | 3.5 | 2.55                        | 2.20                    | 2.55            | 2.20          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.12 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5) obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Niveaux | $\delta_{ek}$ (cm)       |                          | R   | $R \times \delta_{ek}$ (cm) |                         | $\Delta_k$ (cm) |               | $h_k$ (cm) | 1% $h_k$ (cm) |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx}$ (sens xx) | $\delta_{eky}$ (sens yy) |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 6       | 2.45                     | 1.99                     | 3.5 | 8.57                        | 6.96                    | 0.73            | 0.59          | 306        | 3.06          |
| 5       | 2.24                     | 1.82                     | 3.5 | 7.84                        | 6.37                    | 1.26            | 1.02          | 306        | 3.06          |
| 4       | 1.88                     | 1.53                     | 3.5 | 6.58                        | 5.35                    | 1.44            | 1.15          | 306        | 3.06          |
| 3       | 1.47                     | 1.20                     | 3.5 | 5.14                        | 4.20                    | 1.68            | 1.37          | 306        | 3.06          |
| 2       | 0.99                     | 0.81                     | 3.5 | 3.46                        | 2.83                    | 1.68            | 1.29          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.51                     | 0.44                     | 3.5 | 1.78                        | 1.54                    | 1.78            | 1.54          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.13 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5) obtenus dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Niveaux | $\delta_{ek}$ (cm)       |                          | R   | $R \times \delta_{ek}$ (cm) |                         | $\Delta_k$ (cm) |               | $h_k$ (cm) | 1% $h_k$ (cm) |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx}$ (sens xx) | $\delta_{eky}$ (sens yy) |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 6       | 2.54                     | 2.06                     | 3.5 | 8.89                        | 7.21                    | 0.77            | 0.60          | 306        | 3.06          |
| 5       | 2.32                     | 1.89                     | 3.5 | 8.12                        | 6.61                    | 1.30            | 1.08          | 306        | 3.06          |
| 4       | 1.95                     | 1.58                     | 3.5 | 6.82                        | 5.53                    | 1.47            | 1.16          | 306        | 3.06          |
| 3       | 1.53                     | 1.25                     | 3.5 | 5.35                        | 4.37                    | 1.60            | 1.43          | 306        | 3.06          |
| 2       | 1.02                     | 0.84                     | 3.5 | 3.57                        | 2.94                    | 1.90            | 1.33          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.53                     | 0.46                     | 3.5 | 1.85                        | 1.61                    | 1.85            | 1.61          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.14 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+5) obtenus dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### b) Bâtiment en (R+8)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Niveaux | $\delta_{ek} (cm)$        |                           | R   | $R \times \delta_{ek} (cm)$ |                         | $\Delta_k (cm)$ |               | $h_k (cm)$ | $1\%h_k (cm)$ |
|---------|---------------------------|---------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx} (sens\ xx)$ | $\delta_{eky} (sens\ yy)$ |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 9       | 4.80                      | 3.78                      | 3.5 | 16.80                       | 13.23                   | 0.91            | 0.74          | 306        | 3.06          |
| 8       | 4.54                      | 3.57                      | 3.5 | 15.89                       | 12.49                   | 1.54            | 1.29          | 306        | 3.06          |
| 7       | 4.10                      | 3.20                      | 3.5 | 14.35                       | 11.20                   | 1.86            | 1.47          | 306        | 3.06          |
| 6       | 3.57                      | 2.78                      | 3.5 | 12.49                       | 9.73                    | 2.20            | 1.75          | 306        | 3.06          |
| 5       | 2.94                      | 2.28                      | 3.5 | 10.29                       | 7.98                    | 2.14            | 1.65          | 306        | 3.06          |
| 4       | 2.33                      | 1.81                      | 3.5 | 8.15                        | 6.33                    | 2.27            | 1.71          | 306        | 3.06          |
| 3       | 1.68                      | 1.32                      | 3.5 | 5.88                        | 4.62                    | 2.14            | 1.65          | 306        | 3.06          |
| 2       | 1.07                      | 0.85                      | 3.5 | 3.74                        | 2.97                    | 2.06            | 1.57          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.48                      | 0.40                      | 3.5 | 1.68                        | 1.40                    | 1.68            | 1.40          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.15 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8) obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Niveaux | $\delta_{ek} (cm)$        |                           | R   | $R \times \delta_{ek} (cm)$ |                         | $\Delta_k (cm)$ |               | $h_k (cm)$ | $1\%h_k (cm)$ |
|---------|---------------------------|---------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx} (sens\ xx)$ | $\delta_{eky} (sens\ yy)$ |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 9       | 4.88                      | 3.84                      | 3.5 | 17.08                       | 13.44                   | 0.91            | 0.74          | 306        | 3.06          |
| 8       | 4.62                      | 3.63                      | 3.5 | 16.17                       | 12.70                   | 1.58            | 1.29          | 306        | 3.06          |
| 7       | 4.17                      | 3.26                      | 3.5 | 14.59                       | 11.41                   | 1.89            | 1.51          | 306        | 3.06          |
| 6       | 3.63                      | 2.83                      | 3.5 | 12.70                       | 9.90                    | 2.24            | 1.82          | 306        | 3.06          |
| 5       | 2.99                      | 2.31                      | 3.5 | 10.46                       | 8.08                    | 2.17            | 1.64          | 306        | 3.06          |
| 4       | 2.37                      | 1.84                      | 3.5 | 8.29                        | 6.44                    | 2.31            | 1.75          | 306        | 3.06          |
| 3       | 1.71                      | 1.34                      | 3.5 | 5.98                        | 4.69                    | 2.20            | 1.65          | 306        | 3.06          |
| 2       | 1.08                      | 0.87                      | 3.5 | 3.78                        | 3.04                    | 2.07            | 1.61          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.49                      | 0.41                      | 3.5 | 1.71                        | 1.43                    | 1.71            | 1.43          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.16 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8) obtenus dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Niveaux | $\delta_{ek} (cm)$        |                           | R   | $R \times \delta_{ek} (cm)$ |                         | $\Delta_k (cm)$ |               | $h_k (cm)$ | $1\%h_k (cm)$ |
|---------|---------------------------|---------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|------------|---------------|
|         | $\delta_{ekx} (sens\ xx)$ | $\delta_{eky} (sens\ yy)$ |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |            |               |
| 9       | 4.08                      | 3.22                      | 3.5 | 14.28                       | 11.27                   | 0.88            | 0.74          | 306        | 3.06          |
| 8       | 3.83                      | 3.01                      | 3.5 | 13.40                       | 10.53                   | 1.43            | 1.19          | 306        | 3.06          |
| 7       | 3.42                      | 2.67                      | 3.5 | 11.97                       | 9.34                    | 1.58            | 1.26          | 306        | 3.06          |
| 6       | 2.97                      | 2.31                      | 3.5 | 10.39                       | 8.08                    | 1.89            | 1.50          | 306        | 3.06          |
| 5       | 2.43                      | 1.88                      | 3.5 | 8.50                        | 6.58                    | 1.78            | 1.37          | 306        | 3.06          |
| 4       | 1.92                      | 1.49                      | 3.5 | 6.72                        | 5.21                    | 1.89            | 1.43          | 306        | 3.06          |
| 3       | 1.38                      | 1.08                      | 3.5 | 4.83                        | 3.78                    | 1.79            | 1.33          | 306        | 3.06          |
| 2       | 0.87                      | 0.70                      | 3.5 | 3.04                        | 2.45                    | 1.68            | 1.30          | 306        | 3.06          |
| 1       | 0.39                      | 0.33                      | 3.5 | 1.36                        | 1.15                    | 1.36            | 1.15          | 400        | 4.00          |

**Tableau 2.17 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8) obtenus dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Niveaux | $\delta_{ek}$ (cm)       |                          | R   | $R \times \delta_{ek}$ (cm) |                         | $\Delta_k$ (cm) |               | $h_k$<br>(cm) | 1% $h_k$<br>(cm) |
|---------|--------------------------|--------------------------|-----|-----------------------------|-------------------------|-----------------|---------------|---------------|------------------|
|         | $\delta_{ekx}$ (sens xx) | $\delta_{eky}$ (sens yy) |     | $R \times \delta_{ekx}$     | $R \times \delta_{eky}$ | $\Delta_{kx}$   | $\Delta_{ky}$ |               |                  |
| 9       | 3.95                     | 3.12                     | 3.5 | 13.82                       | 10.92                   | 0.84            | 0.70          | 306           | 3.06             |
| 8       | 3.71                     | 2.92                     | 3.5 | 12.98                       | 10.22                   | 1.36            | 1.16          | 306           | 3.06             |
| 7       | 3.32                     | 2.59                     | 3.5 | 11.62                       | 9.06                    | 1.54            | 1.22          | 306           | 3.06             |
| 6       | 2.88                     | 2.24                     | 3.5 | 10.08                       | 7.84                    | 1.86            | 1.47          | 306           | 3.06             |
| 5       | 2.35                     | 1.82                     | 3.5 | 8.22                        | 6.37                    | 1.71            | 1.30          | 306           | 3.06             |
| 4       | 1.86                     | 1.45                     | 3.5 | 6.51                        | 5.07                    | 1.82            | 1.40          | 306           | 3.06             |
| 3       | 1.34                     | 1.05                     | 3.5 | 4.69                        | 3.67                    | 1.72            | 1.29          | 306           | 3.06             |
| 2       | 0.85                     | 0.68                     | 3.5 | 2.97                        | 2.38                    | 1.64            | 1.26          | 306           | 3.06             |
| 1       | 0.38                     | 0.32                     | 3.5 | 1.33                        | 1.12                    | 1.33            | 1.12          | 400           | 4.00             |

**Tableau 2.18 :** Vérification des déplacements relatifs du bâtiment en (R+8) obtenus dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**Commentaire :** Nous constatons que pour les deux bâtiments, les déplacements relatifs dus aux efforts sismiques sont inférieurs aux déplacements relatifs recommandés par le RPA 99/V 2003 qui est égale à 1% de la hauteur d'étage.

**2.7.3. Justification vis à vis de l'effet P – Δ**

Selon le RPA99/V 2003, **Art 5.9**, les effets de second ordre (ou effet P – Δ) peuvent être négligés dans le cas des bâtiments si la condition suivante est satisfaite à tous les niveaux :

$$\theta = \frac{P_k \Delta_k}{V_k h_k} \leq 0.10 \tag{2.14}$$

Avec :

$P_k$  : Poids total de la structure et des charges d'exploitations associées au dessus du niveau  $k$ .

$V_k$  : Effort tranchant d'étage au niveau  $k$ .

$\Delta_k$  : déplacement relatif du niveau  $k$  par rapport au niveau  $k - 1$ .

$h_k$  : hauteur de l'étage  $k$ .

**a) Bâtiment en (R+5)**

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 6       | 306        | 2444       | 0.95            | 567.23     | 0.013    | 0.77            | 567.23     | 0.010    |
| 5       | 306        | 4936       | 1.64            | 1056.99    | 0.025    | 1.37            | 1056.99    | 0.020    |
| 4       | 306        | 7460       | 1.89            | 1459.28    | 0.031    | 1.50            | 1459.28    | 0.025    |
| 3       | 306        | 10017      | 2.24            | 1772.65    | 0.041    | 1.79            | 1772.65    | 0.033    |
| 2       | 306        | 12611      | 2.21            | 1994.27    | 0.045    | 1.71            | 1994.27    | 0.035    |
| 1       | 400        | 15525      | 2.34            | 2124.78    | 0.042    | 2.03            | 2124.78    | 0.037    |

**Tableau 2.19 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 6       | 306        | 2444       | 1.01            | 615.17     | 0.013    | 0.84            | 615.17     | 0.010    |
| 5       | 306        | 4936       | 1.79            | 1146.32    | 0.025    | 1.47            | 1146.32    | 0.020    |
| 4       | 306        | 7460       | 2.06            | 1582.60    | 0.031    | 1.65            | 1582.60    | 0.025    |
| 3       | 306        | 10017      | 2.42            | 1922.46    | 0.041    | 1.92            | 1922.46    | 0.032    |
| 2       | 306        | 12611      | 2.38            | 2162.80    | 0.045    | 1.86            | 2162.80    | 0.035    |
| 1       | 400        | 15525      | 2.55            | 2304.34    | 0.043    | 2.20            | 2304.34    | 0.037    |

**Tableau 2.20 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 6       | 306        | 2444       | 0.73            | 431.42     | 0.013    | 0.59            | 431.42     | 0.010    |
| 5       | 306        | 4936       | 1.26            | 803.91     | 0.025    | 1.02            | 803.91     | 0.020    |
| 4       | 306        | 7460       | 1.44            | 1109.87    | 0.031    | 1.15            | 1109.87    | 0.025    |
| 3       | 306        | 10017      | 1.68            | 1348.22    | 0.040    | 1.37            | 1348.22    | 0.033    |
| 2       | 306        | 12611      | 1.68            | 1516.77    | 0.045    | 1.29            | 1516.77    | 0.035    |
| 1       | 400        | 15525      | 1.78            | 1616.03    | 0.042    | 1.54            | 1616.03    | 0.036    |

**Tableau 2.21 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 6       | 306        | 2444       | 0.77            | 447.39     | 0.013    | 0.60            | 447.39     | 0.010    |
| 5       | 306        | 4936       | 1.30            | 833.69     | 0.025    | 1.08            | 833.69     | 0.019    |
| 4       | 306        | 7460       | 1.47            | 1150.98    | 0.031    | 1.16            | 1150.98    | 0.024    |
| 3       | 306        | 10017      | 1.60            | 1398.15    | 0.037    | 1.43            | 1398.15    | 0.033    |
| 2       | 306        | 12611      | 1.90            | 1572.94    | 0.049    | 1.33            | 1572.94    | 0.034    |
| 1       | 400        | 15525      | 1.85            | 1675.88    | 0.042    | 1.61            | 1675.88    | 0.037    |

**Tableau 2.22 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**b) Bâtiment en (R+8)**

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 9       | 306        | 2444       | 0.91            | 505.19     | 0.014    | 0.74            | 505.19     | 0.011    |
| 8       | 306        | 4936       | 1.54            | 967.89     | 0.025    | 1.29            | 967.89     | 0.021    |
| 7       | 306        | 7460       | 1.86            | 1379.80    | 0.032    | 1.47            | 1379.80    | 0.025    |
| 6       | 306        | 10017      | 2.20            | 1740.51    | 0.041    | 1.75            | 1740.51    | 0.032    |
| 5       | 306        | 12689      | 2.14            | 2052.91    | 0.043    | 1.65            | 2052.91    | 0.033    |
| 4       | 306        | 15431      | 2.27            | 2314.92    | 0.049    | 1.71            | 2314.92    | 0.037    |
| 3       | 306        | 18266      | 2.14            | 2523.08    | 0.050    | 1.65            | 2523.08    | 0.039    |
| 2       | 306        | 21194      | 2.06            | 2673.84    | 0.053    | 1.57            | 2673.84    | 0.040    |
| 1       | 400        | 24609      | 1.68            | 2762.42    | 0.037    | 1.40            | 2762.42    | 0.031    |

**Tableau 2.23 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 9       | 306        | 2444       | 0.91            | 513.83     | 0.014    | 0.74            | 513.83     | 0.011    |
| 8       | 306        | 4936       | 1.58            | 984.43     | 0.025    | 1.29            | 984.43     | 0.021    |
| 7       | 306        | 7460       | 1.89            | 1403.39    | 0.032    | 1.51            | 1403.39    | 0.026    |
| 6       | 306        | 10017      | 2.24            | 1770.26    | 0.041    | 1.82            | 1770.26    | 0.033    |
| 5       | 306        | 12689      | 2.17            | 2088.01    | 0.043    | 1.64            | 2088.01    | 0.032    |
| 4       | 306        | 15431      | 2.31            | 2354.49    | 0.049    | 1.75            | 2354.49    | 0.037    |
| 3       | 306        | 18266      | 2.20            | 2566.21    | 0.051    | 1.65            | 2566.21    | 0.038    |
| 2       | 306        | 21194      | 2.07            | 2719.55    | 0.052    | 1.61            | 2719.55    | 0.041    |
| 1       | 400        | 24609      | 1.71            | 2809.64    | 0.037    | 1.43            | 2809.64    | 0.031    |

**Tableau 2.24 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 9       | 306        | 2444       | 0.88            | 526.05     | 0.013    | 0.74            | 526.05     | 0.011    |
| 8       | 306        | 4936       | 1.43            | 881.97     | 0.026    | 1.19            | 881.97     | 0.021    |
| 7       | 306        | 7460       | 1.58            | 1198.82    | 0.032    | 1.26            | 1198.82    | 0.025    |
| 6       | 306        | 10017      | 1.89            | 1476.29    | 0.041    | 1.50            | 1476.29    | 0.033    |
| 5       | 306        | 12689      | 1.78            | 1716.60    | 0.042    | 1.37            | 1716.60    | 0.033    |
| 4       | 306        | 15431      | 1.89            | 1918.15    | 0.049    | 1.43            | 1918.15    | 0.037    |
| 3       | 306        | 18266      | 1.79            | 2078.27    | 0.051    | 1.33            | 2078.27    | 0.037    |
| 2       | 306        | 21194      | 1.68            | 2194.24    | 0.053    | 1.30            | 2194.24    | 0.041    |
| 1       | 400        | 24609      | 1.36            | 2262.38    | 0.036    | 1.15            | 2262.38    | 0.031    |

**Tableau 2.25 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Niveaux | $h_k$ (cm) | $P_k$ (KN) | Sens (xx)       |            |          | Sens (yy)       |            |          |
|---------|------------|------------|-----------------|------------|----------|-----------------|------------|----------|
|         |            |            | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ | $\Delta_k$ (cm) | $V_k$ (KN) | $\theta$ |
| 9       | 306        | 2444       | 0.84            | 512.11     | 0.013    | 0.70            | 512.11     | 0.010    |
| 8       | 306        | 4936       | 1.36            | 856.16     | 0.025    | 1.16            | 856.16     | 0.021    |
| 7       | 306        | 7460       | 1.54            | 1162.48    | 0.032    | 1.22            | 1162.48    | 0.025    |
| 6       | 306        | 10017      | 1.86            | 1430.67    | 0.042    | 1.47            | 1430.67    | 0.033    |
| 5       | 306        | 12689      | 1.71            | 1662.98    | 0.042    | 1.30            | 1662.98    | 0.032    |
| 4       | 306        | 15431      | 1.82            | 1857.80    | 0.049    | 1.40            | 1857.80    | 0.038    |
| 3       | 306        | 18266      | 1.72            | 2012.59    | 0.051    | 1.29            | 2012.59    | 0.038    |
| 2       | 306        | 21194      | 1.64            | 2124.69    | 0.053    | 1.26            | 2124.69    | 0.041    |
| 1       | 400        | 24609      | 1.33            | 2090.56    | 0.037    | 1.12            | 2090.56    | 0.031    |

**Tableau 2.26 :** Vérification de l'effet  $P - \Delta$  pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**Commentaire :** Nous constatons que pour les deux bâtiments, la condition ( $\theta \leq 0.1$ ) est satisfaite, d'où les effets  $P - \Delta$  peuvent être négligés.

## 2.8. Ferrailage des éléments structuraux des bâtiments étudiés

Le calcul des armatures longitudinales et transversales dans les éléments structuraux poutres et poteaux est effectué en considérant les sollicitations les plus défavorables obtenues par chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés.

Les combinaisons d'actions considérées pour la détermination des sollicitations de calcul, sont celles définies dans les codes RPA 99/V 2003 [2] et le BAEL 91 [18].

Le ferrailage adopté doit respecter les recommandations ainsi que les pourcentages extrêmes maximal et minimal d'acier prescrit par le RPA 99/V 2003 [2].

### 2.8.1. Ferrailage des poutres

Le ferrailage des poutres est mené en flexion simple, elles sont sollicitées par des moments fléchissant et des efforts tranchants, qui résultent des combinaisons suivantes :

$$1.35G + 1.5Q$$

$$G + Q$$

$$G + Q \pm E$$

$$0.8G \pm E$$

E : action du séisme

### 2.8.2. Ferrailage des poteaux

Le ferrailage des poteaux est calculé en flexion composé. Ils sont sollicités par des efforts normaux, moments fléchissant et des efforts tranchants donnés par les combinaisons suivantes :

$$1.35G + 1.5Q$$

$$G + Q$$

$$G + Q \pm 1.2E$$

$$0.8G \pm E$$

Les schémas de ferrailage des poutres et des poteaux des deux bâtiments étudiés sont représentés en (Annexe A.1).

## 2.9. Vérification des contraintes admissibles dans les éléments structuraux poutres et poteaux

Après ferrailage des éléments structuraux (poutres et poteaux), on procède à la vérification des contraintes admissibles.

### 2.9.1. Vérification des poteaux au flambement

Selon le BAEL91, Art 4.4.1, les éléments soumis à la flexion composée doivent être justifiés vis-à-vis de l'état limite ultime de stabilité de forme (flambement).

L'effort normal ultime «  $N_u$  » est défini comme étant l'effort axial maximal que peut supporter un poteau sans subir des instabilités par flambement, et est égale, selon le CBA 93 [19], Art B 8.4.1, à :

$$N_u = \alpha \left[ \frac{B_r f_{c28}}{0.9 \gamma_b} + A_s \frac{f_e}{\gamma_s} \right] \quad (1.15)$$

Avec :

$B_r$  : Section réduite du poteau obtenue en déduisant de sa section réelle un centième d'épaisseur sur toute sa périphérie.

$A_s$  : Section d'acier comprimée prise en compte dans le calcul.

$\gamma_b$  : Coefficient de sécurité = 1.5.

$\gamma_s$  : Coefficient de sécurité = 1.15.

$\alpha$  : Coefficient fonction de l'élançement mécanique  $\lambda$  qui prend les valeurs :

$$\left\{ \begin{array}{ll} \alpha = \frac{0.85}{1 + 0.2 \left( \frac{\lambda}{35} \right)^2} & \text{si } \lambda \leq 50 \\ \alpha = 0.60 \left( \frac{50}{\lambda} \right)^2 & \text{si } 50 < \lambda \leq 70 \end{array} \right.$$

Tel que :  $\lambda = \frac{l_f}{i}$  avec :

$i = \sqrt{I/B}$  : Rayon de giration.

$B$  : Section transversale du poteau.

$I$  : Moment d'inertie.

$l_f$  : Longueur de flambement ( $l_f = 0.707 l_o$ ).

$l_o$  : Longueur libre du poteau.

### a) Bâtiment en (R+5)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Etages        | Section ( $cm^2$ ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ ( $cm^2$ ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|--------------------|------------|------------|-----------|------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45            | 400        | 282        | 21.8      | 37.70            | 1410.22    | 3735.89    | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45            | 306        | 216        | 16.7      | 37.70            | 1165.72    | 3850.63    | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40            | 306        | 216        | 18.7      | 20.36            | 926.86     | 2718.96    | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35            | 306        | 216        | 21.4      | 12.32            | 456.84     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.27** : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Etages        | Section ( $cm^2$ ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ ( $cm^2$ ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|--------------------|------------|------------|-----------|------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45            | 400        | 282        | 21.8      | 37.70            | 1410.22    | 3735.89    | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45            | 306        | 216        | 16.7      | 37.70            | 1165.72    | 3850.63    | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40            | 306        | 216        | 18.7      | 24.13            | 926.86     | 2824.38    | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35            | 306        | 216        | 21.4      | 12.32            | 456.84     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.28** : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Etages        | Section ( $cm^2$ ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ ( $cm^2$ ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|--------------------|------------|------------|-----------|------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45            | 400        | 282        | 21.8      | 24.13            | 1410.22    | 3363.46    | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45            | 306        | 216        | 16.7      | 24.13            | 1165.72    | 3466.76    | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40            | 306        | 216        | 18.7      | 16.08            | 926.86     | 2599.49    | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35            | 306        | 216        | 21.4      | 12.32            | 456.84     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.29** : Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Etages        | Section ( $cm^2$ ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ ( $cm^2$ ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|--------------------|------------|------------|-----------|------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45            | 400        | 282        | 21.8      | 28.65            | 1410.22    | 3487.61    | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45            | 306        | 216        | 16.7      | 28.65            | 1165.72    | 3594.72    | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40            | 306        | 216        | 18.7      | 16.08            | 926.86     | 2599.49    | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35            | 306        | 216        | 21.4      | 12.32            | 456.84     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.30** : Vérification au flambement des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**b) Bâtiment en (R+8)**

Tous les résultats de calcul pour obtenus chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|------------|-----------|--------------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 400        | 282        | 16.3      | 43.77                    | 2182.92    | 6314.13    | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 306        | 216        | 12.5      | 43.77                    | 1917.44    | 6425.32    | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 306        | 216        | 15.0      | 26.51                    | 1410.33    | 4254.49    | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 306        | 216        | 18.7      | 20.36                    | 925.62     | 2718.96    | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 306        | 216        | 21.4      | 12.32                    | 456.75     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.31 :** Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|------------|-----------|--------------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 400        | 282        | 16.3      | 43.77                    | 2182.92    | 6314.13    | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 306        | 216        | 12.5      | 43.77                    | 1917.44    | 6525.32    | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 306        | 216        | 15.0      | 28.65                    | 1410.33    | 4315.42    | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 306        | 216        | 18.7      | 24.13                    | 925.62     | 2824.38    | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 306        | 216        | 21.4      | 12.32                    | 456.75     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.32 :** Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|------------|-----------|--------------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 400        | 282        | 16.3      | 36.69                    | 2182.92    | 6113.86    | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 306        | 216        | 12.5      | 36.69                    | 1917.44    | 6221.53    | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 306        | 216        | 15.0      | 24.13                    | 1410.33    | 4186.40    | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 306        | 216        | 18.7      | 16.08                    | 925.62     | 2599.49    | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 306        | 216        | 21.4      | 12.32                    | 456.75     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.33 :** Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_o$ (cm) | $l_f$ (cm) | $\lambda$ | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | $N_d$ (KN) | $N_u$ (KN) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|------------|-----------|--------------------------|------------|------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 400        | 282        | 16.3      | 32.17                    | 2182.92    | 5985.69    | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 306        | 216        | 12.5      | 32.17                    | 1917.44    | 6091.10    | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 306        | 216        | 15.0      | 24.13                    | 1410.33    | 4186.40    | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 306        | 216        | 18.7      | 16.08                    | 925.62     | 2599.49    | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 306        | 216        | 21.4      | 12.32                    | 456.75     | 1933.49    | vérifiée    |

**Tableau 2.34 :** Vérification des poteaux au flambement pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### 2.9.2. Vérification des poteaux aux sollicitations tangentés

Selon le RPA99/V 2003, **Art 7.4.3.2**, la contrainte de cisaillement conventionnelle de calcul dans le béton «  $\tau_{bu}$  » sous combinaison sismique doit être inférieure ou égale à la valeur limite suivante :

$$\overline{\tau_{bu}} = \rho_d f_{c28} \quad (2.16)$$

Avec :

$$\rho_d = \begin{cases} 0.075 & \text{si } \lambda_g \geq 5 \\ 0.04 & \text{si } \lambda_g < 5 \end{cases}$$

$\lambda_g = \frac{l_f}{a}$  ou  $\lambda_g = \frac{l_f}{b}$  ( $a$  et  $b$ , dimensions de la section droite du poteau dans la direction de déformation considérée, et  $l_f$  longueur de flambement du poteau).

La contrainte de cisaillement conventionnelle de calcul dans le béton est égale à :

$$\tau_{bu} = \frac{V_d}{b d} \quad (2.17)$$

Avec :

$V_d$  : Effort tranchant maximal sous charges sismiques.

$d$  : Hauteur utile de la section du poteau.

#### a) Bâtiment en (R+5)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Etages        | Section<br>( $cm^2$ ) | $l_f$<br>( $cm$ ) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$<br>( $KN$ ) | $\tau_{bu}$<br>( $Mpa$ ) | $\overline{\tau_{bu}}$<br>( $Mpa$ ) | Observation |
|---------------|-----------------------|-------------------|-------------|----------|-------------------|--------------------------|-------------------------------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45               | 282               | 6.26        | 0.075    | 112.77            | 0.618                    | 1.875                               | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45               | 216               | 4.80        | 0.04     | 124.46            | 0.685                    | 1.000                               | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40               | 216               | 5.40        | 0.075    | 104.15            | 0.723                    | 1.875                               | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35               | 216               | 6.17        | 0.075    | 63.06             | 0.571                    | 1.875                               | vérifiée    |

**Tableau 2.35** : Vérification des poteaux aux sollicitations tangentés pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45                    | 282        | 6.26        | 0.075    | 122.26     | 0.670             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45                    | 216        | 4.80        | 0.04     | 135.24     | 0.742             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 112.77     | 0.783             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 68.67      | 0.622             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.36 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45                    | 282        | 6.26        | 0.075    | 85.87      | 0.471             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45                    | 216        | 4.80        | 0.04     | 95.50      | 0.524             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 79.73      | 0.553             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 48.58      | 0.440             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.37 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 45 x 45                    | 282        | 6.26        | 0.075    | 90.00      | 0.493             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etage 1       | 45 x 45                    | 216        | 4.80        | 0.04     | 100.00     | 0.548             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 2 et 3 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 82.60      | 0.573             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 4 et 5 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 50.28      | 0.456             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.38 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### b) Bâtiment en (R+8)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 282        | 4.70        | 0.04     | 145.92     | 0.450             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 216        | 3.60        | 0.04     | 161.96     | 0.500             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 216        | 4.32        | 0.04     | 137.10     | 0.610             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 103.20     | 0.716             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 59.15      | 0.539             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.39 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 282        | 4.70        | 0.04     | 148.41     | 0.458             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 216        | 3.60        | 0.04     | 164.70     | 0.510             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 216        | 4.32        | 0.04     | 139.38     | 0.620             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 104.90     | 0.728             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 60.10      | 0.545             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.40 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 282        | 4.70        | 0.04     | 119.60     | 0.370             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 216        | 3.60        | 0.04     | 133.33     | 0.411             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 216        | 4.32        | 0.04     | 114.20     | 0.507             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 88.06      | 0.611             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 54.26      | 0.492             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.41 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Etages        | Section (cm <sup>2</sup> ) | $l_f$ (cm) | $\lambda_g$ | $\rho_d$ | $V_d$ (KN) | $\tau_{bu}$ (Mpa) | $\overline{\tau_{bu}}$ (Mpa) | Observation |
|---------------|----------------------------|------------|-------------|----------|------------|-------------------|------------------------------|-------------|
| RDC           | 60 x 60                    | 282        | 4.70        | 0.04     | 115.81     | 0.357             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 1 et 2 | 60 x 60                    | 216        | 3.60        | 0.04     | 129.17     | 0.398             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 3 et 4 | 50 x 50                    | 216        | 4.32        | 0.04     | 110.70     | 0.492             | 1.000                        | vérifiée    |
| Etages 5 et 6 | 40 x 40                    | 216        | 5.40        | 0.075    | 85.45      | 0.593             | 1.875                        | vérifiée    |
| Etages 7 et 8 | 35 x 35                    | 216        | 6.17        | 0.075    | 52.78      | 0.478             | 1.875                        | vérifiée    |

**Tableau 2.42 :** Vérification des poteaux aux sollicitations tangentes pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### 2.9.3. Vérification des contraintes de compression dans les poteaux à l'état limite de service

Dans notre cas, la fissuration est peut nuisible, donc la vérification se fait pour la contrainte de compression du béton seulement. [18]

Selon le BAEL 91, Art A.4.5.2, la contrainte de compression dans le béton «  $\sigma_{bc}$  », est limitée par la condition suivante :

$$\sigma_{bc} \leq \overline{\sigma_{bc}} = 0.6 f_{c28} = 15 \text{ MPa} \quad (2.18)$$

**1<sup>er</sup> cas :**  $e_s = \frac{M_{ser}}{N_{ser}} < \frac{h}{6} \Rightarrow$  Section Entièrement Comprimée (SEC)

$M_{ser}$  : Moment fléchissant à l'état limite de service.

$N_{ser}$  : Effort normal à l'état limite de service.

- La section homogène du poteau est :

$$B_o = b h + 15(A + A')$$

$$V_1 = \frac{1}{B_o} \left( \frac{b h^2}{2} + 15(A' c' + A d) \right)$$

$$V_2 = h - V_1$$

- Le moment d'inertie de la section homogène :

$$I_o = \frac{b}{3} (V_1^3 + V_2^3) + 15[A (V_1 - c)^2 + A' (V_2 - c')^2]$$

- Vérification des contraintes dans le béton :

$$\begin{cases} \sigma_{bc}^{sup} = \frac{N_{ser}}{B_o} + \frac{M_{ser}}{I_o} V_1 \leq \overline{\sigma}_{bc} \\ \sigma_{bc}^{inf} = \frac{N_{ser}}{B_o} + \frac{M_{ser}}{I_o} V_2 \leq \overline{\sigma}_{bc} \end{cases}$$

**2<sup>ème</sup> cas :**  $e_s = \frac{M_{ser}}{N_{ser}} > \frac{h}{6} \Rightarrow$  Section Partiellement Comprimée (SPC)

- La contrainte de compression dans le béton vaut :

$$\sigma_{bc} = K y_1$$

Avec :

$$K = \frac{M_{ser}}{I_{xx}}$$

$$I_{xx} = \frac{b y_1^3}{3} + 15 [A (d - y_1)^2 + A' (y_1 - c')^2]$$

$$y_1 = y_2 + c_1$$

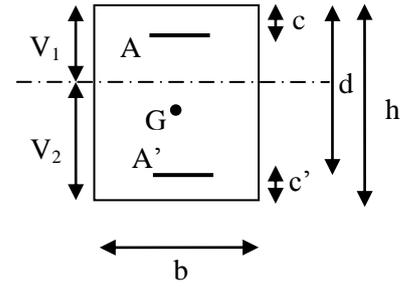
$$c_1 = \frac{h}{2} - e_s$$

On détermine la valeur de  $y_2$  par la résolution de l'équation suivante :

$$y_2^3 + p y_2 + q = 0$$

Avec :

$$p = -3c_1^2 - \frac{90 A'}{b} (c_1 - c') + \frac{90 A}{b} (d - c_1)$$



**Figure 2.6 :** Section d'un poteau.

$$q = -2c_1^3 - \frac{90 A'}{b} (c_1 - c')^2 + \frac{90 A}{b} (d - c_1)^2$$

- Vérification de la contrainte dans le béton :

$$\sigma_{bc} = K y_1 \leq \overline{\sigma}_{bc}$$

**a) Bâtiment en (R+5)**

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Etages         | Section (cm <sup>2</sup> ) | N <sub>ser</sub> (KN)      | M <sub>ser</sub> (KN m)  | A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> ) | OBS | σ <sub>bc</sub> <sup>sup</sup> (MPa) | σ <sub>bc</sub> <sup>inf</sup> (MPa) | σ <sub>bc</sub> <sup>bar</sup> (MPa) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| RDC et étage 1 | 45 x 45                    | N <sub>max</sub> = 1025.35 | M <sub>cor</sub> = 0     | 37.70                             | SEC | 4.3                                  | 4.3                                  | 15                                   |
|                |                            | N <sub>min</sub> = 292.25  | M <sub>cor</sub> = 16.73 |                                   | SEC | 2.0                                  | 0.4                                  |                                      |
|                |                            | N <sub>cor</sub> = 494.23  | M <sub>max</sub> = 32.68 |                                   | SEC | 3.6                                  | 0.5                                  |                                      |
| Etages 2 et 3  | 40 x 40                    | N <sub>max</sub> = 674.08  | M <sub>cor</sub> = 0     | 20.36                             | SEC | 3.7                                  | 3.7                                  | 15                                   |
|                |                            | N <sub>min</sub> = 168.11  | M <sub>cor</sub> = 17.32 |                                   | SPC | 2.3                                  | 0                                    |                                      |
|                |                            | N <sub>cor</sub> = 280.43  | M <sub>max</sub> = 30.72 |                                   | SPC | 4.0                                  | 0                                    |                                      |
| Etages 4 et 5  | 35 x 35                    | N <sub>max</sub> = 322.70  | M <sub>cor</sub> = 0     | 12.32                             | SEC | 2.4                                  | 2.4                                  | 15                                   |
|                |                            | N <sub>min</sub> = 48.05   | M <sub>cor</sub> = 20.57 |                                   | SPC | 3.9                                  | 0                                    |                                      |
|                |                            | N <sub>cor</sub> = 84.28   | M <sub>max</sub> = 35.95 |                                   | SPC | 6.8                                  | 0                                    |                                      |

**Tableau 2.43 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Etages         | Section (cm <sup>2</sup> ) | N <sub>ser</sub> (KN)      | M <sub>ser</sub> (KN m)  | A <sub>s</sub> (cm <sup>2</sup> ) | OBS | σ <sub>bc</sub> <sup>sup</sup> (MPa) | σ <sub>bc</sub> <sup>inf</sup> (MPa) | σ <sub>bc</sub> <sup>bar</sup> (MPa) |
|----------------|----------------------------|----------------------------|--------------------------|-----------------------------------|-----|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| RDC et étage 1 | 45 x 45                    | N <sub>max</sub> = 1025.35 | M <sub>cor</sub> = 0     | 37.70                             | SEC | 4.3                                  | 4.3                                  | 15                                   |
|                |                            | N <sub>min</sub> = 292.25  | M <sub>cor</sub> = 16.73 |                                   | SEC | 2.0                                  | 0.4                                  |                                      |
|                |                            | N <sub>cor</sub> = 494.23  | M <sub>max</sub> = 32.68 |                                   | SEC | 3.6                                  | 0.5                                  |                                      |
| Etages 2 et 3  | 40 x 40                    | N <sub>max</sub> = 674.08  | M <sub>cor</sub> = 0     | 24.13                             | SEC | 3.7                                  | 3.7                                  | 15                                   |
|                |                            | N <sub>min</sub> = 168.11  | M <sub>cor</sub> = 17.32 |                                   | SPC | 2.2                                  | 0                                    |                                      |
|                |                            | N <sub>cor</sub> = 280.43  | M <sub>max</sub> = 30.72 |                                   | SPC | 3.7                                  | 0                                    |                                      |
| Etages 4 et 5  | 35 x 35                    | N <sub>max</sub> = 322.70  | M <sub>cor</sub> = 0     | 12.32                             | SEC | 2.4                                  | 2.4                                  | 15                                   |
|                |                            | N <sub>min</sub> = 48.05   | M <sub>cor</sub> = 20.57 |                                   | SPC | 3.9                                  | 0                                    |                                      |
|                |                            | N <sub>cor</sub> = 84.28   | M <sub>max</sub> = 35.95 |                                   | SPC | 6.8                                  | 0                                    |                                      |

**Tableau 2.44 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Etages         | Section (cm <sup>2</sup> ) | $N_{ser}$ (KN)      | $M_{ser}$ (KN m)  | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | OBS | $\sigma_{bc}^{sup}$ (MPa) | $\sigma_{bc}^{inf}$ (MPa) | $\overline{\sigma_{bc}}$ (MPa) |
|----------------|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| RDC et étage 1 | 45 x 45                    | $N_{max} = 1025.35$ | $M_{cor} = 0$     | 24.13                    | SEC | 4.5                       | 4.5                       | 15                             |
|                |                            | $N_{min} = 292.25$  | $M_{cor} = 16.73$ |                          | SEC | 2.2                       | 0.4                       |                                |
|                |                            | $N_{cor} = 494.23$  | $M_{max} = 32.68$ |                          | SEC | 3.9                       | 0.5                       |                                |
| Etages 2 et 3  | 40 x 40                    | $N_{max} = 674.08$  | $M_{cor} = 0$     | 16.08                    | SEC | 3.8                       | 3.8                       | 15                             |
|                |                            | $N_{min} = 168.11$  | $M_{cor} = 17.32$ |                          | SPC | 2.3                       | 0                         |                                |
|                |                            | $N_{cor} = 280.43$  | $M_{max} = 30.72$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
| Etages 4 et 5  | 35 x 35                    | $N_{max} = 322.70$  | $M_{cor} = 0$     | 12.32                    | SEC | 2.4                       | 2.4                       | 15                             |
|                |                            | $N_{min} = 48.05$   | $M_{cor} = 20.57$ |                          | SPC | 3.9                       | 0                         |                                |
|                |                            | $N_{cor} = 84.28$   | $M_{max} = 35.95$ |                          | SPC | 6.8                       | 0                         |                                |

**Tableau 2.45 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Etages         | Section (cm <sup>2</sup> ) | $N_{ser}$ (KN)      | $M_{ser}$ (KN m)  | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | OBS | $\sigma_{bc}^{sup}$ (MPa) | $\sigma_{bc}^{inf}$ (MPa) | $\overline{\sigma_{bc}}$ (MPa) |
|----------------|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| RDC et étage 1 | 45 x 45                    | $N_{max} = 1025.35$ | $M_{cor} = 0$     | 28.65                    | SEC | 4.4                       | 4.4                       | 15                             |
|                |                            | $N_{min} = 292.25$  | $M_{cor} = 16.73$ |                          | SEC | 2.1                       | 0.4                       |                                |
|                |                            | $N_{cor} = 494.23$  | $M_{max} = 32.68$ |                          | SEC | 3.7                       | 0.5                       |                                |
| Etages 2 et 3  | 40 x 40                    | $N_{max} = 674.08$  | $M_{cor} = 0$     | 16.08                    | SEC | 3.8                       | 3.8                       | 15                             |
|                |                            | $N_{min} = 168.11$  | $M_{cor} = 17.32$ |                          | SPC | 2.3                       | 0                         |                                |
|                |                            | $N_{cor} = 280.43$  | $M_{max} = 30.72$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
| Etages 4 et 5  | 35 x 35                    | $N_{max} = 322.70$  | $M_{cor} = 0$     | 12.32                    | SEC | 2.4                       | 2.4                       | 15                             |
|                |                            | $N_{min} = 48.05$   | $M_{cor} = 20.57$ |                          | SPC | 3.9                       | 0                         |                                |
|                |                            | $N_{cor} = 84.28$   | $M_{max} = 35.95$ |                          | SPC | 6.8                       | 0                         |                                |

**Tableau 2.46 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### b) Bâtiment en (R+8)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Etages               | Section (cm <sup>2</sup> ) | $N_{ser}$ (KN)      | $M_{ser}$ (KN m)  | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | OBS | $\sigma_{bc}^{sup}$ (MPa) | $\sigma_{bc}^{inf}$ (MPa) | $\overline{\sigma_{bc}}$ (MPa) |
|----------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| RDC et étages 1 et 2 | 60 x 60                    | $N_{max} = 1587.71$ | $M_{cor} = 0$     | 43.77                    | SEC | 3.9                       | 3.9                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 449.71$  | $M_{cor} = 19.60$ |                          | SEC | 1.5                       | 0.7                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 494.23$  | $M_{max} = 35.10$ |                          | SEC | 2.0                       | 0.5                       |                                |
| Etages 3 et 4        | 50 x 50                    | $N_{max} = 1025.51$ | $M_{cor} = 0$     | 26.51                    | SEC | 3.7                       | 3.7                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 306.36$  | $M_{cor} = 20.80$ |                          | SEC | 1.9                       | 0.3                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 493.91$  | $M_{max} = 40.00$ |                          | SEC | 3.3                       | 0.2                       |                                |
| Etages 5 et 6        | 40 x 40                    | $N_{max} = 673.18$  | $M_{cor} = 0$     | 20.36                    | SEC | 3.7                       | 3.7                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 175.10$  | $M_{cor} = 19.10$ |                          | SPC | 2.4                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 286.70$  | $M_{max} = 33.62$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
| Etages 7 et 8        | 35 x 35                    | $N_{max} = 332.63$  | $M_{cor} = 0$     | 12.32                    | SEC | 2.4                       | 2.4                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 49.85$   | $M_{cor} = 22.30$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 86.10$   | $M_{max} = 38.80$ |                          | SPC | 7.3                       | 0                         |                                |

**Tableau 2.47 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Etages               | Section (cm <sup>2</sup> ) | $N_{ser}$ (KN)      | $M_{ser}$ (KN m)  | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | OBS | $\sigma_{bc}^{sup}$ (MPa) | $\sigma_{bc}^{inf}$ (MPa) | $\overline{\sigma_{bc}}$ (MPa) |
|----------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| RDC et étages 1 et 2 | 60 x 60                    | $N_{max} = 1587.71$ | $M_{cor} = 0$     | 43.77                    | SEC | 3.9                       | 3.9                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 449.71$  | $M_{cor} = 19.60$ |                          | SEC | 1.5                       | 0.7                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 494.23$  | $M_{max} = 35.10$ |                          | SEC | 2.0                       | 0.5                       |                                |
| Etages 3 et 4        | 50 x 50                    | $N_{max} = 1025.51$ | $M_{cor} = 0$     | 28.65                    | SEC | 3.7                       | 3.7                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 306.36$  | $M_{cor} = 20.80$ |                          | SEC | 1.9                       | 0.3                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 493.91$  | $M_{max} = 40.00$ |                          | SEC | 3.2                       | 0.3                       |                                |
| Etages 5 et 6        | 40 x 40                    | $N_{max} = 673.18$  | $M_{cor} = 0$     | 24.13                    | SEC | 3.7                       | 3.7                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 175.10$  | $M_{cor} = 19.10$ |                          | SPC | 2.4                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 286.70$  | $M_{max} = 33.62$ |                          | SPC | 4.1                       | 0                         |                                |
| Etages 7 et 8        | 35 x 35                    | $N_{max} = 332.63$  | $M_{cor} = 0$     | 12.32                    | SEC | 2.4                       | 2.4                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 49.85$   | $M_{cor} = 22.30$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 86.10$   | $M_{max} = 38.80$ |                          | SPC | 7.3                       | 0                         |                                |

**Tableau 2.48 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Etages               | Section (cm <sup>2</sup> ) | $N_{ser}$ (KN)      | $M_{ser}$ (KN m)  | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | OBS | $\sigma_{bc}^{sup}$ (MPa) | $\sigma_{bc}^{inf}$ (MPa) | $\overline{\sigma_{bc}}$ (MPa) |
|----------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| RDC et étages 1 et 2 | 60 x 60                    | $N_{max} = 1587.71$ | $M_{cor} = 0$     | 36.7                     | SEC | 4.0                       | 4.0                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 449.71$  | $M_{cor} = 19.60$ |                          | SEC | 1.6                       | 0.7                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 494.23$  | $M_{max} = 35.10$ |                          | SEC | 2.0                       | 0.5                       |                                |
| Etages 3 et 4        | 50 x 50                    | $N_{max} = 1025.51$ | $M_{cor} = 0$     | 24.13                    | SEC | 3.7                       | 3.7                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 306.36$  | $M_{cor} = 20.80$ |                          | SEC | 1.9                       | 0.3                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 493.91$  | $M_{max} = 40.00$ |                          | SEC | 3.4                       | 0.2                       |                                |
| Etages 5 et 6        | 40 x 40                    | $N_{max} = 673.18$  | $M_{cor} = 0$     | 16.08                    | SEC | 3.8                       | 3.8                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 175.10$  | $M_{cor} = 19.10$ |                          | SPC | 2.5                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 286.70$  | $M_{max} = 33.62$ |                          | SPC | 4.3                       | 0                         |                                |
| Etages 7 et 8        | 35 x 35                    | $N_{max} = 332.63$  | $M_{cor} = 0$     | 12.32                    | SEC | 2.4                       | 2.4                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 49.85$   | $M_{cor} = 22.30$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 86.10$   | $M_{max} = 38.80$ |                          | SPC | 7.3                       | 0                         |                                |

**Tableau 2.49 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Etages               | Section (cm <sup>2</sup> ) | $N_{ser}$ (KN)      | $M_{ser}$ (KN m)  | $A_s$ (cm <sup>2</sup> ) | OBS | $\sigma_{bc}^{sup}$ (MPa) | $\sigma_{bc}^{inf}$ (MPa) | $\overline{\sigma_{bc}}$ (MPa) |
|----------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|--------------------------|-----|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|
| RDC et étages 1 et 2 | 60 x 60                    | $N_{max} = 1587.71$ | $M_{cor} = 0$     | 32.17                    | SEC | 4.1                       | 4.1                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 449.71$  | $M_{cor} = 19.60$ |                          | SEC | 1.6                       | 0.7                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 494.23$  | $M_{max} = 35.10$ |                          | SEC | 2.1                       | 0.5                       |                                |
| Etages 3 et 4        | 50 x 50                    | $N_{max} = 1025.51$ | $M_{cor} = 0$     | 24.13                    | SEC | 3.7                       | 3.7                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 306.36$  | $M_{cor} = 20.80$ |                          | SEC | 1.9                       | 0.3                       |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 493.91$  | $M_{max} = 40.00$ |                          | SEC | 3.4                       | 0.2                       |                                |
| Etages 5 et 6        | 40 x 40                    | $N_{max} = 673.18$  | $M_{cor} = 0$     | 16.08                    | SEC | 3.8                       | 3.8                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 175.10$  | $M_{cor} = 19.10$ |                          | SPC | 2.5                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 286.70$  | $M_{max} = 33.62$ |                          | SPC | 4.3                       | 0                         |                                |
| Etages 7 et 8        | 35 x 35                    | $N_{max} = 332.63$  | $M_{cor} = 0$     | 12.32                    | SEC | 2.4                       | 2.4                       | 15                             |
|                      |                            | $N_{min} = 49.85$   | $M_{cor} = 22.30$ |                          | SPC | 4.2                       | 0                         |                                |
|                      |                            | $N_{cor} = 86.10$   | $M_{max} = 38.80$ |                          | SPC | 7.3                       | 0                         |                                |

**Tableau 2.50 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poteaux pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**Commentaire :** Nous constatons que pour les deux bâtiments les contraintes de compression dans le béton des poteaux sont inférieures à la contrainte admissible «  $\overline{\sigma_{bc}}$  ».

#### 2.9.4. Justification sous sollicitation d'effort tranchant dans les poutres à l'état limite ultime

Selon le BAEL 91, **Art A.5.1.1**, les poutres soumises à des efforts tranchants sont justifiées vis-à-vis de l'état ultime, cette justification est conduite à partir de la contrainte tangentielle «  $\tau_u$  », prise conventionnellement égale à :

$$\tau_u = \frac{V_u}{b_o d} \quad (2.19)$$

Avec :

$V_u$  : Effort tranchant maximal à l'état limite ultime.

$b_o$  : Largeur de la section de la poutre.

$d$  : Hauteur utile de la section de la poutre ( $d = 0.9 * h$ ) ;  $h$  : hauteur de la section.

Dans notre cas la fissuration est peu nuisible, donc la contrainte tangentielle doit être inférieure ou égale à la valeur limite suivante :

$$\tau_u \leq \overline{\tau_u} = \min(0.13 f_{c28}, 5 \text{ MPa}) = 3.25 \text{ MPa} \quad (2.20)$$

Tous les résultats de calcul sont résumés dans le tableau 2.51 pour le bâtiments en (R+5), et tableau 2.52 pour le bâtiment en (R+8).

| poutres             | $V_u$ | $\tau_u$ | $\overline{\tau_u}$ | Observation |
|---------------------|-------|----------|---------------------|-------------|
| Poutres principales | 95.38 | 0.78     | 3.25                | Vérifiée    |
| Poutres secondaires | 14.60 | 0.13     | 3.25                | Vérifiée    |

**Tableau 2.51 :** Vérification de l'effort tranchant dans les poutres pour le bâtiment en (R+5).

| poutres             | $V_u$ | $\tau_u$ | $\overline{\tau_u}$ | Observation |
|---------------------|-------|----------|---------------------|-------------|
| Poutres principales | 98.43 | 0.81     | 3.25                | Vérifiée    |
| Poutres secondaires | 23.43 | 0.22     | 3.25                | Vérifiée    |

**Tableau 2.52 :** Vérification de l'effort tranchant dans les poutres pour le bâtiment en (R+8).

#### 2.9.5. Vérification des contraintes de compression dans les poutres à l'état limite de service

Dans notre cas, la fissuration est peut nuisible, donc la vérification se fait pour la contrainte de compression du béton seulement. [18]

La contrainte de compression dans le béton ne doit pas dépasser la contrainte admissible «  $\overline{\sigma}_{bc}$  ».

$$\sigma_{bc} = \frac{M_{ser}}{I} y \leq \overline{\sigma}_{bc} = 0.6 f_{c28} = 15 \text{ MPa} \quad (2.21)$$

$M_{ser}$  : Moment fléchissant à l'état limite de service.

- Le moment d'inertie de la section homogène :

$$I = \frac{b}{3} y^3 + 15 A (d - y)^2 + 15 A' (y - c')^2$$

- On détermine la valeur de  $y$  par la résolution de l'équation suivante :

$$\frac{b}{2} y^2 + 15(A + A') y - 15(A d + A' c') = 0$$

**a) Bâtiment en (R+5)**

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN m)$ | $\sigma_{bc} (Mpa)$ | $\overline{\sigma}_{bc} (MPa)$ |
|-------------|--------------|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| Principales | Appuis       | 47.91           | 6.1                 | 15                             |
|             | Travées      | 28.24           | 3.9                 | 15                             |
| Secondaires | Appuis       | 14.28           | 2.0                 | 15                             |
|             | Travées      | 7.76            | 1.4                 | 15                             |

**Tableau 2.53 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN m)$ | $\sigma_{bc} (Mpa)$ | $\overline{\sigma}_{bc} (MPa)$ |
|-------------|--------------|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| Principales | Appuis       | 47.91           | 6.0                 | 15                             |
|             | Travées      | 28.24           | 3.5                 | 15                             |
| Secondaires | Appuis       | 14.28           | 1.8                 | 15                             |
|             | Travées      | 7.76            | 1.3                 | 15                             |

**Tableau 2.54 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN m)$ | $\sigma_{bc} (Mpa)$ | $\overline{\sigma}_{bc} (MPa)$ |
|-------------|--------------|-----------------|---------------------|--------------------------------|
| Principales | Appuis       | 47.91           | 6.5                 | 15                             |
|             | Travées      | 28.24           | 4.1                 | 15                             |
| Secondaires | Appuis       | 14.28           | 2.1                 | 15                             |
|             | Travées      | 7.76            | 1.4                 | 15                             |

**Tableau 2.55 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN\ m)$ | $\sigma_{bc}(Mpa)$ | $\bar{\sigma}_{bc}(MPa)$ |
|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Principales | Appuis       | 47.91            | 6.4                | 15                       |
|             | Travées      | 28.24            | 3.9                | 15                       |
| Secondaires | Appuis       | 14.28            | 2.1                | 15                       |
|             | Travées      | 7.76             | 1.4                | 15                       |

**Tableau 2.56 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### b) Bâtiment en (R+8)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN\ m)$ | $\sigma_{bc}(Mpa)$ | $\bar{\sigma}_{bc}(MPa)$ |
|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Principales | Appuis       | 53.16            | 5.2                | 15                       |
|             | Travées      | 28.28            | 3.3                | 15                       |
| Secondaires | Appuis       | 17.51            | 1.8                | 15                       |
|             | Travées      | 9.89             | 1.5                | 15                       |

**Tableau 2.57 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN\ m)$ | $\sigma_{bc}(Mpa)$ | $\bar{\sigma}_{bc}(MPa)$ |
|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Principales | Appuis       | 53.16            | 5.0                | 15                       |
|             | Travées      | 28.28            | 3.2                | 15                       |
| Secondaires | Appuis       | 17.51            | 1.8                | 15                       |
|             | Travées      | 9.89             | 1.4                | 15                       |

**Tableau 2.58 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN\ m)$ | $\sigma_{bc}(Mpa)$ | $\bar{\sigma}_{bc}(MPa)$ |
|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Principales | Appuis       | 53.16            | 5.5                | 15                       |
|             | Travées      | 28.28            | 3.5                | 15                       |
| Secondaires | Appuis       | 17.51            | 2.0                | 15                       |
|             | Travées      | 9.89             | 1.7                | 15                       |

**Tableau 2.59 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Poutres     | Localisation | $M_{ser}(KN\ m)$ | $\sigma_{bc}(Mpa)$ | $\bar{\sigma}_{bc}(MPa)$ |
|-------------|--------------|------------------|--------------------|--------------------------|
| Principales | Appuis       | 53.16            | 5.7                | 15                       |
|             | Travées      | 28.28            | 3.7                | 15                       |
| Secondaires | Appuis       | 17.51            | 2.2                | 15                       |
|             | Travées      | 9.89             | 1.7                | 15                       |

**Tableau 2.60 :** Vérification des contraintes de compression dans le béton des poutres pour le bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**Commentaire :** Nous constatons que pour les deux bâtiments les contraintes de compression dans le béton des poutres sont inférieures à la contrainte admissible «  $\overline{\sigma_{bc}}$  ».

### 2.10. Vérification des zones nodales

Dans le but de faire en sorte que les rotules plastiques se forment dans les poutres plutôt que dans les poteaux, concept “ poteaux forts – poutres faibles ”, et ce pour avoir un mécanisme de ruine de type plastique global, le RPA 99/V 2003, **Art 7.6.2**, exige de vérifier la relation suivante :

$$|M_n| + |M_s| \geq 1.25 (|M_w| + |M_e|) \quad (2.22)$$

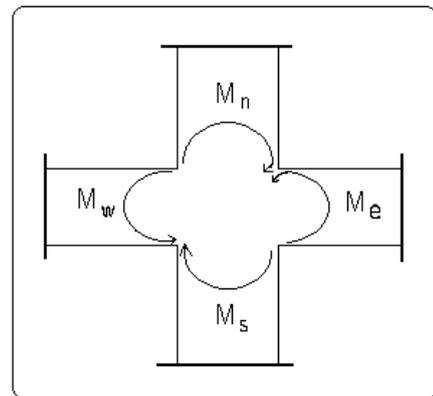
Avec :

$M_n$  : Moment résistant dans le poteau supérieur.

$M_s$  : Moment résistant dans le poteau inférieur.

$M_w$  : Moment résistant gauche de la poutre.

$M_e$  : Moment résistant droit de la poutre.



**Figure 2.7 :** La zone nodale.

Cependant cette vérification est facultative pour les deux derniers niveaux (bâtiments supérieurs à (R+2)).

#### a) Bâtiment en (R+5)

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 6       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 5       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 4       | x-x  | 104.85          | 221.41          | 326.26                | 116.26          | 116.26          | 290.65                       |
|         | y-y  | 104.85          | 221.41          | 326.26                | 130.03          | 130.03          | 325.05                       |
| 3       | x-x  | 221.41          | 221.41          | 442.82                | 116.26          | 116.26          | 290.65                       |
|         | y-y  | 221.41          | 221.41          | 442.82                | 130.03          | 130.03          | 325.05                       |
| 2       | x-x  | 221.41          | 327.52          | 548.93                | 131.91          | 131.91          | 329.77                       |
|         | y-y  | 221.41          | 327.52          | 548.93                | 157.16          | 157.16          | 392.90                       |
| 1       | x-x  | 327.52          | 327.52          | 655.04                | 131.91          | 131.91          | 329.77                       |
|         | y-y  | 327.52          | 327.52          | 655.04                | 157.16          | 157.16          | 392.90                       |

**Tableau 2.61** : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 6       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 5       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 4       | x-x  | 104.85          | 240.93          | 345.78                | 116.26          | 116.26          | 290.65                       |
|         | y-y  | 104.85          | 240.93          | 345.78                | 138.25          | 138.25          | 345.62                       |
| 3       | x-x  | 240.93          | 240.93          | 481.86                | 116.26          | 116.26          | 290.65                       |
|         | y-y  | 240.93          | 240.93          | 481.86                | 138.25          | 138.25          | 345.62                       |
| 2       | x-x  | 240.93          | 327.52          | 548.93                | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 240.93          | 327.52          | 548.93                | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |
| 1       | x-x  | 327.52          | 327.52          | 655.04                | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 327.52          | 327.52          | 655.04                | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |

**Tableau 2.62** : Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 6       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 86.08           | 86.08           | 215.20                       |
| 5       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 86.08           | 86.08           | 215.20                       |
| 4       | x-x  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 3       | x-x  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 2       | x-x  | 186.54          | 277.46          | 464.00                | 101.26          | 101.26          | 253.15                       |
|         | y-y  | 186.54          | 277.46          | 464.00                | 127.48          | 127.48          | 318.70                       |
| 1       | x-x  | 277.46          | 277.46          | 554.92                | 101.26          | 101.26          | 253.15                       |
|         | y-y  | 277.46          | 277.46          | 554.92                | 127.48          | 127.48          | 318.70                       |

**Tableau 2.63 :** Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 6       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 86.08           | 86.08           | 215.20                       |
| 5       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 86.08           | 86.08           | 215.20                       |
| 4       | x-x  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 3       | x-x  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 2       | x-x  | 186.54          | 277.46          | 464.00                | 105.79          | 105.79          | 264.47                       |
|         | y-y  | 186.54          | 277.46          | 464.00                | 133.43          | 133.43          | 333.57                       |
| 1       | x-x  | 289.56          | 289.56          | 579.12                | 105.79          | 105.79          | 264.47                       |
|         | y-y  | 289.56          | 289.56          | 579.12                | 133.43          | 133.43          | 333.57                       |

**Tableau 2.64 :** Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+5) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

**b) Bâtiment en (R+8)**

Tous les résultats de calcul obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés sont récapitulés dans les tableaux suivants :

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 9       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 8       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 7       | x-x  | 104.85          | 221.41          | 326.26                | 105.79          | 105.79          | 264.40                       |
|         | y-y  | 104.85          | 221.41          | 326.26                | 129.79          | 129.79          | 324.47                       |
| 6       | x-x  | 221.41          | 221.41          | 442.82                | 105.79          | 105.79          | 264.40                       |
|         | y-y  | 221.41          | 221.41          | 442.82                | 129.79          | 129.79          | 324.47                       |
| 5       | x-x  | 221.41          | 334.49          | 555.90                | 131.91          | 131.91          | 329.77                       |
|         | y-y  | 221.41          | 334.49          | 555.90                | 151.25          | 151.25          | 378.12                       |
| 4       | x-x  | 334.49          | 334.49          | 668.96                | 131.91          | 131.91          | 329.77                       |
|         | y-y  | 334.49          | 334.49          | 668.96                | 151.25          | 151.25          | 378.12                       |
| 3       | x-x  | 334.49          | 631.42          | 965.91                | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 334.49          | 631.42          | 965.91                | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |
| 2       | x-x  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |
| 1       | x-x  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |

**Tableau 2.65 :** Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T1).

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 9       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 8       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 91.34           | 91.34           | 228.35                       |
| 7       | x-x  | 104.85          | 240.93          | 345.78                | 105.79          | 105.79          | 264.40                       |
|         | y-y  | 104.85          | 240.93          | 345.78                | 129.79          | 129.79          | 324.47                       |
| 6       | x-x  | 240.93          | 240.93          | 481.86                | 105.79          | 105.79          | 264.47                       |
|         | y-y  | 240.93          | 240.93          | 481.86                | 129.79          | 129.79          | 324.47                       |
| 5       | x-x  | 240.93          | 354.80          | 595.73                | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 240.93          | 354.80          | 595.73                | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |
| 4       | x-x  | 354.80          | 354.80          | 709.60                | 137.13          | 137.13          | 342.82                       |
|         | y-y  | 354.80          | 354.80          | 709.60                | 171.19          | 171.19          | 427.97                       |
| 3       | x-x  | 354.80          | 631.42          | 986.22                | 149.64          | 149.64          | 374.10                       |
|         | y-y  | 354.80          | 631.42          | 986.22                | 185.22          | 185.22          | 463.05                       |
| 2       | x-x  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 149.64          | 149.64          | 374.10                       |
|         | y-y  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 185.22          | 185.22          | 463.05                       |
| 1       | x-x  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 149.64          | 149.64          | 374.10                       |
|         | y-y  | 631.42          | 631.42          | 1262.84               | 185.22          | 185.22          | 463.05                       |

**Tableau 2.66 :** Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule RPA (T2).

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 9       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 86.08           | 86.08           | 215.20                       |
| 8       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 86.08           | 86.08           | 215.20                       |
| 7       | x-x  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 6       | x-x  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 5       | x-x  | 186.54          | 325.73          | 512.27                | 116.26          | 116.26          | 290.65                       |
|         | y-y  | 186.54          | 325.73          | 512.27                | 145.34          | 145.34          | 363.35                       |
| 4       | x-x  | 325.73          | 325.73          | 651.46                | 116.26          | 116.26          | 290.65                       |
|         | y-y  | 325.73          | 325.73          | 651.46                | 145.34          | 145.34          | 363.35                       |
| 3       | x-x  | 325.73          | 589.45          | 915.18                | 126.68          | 126.68          | 316.70                       |
|         | y-y  | 325.73          | 589.45          | 915.18                | 151.25          | 151.25          | 378.12                       |
| 2       | x-x  | 589.45          | 589.45          | 1178.90               | 126.68          | 126.68          | 316.70                       |
|         | y-y  | 589.45          | 589.45          | 1178.90               | 151.25          | 151.25          | 378.12                       |
| 1       | x-x  | 589.45          | 589.45          | 1178.90               | 126.68          | 126.68          | 316.70                       |
|         | y-y  | 589.45          | 589.45          | 1178.90               | 151.25          | 151.25          | 378.12                       |

**Tableau 2.67 :** Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule de l'Eurocode 8.

| Niveaux | Sens | $M_n$<br>(KN.m) | $M_s$<br>(KN.m) | $M_n + M_s$<br>(KN.m) | $M_w$<br>(KN.m) | $M_e$<br>(KN.m) | $1.25 (M_w + M_e)$<br>(KN.m) |
|---------|------|-----------------|-----------------|-----------------------|-----------------|-----------------|------------------------------|
| 9       | x-x  | -               | 104.85          | 104.85                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | -               | 104.85          | 104.85                | 75.51           | 75.51           | 188.77                       |
| 8       | x-x  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 65.75           | 65.75           | 164.37                       |
|         | y-y  | 104.85          | 104.85          | 209.70                | 75.51           | 75.51           | 188.77                       |
| 7       | x-x  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 104.85          | 186.54          | 291.39                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 6       | x-x  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 88.70           | 88.70           | 221.75                       |
|         | y-y  | 186.54          | 186.54          | 373.08                | 114.36          | 114.36          | 285.90                       |
| 5       | x-x  | 186.54          | 325.73          | 512.27                | 111.04          | 111.04          | 277.60                       |
|         | y-y  | 186.54          | 325.73          | 512.27                | 139.43          | 139.43          | 348.57                       |
| 4       | x-x  | 325.73          | 325.73          | 651.46                | 111.04          | 111.04          | 277.60                       |
|         | y-y  | 325.73          | 325.73          | 651.46                | 139.43          | 139.43          | 348.57                       |
| 3       | x-x  | 325.43          | 548.57          | 874.00                | 121.47          | 121.47          | 303.67                       |
|         | y-y  | 325.43          | 548.57          | 874.00                | 145.34          | 145.34          | 363.35                       |
| 2       | x-x  | 548.57          | 548.57          | 1097.14               | 121.47          | 121.47          | 303.67                       |
|         | y-y  | 548.57          | 548.57          | 1097.14               | 145.34          | 145.34          | 363.35                       |
| 1       | x-x  | 548.57          | 548.57          | 1097.14               | 121.47          | 121.47          | 303.67                       |
|         | y-y  | 548.57          | 548.57          | 1097.14               | 145.34          | 145.34          | 363.35                       |

**Tableau 2.68 :** Vérification des zones nodales du bâtiment en (R+8) dans le cas d'étude par la formule d'ASCE 7-05.

### Commentaire :

Nous constatons que la vérification des zones nodales est justifiée, sauf pour les deux derniers niveaux des bâtiments.

### 2.11. Conclusions

L'analyse des résultats de calcul linéaire des deux bâtiments obtenus par chacune des quatre formules des trois codes considérés, fait ressortir les conclusions suivantes :

- La période propre fondamentale est l'un des paramètres à avoir une influence considérable sur les forces sismiques de dimensionnement d'un bâtiment.
- Les formules du RPA 99/ V 2003 donnent des forces sismiques de dimensionnement qui sont plus grandes que celles résultants de l'utilisation des formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05.
- Les sections d'acier dans les éléments structuraux poutres et poteaux obtenues dans le cas de dimensionnement en considérant les formules du RPA 99/ V 2003 sont plus importantes que celles obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05, en particulier pour les niveaux inférieurs des bâtiments. Les formules issues du RPA 99 donnent des augmentations, dans les deux premiers niveaux des bâtiments, de l'ordre de **19%** à **48%** pour les poteaux et de l'ordre de **9%** à **25%** pour les poutres.

De façon générale, nous pouvons conclure que le règlement parasismique algérien (RPA, 2003) conduit à un dimensionnement plus sécuritaire.

## Chapitre 3

---

### Présentation de l'analyse Pushover

### 3.1. Introduction

De plus en plus les ingénieurs poussent les matériaux à travailler dans le domaine post-élastique. Après avoir fait l'étude des deux structures dans le domaine élastique, il est souhaitable de connaître leurs comportements dans le domaine plastique. Plusieurs méthodes sont proposées dans la littérature, cependant la plus utilisée est la méthode Pushover.

La méthode d'analyse de type « Pushover », basée sur les courbes de capacité (ou bien les courbes Pushover), représente une nouvelle approche d'estimation de dommages (structurels et non structurels), incluant notamment les effets du comportement post-élastique.

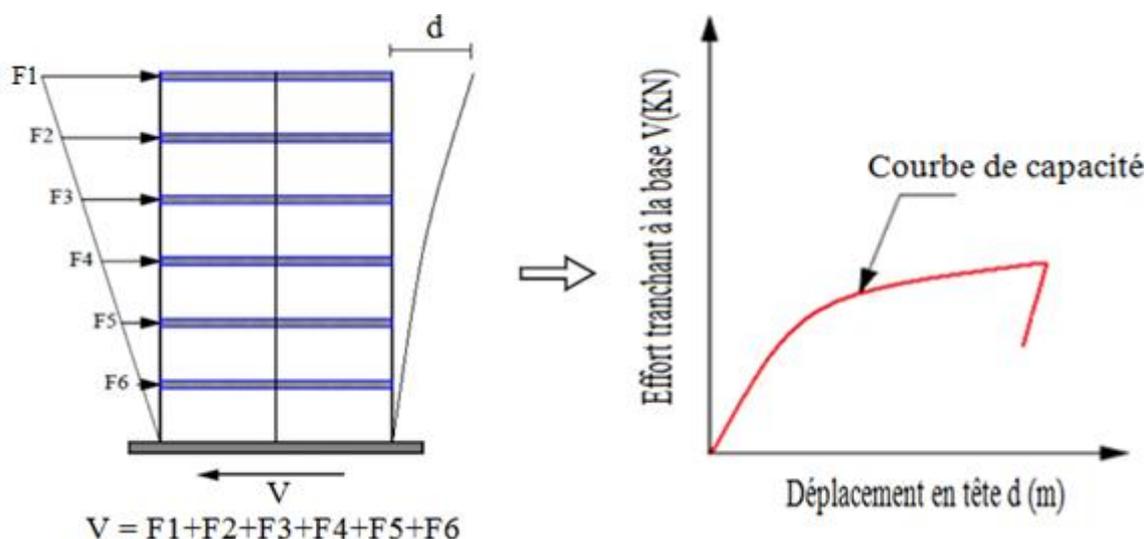
Les techniques d'analyse de structures consistent essentiellement à comparer un paramètre de demande de déplacement avec un paramètre de capacité.

### 3.2. Concepts fondamentaux d'une analyse Pushover

#### 3.2.1. Description de l'analyse Pushover

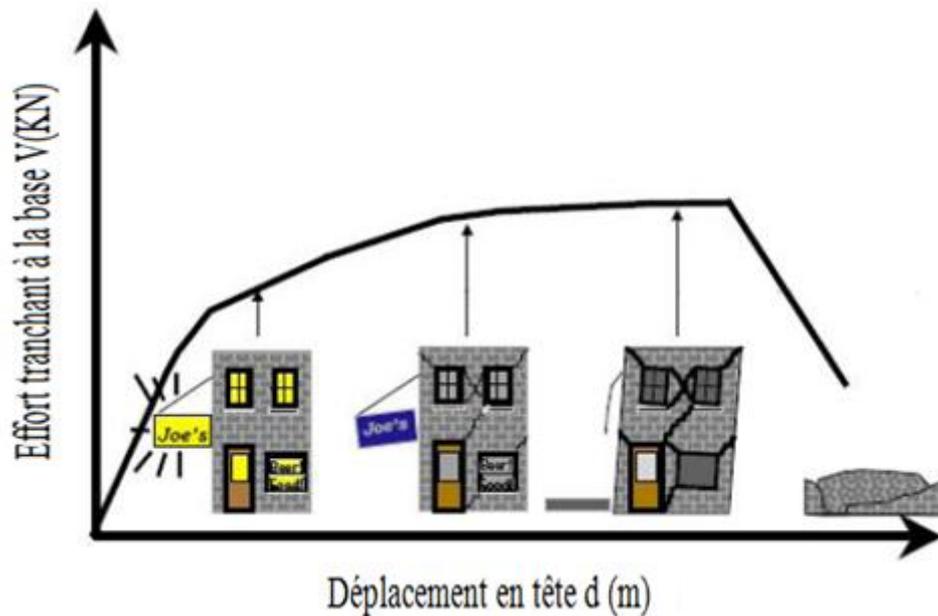
L'analyse statique non linéaire par poussée progressive communément appelée analyse Pushover, est une méthode approximative dont laquelle la structure est assujettie à des charges latérales qui représentent les forces d'inertie qui se produisent à la suite d'une accélération du sol. Ces charges latérales croissent d'une façon monotone jusqu'à atteindre une première plastification d'un élément structural (apparition de rotule plastique), le modèle mathématique de la structure est modifié pour tenir compte de la résistance réduite. Les charges latérales sont à nouveau appliquées jusqu'à ce que d'autres éléments structuraux supplémentaires atteignent la résistance plastique. Ce processus se poursuit jusqu'à ce que la structure devienne instable ou jusqu'à une limite fixe soit atteinte. [14]

L'analyse Pushover utilise une série d'analyses séquentielles élastiques, superposées pour approximer une courbe de capacité ou courbe [effort tranchant à la base – déplacement au sommet de la structure] (figure 3.1). [15]



**Figure 3.1 :** Courbe de capacité (Pushover) d'une structure.

La courbe de capacité se rapproche de la manière dont la structure se comporte, après avoir dépassée la limite élastique (figure 3.2).



**Figure 3.2 :** Niveaux d'endommagement décrits par une courbe de capacité.

D'après la figure 3.2 nous remarquons que la courbe est composée de quatre segments, chaque segment correspond à une phase d'endommagement.

- a) **Le premier niveau** correspond au comportement élastique de la structure et représente le niveau de conception parasismique habituel. Il indique par conséquent un état d'endommagement superficiel (ou bien de non endommagement).
- b) **Le deuxième niveau** d'endommagement correspond à un niveau de dommage contrôlé. La stabilité de la structure n'est pas en danger, mais toutefois un endommagement mineur est susceptible de se développer.
- c) **Le troisième niveau** représente un état d'endommagement avancé, sa stabilité étant en danger. Au delà de ce niveau, la structure est susceptible à l'effondrement, ne présentant aucune capacité de résistance.

### 3.2.2. Principe de l'analyse Pushover

L'analyse statique Pushover est basée sur l'hypothèse que la réponse de la structure peut être assimilée à la réponse d'un système à un seul degré de liberté équivalent. Ceci implique que la réponse est fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration et que la forme de ce mode demeure constante durant la durée du séisme.

Les chercheurs ont montré que ces hypothèses donnent de bons résultats concernant la réponse sismique (déplacement maximal) donnée par le premier mode de vibration de la structure simulé à un système linéaire équivalent. [11]

### 3.2.3. But de l'analyse Pushover

Le but de l'analyse Pushover est de décrire le comportement réel de la structure et d'évaluer sous des sollicitations données les déplacements dans les éléments de la structure.

L'analyse Pushover est supposée fournir des informations sur plusieurs caractéristiques de la réponse qui ne peuvent être obtenues par une simple analyse élastique, nous pouvons citer :

- L'estimation des déformations dans le cas des éléments qui doivent subir des déformations inélastiques afin de dissiper de l'énergie communiquée à la structure par le mouvement du sol.
- La détermination des sollicitations réelles sur les éléments fragiles, telles que les sollicitations sur les assemblages de contreventements, les sollicitations axiales sur les poteaux, les moments sur les jonctions poteau-poutre, les sollicitations de cisaillement.
- Les conséquences de la détérioration de la résistance des éléments sur le comportement global de la structure ce qui permet de déterminer les points forts et les points faibles de notre structure.
- L'identification des zones critiques dans lesquelles les déformations sont supposées être grandes.
- L'identification des discontinuités de résistance en plan et en élévation qui entraînent des variations dans les caractéristiques dynamiques dans le domaine inélastique.
- L'estimation des déplacements inter-étage qui tiennent compte des discontinuités de la rigidité et de la résistance qui peut être utilisée dans le contrôle de l'endommagement.

### 3.2.4. Le déplacement cible

La relation entre l'analyse Pushover, qui est statique, et le comportement réel de l'ossature sous séisme, qui est dynamique, est établie par la définition d'un déplacement « cible », déplacement maximum attendu de la structure. Il permet d'associer les résultats de l'analyse en poussée progressive, qui caractérisent « l'offre de déformation », à « la demande de déformation » correspondant au déplacement cible.

### 3.2.5. Distribution des charges latérales

La sélection du mode de chargement (incrémental) est un des aspects le plus critique de la méthode, car ce mode de chargement est censé représenter la distribution des forces d'inertie dans le calcul sismique.

Ces forces varient en fonction de la sévérité du séisme (déplacement inélastiques induits), mais dans cette analyse, l'hypothèse de base est que la forme de la distribution des forces latérales doit être invariante (pendant le séisme), et que les déformations obtenues doivent être comparables avec celles données par un calcul dynamique.

Il est recommandé (Fajfar, 2000 [24]; Kunnath, 2004 [27]) d'utiliser au moins deux distributions des forces :

- Distribution uniforme c'est-à-dire que la force à chaque niveau est proportionnelle à la masse de ce niveau ( $S_j = m_j$ ).
- Distribution modale qui est proportionnelle aux forces latérales qui sont consistantes avec la distribution des forces latérales déterminée lors de l'analyse élastique. Elle doit être une des distributions suivantes :
  1. distribution de mode fondamentale : ( $S_j = m_j \phi_{j1}$ ) ou  $m_j$  est la masse et  $\phi_{j1}$  est la valeur du mode propre au niveau  $j$ .
  2. force latérale équivalente : ( $S_j = m_j h_j^k$ ) ou  $h_j$  est la hauteur d'étages  $j$  à partir de la base, et  $k = 1$  si la période fondamentale  $T \leq 0.5$  s,  $k = 2$  si  $T \geq 2.5$  s, et varie linéairement entre eux.
  3. distribution des forces latérales proportionnelle aux forces d'inerties des étages et compatible avec la distribution des efforts tranchants dans ces étages. Elle est déterminée par une analyse spectrale de la structure basée sur la combinaison modale SRSS (racine carrée de la somme des carrés), avec un nombre suffisant de modes pour avoir 90% de la masse totale.
  4. distribution modale :  $S_j = \frac{m_j \phi_{j1}}{\sum m_j \phi_{j1}} S$  et qui doit être utilisée si plus que 75% de la masse totale participe au mode fondamental dans la direction prise en considération.  $S_j$  est la force latérale à l'étage  $j$ ,  $m_j$  est la masse de l'étage  $j$ ,  $\phi_{j1}$  est l'amplitude du mode fondamentale au niveau  $j$ , et  $S$  est l'effort tranchant à la base.

La question du choix du mode du chargement représente le point de faiblesse ou (limite) de l'analyse Pushover, car l'utilisation d'une forme invariante de chargement peut conduire à des résultats erronés, en particulier pour les structures à longues périodes de vibration. [22]

### 3.2.6. Idéalisation de la courbe de capacité

La courbe de capacité est idéalisée par une courbe bilinéaire en utilisant une équivalence basée sur l'égalité des énergies dissipées de telle manière que les aires en-dessous des deux courbes réelles et idéalisées soient égales, ce qui nous permet de déterminer les paramètres caractérisant l'état élastique limite (point **B**) qui représente l'entrée dans le domaine post-élastique et ceux caractérisant l'état ultime de résistance (point **C**) qui représente la perte totale de la capacité résistante de la structure (figure 3.3).

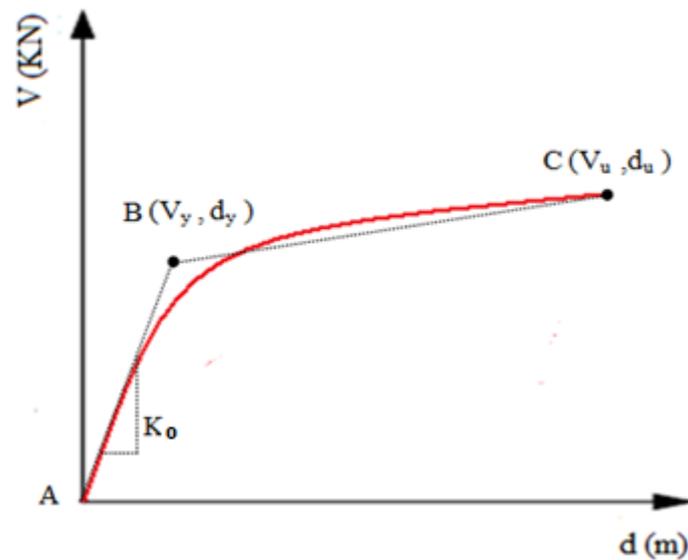


Figure 3.3 : Idéalisation de la courbe de capacité.

Avec :

$V_y$  : Charge élastique limite.

$d_y$  : Déplacement élastique limite.

$V_u$  : Charge ultime de résistance.

$d_u$  : Déplacement ultime.

$K_o$  : Raideur initiale ( $K_o = V_y / d_y$ ).

### 3.3. Approche du code utilisé pour cette étude

Plusieurs approches ont été proposées pour appliquer la procédure d'analyse statique non linéaire. Ces approches s'appuient souvent sur une modélisation du comportement non linéaire des structures et sur un calcul statique équivalent de la réponse de la structure représentée par une courbe reliant la force résultante à la base et le déplacement en tête connu sous le nom de « Pushover » ou « Poussée Progressive ». Il existe différents codes traitant cette méthode à savoir les codes FEMA 273[11], FEMA 356 [7], ATC 40 [9] et Eurocode 8 [6]. Dans notre étude nous allons utiliser l'approche du code ATC 40 [9] qui est illustrée dans ce qui suit.

#### 3.3.1. Approche du code ATC 40

La méthode d'analyse proposée dans ATC 40 [9] est désignée par la « **méthode du spectre de capacité** ». Le principe de cette méthode consiste à superposer une courbe représentant la capacité résistante d'une structure issue d'une analyse statique non linéaire par Pushover avec une courbe représentative de la sollicitation apportée par le séisme dérivé du spectre de réponse élastique à 5% d'amortissement. L'intersection de ces deux courbes représente un point de fonctionnement (*point de performance*) permettant d'évaluer le déplacement maximal que la structure subira et subséquemment son degré d'incursion dans le domaine plastique ce qui permet d'évaluer l'amortissement équivalent correspondant.

##### 3.3.1.1. Conversion de la courbe de capacité en spectre de capacité

Pour utiliser la méthode du spectre de capacité, il est nécessaire de convertir la courbe de capacité, qui est en termes d'effort tranchant à la base et le déplacement en tête ( $V - d$ ) en un spectre de capacité qui est la représentation de la courbe de capacité en format accélération spectrale – déplacement spectrale ( $S_a - S_d$ ) (figure 3.4). Les équations nécessaires pour faire la transformation sont les suivantes :

$$S_a = \frac{V/W}{\alpha_1} \quad (3.1)$$

$$S_d = \frac{d}{PF_1 \phi_{N1}} \quad (3.2)$$

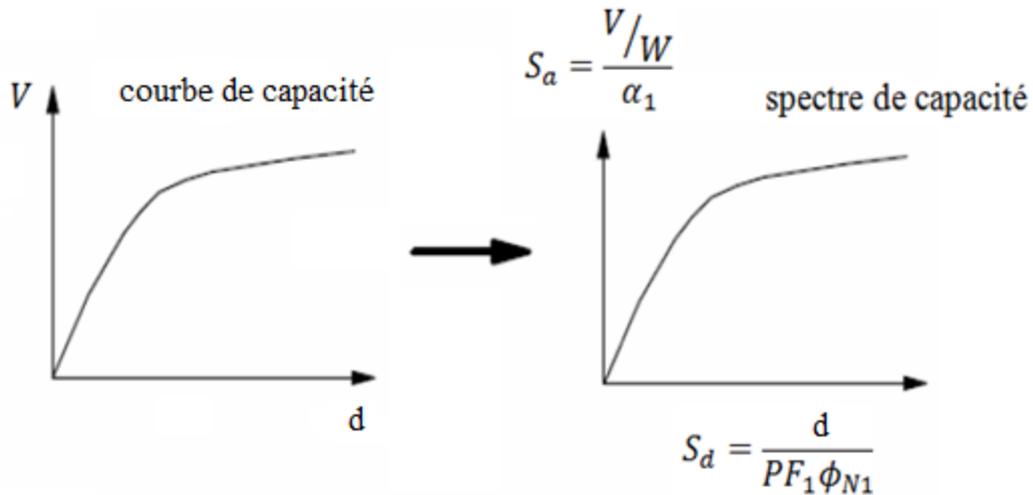
Où :

$PF_1$  : Facteur de participation modale du premier mode.

$\alpha_1$  : Coefficient de masse modal du premier mode.

$W$ : Poids total de la structure.

$\phi_{N1}$ : Amplitude au sommet du premier mode.



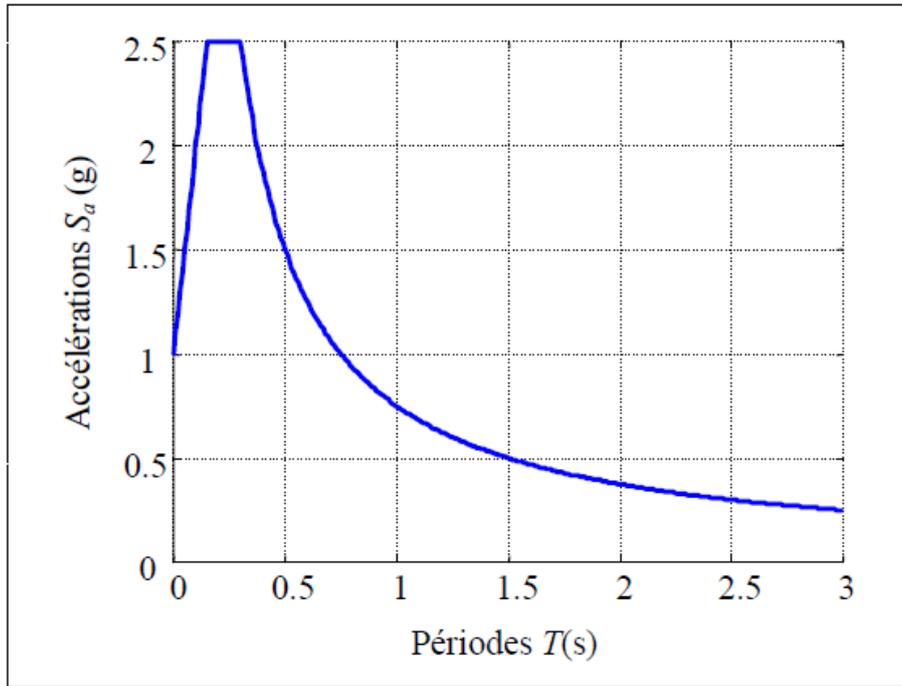
**Figure 3.4 :** Conversion de la courbe de capacité en spectre de capacité.

### 3.3.1.2. Conversion du spectre de la demande au format accélération – déplacement

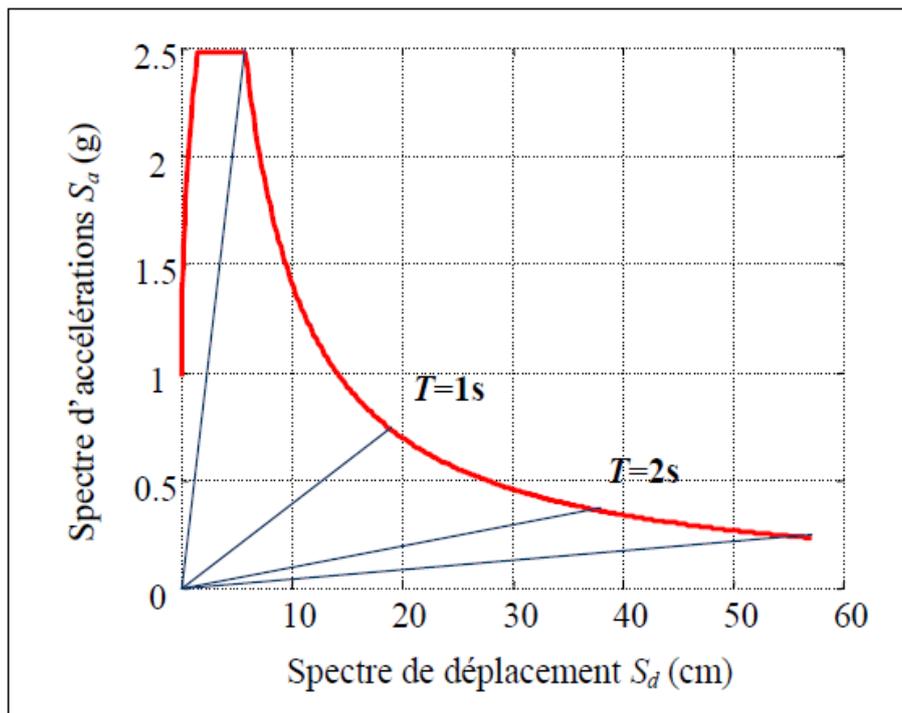
Le spectre de réponse élastique (figure 3.5a) est transformé du format traditionnel accélérations – périodes ( $S_a - T$ ) au format accélérations – déplacements ( $S_a - S_d$ ) en utilisant la relation suivante :

$$S_d = \frac{T^2}{4\pi^2} S_a \quad (3.3)$$

Où,  $S_a$  et  $S_d$  sont respectivement, l'accélération spectrale et le déplacement spectrale correspondant aux périodes  $T$ , avec une constante d'amortissement visqueux fixée à 5% (figure 3.5b).



(a) Spectre de réponse dans le format traditionnel accélérations – période.



(b) Spectre de réponse dans le format accélérations – déplacements.

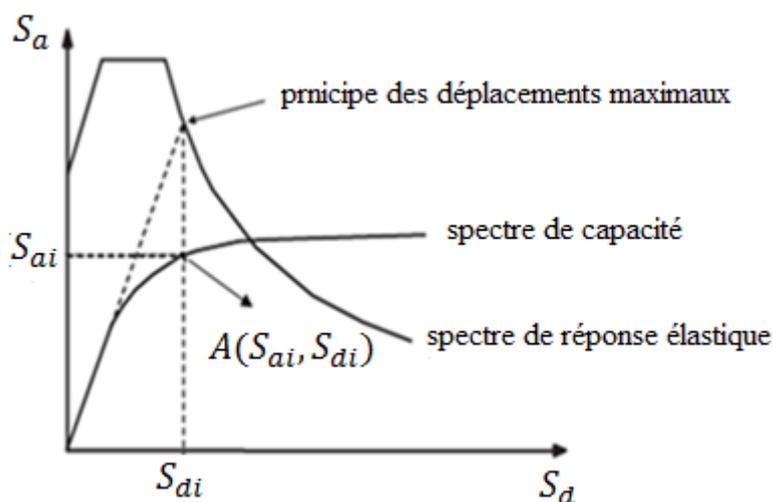
**Figure 3.5 :** Conversion du spectre élastique ( $S_a - T$ ) au format ( $S_a - S_d$ ).

### 3.3.1.3. Procédure d'évaluation du point de performance

Il existe trois procédures dans le code ATC40 [9] pour le calcul du point de performance, à savoir les procédures **A**, **B** et **C**. Les procédures **A** et **B** sont analytiques et peuvent être programmées, alors que la procédure **C** est purement graphique et plus adapté à l'analyse à la main.

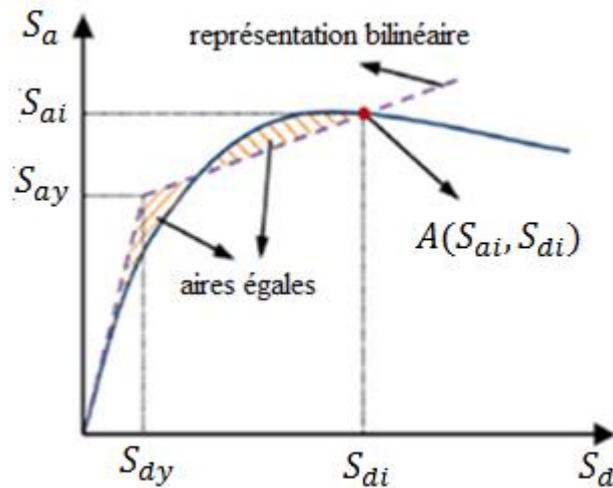
Dans notre étude, nous allons utiliser la **procédure A** qui est la plus simple et la mieux assimilée, c'est une méthode itérative elle permet de réduire le spectre de la demande élastique amorti à **5%** en fonction de l'amortissement effectif ( $\xi_{eff}$ ) jusqu'à ce que la convergence soit satisfaite. Cette procédure comprend les étapes suivantes :

- 1- Développer le spectre de réponse à 5% d'amortissement appropriée au site en format accélération – déplacement ( $S_a - S_d$ ).
- 2- Transformer la courbe de capacité en spectre de capacité et procéder au tracé de la courbe sur le même graphique que le spectre de réponse amorti à 5%.
- 3- Sélectionner le premier point d'essai de coordonnées  $A(S_{ai}, S_{di})$  qui correspond au critère d'égalité des déplacements maximaux (figure 3.6).



**Figure 3.6 :** Critère d'égalité des déplacements maximaux.

- 4- Développer une représentation bilinéaire du spectre de capacité à partir du point  $A(S_{ai}, S_{di})$  telle que l'aire sous le spectre de capacité soit la même que celui sous la courbe bilinéaire qui nous permet de sélectionner les limites élastiques ( $S_{ay}, S_{dy}$ ) (figure 3.7).



**Figure 3.7 :** Représentation bilinéaire du spectre de capacité.

- 5- Calculer l'amortissement effectif ( $\xi_{eff}$ ), qui correspond à l'énergie dissipée par la structure en utilisant l'équation suivante :

$$\xi_{eff} = 0.05 + \kappa \cdot \xi_o \quad (3.4)$$

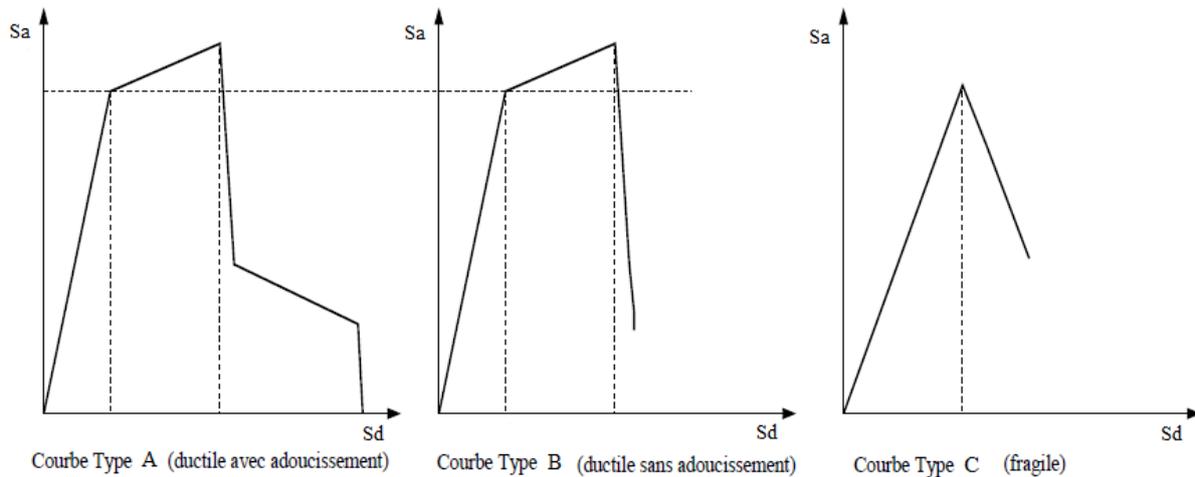
0.05 : Amortissement visqueux inhérent à la structure (supposé constant).

$\kappa$  : Facteur de modification de l'amortissement.

$\xi_o$  : Amortissement visqueux équivalent donné par la formule suivante :

$$\xi_o = 0.637 \cdot \frac{(S_{ay} S_{di} - S_{dy} S_{ai})}{S_{ai} S_{di}} \quad (3.5)$$

Le facteur  $\kappa$  dépend du comportement de la structure, qui à son tour dépend du système de contreventement et de la durée du séisme. Pour simplifier, le code ATC 40 [9] définit trois types de comportement structural. Le type A représente un comportement ductile avec une boucle d'hystérésis raisonnablement complète, alors que le type C représente le comportement fragile (pas de déformation plastique). Le type B représente le comportement intermédiaire (semi-ductile). (Figure 3.8)



**Figure 3.8** : Types de comportement de structure.

Les valeurs du facteur  $\kappa$  affectées aux trois types de comportement structurel sont données dans le tableau 3.1. [9]

| Typologies des structures | $\xi_o$ (%)    | $\kappa$   |
|---------------------------|----------------|--|
| Type A                    | $\leq 16.25$   | 1.0  |
|                           | $> 16.25$      | $1.13 - \frac{0.51(S_{ay} S_{di} - S_{dy} S_{ai})}{S_{ai} S_{di}}$   |
| Type B                    | $\leq 25$      | 0.67   |
|                           | $> 25$         | $0.845 - \frac{0.446(S_{ay} S_{di} - S_{dy} S_{ai})}{S_{ai} S_{di}}$ |
| Type C                    | Toutes valeurs | 0.33   |

**Tableau 3.1** : Valeurs du facteur de modification de l'amortissement,  $\kappa$ .

6- Calcul et application des coefficients de réduction spectraux  $S_{RA}$  et  $S_{RV}$  sur le spectre de la demande amorti à 5%.

$$S_{RA} = \frac{3.21 - 0.68 \ln(\xi_{eff})}{2.12} \geq \text{valeur du Tableau 3.2} \quad (3.6)$$

$$S_{RV} = \frac{2.31 - 0.41 \ln(\xi_{eff})}{1.65} \geq \text{valeur du tableau 3.2} \quad (3.7)$$

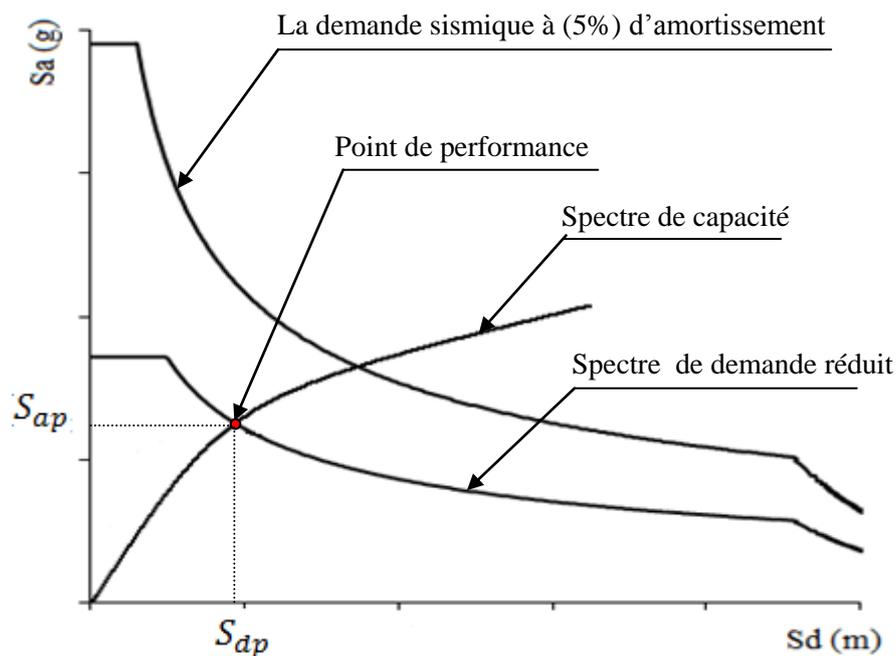
**Remarque** : les valeurs minimales de  $S_{RA}$  et  $S_{RV}$  sont données dans le tableau 3.2. [9]

| Typologies des structures | $S_{RA}$ | $S_{RV}$ |
|---------------------------|----------|----------|
| Type A                    | 0.33     | 0.50     |
| Type B                    | 0.44     | 0.56     |
| Type C                    | 0.46     | 0.67     |

**Tableau 3.2** : Valeurs minimales de  $S_{RA}$  et  $S_{RV}$ .

- 7- Tracer le spectre de la demande réduit une fois qu'il est multiplier par les coefficients  $S_{RA}$  et  $S_{RV}$ . Le déplacement correspondant à l'intersection est noté  $S_{dp}$  (figure 3.9) tel que :

$$0.95 S_{di} \leq S_{dp} \leq 1.05 S_{di} \quad (3.8)$$

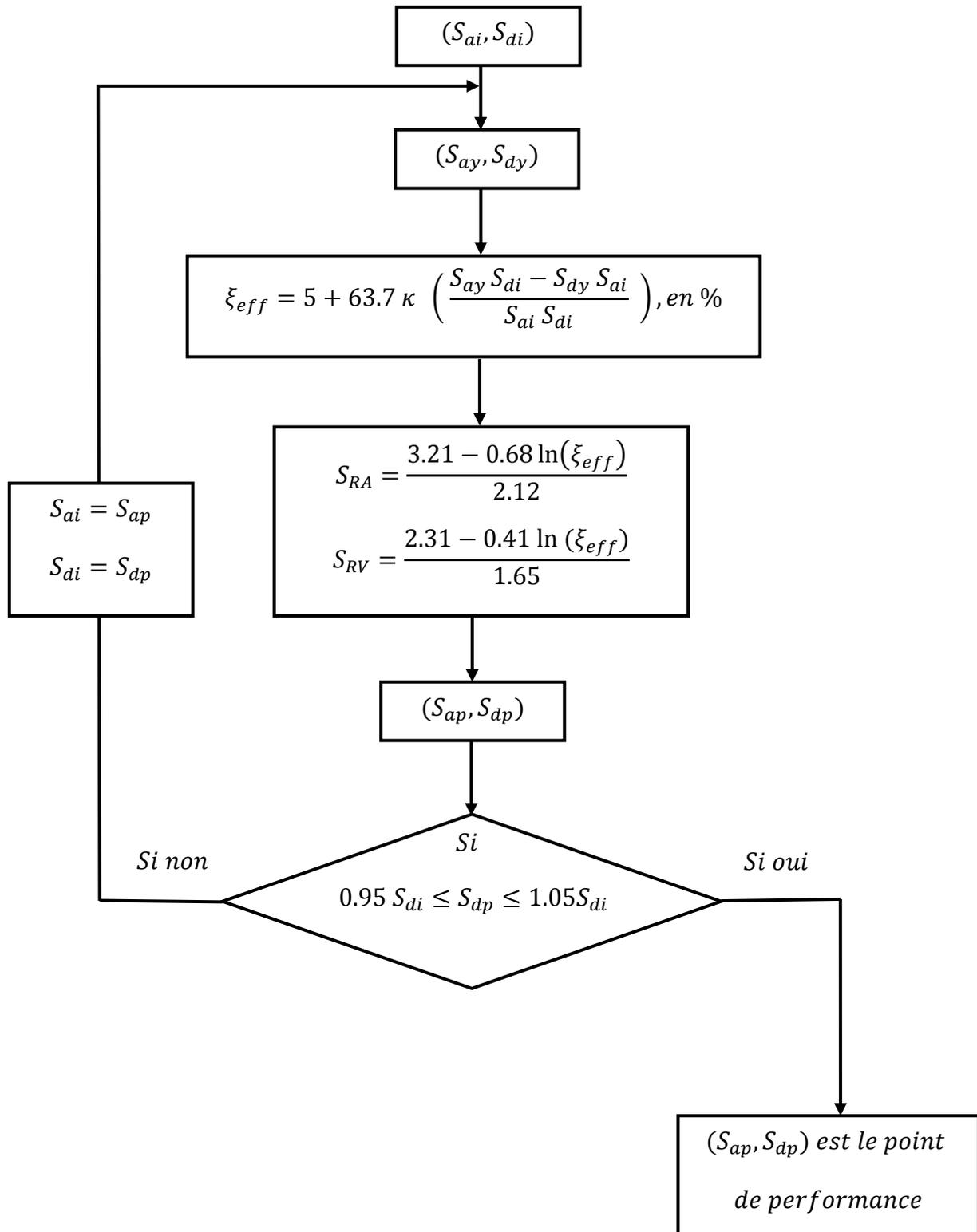


**Figure 3.9** : Détermination du point de performance.

- 8- Si le taux d'erreur limité à 5% est vérifié alors  $S_{dp}$  représentent le déplacement maximal attendu pour la demande du séisme, et le point  $(S_{ap}, S_{dp})$  est le point de performance. Sinon un autre point doit être choisi et reprendre depuis l'étape 4. Le nouveau point choisi peut être le point  $(S_{ap}, S_{dp})$ .

L'ensemble de ces étapes sont représentées sur l'organigramme suivant :

➤ Organigramme de la procédure A :



## Chapitre 4

---

Impact des périodes propres fondamentales sur le la performance sismique des bâtiments

## 4.1. Introduction

Les analyses statiques non linéaires (Pushover) sont effectuées sur les deux bâtiments dimensionnés au chapitre 2 en tenant compte de chacune des quatre formules empiriques, afin d'étudier leurs comportements dans le domaine non linéaire et d'évaluer leurs performances sismiques.

Au terme de ces analyses non linéaires, nous procédons au tracé des courbes de capacité pour chaque bâtiment donnant, chacune, l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement en tête du bâtiment.

Nous déterminons aussi les points de performance ainsi que les déplacements relatifs inter-étages et les demandes en ductilité ( $\mu_D$ ) qui caractérise le degré de pénétration des bâtiments dans le domaine plastique.

Nous déterminons également les distributions des rotules plastiques dans les différents éléments structuraux poutres et poteaux ainsi que leurs niveaux de dommages correspondant aux points de performance.

## 4.2. Paramètres de modélisation et critères d'acceptation de l'analyse Pushover

### 4.2.1. Définition du comportement non linéaire des poutres et poteaux

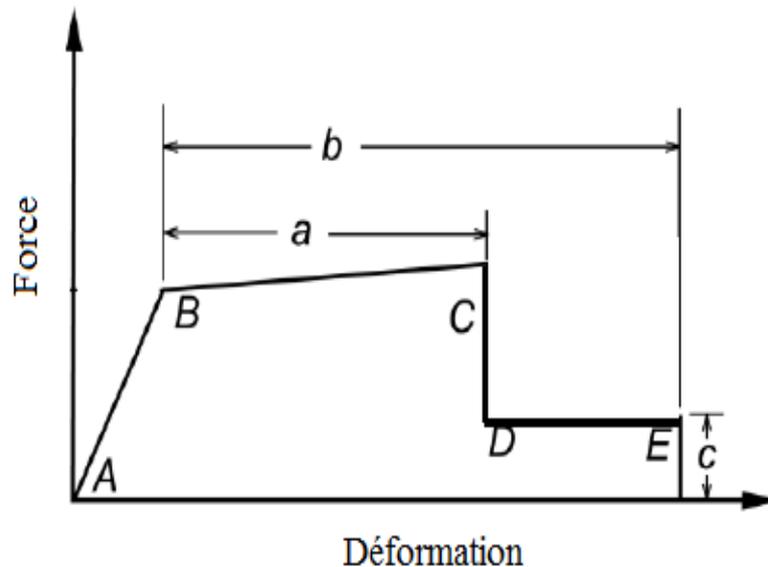
Le comportement non linéaire des éléments structuraux poutres et poteaux est représenté par l'attribution des rotules plastiques concentrées à chacune de leurs extrémités, car le type de rupture possible dans une structure en portique auto-stable se fait généralement par la formation des rotules plastiques au droit des nœuds poteaux – poutres. [21]

Ces rotules plastiques sont caractérisées par certains paramètres qui définissent la capacité de déplacement ou de rotation de la rotule, avant sa rupture. Ces paramètres sont fonction des caractéristiques de l'élément correspondant (résistance du matériau, section, ferrailage, ...). Dans notre cas, nous avons utilisé les paramètres par défaut du logiciel de calcul **Etabs v 9.7**, qui sont issus des deux règlements de constructions FEMA 273 [11] et ATC 40 [9].

Les types de rotules plastiques considérés dans cette étude sont :

- **Poutres** : rotules de flexion ( $M_3$ ), et rotules de cisaillement ( $V_2$ ).
- **Poteaux** : rotules de flexion (**P-M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>**) qui tient compte de la loi de variation du moment résistant en fonction de l'effort normal dans le poteau, et rotules de cisaillement suivant l'axe 2-2 ( $V_2$ ) et l'axe 3-3 ( $V_3$ ).

Pour chaque type de rotule, le comportement non linéaire est défini par un modèle idéalisé, représenté par une courbe force – déformation (Figure 4.1). [11]



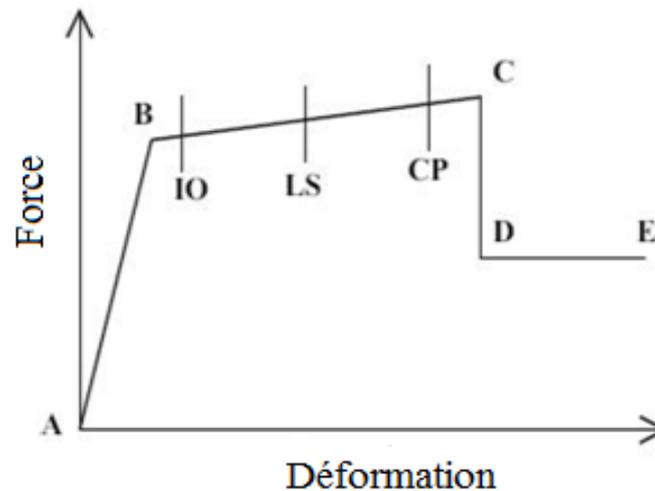
**Figure 4.1** : Courbe Force – Déformation.

La courbe est composée d'une réponse linéaire (ou réponse élastique) entre les points **A** et **B**. Au point **B**, l'élément atteint la limite élastique et à nouveau une réponse linéaire est observé avec une rigidité réduite entre les points **B** et **C**. Au point **C**, une réduction soudaine de la résistance de l'élément se produit et le graphique tombe au point **D**. Au-delà du point **D**, l'élément répond avec une résistance réduite jusqu'au point **E**, où la perte définitive de la résistance de l'élément a lieu.

Les paramètres **a**, **b** et **c** désignent les déformations qui se produisent après dépassement de la limite élastique de l'élément, c'est-à-dire, la déformation plastique. Ces paramètres sont déterminés par le logiciel de calcul en se référant aux tableaux donnés dans le code FEMA 273 [11]. (Annexe A.2)

#### 4.2.2. Critères d'acceptation et niveau de performance de la rotule plastique

Le code FEMA 273[11] définit trois critères d'acceptation en fonction des niveaux de déformation (déplacements, contraintes, ou rotations) de la rotule plastique. Ils sont utilisés pour indiquer l'état de la rotule plastique lors de la visualisation des résultats de l'analyse, et qui sont désignés par **IO**, **LS** et **CP** (figure 4.2).



**Figure 4.2 :** Courbe Force – Déformation et critères d’acceptation d’une rotule plastique.

- Au niveau **IO** (*Immediate Occupancy*), les dommages sont relativement limités, l’élément garde une grande partie de sa raideur initiale.
- Au niveau **LS** (*Life Safety*), l’élément a subi des dommages importants, et il peut y avoir une perte significative de sa raideur.
- Au niveau **CP** (*Collapse Prévention*), l’élément a subi de grandes déformations, au delà de ce niveau l’élément est susceptible de se rompre.

Les critères d’acceptation **IO**, **LS** et **CP** qui définissent les niveaux de performance des rotules plastiques sont donnés dans le code FEMA 273 [11]. (**Annexe A.2**)

### 4.3. Distribution des charges latérales

Dans notre cas, les structures étudiées ont des distributions uniformes des masses et des rigidités (structures régulières), de manière à éviter l’influence des modes supérieurs. Ainsi, les distributions des charges latérales utilisées dans notre étude, sont les forces latérales obtenues lors de l’analyse par la méthode statique équivalente du RPA99/ V 2003 [2] correspondant au mode fondamentale.

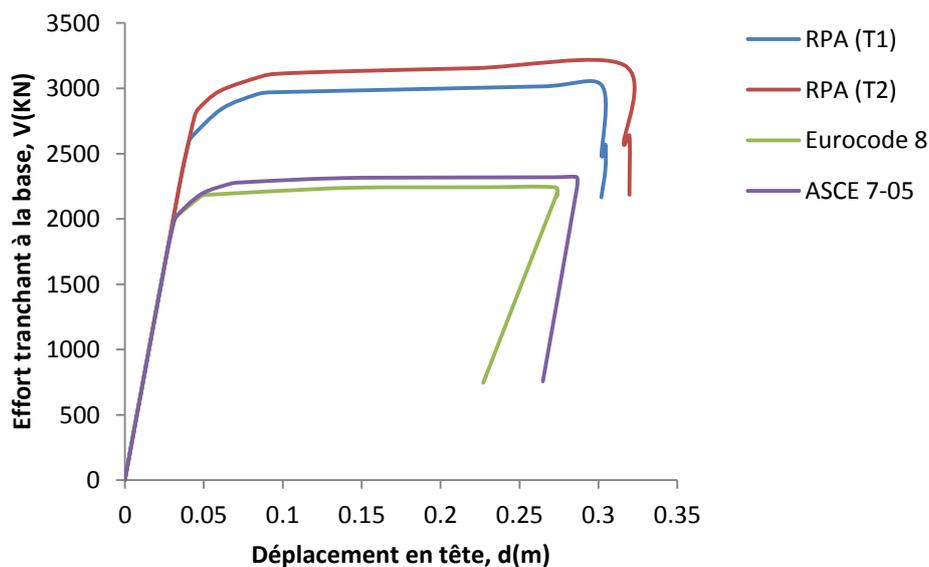
## 4.4. Résultats des analyses Pushover

### 4.4.1. Bâtiment en (R+5)

#### 4.4.1.1. Courbes de capacité

##### ➤ Direction (xx)

Les courbes de capacité qui en résultent pour le bâtiment en (R+5) dans la direction (xx), pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés sont représentées dans la figure 4.3.



**Figure 4.3 :** Courbes de capacité du bâtiment en (R+5) direction (xx).

Les courbes de capacité sont caractérisées par un état élastique limite correspondant à l'entrée dans le domaine post-élastique qui est représenté par les paramètres  $V_y$ ,  $d_y$ , et  $K_o$ , et un état ultime de résistance qui est représenté par les paramètres  $V_u$ ,  $d_u$ , et qui sont donnés dans le tableau 4.1.

| Codes      | Etat élastique limite |           |              | Etat ultime de résistance |           |
|------------|-----------------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|
|            | $V_y$ (KN)            | $d_y$ (m) | $K_o$ (KN/m) | $V_u$ (KN)                | $d_u$ (m) |
| RPA (T1)   | 2908.24               | 0.044     | 66096.36     | 3023.18                   | 0.302     |
| RPA (T2)   | 3062.83               | 0.047     | 65166.60     | 3179.16                   | 0.316     |
| Eurocode 8 | 2195.92               | 0.033     | 66543.05     | 2241.90                   | 0.272     |
| ASCE 7-05  | 2261.47               | 0.034     | 66513.82     | 2319.74                   | 0.286     |

**Tableau 4.1 :** Caractéristiques générales du bâtiment (R+5) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (xx).

Pour mieux illustrer l'impact des différentes périodes fondamentales sur le comportement non linéaire du bâtiment, nous effectuons une analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance.

**a) à l'état élastique limite :**

- Les raideurs initiales  $K_o$  présentent des valeurs presque similaires pour les quatre formules empiriques des trois codes considérés (tableau 4.1).
- La charge  $V_y$  et le déplacement correspondant  $d_y$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **29%** à **39%** pour la charge  $V_y$  et de l'ordre de **29%** à **42%** pour le déplacement  $d_y$  (tableau 4.2).

**b) à l'état ultime de résistance :**

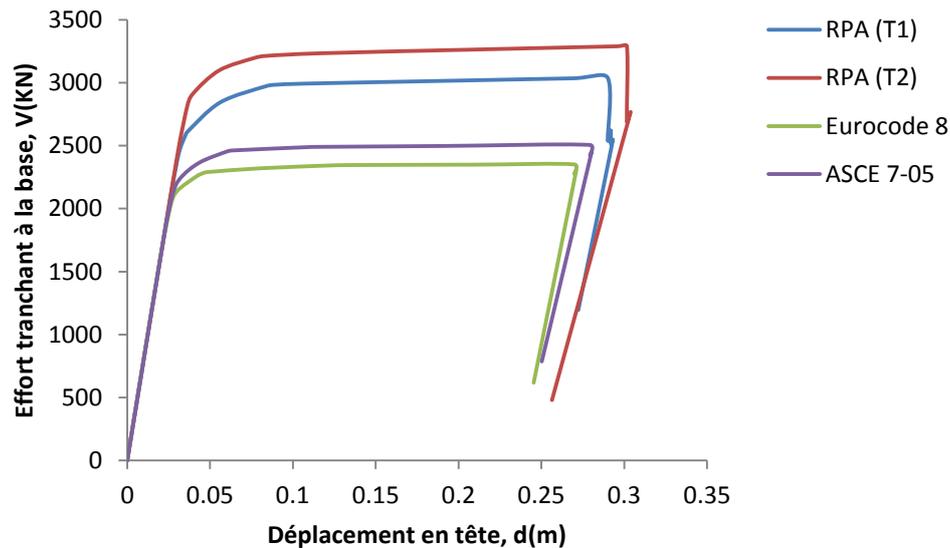
- La charge  $V_u$  et le déplacement correspondant  $d_u$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **30%** à **42%** pour la charge  $V_u$  et de l'ordre de **6%** à **16%** pour le déplacement  $d_u$  (tableau 4.2).

| Codes                          | Etats élastique limite        |                                    | Etat ultime de résistance     |                                    |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
|                                | Rapport des charges $V_y$ (%) | Rapport des déplacements $d_y$ (%) | Rapport des charges $V_u$ (%) | Rapport des déplacements $d_u$ (%) |
| $\frac{RPA (T1)}{Eurocode 8}$  | 32                            | 33                                 | 35                            | 11                                 |
| $\frac{RPA (T1)}{ASCE 7 - 05}$ | 29                            | 29                                 | 30                            | 6                                  |
| $\frac{RPA (T2)}{Eurocode 8}$  | 39                            | 42                                 | 42                            | 16                                 |
| $\frac{RPA (T2)}{ASCE 7 - 05}$ | 35                            | 38                                 | 37                            | 10                                 |

**Tableau 4.2 :** Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+5) dans la direction (xx).

➤ **Direction (yy)**

Les courbes de capacité qui en résultent pour le bâtiment en (R+5) dans la direction (yy), pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés sont représentées dans la figure 4.4.



**Figure 4.4 :** Courbes de capacité du bâtiment en (R+5) direction (yy).

Les courbes de capacité sont caractérisées par un état élastique limite correspondant à l'entrée dans le domaine post-élastique qui est représenté par les paramètres  $V_y$ ,  $d_y$ , et  $K_o$ , et un état ultime de résistance qui est représenté par les paramètres  $V_u$ ,  $d_u$ , et qui sont donnés dans le tableau 4.3.

| Codes      | Etat élastique limite |           |              | Etat ultime de résistance |           |
|------------|-----------------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|
|            | $V_y$ (KN)            | $d_y$ (m) | $K_o$ (KN/m) | $V_u$ (KN)                | $d_u$ (m) |
| RPA (T1)   | 2911.09               | 0.036     | 80863.61     | 3039.53                   | 0.290     |
| RPA (T2)   | 3167.76               | 0.039     | 81224.61     | 3289.81                   | 0.301     |
| Eurocode 8 | 2295.10               | 0.027     | 85003.70     | 2350.25                   | 0.270     |
| ASCE 7-05  | 2442.71               | 0.029     | 84231.38     | 2505.46                   | 0.279     |

**Tableau 4.3 :** caractéristiques générales du bâtiment (R+5) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (yy).

Pour mieux illustrer l'impact des différentes périodes fondamentales sur le comportement non linéaire du bâtiment, nous effectuons une analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance.

**a) à l'état élastique limite :**

- Les raideurs initiales  $K_o$  présentent des valeurs presque similaires pour les quatre formules empiriques des trois codes considérés (tableau 4.3).

- La charge  $V_y$  et le déplacement correspondant  $d_y$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **19%** à **38%** pour la charge  $V_y$  et de l'ordre de **24%** à **34%** pour le déplacement  $d_y$  (tableau 4.4).

**b) à l'état ultime de résistance :**

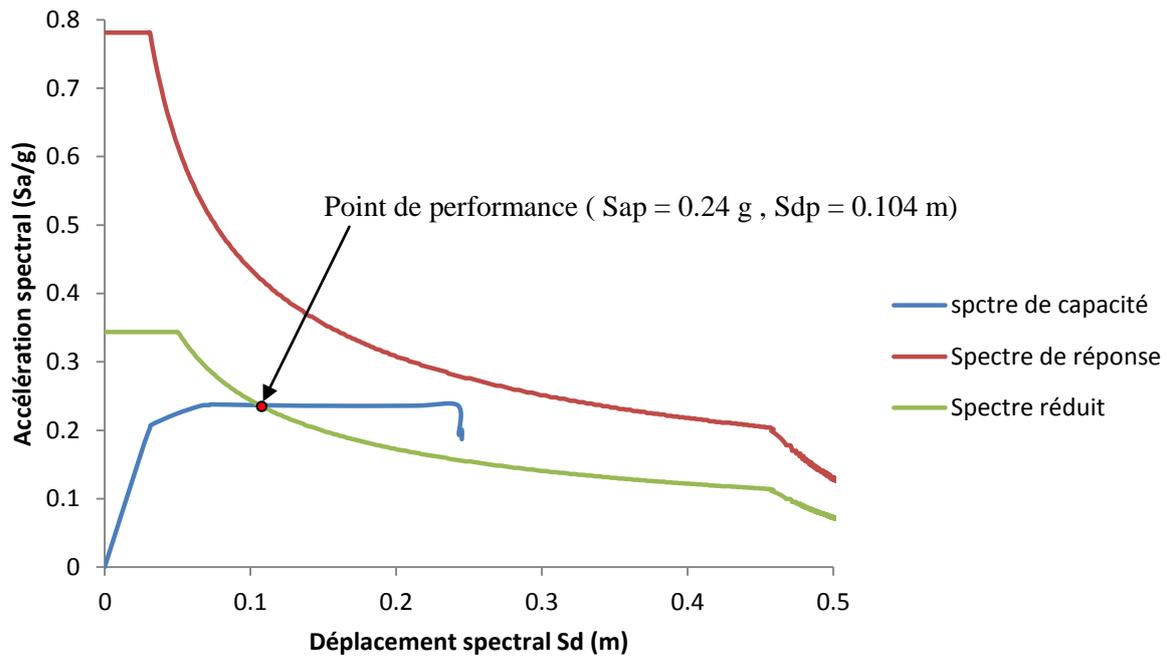
- La charge  $V_u$  et le déplacement correspondant  $d_u$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **21%** à **40%** pour la charge  $V_u$  et de l'ordre de **4%** à **11%** pour le déplacement  $d_u$  (tableau 4.4).

| Codes                          | Etats limite élastique        |                                    | Etat ultime de résistance     |                                    |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
|                                | Rapport des charges $V_y$ (%) | Rapport des déplacements $d_y$ (%) | Rapport des charges $V_u$ (%) | Rapport des déplacements $d_u$ (%) |
| $\frac{RPA (T1)}{Eurocode 8}$  | 27                            | 33                                 | 29                            | 7                                  |
| $\frac{RPA (T1)}{ASCE 7 - 05}$ | 19                            | 24                                 | 21                            | 4                                  |
| $\frac{RPA (T2)}{Eurocode 8}$  | 38                            | 44                                 | 40                            | 11                                 |
| $\frac{RPA (T2)}{ASCE 7 - 05}$ | 30                            | 34                                 | 31                            | 8                                  |

**Tableau 4.4 :** Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+5) dans la direction (yy).

#### 4.4.1.2. Détermination des points de performance

Pour déterminer les points de performance, nous avons appliqué la **procédure A** du code ATC 40 [9] décrite au chapitre 3. La figure 4.5 montre la détermination du point de performance pour le cas de dimensionnement en considérant la formule du RPA (T1) dans la direction (xx).



**Figure 4.5 :** Détermination du point de performance du bâtiment en (R+5) pour le cas de dimensionnement par la formule du RPA (T1) dans la direction (xx).

Pour les autres cas, tous les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

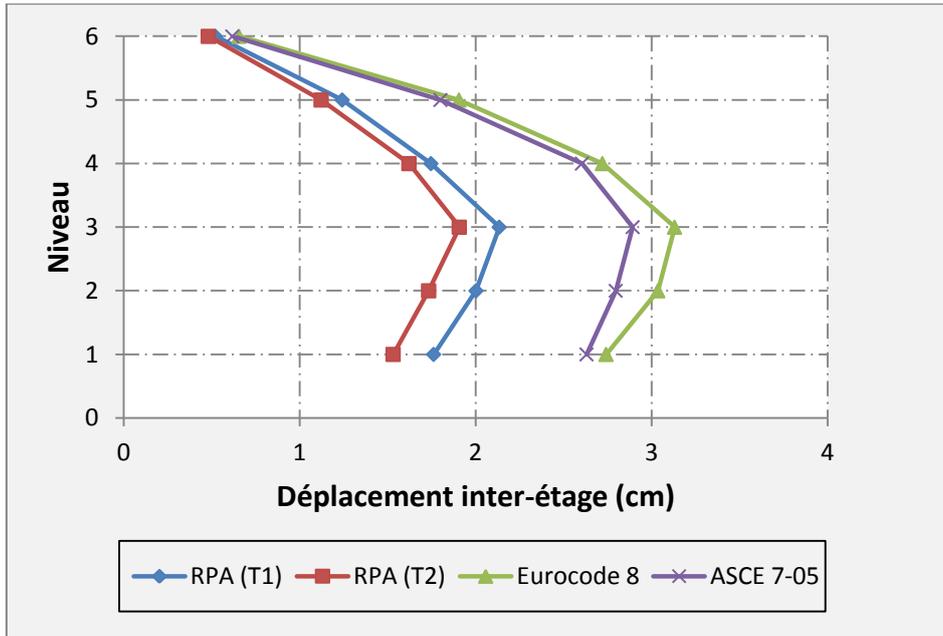
| Codes      | Direction (xx) |              | Direction (yy) |              |
|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
|            | $S_{ap} (g)$   | $S_{dp} (m)$ | $S_{ap} (g)$   | $S_{dp} (m)$ |
| RPA (T1)   | 0.240          | 0.104        | 0.242          | 0.100        |
| RPA (T2)   | 0.252          | 0.096        | 0.254          | 0.090        |
| Eurocode 8 | 0.178          | 0.185        | 0.181          | 0.179        |
| ASCE 7-05  | 0.184          | 0.176        | 0.191          | 0.160        |

**Tableau 4.5 :** Points de performances du bâtiment en (R+5).

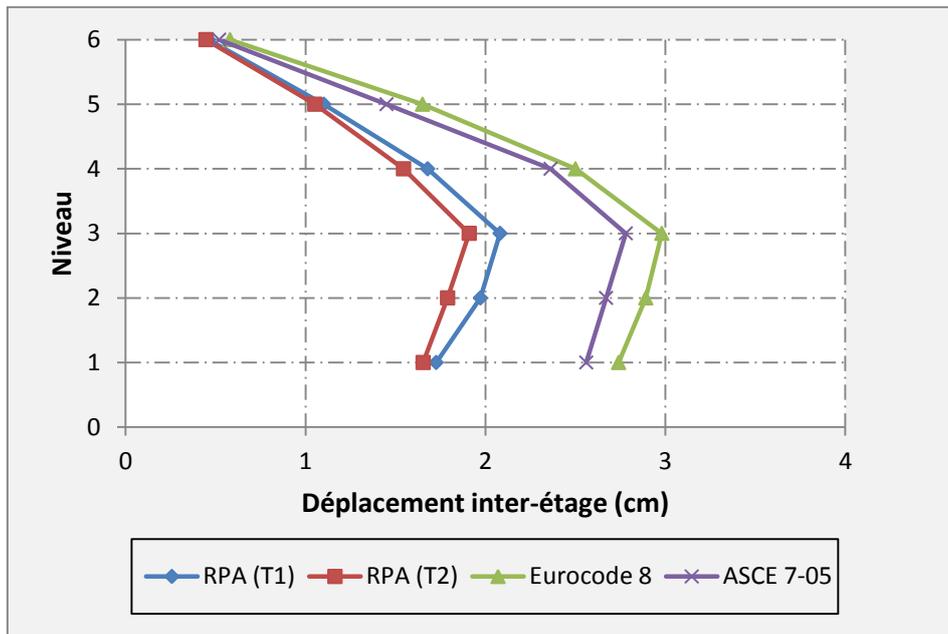
#### 4.4.1.3. Déplacements relatifs inter-étages au point de performance

Les déplacements relatifs inter-étages sont reconnus comme étant un important indicateur de la performance d'un bâtiment car ils sont directement liés aux sollicitations maximales développées dans les rotules plastiques, aux dommages causés aux éléments non-structuraux et aux effets P-delta. [26]

En utilisant le logiciel **Etabs v 9.7** [16], nous obtenons les déplacements inter-étages pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés, et cela dans les deux directions (xx) et (yy). Les déplacements relatifs inter-étages sont représentés dans les figures 4.6 et 4.7.



**Figure 4.6 :** Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du bâtiment en (R+5) direction (xx).



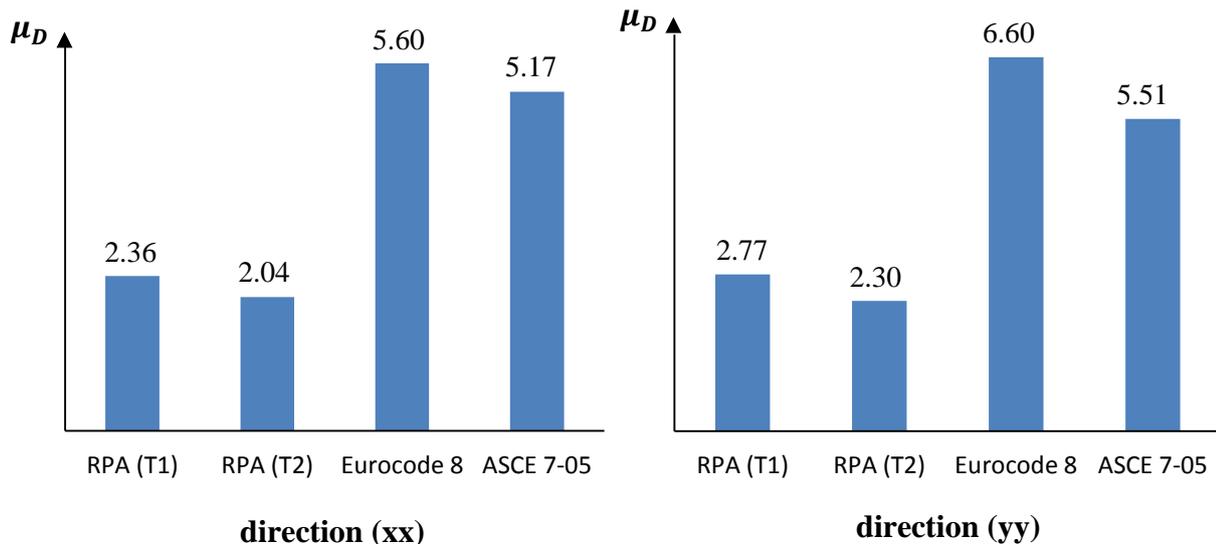
**Figure 4.7 :** Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du bâtiment en (R+5) direction (yy).

Nous constatons que les déplacements relatifs inter-étages obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003 sont inférieurs par rapport à ceux résultants du dimensionnement par les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05.

Nous concluons que le dimensionnement en considérant les formules du RPA 99/V 2003, limite l'effet **P - delta**.

#### 4.4.1.4. Demande en ductilité ( $\mu_D$ )

La demande en ductilité est un critère qui situe le degré de pénétration de la structure dans le domaine plastique, et elle est estimée par le rapport entre le déplacement correspondant au point de performance et le déplacement élastique limite ( $\mu_D = S_{dp}/d_y$ ). A mesure que le facteur ( $\mu_D$ ) est grand, le degré de pénétration de la structure dans le domaine plastique est important. [20]



**Figure 4.8 :** Demande en ductilité du bâtiment en (R+5).

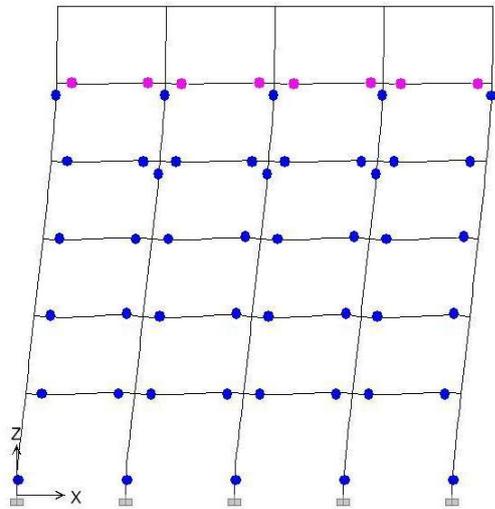
Nous constatons que les demandes en ductilité obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003 sont inférieurs par rapport aux demandes en ductilité obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05 et cela pour les deux directions (xx) et (yy).

Nous concluons que dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003, les bâtiments sont dans un état de plastification moins avancé que dans le cas de dimensionnement par les formules de l'Eurocode 8 et ASCE 7-05.

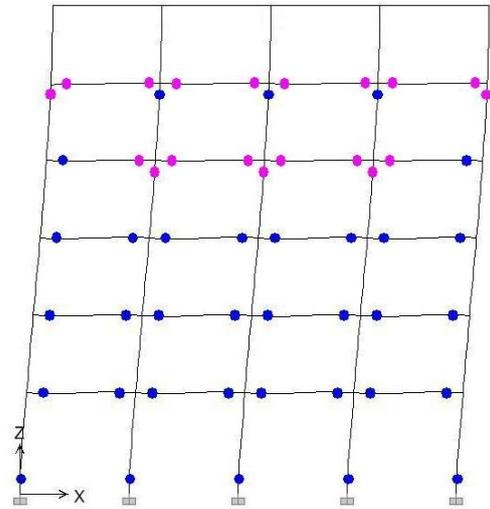
#### 4.4.1.5. Distribution des rotules plastiques dans les éléments structuraux

Le logiciel **Etabs v 9.7** [16] nous permet de visualiser le développement des rotules plastiques dans les éléments structuraux. Les figures 4.9 et 4.10 montrent les distributions des rotules plastiques ainsi que leurs niveaux de dommages obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés correspondant aux points de performance.

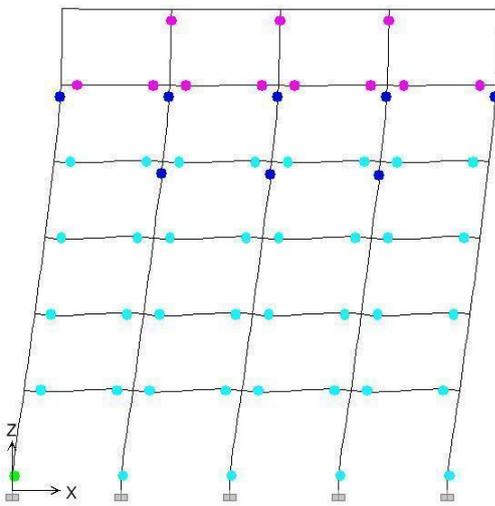
➤ **Direction (xx)**



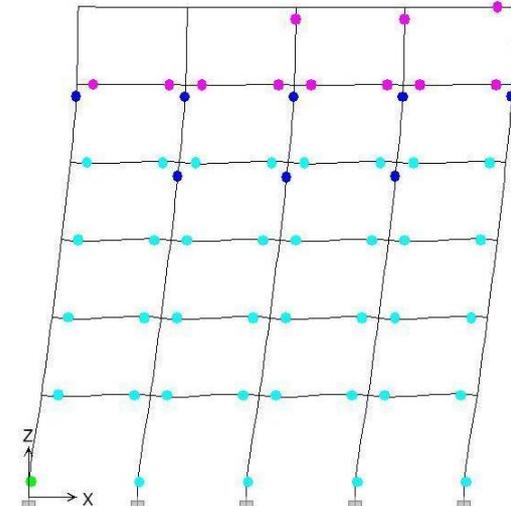
**RPA (T1)**



**RPA (T2)**



**Eurocode 8**

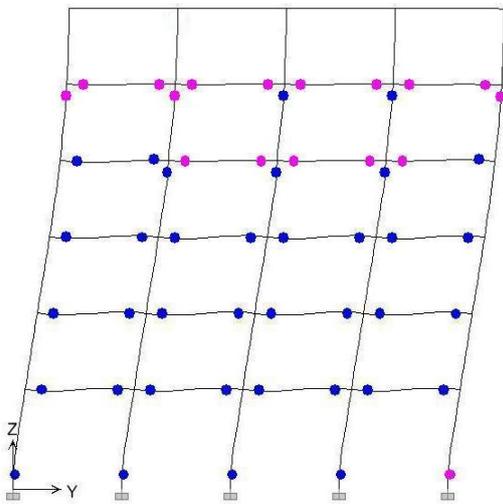


**ASCE 7-05**

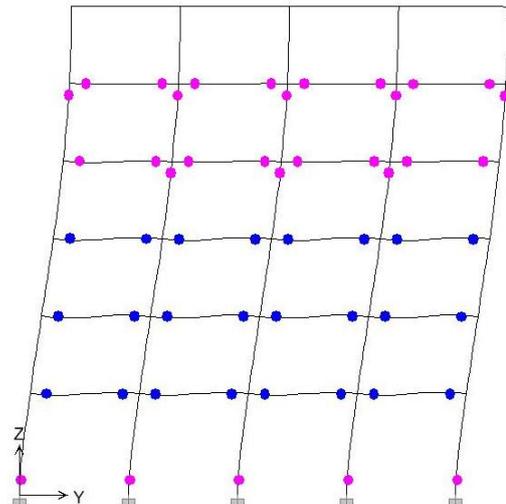


**Figure 4.9** : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment en (R+5) direction (xx).

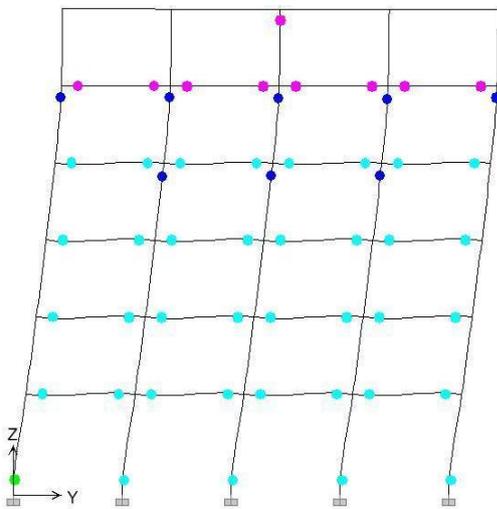
➤ **Direction (yy)**



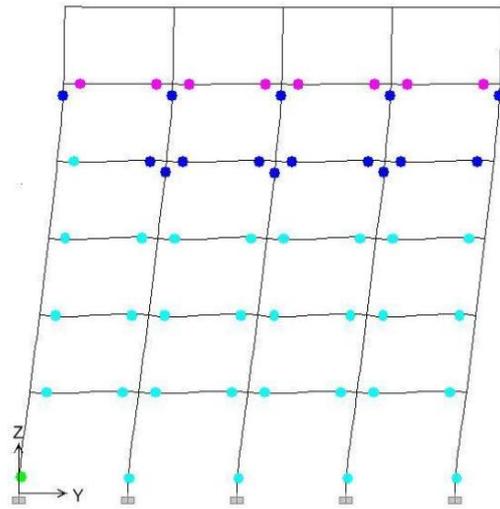
**RPA (T1)**



**RPA (T2)**



**Eurocode 8**



**ASCE 7-05**



**Figure 4.10 :** Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment en (R+5) direction (yy).

### Commentaire :

Après visualisation de la distribution des rotules plastiques correspondant aux points de performance, nous constatons que dans le cas de dimensionnement en considérant les formules du RPA 99/V 2003, les dommages sont relativement limités, avec la formation des rotules plastiques de type **(B – IO)** dans les poutres et les poteaux, tandis que dans le cas de dimensionnement par les formules de l’Eurocode 8 et ASCE 7-05, les dommages sont assez importants, les poutres et les poteaux connaissent une plastification avancée, avec la formation de rotules plastiques de type **(IO – LS)** dans les poutres et de type **(LS – CP)** dans les poteaux.

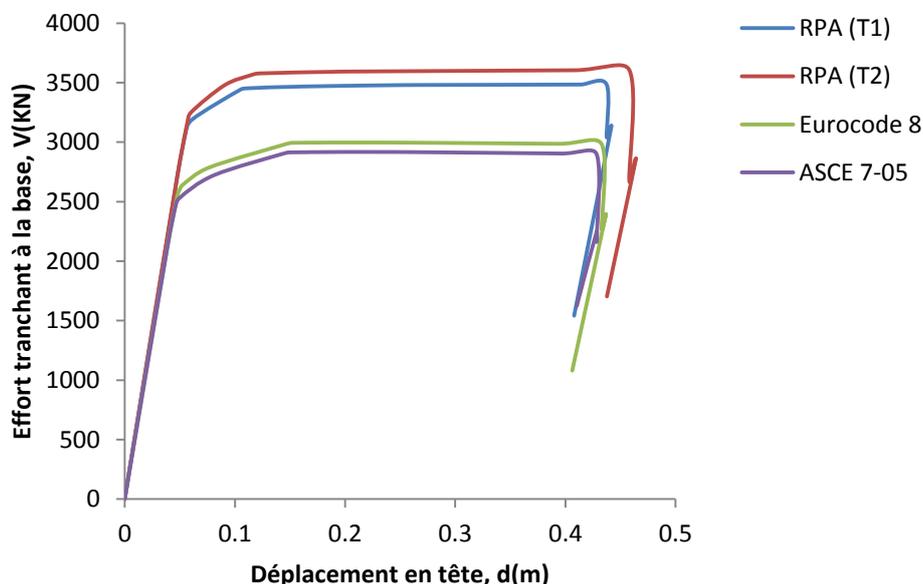
Nous constatons aussi la formation de rotules plastiques de type **(B – IO)** dans les poteaux des derniers niveaux, et ce pour les quatre formules empiriques. Ceci s’explique par le fait que l’effort normal est assez faible dans les niveaux supérieurs et donc une faible limite élastique.

#### 4.4.2. Bâtiment en (R+8)

##### 4.4.2.1. Courbes de capacité

###### ➤ Direction (xx)

Les courbes de capacité qui en résultent pour le bâtiment en (R+8) dans la direction (xx), pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés sont représentées dans la figure 4.11.



**Figure 4.11** : Courbes de capacité du bâtiment en (R+8) direction (xx).

Les courbes de capacité sont caractérisées par un état élastique limite correspondant à l’entrée dans le domaine post-élastique qui est représenté par les paramètres  $V_y$ ,  $d_y$ , et  $K_o$ , et un état ultime de résistance qui est représenté par les paramètres  $V_u$ ,  $d_u$ , et qui sont donnés dans le tableau 4.6.

| Codes      | Etat élastique limite |           |              | Etat ultime de résistance |           |
|------------|-----------------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|
|            | $V_y$ (KN)            | $d_y$ (m) | $K_o$ (KN/m) | $V_u$ (KN)                | $d_u$ (m) |
| RPA (T1)   | 3421.90               | 0.060     | 57031.66     | 3483.29                   | 0.437     |
| RPA (T2)   | 3535.59               | 0.062     | 57025.64     | 3606.38                   | 0.458     |
| Eurocode 8 | 2808.04               | 0.051     | 55059.60     | 2997.10                   | 0.432     |
| ASCE 7-05  | 2712.03               | 0.049     | 55347.55     | 2918.82                   | 0.421     |

**Tableau 4.6 :** Caractéristiques générales du bâtiment (R+8) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (xx).

Pour mieux illustrer l'impact des différentes périodes fondamentales sur le comportement non linéaire du bâtiment, nous effectuons une analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance.

**a) à l'état élastique limite :**

- Les raideurs initiales  $K_o$  présentent des valeurs presque similaires pour les quatre formules empiriques des trois codes considérés (tableau 4.6).
- La charge  $V_y$  et le déplacement correspondant  $d_y$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **22%** à **30%** pour la charge  $V_y$  et de l'ordre de **17%** à **26%** pour le déplacement  $d_y$  (tableau 4.7).

**b) à l'état ultime de résistance :**

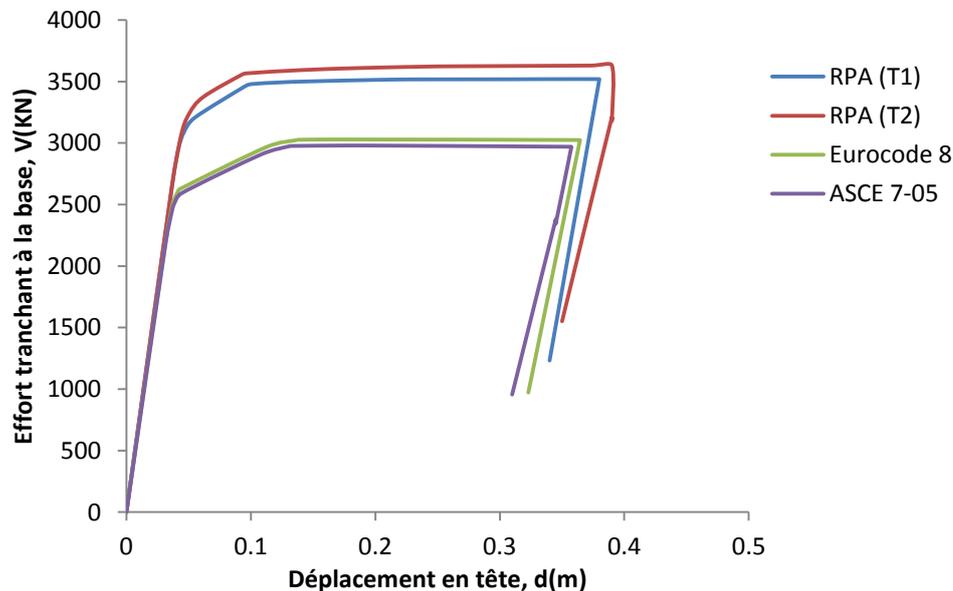
- La charge  $V_u$  et le déplacement correspondant  $d_u$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **16%** à **24%** pour la charge  $V_u$  et de l'ordre de **1%** à **8%** pour le déplacement  $d_u$  (tableau 4.7).

| Codes                          | Etats limite élastique        |                                    | Etat ultime de résistance     |                                    |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
|                                | Rapport des charges $V_y$ (%) | Rapport des déplacements $d_y$ (%) | Rapport des charges $V_u$ (%) | Rapport des déplacements $d_u$ (%) |
| $\frac{RPA (T1)}{Eurocode 8}$  | 22                            | 17                                 | 16                            | 1                                  |
| $\frac{RPA (T1)}{ASCE 7 - 05}$ | 26                            | 22                                 | 19                            | 4                                  |
| $\frac{RPA (T2)}{Eurocode 8}$  | 26                            | 21                                 | 20                            | 6                                  |
| $\frac{RPA (T2)}{ASCE 7 - 05}$ | 30                            | 26                                 | 24                            | 8                                  |

**Tableau 4.7 :** Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+8) dans la direction (xx).

### ➤ Direction (yy)

Les courbes de capacité qui en résultent pour le bâtiment (R+8) dans la direction (yy), pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés sont représentées dans la figure 4.12.



**Figure 4.12 :** Courbes de capacité du bâtiment en (R+8) direction (yy).

Les courbes de capacité sont caractérisées par un état élastique limite correspondant à l'entrée dans le domaine post-élastique qui est représenté par les paramètres  $V_y$ ,  $d_y$ , et  $K_o$ , et un état ultime de résistance est représenté par les paramètres  $V_u$ ,  $d_u$ , et qui sont donnés dans le tableau 4.8.

| Codes      | Etat élastique limite |           |              | Etat ultime de résistance |           |
|------------|-----------------------|-----------|--------------|---------------------------|-----------|
|            | $V_y$ (KN)            | $d_y$ (m) | $K_o$ (KN/m) | $V_u$ (KN)                | $d_u$ (m) |
| RPA (T1)   | 3424.17               | 0.047     | 72854.68     | 3518.09                   | 0.381     |
| RPA (T2)   | 3540.00               | 0.049     | 72244.90     | 3630.01                   | 0.397     |
| Eurocode 8 | 2813.75               | 0.040     | 70343.75     | 3044.21                   | 0.364     |
| ASCE 7-05  | 2717.13               | 0.039     | 69670.00     | 2978.66                   | 0.351     |

**Tableau 4.8 :** Caractéristiques générales du bâtiment (R+8) à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance dans la direction (yy).

Pour mieux illustrer l'impact des différentes périodes fondamentales sur le comportement non linéaire du bâtiment, nous effectuons une analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance.

**a) à l'état élastique limite :**

- Les raideurs initiales  $K_o$  présentent des valeurs presque similaires pour les quatre formules empiriques des trois codes considérés (tableau 4.8).
- La charge  $V_y$  et le déplacement correspondant  $d_y$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **22%** à **30%** pour la charge  $V_y$  et de l'ordre de **17%** à **26%** pour le déplacement  $d_y$  (tableau 4.9).

**b) à l'état ultime de résistance :**

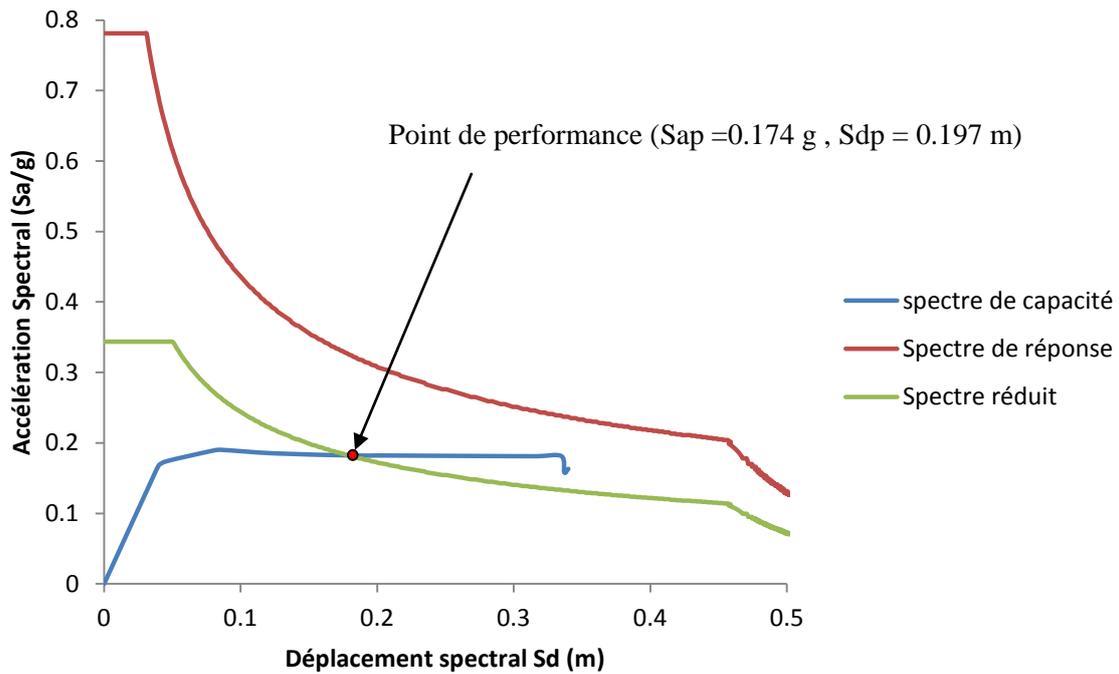
- La charge  $V_u$  et le déplacement correspondant  $d_u$  résultant du dimensionnement par les formules RPA 99/V 2003 sont supérieurs à ceux obtenues en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05. Soit une augmentation de l'ordre de **17%** à **22%** pour la charge  $V_u$  et de l'ordre de **5%** à **13%** pour le déplacement  $d_u$  (tableau 4.9).

| Codes                          | Etats limite élastique        |                                    | Etat ultime de résistance     |                                    |
|--------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|------------------------------------|
|                                | Rapport des charges $V_y$ (%) | Rapport des déplacements $d_y$ (%) | Rapport des charges $V_u$ (%) | Rapport des déplacements $d_u$ (%) |
| $\frac{RPA (T1)}{Eurocode 8}$  | 22                            | 17                                 | 17                            | 5                                  |
| $\frac{RPA (T1)}{ASCE 7 - 05}$ | 26                            | 21                                 | 18                            | 9                                  |
| $\frac{RPA (T2)}{Eurocode 8}$  | 26                            | 22                                 | 19                            | 9                                  |
| $\frac{RPA (T2)}{ASCE 7 - 05}$ | 30                            | 26                                 | 22                            | 13                                 |

**Tableau 4.9 :** Analyse comparative des résultats obtenus à l'état élastique limite et l'état ultime de résistance du bâtiment (R+8) dans la direction (yy).

**4.4.2.2. Détermination des points de performance**

Pour déterminer les points de performance, nous avons appliqué la **procédure A** du code ATC 40 [9] décrite au chapitre 3. La figure 4.13 montre la détermination du point de performance pour le cas de dimensionnement en considérant la formule du RPA (T1) dans la direction (xx).



**Figure 4.13 :** Détermination du point de performance du bâtiment en (R+8) pour le cas de dimensionnement par la formule du RPA (T1) dans la direction (xx).

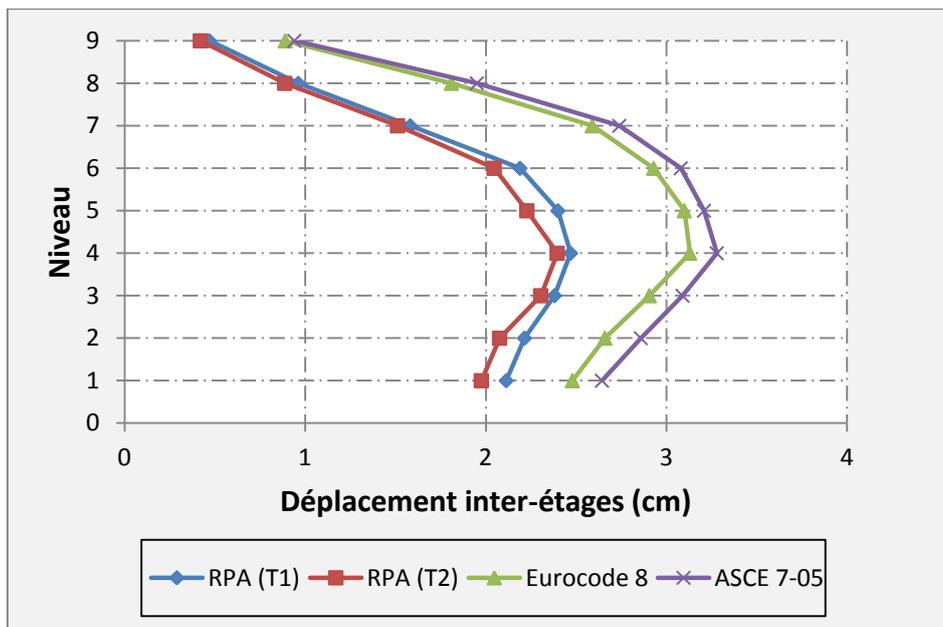
Pour les autres cas, tous les résultats sont donnés dans le tableau suivant :

| Codes      | Direction (xx) |              | Direction (yy) |              |
|------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
|            | $S_{ap} (g)$   | $S_{dp} (m)$ | $S_{ap} (g)$   | $S_{dp} (m)$ |
| RPA (T1)   | 0.174          | 0.197        | 0.176          | 0.190        |
| RPA (T2)   | 0.184          | 0.176        | 0.185          | 0.170        |
| Eurocode 8 | 0.160          | 0.244        | 0.164          | 0.232        |
| ASCE 7-05  | 0.152          | 0.258        | 0.156          | 0.240        |

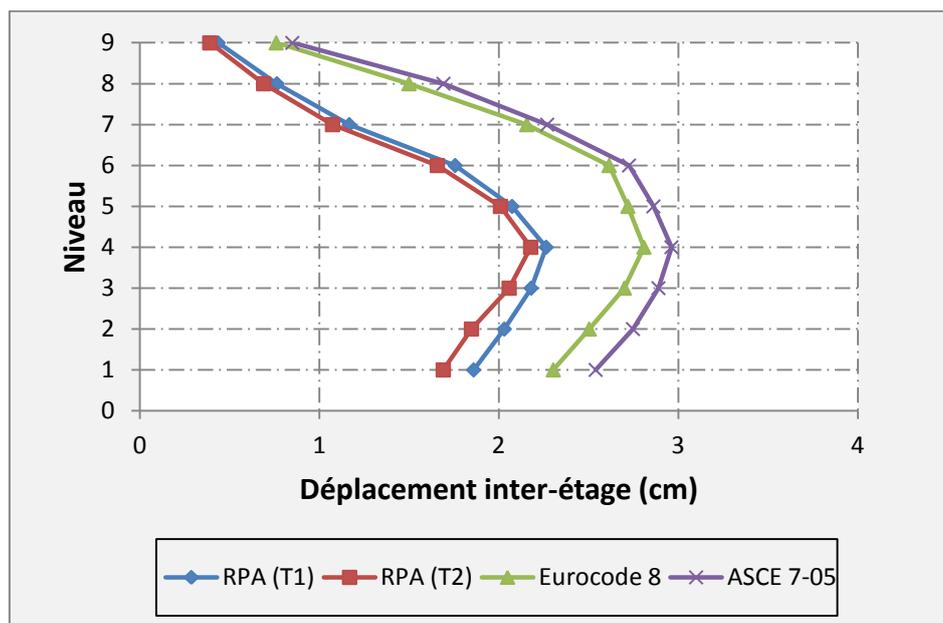
**Tableau 4.10 :** Points de performances du bâtiment en (R+8).

#### 4.4.2.3. Déplacements relatifs inter-étages au point de performance

En utilisant le logiciel **Etabs v 9.7** [16], on obtient les déplacements relatifs inter-étages pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés dans les deux directions (xx) et (yy). Les déplacements relatifs inter-étages sont représentés par les figures 4.14 et 4.15).



**Figure 4.14 :** Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du bâtiment en (R+8) direction (xx).



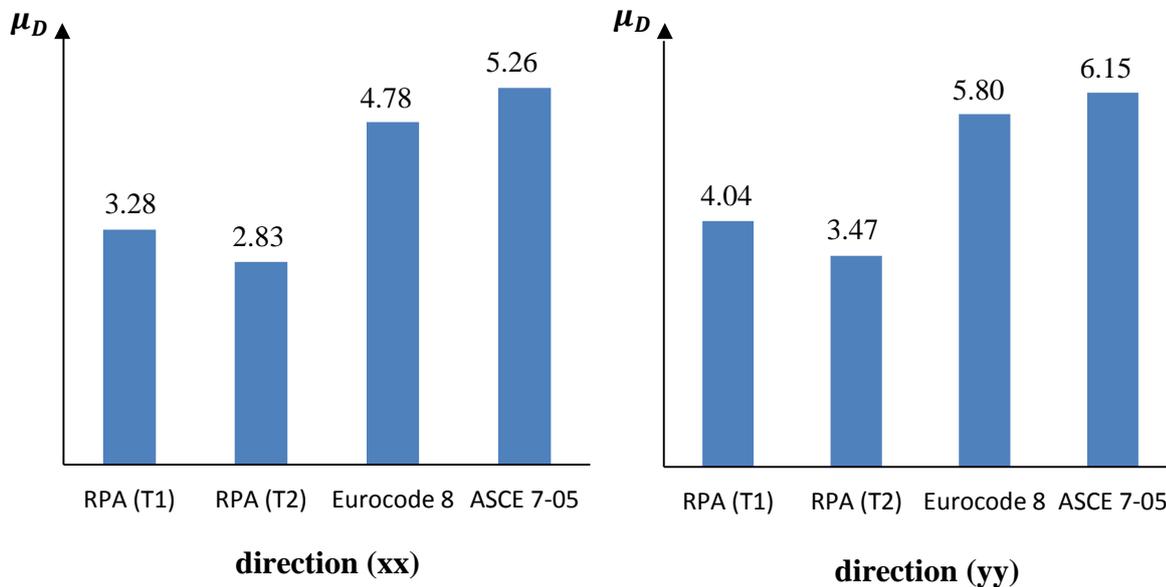
**Figure 4.15 :** Déplacements relatifs inter-étages aux points de performances du bâtiment en (R+8) direction (yy).

Nous constatons que les déplacements relatifs maximaux obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003 sont inférieurs par rapport aux déplacements relatifs obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05.

On en conclue que le dimensionnement en considérant les formules du RPA 99/V 2003, limite l'effet **P - delta**.

#### 4.4.2.4. Demande en ductilité ( $\mu_D$ )

La demande en ductilité est un critère qui situe le degré d'enfoncement de la structure dans le domaine plastique, et elle est estimée par le facteur ( $\mu_D = S_{dp}/d_y$ ). [20]



**Figure 4.16 :** Demande en ductilité du bâtiment en (R+8).

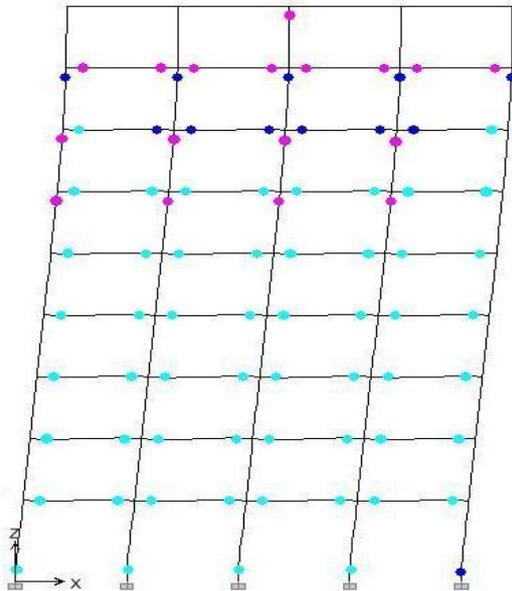
Nous constatons que les demandes en ductilité obtenus dans le cas de dimensionnement en considérant les formules du RPA 99/V 2003 sont inférieurs par rapport aux demandes en ductilité obtenus dans le cas de dimensionnement en considérant les formules des codes Eurocode 8 et ASCE 7-05 et cela pour les deux directions (xx) et (yy).

Nous concluons que dans le cas dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003, les bâtiments connaissent une plastification moins avancé que dans le cas de dimensionnement par les formules de l'Eurocode 8 et ASCE 7-05.

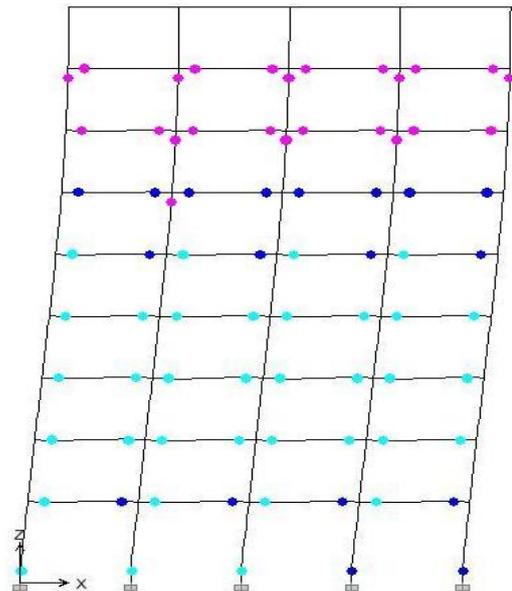
#### 4.4.2.5. Distribution des rotules plastiques dans les éléments structuraux

Les figures 4.17 et 4.18 montrent les distributions des rotules plastiques ainsi que leurs niveaux de dommages obtenus pour chacune des quatre formules empiriques des trois codes considérés correspondant aux points de performance.

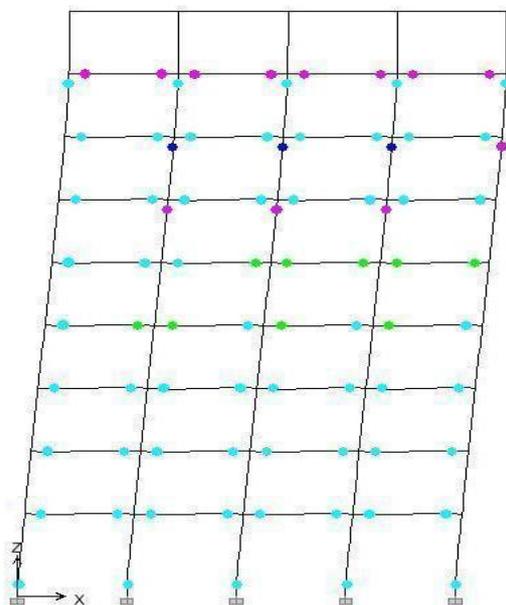
➤ **Direction (xx)**



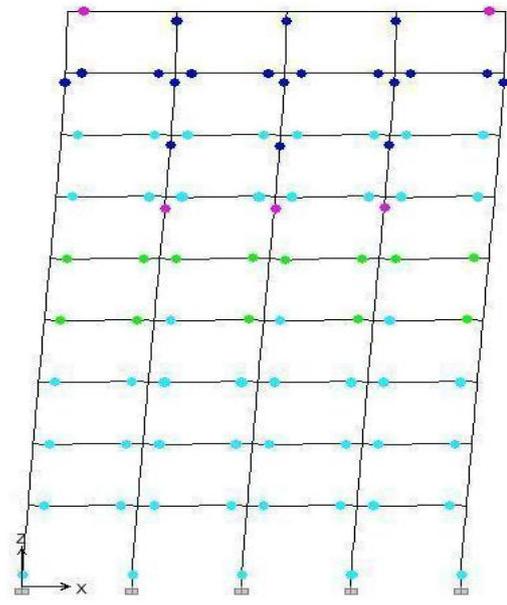
**RPA (T1)**



**RPA (T2)**



**Eurocode 8**

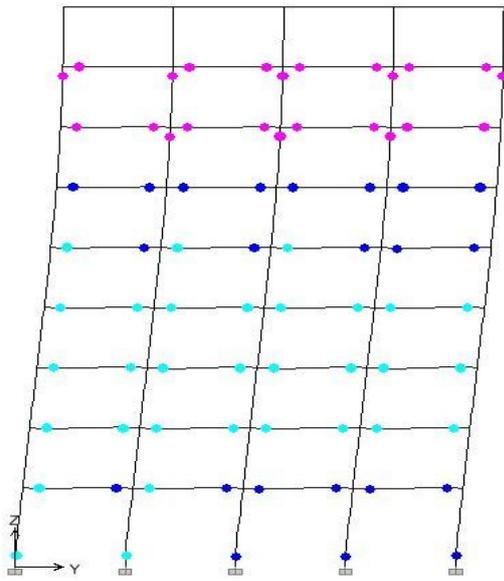


**ACSE 7-05**

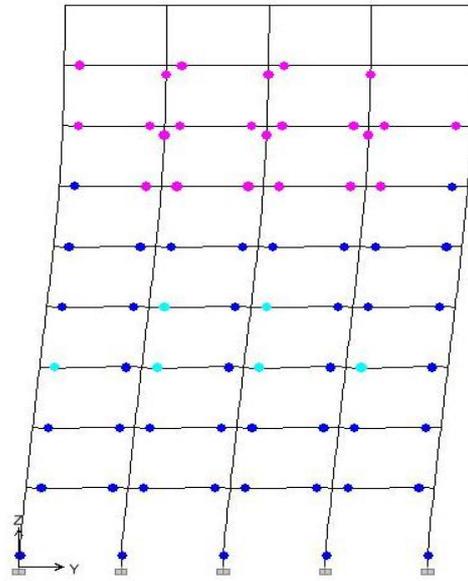


**Figure 4.17** : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment en (R+8) direction (xx).

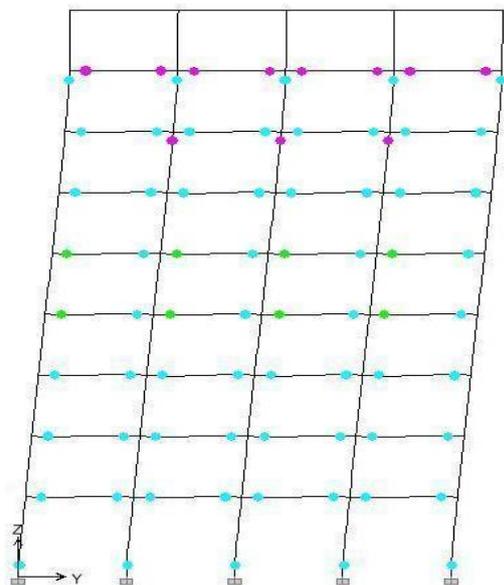
➤ **Direction (yy)**



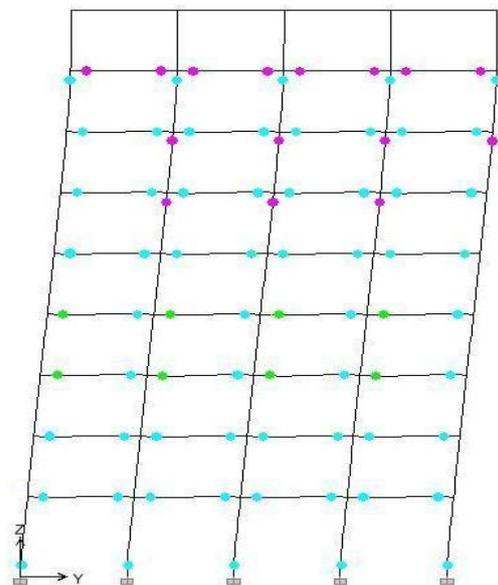
**RPA (T1)**



**RPA (T2)**



**Eurocode 8**



**ACSE 7-05**



**Figure 4.18** : Distribution des rotules plastiques dans le bâtiment en (R+8) direction (yy).

### Commentaire :

Nous constatons que les degrés de dommage obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003, sont moins importants, avec la formation des rotules plastiques de type **(IO – LS)** dans les poutres et les poteaux, alors que dans le cas de dimensionnement par les formules de l’Eurocode 8 et ASCE 7-05, les dommages sont assez importants. Les poteaux subissent le même niveau d’endommagement que dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA (rotules de type “**IO – LS**”), par contre, les poutres subissent plus de dégât avec la formation de rotules plastiques de type **(LS – CP)**.

Nous constatons également la formation des rotules plastiques dans les poteaux des derniers niveaux des bâtiments. Rotules de type **(B – IO)** dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA et de type **(IO – LS)** dans le cas de dimensionnement par les formules de l’Eurocode 8 et ASCE 7-05, et cela est dû à leurs faibles résistances.

### 4.5. Conclusions

Les analyses statiques non linéaires (Pushover) effectuées sur les deux bâtiments, nous ont permis d’étudier leur comportement au-delà du domaine élastique, et d’évaluer l’impact des différentes périodes fondamentales sur le comportement non linéaire des structures en portique en béton armé.

A partir des résultats obtenus, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Dans le cas de dimensionnement par les formules de l’Eurocode 8 et ASCE 7-05 les bâtiments sont relativement souples et manifestent des déplacements relatifs plus importants par rapport à ceux obtenus dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/ V 2003.
- Dans le cas de dimensionnement par les formules du RPA 99/V 2003 les bâtiments étudiés présentent des demandes en ductilité plus faible par rapport à celles obtenues dans le cas de dimensionnement par les formules de l’Eurocode 8 et ASCE 7-05, ce qui est révélateur d’un état de plastification moins avancé dans le cas de dimensionnement en considérant les formules du RPA 99/ V 2003.
- Les degrés de dommages obtenus dans le cas de dimensionnement en considérant les formules de l’Eurocode 8 et ASCE 7-05 sont plus importants que ceux obtenus en considérant les formules du RPA 99/ V 2003.
- Le comportement des bâtiments en portique en béton armé est adéquat en zones sismique. Ceci est vérifié par les distributions des rotules plastiques obtenues aux points de performance, qui correspond à un état de dommage limité.

Nous concluons principalement que les codes Eurocode 8 et ASCE 7-05 autorisent une incursion marquée dans le domaine post-élastique par rapport au RPA 2003, vu le niveau de ductilité envisagé.

## Conclusion générale

---

# Conclusion

Au cours de ce travail, nous nous sommes intéressés essentiellement à l'évaluation de l'impact des périodes fondamentales proposées par les différents règlements parasismiques de part le monde sur le dimensionnement et la performance sismique des bâtiments en portiques auto-stables en béton armé.

Dans la première partie de ce travail, nous avons considéré deux structures de bâtiments de 5 et 8 étages en portique auto-stables en béton armé. Ces bâtiments ont été dimensionnés selon le code de calcul de béton armé aux états limites (BAEL 91), et le règlement parasismique algérien (RPA, 2003) sur la base d'une analyse par la méthode statique équivalente, dans laquelle nous avons considéré quatre formules empiriques pour estimer la période fondamentale. Ces formules sont données par les règlements parasismiques RPA 99 version 2003, l'Eurocode 8 et le code américain ASCE 7-05.

Le dimensionnement concerne essentiellement le calcul des sections d'acier dans les éléments structuraux poutres et poteaux sur la base des sollicitations obtenues en considérant chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés, et à la vérification des contraintes admissibles dans ces éléments.

La deuxième partie de ce travail porte sur l'application de l'analyse statique non linéaire par poussée progressive (analyse Pushover) sur les deux bâtiments dimensionnés en tenant compte de chacune des quatre formules empiriques des trois règlements considérés.

Dans cette étude, nous avons effectuée une analyse comparative des résultats obtenus pour chaque paramètre considéré. Les paramètres de comparaison sont l'effort tranchant à la base, les déplacements relatifs inter-étages, les demandes en ductilité ( $\mu_D$ ) et les distributions des rotules plastiques dans les éléments structuraux poutres et poteaux aux points de performance.

L'analyse des résultats obtenus par le travail entrepris a permis d'établir les conclusions suivantes :

- La période propre est l'un des paramètres à avoir un impact considérable sur les forces sismique de dimensionnement, sa valeur est inversement proportionnelle à la force sismique totale à la base d'un bâtiment.
- Les formules du RPA 99/ V 2003 sous-estime la valeur de la période fondamentale par rapport aux formules de l'Eurocode 8 et du code américain ASCE 7-05.  
De faibles valeurs de la période fondamentale conduit, comme on l'a constaté pour les bâtiments étudiés, à des forces sismiques de dimensionnement plus élevées, et par conséquent, des sections d'acier dans les éléments structuraux poutres et poteaux plus importantes.  
Autrement dit, le RPA 99 conduit à un dimensionnement plus sécuritaire.

- L'Eurocode 8 et le code américain ASCE 7-05 tolèrent des déplacements relatifs inter-étages plus importants par rapport au code RPA 99/ V 2003. Cela peut s'expliquer par le niveau de ductilité locale visé par les codes Eurocode 8 et ASCE 7-05.
- Les règlements Eurocode 8 et ASCE 7-05 autorisent une incursion plus importante dans le domaine plastique par rapport au règlement RPA 99/ V 2003. Cela est dû au niveau de ductilité envisagé, et à la qualité des matériaux utilisés dans les constructions.

Par ailleurs, l'analyse des résultats a aussi permis de constater que les bâtiments en portiques auto-stables en béton armé ont une bonne résistance au séisme. Ceci est vérifié par les degrés de dommages obtenus en visualisant les distributions des rotules plastiques dans les éléments structuraux poutres et poteaux obtenus aux points de performance, qui correspondent à un état de dommage limité (les bâtiments atteignent leur demandes en déplacement sans subir la ruine), ainsi que les mécanismes enregistré favorise l'apparition des rotules plastiques, aux extrémités des poutres (après apparition des rotules à la base des poteaux du rez-de-chaussée) conduisant ainsi à une meilleur dissipation d'énergie.

Néanmoins, les différents séismes que l'Algérie a connus, notamment celui de Boumerdès, ont montré la vulnérabilité de ce type de structure à l'action sismique. L'unique explication que nous pouvons avancer à cette étude de la recherche peut être liée à la qualité des matériaux mis en œuvre et le non respect du concept « poteaux forts – poutres faibles ».

Cependant, il ya lieu d'étudier plus de cas avant d'arriver à des conclusions définitives sur le comportement des bâtiments à ossature auto-stable en béton armé.

Cette étude nous a permis aussi de situer le règlement parasismique algérien (RPA, 2003) par rapport au niveau de protection parasismique des constructions. Il s'est avéré que le RPA 2003 est assez conservatif et présente une marge de sécurité importante par rapport aux codes Eurocode 8 et ASCE 7-05, et cela est dû probablement à la qualité de construction en Algérie qui est loin d'être aussi bonne qu'aux Etats Unis et en Europe.

## Références bibliographiques

---

## Références bibliographiques

- [1] Milan ZACEK : *construction parasismique*. Edition parenthèses, France 1996.
- [2] *Règlement parasismique algérien (RPA 99/ version 2003)*, Centre National de Recherche Appliquée en Génie Parasismique.
- [3] *Règlement de construction parasismique (R.P.S 2000)*, Ministère de l'Aménagement du Territoire, de l'Urbanisme, de l'Habitat et de l'Environnement. Royaume du Maroc.
- [4] Code national du bâtiment, Canada 1995. *Première modification publié par la commission canadienne des codes du bâtiment et de prévention des incendies*. Juillet 1998.
- [5] Uniform Building Code UBC 97, *Structural Engineering Design Provisions*, Volume 2. International Conference of Building Officials, USA 1997.
- [6] Eurocode 8 : *Conception et dimensionnement des structures pour leur résistance aux séismes et document d'application national*.
- [7] Federal Emergency Management Agency,(FEMA), 2000, *Prestandard and Commentary for the rehabilitation of buildings*, FEMA-356.
- [8] Alain CAPRA et Victor DAVIDOVICI, *Calcul Dynamique Des Structures En Zone Sismique*, Editions Eyrolles.
- [9] Applied technology Council, ATC-40, 1996, *Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings*, volume 1-2, Redwood City, California.
- [10] Pierino Lestuzzi et Marc Badoux : *Guide de la conception parasismique des bâtiments*. Eyrolles, Paris, 2004.
- [11] Federal Emergency Management Agency, (FEMA), 1997, *Prestandard and Commentary for the rehabilitation of buildings*, FEMA-273.
- [12] Kelly Christine Young : *An Investigation of the Fundamental Period of Vibration of Irregular Steel Structures*, The Ohio State University.
- [13] Computers and Structures Inc. (CSI), SAP 2000 *Three Dimensional Static and Dynamic Finite Element Analysis and Design of Structures*, V.14.2.2.
- [14] K. Hamou, K.Ramdane : *Etablissement de la courbe de fragilité par la méthode pushover*. 7ème Colloque National AFPS 2007 – Ecole Centrale Paris.
- [15] A.Boumekik : *Analyse pushover des structures en béton armé*. Projet de recherche, université de Batna.2006.
- [16] Computers and Structures Inc. (CSI), 1995, *ETABS Program-Extended Tridimensional Analysis of building Structures*, Berkeley, California, U.S.A.

- [17] ASCE 7-05. *Minimum Design Loads for Buildings and Other Structures* - SEI/ASCE Standard No. 7-05. American Society of Civil Engineers. Reston, VA: American Society of Civil Engineers.
- [18] BAEL 91, 1992, *Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et construction en béton armé suivant la méthode des Etats Limites*, Edition Eyrolles.
- [19] CBA 93, *Règles de conception et de calcul des structures en béton armé*. DTR BC 2.41, 1993.
- [20] Thomas Paulay, 1999, *A simple seismic design strategy based on displacement and ductility compatibility*, Earthquake engineering and engineering seismology, volume 1, number 1, september 1999, pp 51-67.
- [21] S. Oguz « *Evaluation of pushover analysis procedures for frame structures* ». Thèse de masters. Middle East technical university. 2005.
- [22] Hemsas Miloud, 2010, *Modélisation par macro élément du comportement non linéaire des ouvrages à voiles porteurs en béton armé sous action sismique*, thèse de doctorat, Université de Bordeaux 1, France.
- [23] Farsi Mohammed Naboussi, 1996, *Identification des structures de Génie Civil à partir de leurs réponses vibratoires. Vulnérabilité du bâti existant*, thèse de doctorat, Université Joseph Fourier Grenoble 1, France.
- [24] Fajfar P. 2000, *A nonlinear analysis method for performance based design*. Earthquake spectra. Vol.16 pp.573-592.
- [25] Chopre A.K, et Goel. K, *Vibration properties of buildings determined from recorded earthquake motion*, Earthquake engineering research center. Report No, UCB/EERC-97/14 December 1997.
- [26] Branci Taïeb, *Réponse sismique non linéaire des portiques en béton armé irréguliers en élévation*, XXXe Rencontres AUGC-IBPSA Chambéry, Savoie, 6 au 8 juin 2012.
- [27] Kunnath, S. K (2004), *Identification of modal combination for nonlinear static analysis of building structures*, Computer- Aided Civil and Infrastructure Engineering. 19: 282. 295. 2004.
- [28] R.K. Goel and A.K. Chopra, *Period formulas for moment-resisting frame buildings*, J Struct Eng 123 (11) (1997), pp. 1454–1461. View Record in Scopus | Cited By in Scopus (52).
- [29] Paolo Ricci, Gerardo Mario Verderamea and Gaetano Manfredia, *Analytical investigation of elastic period of infilled RC MRF buildings*, Department of Structural Engineering, University of Naples Federico II, Via Claudio 21, 80125 - Naples, Italy.

- [30] Rui Pinho a, Helen Crowley, *revisiting euro code 8 formulae for periods of vibration and their employment in linear seismic analysis*, Department of Structural Mechanics, University of Pavia, Via Ferrata 1, Pavia, Italy.
- [31] Tassadit ALEM, *Influence des dimensions du bâtiment sur la valeur de la période (cas des structures auto-stable*, thèse Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2009.
- [32] Mohammed. N. Farsi - Pierre-Yves Bard, *Estimation des périodes propres de bâtiments et Vulnérabilité du bâti existant dans l'agglomération de Grenoble* (France). Revue Française de Génie Civil. Volume X – n° Y/200Z.

## Annexes

---

Tableau A.1.1. Ferrailage des poteaux du bâtiment (R+5)

| Etages                 | RPA (T1) | RPA (T2) | Eurocode 8 | ASCE 7-05 |
|------------------------|----------|----------|------------|-----------|
| R.D.C<br>et<br>étage 1 |          |          |            |           |
| Etages<br>2 et 3       |          |          |            |           |
| Etages<br>4 et 5       |          |          |            |           |

Tableau A.1.2. Ferrailage des poutres principales (30X45) du bâtiment (R+5)

| Niveaux | Zones  | RPA (T1) | RPA (T2) | Eurocode 8 | ASCE 7-05 |
|---------|--------|----------|----------|------------|-----------|
| 1 et 2  | Travée |          |          |            |           |
|         | Appui  |          |          |            |           |
| 3 et 4  | Travée |          |          |            |           |
|         | Appui  |          |          |            |           |
| 5 et 6  | Travée |          |          |            |           |
|         | Appui  |          |          |            |           |

Tableau A.1.3. Ferrailage des poutres secondaires (30X40) du bâtiment (R+5)

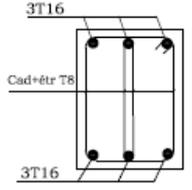
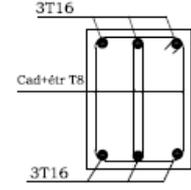
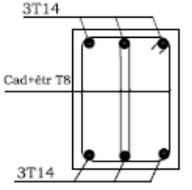
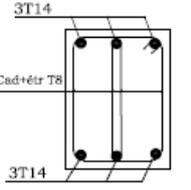
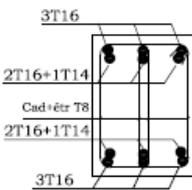
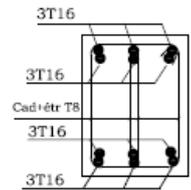
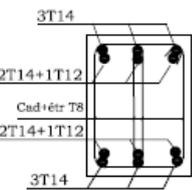
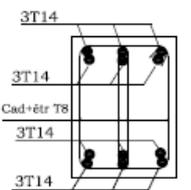
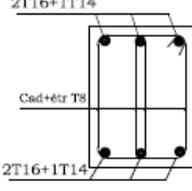
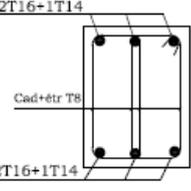
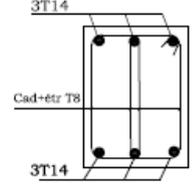
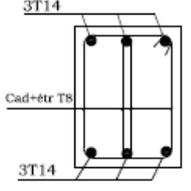
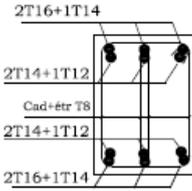
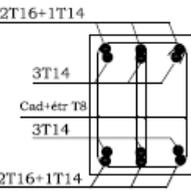
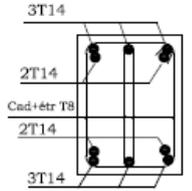
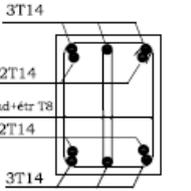
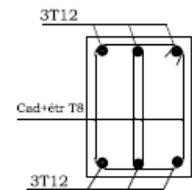
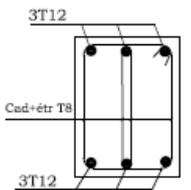
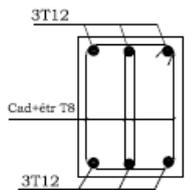
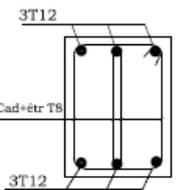
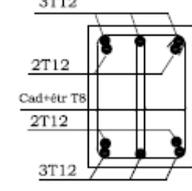
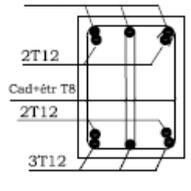
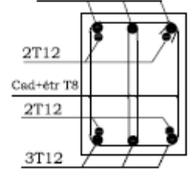
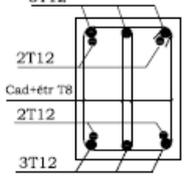
| Niveaux | Zones  | RPA (T1)  | RPA (T2)  | Eurocode 8   | ASCE 7-05   |
|---------|--------|---|---|--|---|
| 1 et 2  | Travée |    |    |    |    |
|         | Appui  |    |    |    |    |
| 3 et 4  | Travée |   |   |   |   |
|         | Appui  |  |  |  |  |
| 5 et 6  | Travée |  |  |  |  |
|         | Appui  |  |  |  |  |

Tableau A.1.4. Ferrailage des poteaux du bâtiment (R+8)

| Etages                      | RPA (T1) | RPA (T2) | Eurocode 8 | ASCE 7-05 |
|-----------------------------|----------|----------|------------|-----------|
| R.D.C +<br>étages<br>1 et 2 |          |          |            |           |
| Etages<br>3 et 4            |          |          |            |           |
| Etages<br>5 et 6            |          |          |            |           |
| Etages<br>7 et 8            |          |          |            |           |

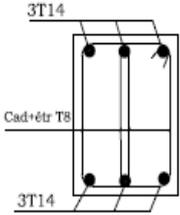
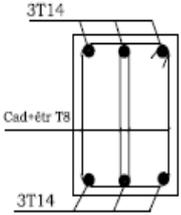
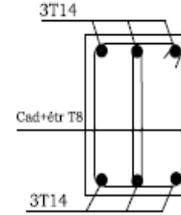
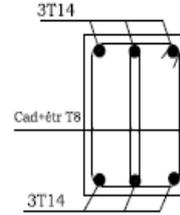
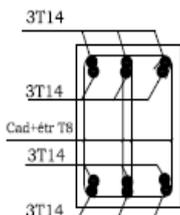
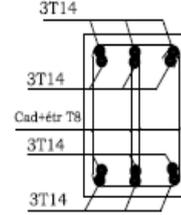
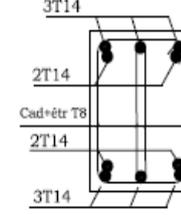
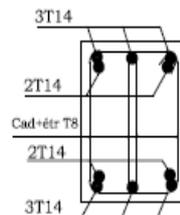
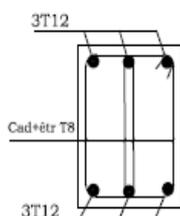
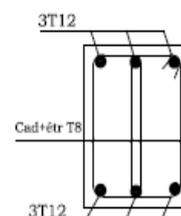
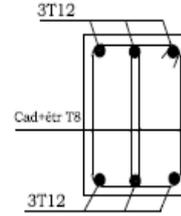
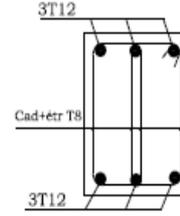
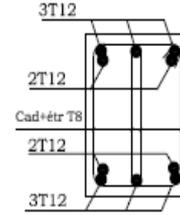
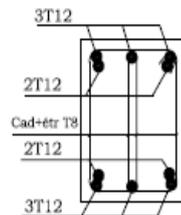
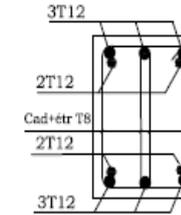
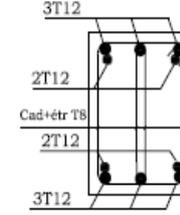
Tableau A.1.5. Ferrailage des poutres principales (30X45) du bâtiment (R+8)

| Niveaux   | Zones  | RPA (T1) | RPA (T2) | Eurocode 8 | ASCE 7-05 |
|-----------|--------|----------|----------|------------|-----------|
| 1, 2 et 3 | Travée |          |          |            |           |
|           | Appui  |          |          |            |           |
| 4 et 5    | Travée |          |          |            |           |
|           | Appui  |          |          |            |           |

|        |        |  |  |  |  |
|--------|--------|--|--|--|--|
| 6 et 7 | Travée |  |  |  |  |
|        | Appui  |  |  |  |  |
| 8 et 9 | Travée |  |  |  |  |
|        | Appui  |  |  |  |  |

Tableau A.1.6. Ferrailage des poutres secondaires (30X40) du bâtiment (R+8)

| Niveaux   | Zones  | RPA (T1) | RPA (T2) | Eurocode 8 | ASCE 7-05 |
|-----------|--------|----------|----------|------------|-----------|
| 1, 2 et 3 | Travée |          |          |            |           |
|           | Appui  |          |          |            |           |
| 4 et 5    | Travée |          |          |            |           |
|           | Appui  |          |          |            |           |

|        |        |   |   |  |   |
|--------|--------|---|---|--|---|
| 6 et 7 | Travée |    |    |    |    |
|        | Appui  |    |    |    |    |
| 8 et 9 | Travée |   |   |   |   |
|        | Appui  |  |  |  |  |

