

CHAPITRE 3

EVALUATION DES RESULTATS D'ANALYSE PUSHOVER

3.1. Introduction

Les effets et la précision des modes de chargement latéral utilisés dans l'analyse Pushover pour prévoir le comportement des structures suite aux mouvements sismiques qui entraînent différents niveaux de réponses élastiques linéaires ou non élastiques non linéaires, sont présentés dans cette étude, dans ce but :

- le comportement global de la structure.
- Les déplacements des niveaux.
- Le rapport de déplacement relatif
- l'effort tranchant d'étage.
- L'emplacement des rotules plastiques.

Ont été choisis en tant que paramètres de réponse.

Les courbes pushover des structures sont obtenues en procédant aux analyses pushover au moyen du programme SAP 2000.

Les déplacements des niveaux, le rapport de déplacement relatif, l'effort tranchant d'étage, l'emplacement des rotules plastiques pour tout mode de chargement latéral est extraite de la base de données d'analyse pushover . Lors du déplacement au sommet prédéterminé en accord avec le niveau de déformation considérée.

Dans notre étude, nous avons choisi deux niveaux de déformation :

- Niveau de déformation à la limite de l'élasticité qui représente la réponse linéaire.
- Niveau de déformation à la limite de la plasticité (qui est le point limite directe avant l'effondrement) qui représente la réponse non linéaire.

3.2. Evaluation du comportement global des modèles

Toutes les courbes pushover pour tous les modèles sont présentés dans l'annexe C.

Comme cité précédemment trois modes de chargement latéral sont utilisés dans l'analyse pushover non linéaires. Les courbes représentant le déplacement au sommet en fonction de

l'effort tranchant à la base pour chaque mode de chargement sont dessinées sur le même graphe pour la représentation du comportement global des modèles de constructions. Pour exemple les courbes de pushover des modèles (2-1), (2-2), (2-3), (2-4), (5-1), (8-1), sont représentées dans les figures (1-3), (2.3), (3.3), (4.3), (5.3), (5.6).

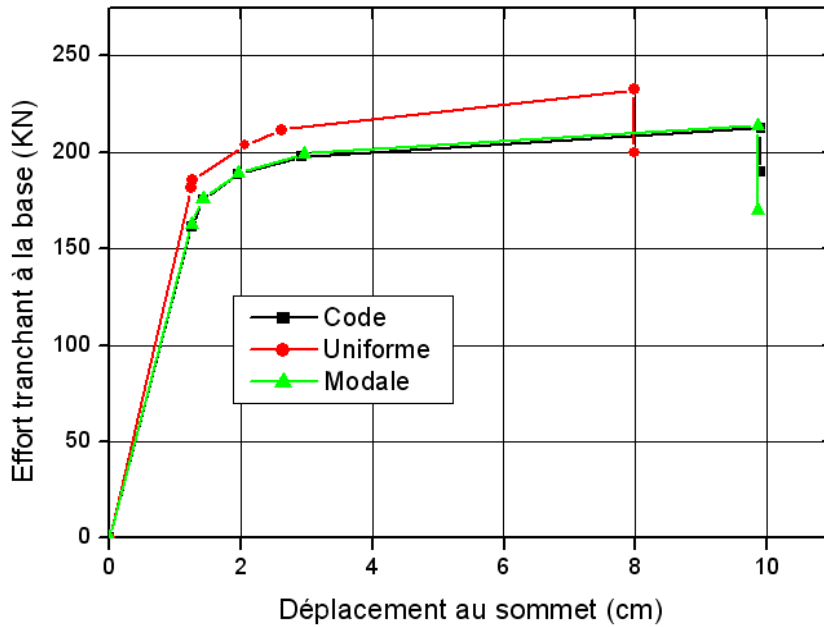


Figure 3-1 : courbes de pushover du modèle 2-1

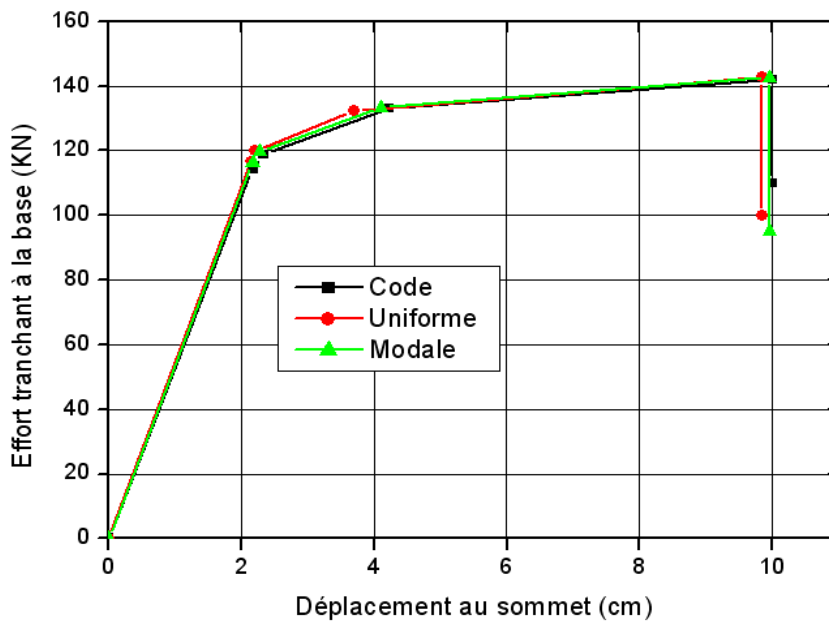


Figure 3-2 : courbes de pushover du modèle 2-2

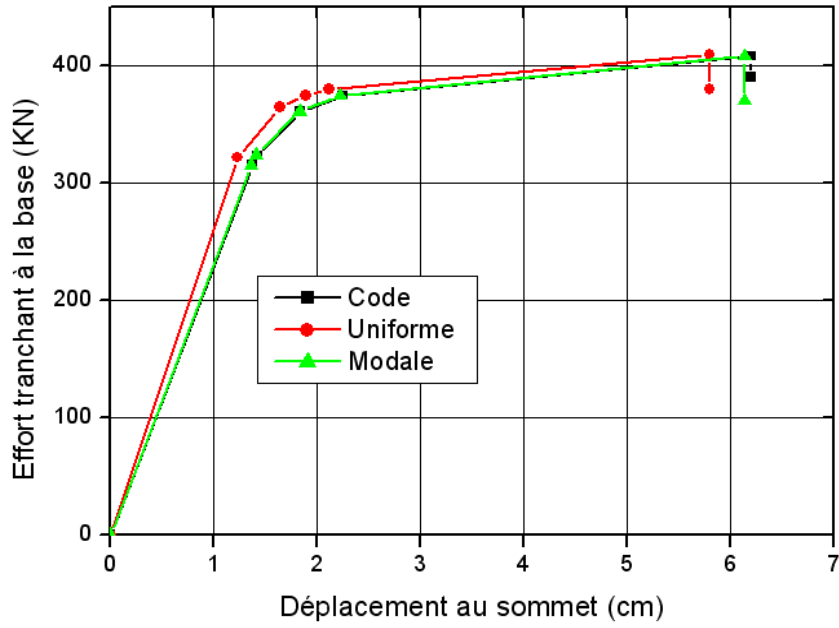


Figure 3-3 : courbes de pushover du modèle 2-3

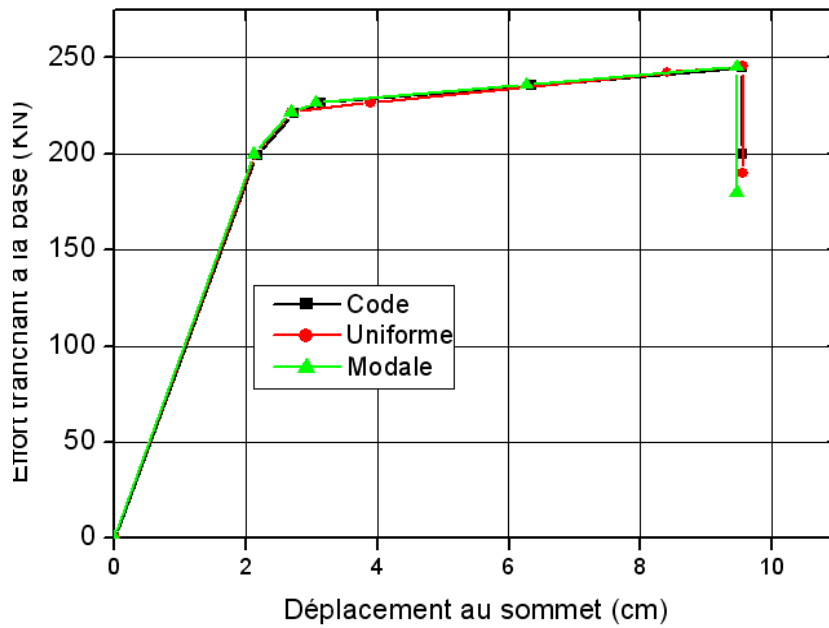


Figure 3-4 : courbes de pushover du modèle 2-4

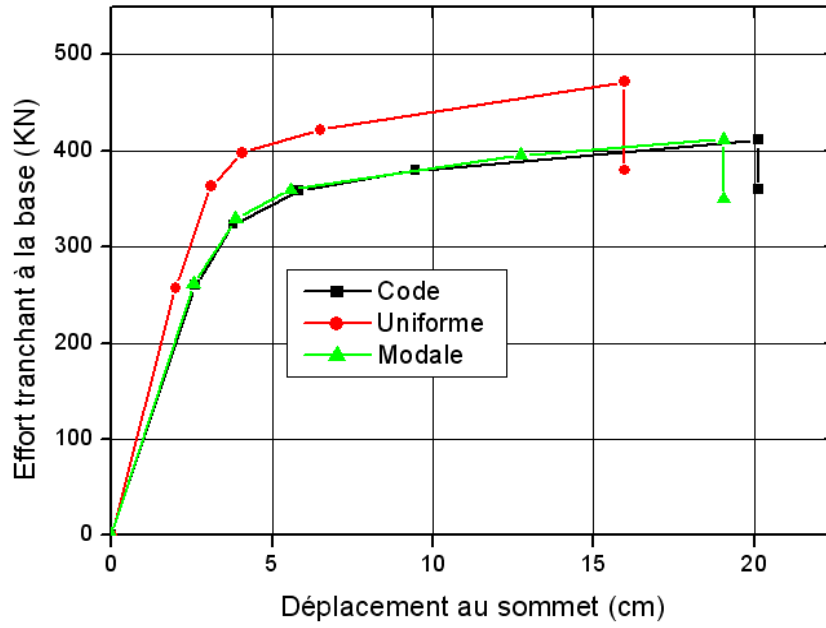


Figure 3-5: courbes de pushover du modèle 5-1

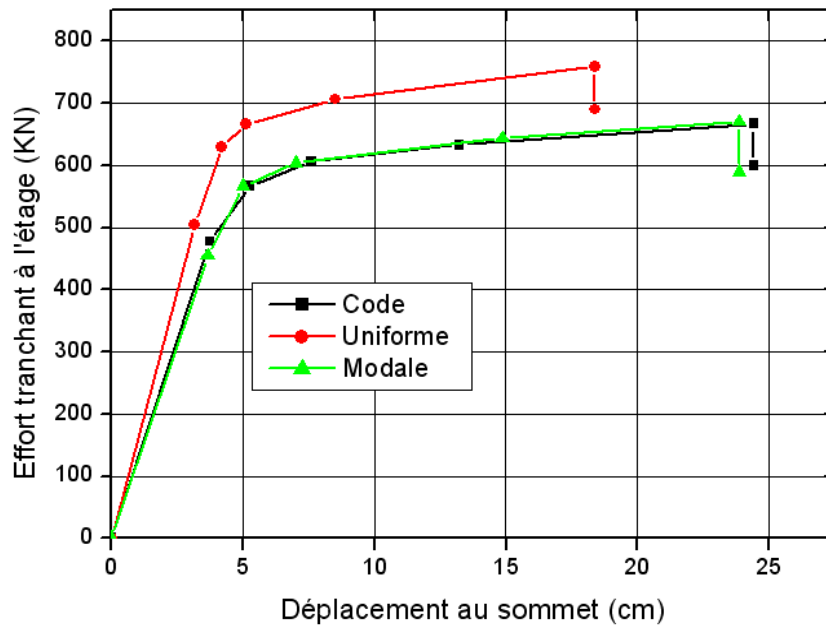


Figure 3-6: courbes de pushover du modèle 8-1

Lors de l'évaluation du comportement global des modèles analytiques, nous comparons les courbes pushover en considérant le nombre de travées, la hauteur du premier niveau et le nombre de niveaux .

Dans les comparaisons effectuées suivant le nombre de travées, il a été prouvé que par l'augmentation du nombre de travées la force latérale augmente (l'effort tranchant à la base) aussi.

Cette augmentation est proportionnelle avec la capacité de dissipation d'énergie car les rotules plastiques probables augmentent par l'augmentation des travées. D'un autre côté, il a été constaté que les déplacements ultimes sont supérieurs dans les modèles à faible nombre de travées. Il est constaté que le niveau de déplacement latéral lors de la formation de la première rotule plastique (qui est le déplacement à la limite d'élasticité) augmente par l'augmentation du nombre de travée.

Lors de la comparaison des courbes pushover obtenues par des modes de chargements différents, il a été constaté que la capacité et la déformation des modèles réguliers (hauteur du premier niveau = 3 m) obtenues par le mode de chargement uniforme sont complètement différentes des résultats obtenues par les autres modes de chargement. Comme il a été constaté que cette différence dans les modes de chargement entraîne à la différence de la valeur de la rigidité initiale. Additionnellement, les résultats du mode de chargement du code et du mode de chargement modal sont presque identiques dans la majorité des modèles. D'autre part, pour les modèles irréguliers (la hauteur du premier niveau = 5 m) les courbes pushover obtenues par les différents modes de chargements, il a été constaté qu'elles étaient très proches avec la présence de différences minimales lors de l'augmentation de la période fondamentale des modèles. Et ce en tant que résultat du déplacement du premier niveau commandant le comportement global des modèles.

Les courbes pushover font aussi apparaître clairement les insuffisances de capacités des modèles irréguliers. Lors de la comparaison des deux figures (3-1) et (3-2) nous trouvons que par augmentation de la hauteur du premier niveau la capacité globale de la structure diminue d'un taux de 33 % et ceci est dû à la probabilité de la présence d'un étage souple.

Dans les comparaisons effectuées suivant le nombre de niveau, il a été prouvé que par l'augmentation du nombre de niveaux la force latérale (l'effort tranchant à la base) augmente ainsi que le niveau de déformation. Additionnellement, il a été constaté que les

déplacements latéraux calculés lors de la formation de la première rotule plastique augmentent en fonction de l'augmentation du nombre de niveaux.

Le comportement structurel prévisionnel des modèles réguliers par le mode de chargement latéral triangulaire est proche du comportement dynamique exact obtenu par les analyses temporelles non linéaires. La réponse structurelle générale déterminée au moyen des modes de chargement triangulaire est meilleure que les prévisions par le mode de chargement latéral uniforme dans à peu près tous les modèles. Parce que le chargement latéral uniforme dans la majorité des cas et par comparaison par les résultats exacts augmente l'estimation de l'effort tranchant à la base et diminue l'estimation du déplacement global ultime [53].

3.3. La réponse élastique linéaire

La réponse linéaire des constructions joue un très grand rôle dans la conception des structures et donne une estimation importante du comportement de la construction. Et ceci revient à la très bonne connaissance des relations basées sur l'analyse linéaire entre les forces et les déformations des différents éléments, et qui donne une formulation fiable utilisée dans l'amélioration et la conception des éléments structurels. L'application des réponses linéaires dans la conception sismiques des constructions sera pour une étude du comportement des constructions lors d'un faible séisme ne provoquant pas de dégâts.

A partir de cela dans cette partie les réponses linéaires des constructions seront étudiées en prenant en considération les quantités de réponses importantes comme par exemple : Les déplacements des niveaux, le rapport de déplacement relatif et l'effort tranchant d'étage.

- Le rapport de déplacement relatif est défini par la différence entre le déplacement relatif de deux niveaux successifs divisé par la hauteur du niveau. L'effort tranchant d'étage est défini comme étant la somme totale d'efforts tranchants formés dans les poteaux du niveau considéré.
- Dans cette étude par rapport à chaque modèle analytique, ces quantités seront calculées à limite de l'élasticité (lors de la formation de la première rotule) comme décrit dans les courbes de pushover et cela pour son estimation dans le domaine linéaire.

3.3.1 Les déplacements des niveaux

Après la réalisation de l'analyse pushover en utilisant les trois modes de chargement, le déplacement de niveau obtenu à la limite de l'élasticité est présenté sur le même graphe. Les courbes obtenues aident à la comparaison entre les résultats et la vérification de leurs exactitudes.

Les graphes du déplacement de niveau des modèles analytiques sont donnée dans l'annexe C comme par exemple les figures (3-7), (3-8), (3-9), (3-10) font apparaître les graphes du déplacement des modèles (5-1), (5-2), (8-1), (8-2).

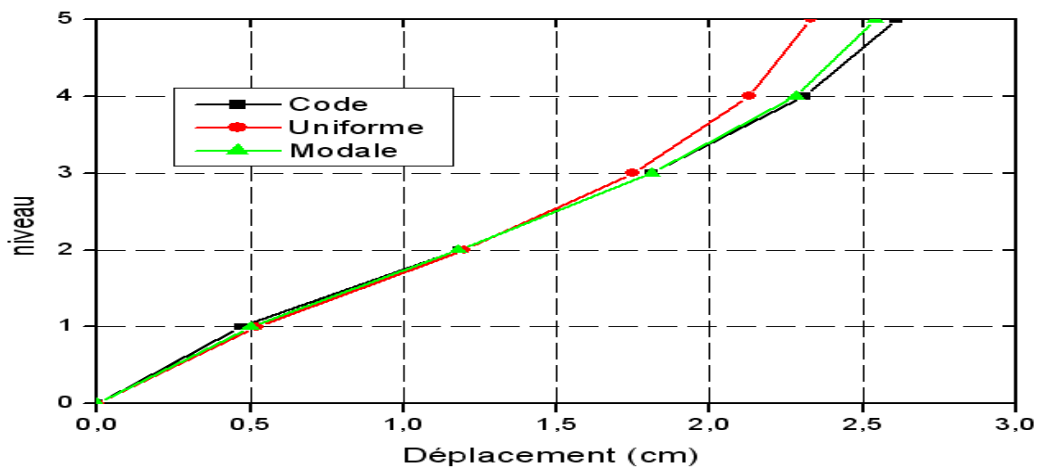


Figure 3-7 : Les déplacements des niveaux du modèle 5-1

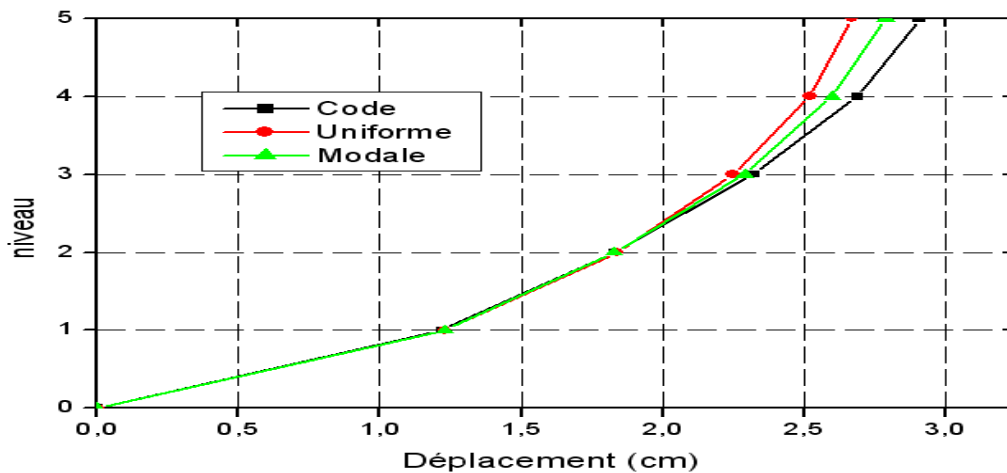


Figure 3-8 : Les déplacements des niveaux du modèle 5-2

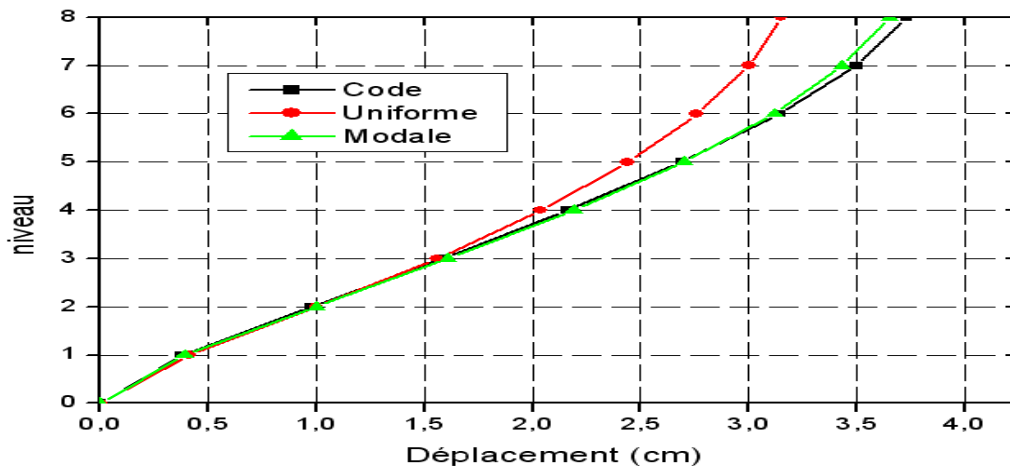


Figure 3-9 : Les déplacements des niveaux du modèle 8-1

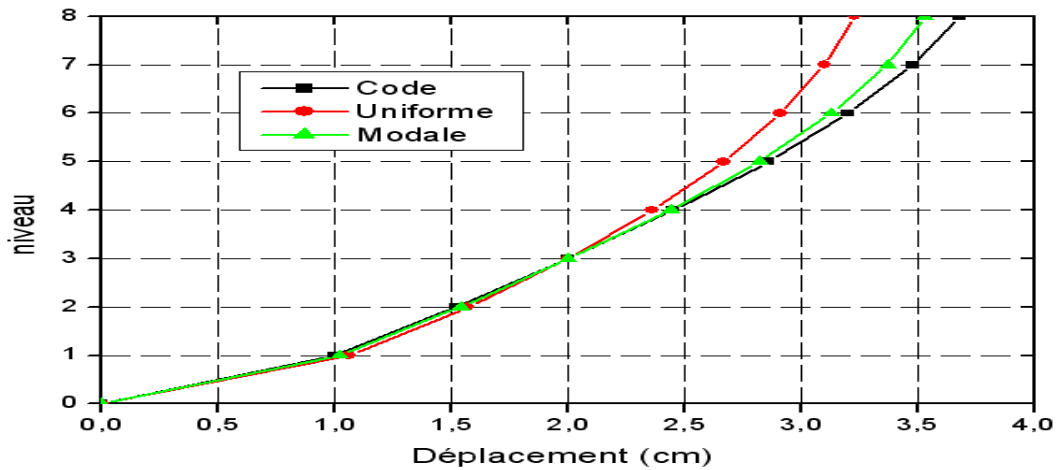


Figure 3-10: Les déplacements des niveaux du modèle 8-2

Il a été constaté à partir de ces figures que les déplacements des sommets obtenus au moyen du mode de chargement du code et mode de chargement modal sont très proches et sont considérés comme des valeurs maximales en comparaison avec les déplacements des sommets du mode de chargement uniforme, la différence dans le déplacement au sommet sous l'influence des trois modes de chargement, il a été constaté son élévation par l'augmentation du nombre de niveau, les valeurs des déplacements dans les premiers niveaux ont été constatées très proches par rapport à tous les modes de chargement, et dans certains cas le mode de chargement uniforme donne des valeurs légèrement supérieures par comparaison aux deux autres modes.

La comparaison entre les figures (7-3) et (8-3) fait apparaître que le déplacement du premier niveau sur la figure (8-3) est devenu à peu près trois fois supérieures au

déplacement du premier niveau sur la figure (7-3) et cela provient dans l'augmentation du premier niveau, ce qui nous conduit à déduire que les analyses pushover dans le domaine élastique linéaire donnent des résultats logiques.

Les recherches ayant effectués des comparaisons entre les valeurs de déplacements déterminées par l'utilisation des modes de chargement et les déplacements déterminés au moyen de l'analyse dynamique non linéaire et qui peut être considéré comme une analyse plus exacte et cela dans le niveau de déformation linéaires font apparaître que malgré la présence de différence entre eux, mais celles sont considérés comme minimales [44,53].

Ce qui nous entraînent à déduire que l'analyse de pushover au moyen des trois modes de chargement latéral donne des prévisions du déplacement proches des résultats exacts (résultat de l'analyse dynamique non linéaire) et cela dans le domaine élastique.

3.3.2. Le rapport de déplacement relatif

Après l'obtention des déplacements latéraux à limite de l'élasticité, nous calculons le rapport de déplacement relatif, l'estimation minutieuse du rapport de déplacement relatif et sa distribution sur la hauteur de la structure est une étape d'une importance dans l'évaluation des performances sismiques de la structure. Et cela parce que le dommage structurel concerne le rapport du déplacement relatif, le rapport de déplacement relatif des trois modes de chargement de chaque modèle est représenté et donné dans l'annexe C. les figures (3-11), (3-12), (3-13), (3-14), font apparaître le rapport de déplacement relatif des modèles (5-1), (5-2), (8-1), (8-2).

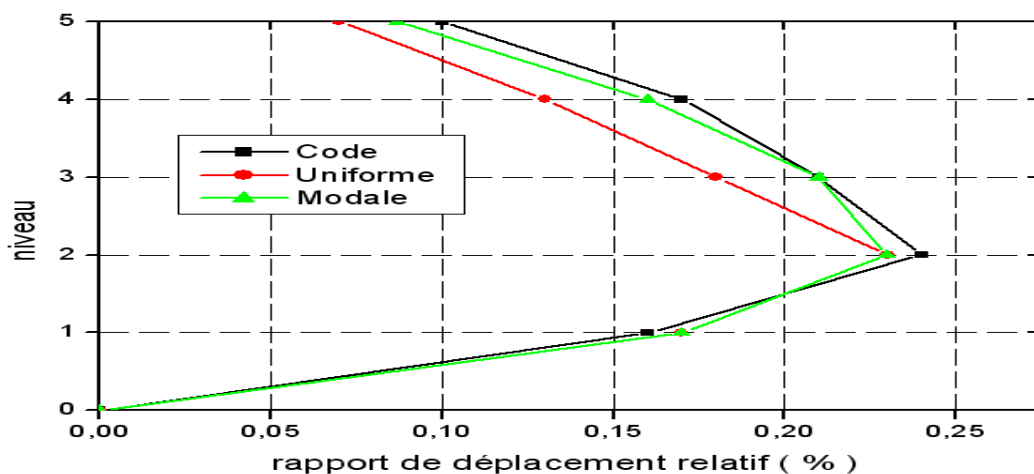


Figure 3-11 : Rapport de déplacement relatif du modèle 5-1

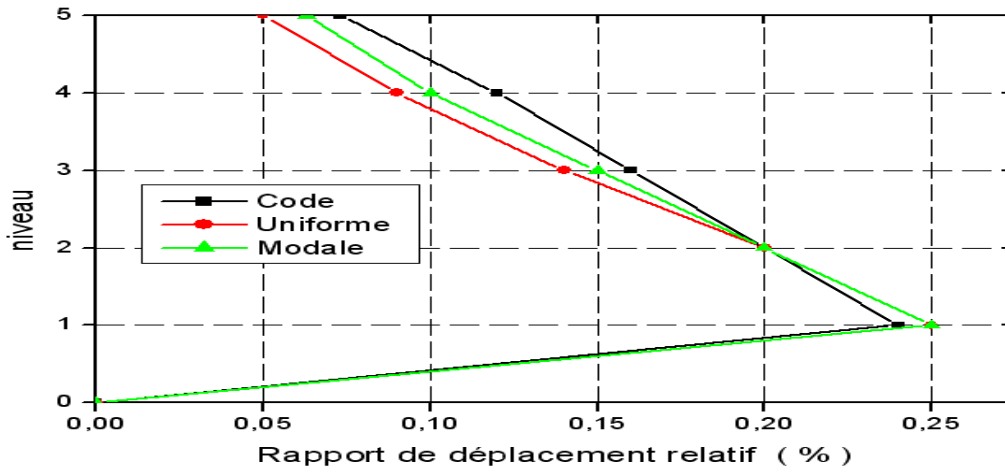


Figure 3-12 : Rapport de déplacement relatif du modèle 5-2

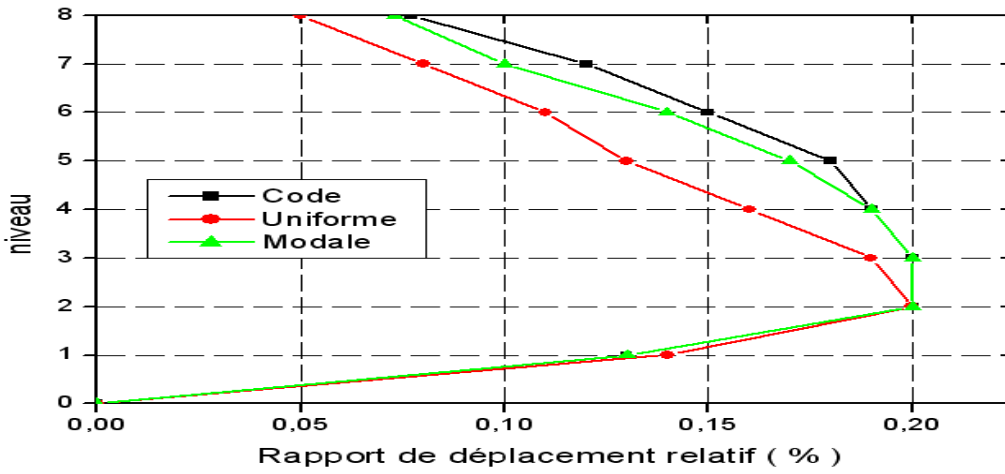


Figure 3-13 : Rapport de déplacement relatif du modèle 8-1

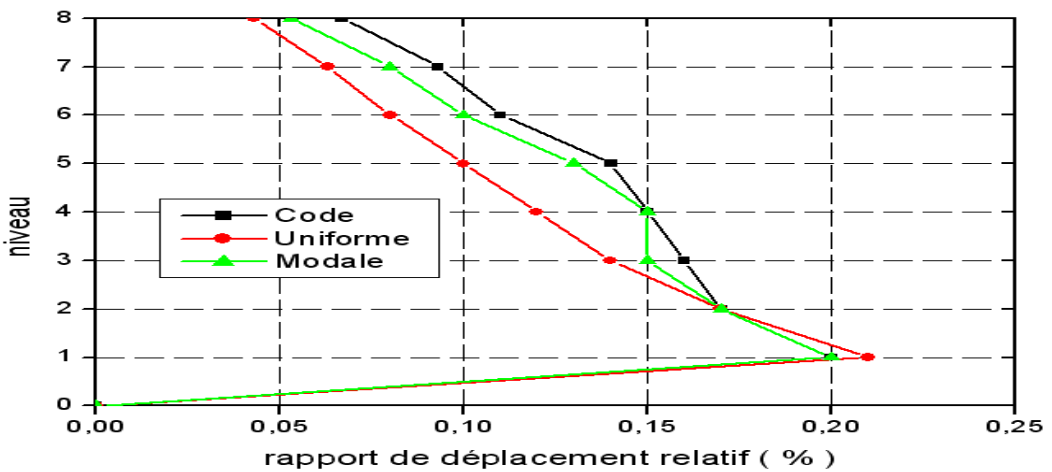


Figure 3-14: Rapport de déplacement relatif du modèle 8-2

Ces figures font apparaître que pour les modèles irréguliers (hauteur du niveau 1= 5 m) le rapport de déplacement relatif maximal se situe au niveau un (01). et ce rapport est supérieur par rapport au niveau de dessus comme prévu. D'autre part, concernant les rapports de déplacements inter niveau pour modèles réguliers (hauteur du niveau 1 = 3 m), il a été constaté qu'ils étaient très proches dans les niveaux un et deux. La valeur maximale du rapport de déplacement relatif renseigne sur le dommage structurel maximal.

Ces figures font apparaître aussi que le mode de chargement du code donne un rapport de déplacement relatif minime au niveau un et le rapport maximal de déplacement relatif au dernier niveau. Ces résultats sont proches des résultats du mode de chargement modal, alors qu'il existe une grande différence avec les modes de chargement uniforme et cela après les deux premiers niveaux. Cette différence diminue pour les modèles irréguliers.

En réalité, le mode de chargement latéral uniforme augmente l'estimation du rapport de déplacement relatif dans les niveaux inférieurs et diminue l'estimation dans les niveaux supérieurs. Les distributions triangulaires (mode de chargement de code, mode chargement modal) sont dans la majorité en concordance continue avec les résultats exacts et cela dans le domaine élastique et si différence il y'a, elle est insignifiante. Ainsi, il peut être utilisé tout mode de chargement triangulaire dans l'estimation du paramètre de réponse [44,53].

3.3.3. l'effort tranchant d'étage

Nous passons maintenant à un autre paramètre parmi les paramètres de réponse qui est l'effort tranchant d'étage, l'effort tranchant d'étage est obtenu à partir de la base de données de l'analyse pushover, les figures (3-15), (3-16), (3-17) font apparaître l'effort tranchant d'étage des modèles (5-1), (5-2), (8-1), (8-2) et qui prennent en considération les résultats des trois modes de chargement latéral, ces modes poussent la structure au déplacement cible pour des résultats au limite de l'élasticité et cela pour chaque modèle, les résultats des autres modèles sont donné dans l'annexe C.

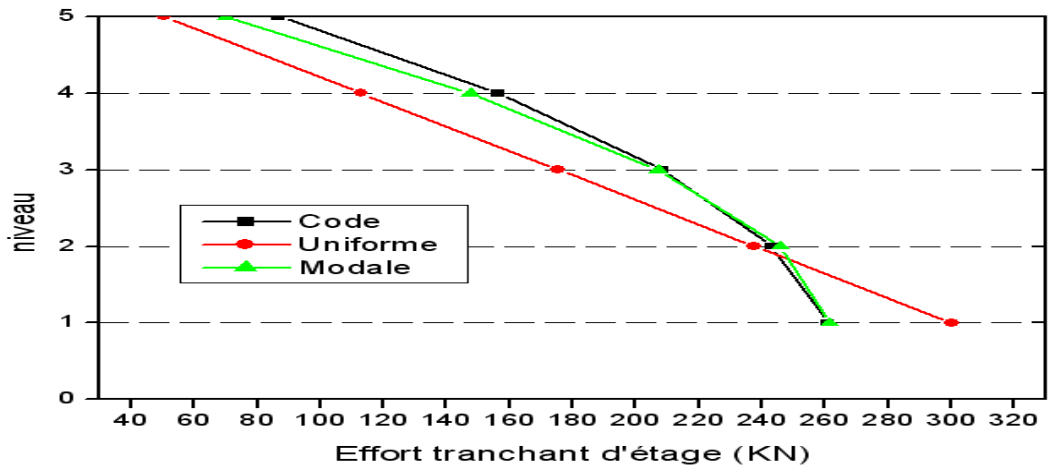


Figure 3-15: L'effort tranchant d'étage du modèle 5-1

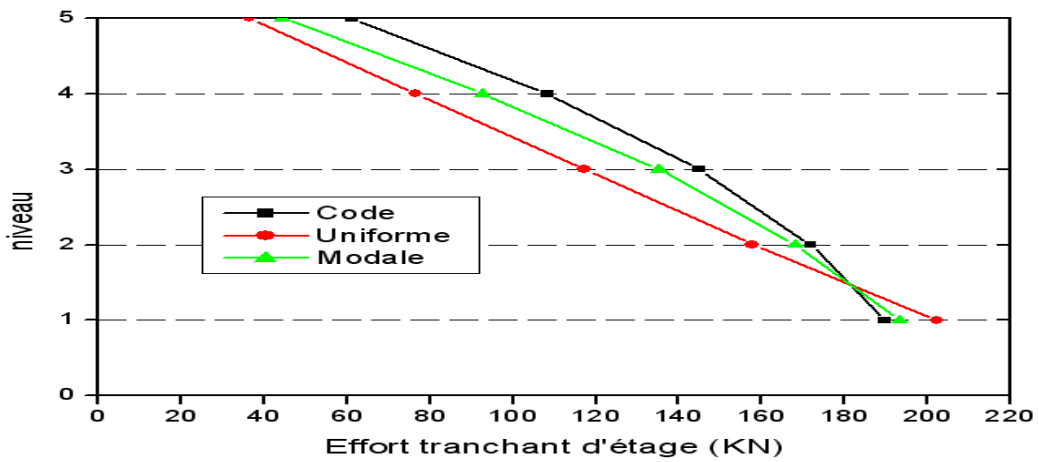


Figure 3-16 : L'effort tranchant d'étage du modèle 5-2

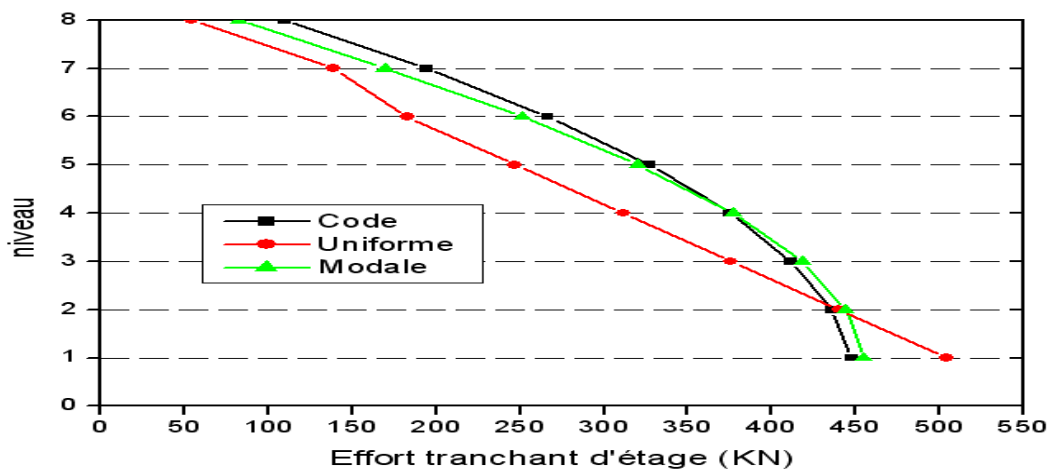


Figure 3-17: L'effort tranchant d'étage du modèle 8-1

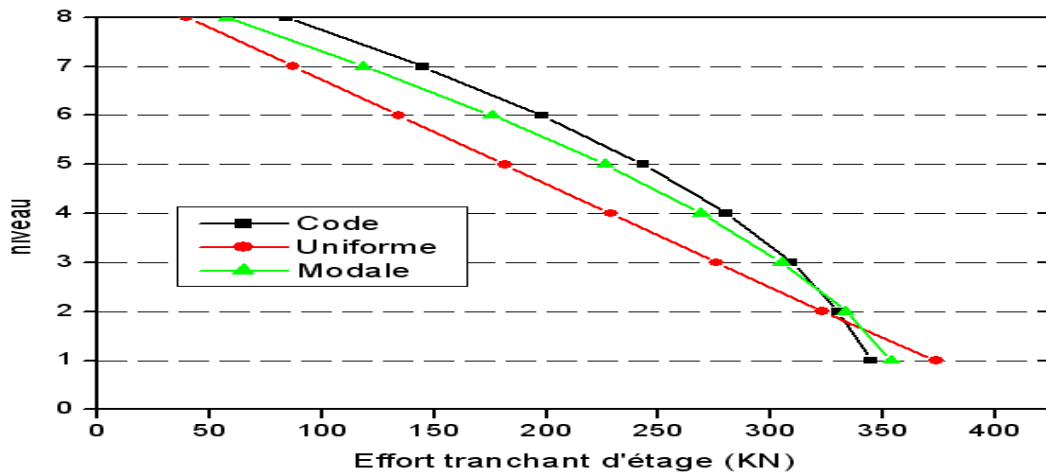


Figure 3-18: L'effort tranchant d'étage du modèle 8-2

Nous constatons à partir de ces figures que, dans presque tous les modèles les résultats du mode uniforme nous fournissent la limite supérieure de l'effort tranchant d'étage au premier niveau et la limite inférieure des niveaux supérieurs. D'un autre côté, l'effort tranchant d'étage est grandissant aux niveaux supérieurs des modèles sous le mode de chargement latéral triangulaire (mode de chargement de code, mode de chargement modal) par rapport au mode de chargement uniforme.

Nous observons aussi, que la différence dans la valeur de l'effort tranchant de chaque niveau des trois modes de chargement au premier niveau des modèles irréguliers est inférieure à celle des modèles réguliers. Comme, nous observons que chaque mode de chargement latéral donne à peu près les mêmes valeurs d'effort tranchant à chaque niveau lors (1/3 à 1/4) de la hauteur totale de chaque modèle.

3.4. La réponse non élastique

La réponse non linéaire des structures joue un très grand rôle dans la compréhension de la résistance sismique des structures. Les critères de sécurité dans les codes sismiques sont utilisés pour la conception de structures élastiques face à des séismes de faibles magnitudes. Lors de séismes de fortes magnitudes, les structures doivent résulter sans effondrement, tout en permettant des dommages structurels et non structurels.

Pour la prévision des dommages structurels, la réponse non élastique doit être étudiée en utilisant l'analyse non linéaire exacte.

Pour l'étude du comportement non linéaire des modèles, cette partie donne une profonde compréhension du comportement des modèles basées sur les résultats des réponses qui prennent en considération le domaine non élastique de déformation.

3.4.1. Les déplacements des niveaux

Les déplacements des niveaux dans le domaine non linéaire s'obtiennent à partir de la base de données de l'analyse pushover, et cela au point précédant directement l'effondrement (la limite de plasticité). Les résultats obtenus en considérant les trois modes de chargement sont représentés sur le même graphe et indiqués dans l'annexe C. Les figures (3-19), (3-20), (3-21), (3-22) font apparaître des déplacements de niveaux à la limite de plasticité des modèles (5-1), (5-2), (8-1) et (8-2).

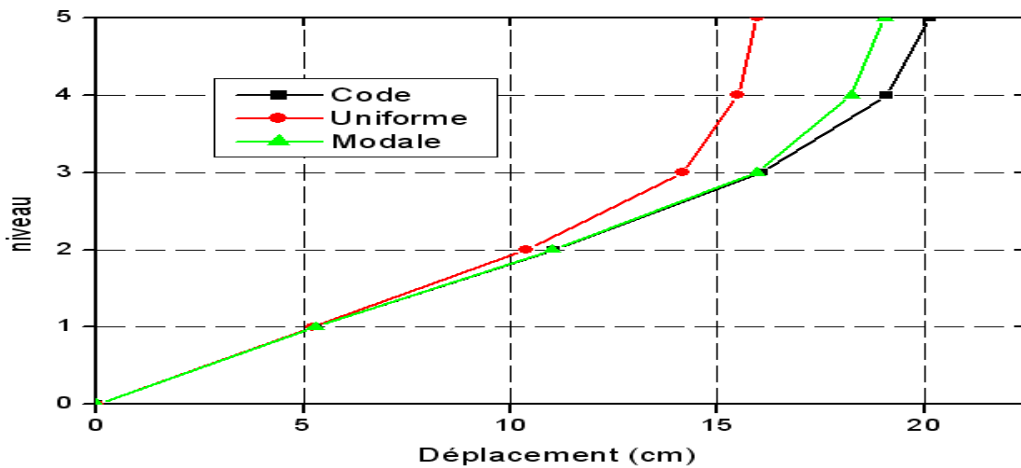


Figure 3-19 : Les déplacements des niveaux du modèle 5-1 (réponse non élastique)

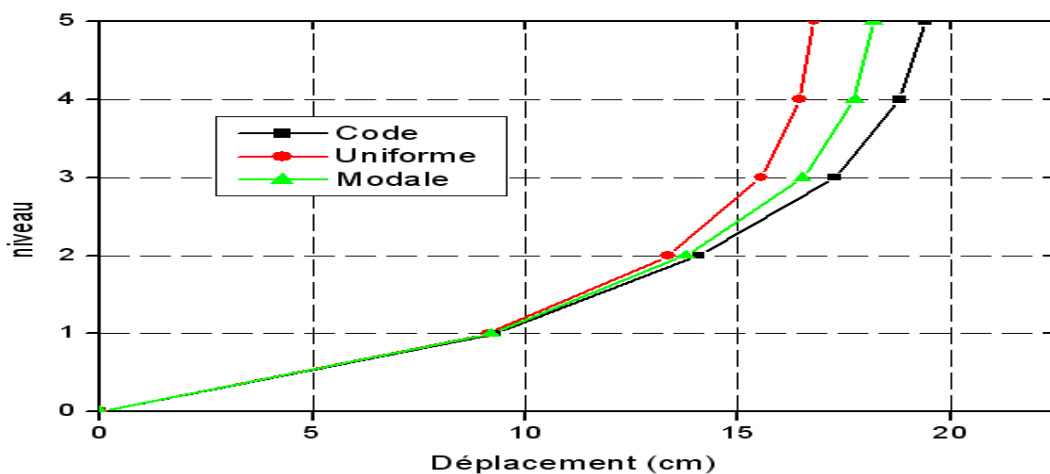


Figure 3-21: Les déplacements des niveaux du modèle 5-2 (réponse non élastique)

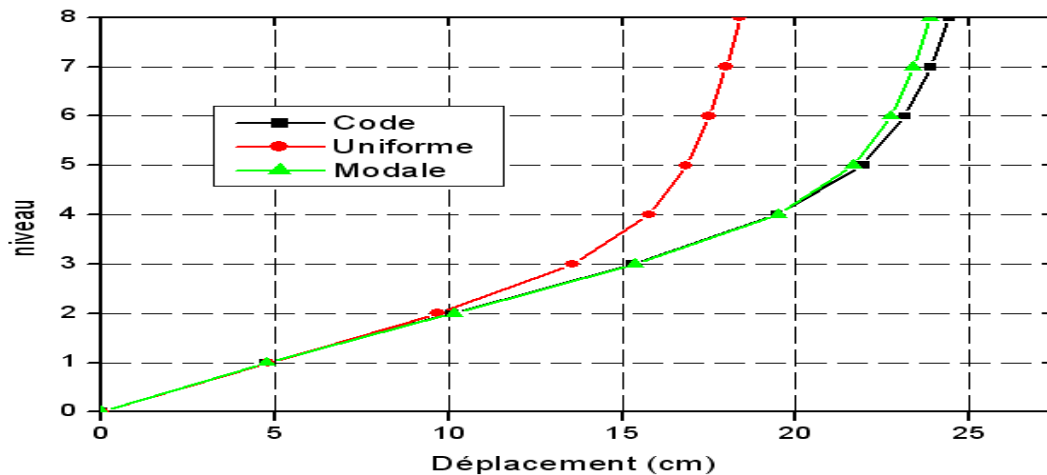


Figure 3-21: Les déplacements des niveaux du modèle 8-1 (réponse non élastique)

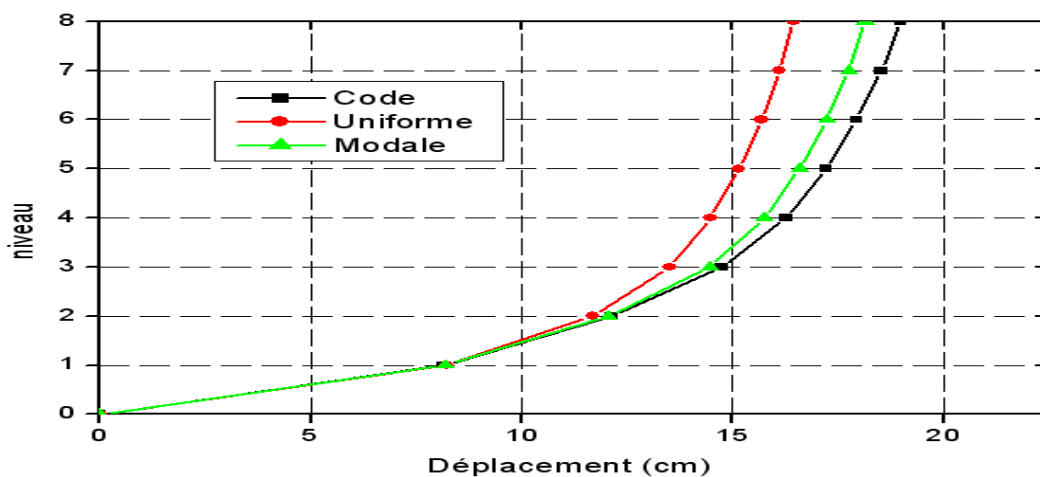


Figure 3-22: Les déplacements des niveaux du modèle 8-2 (réponse non élastique)

Ces figures font apparaître que dans le domaine non linéaire les effets des modes de chargements restent inchangés, les valeurs de déplacement au sommet obtenues par les modes de chargement du code et modal restent toujours maximales par comparaison avec le mode de chargement uniforme. Mais dans ce domaine, la différence entre le mode de chargement uniforme et les deux autres modes (code et modal) est supérieure à celle du domaine élastique et grandit par augmentation du nombre de niveau. Et nous observons aussi de ces figures, le mode de chargement uniforme donne les valeurs minimales sur toute la hauteur de la construction contrairement au domaine élastique. Dans la réalité, il n'existe pas de mode de chargement latéral qui peut capter d'une façon appropriée les déplacements exacts du sommet obtenus par l'analyse temporelle non linéaire dans le domaine non élastique de déformation. Mais cette erreur dans l'estimation n'est pas

important, mais il va grandissant par augmentation du nombre de niveaux, d'un autre sens la période fondamentale augmente, les estimations des modes de chargement triangulaires sont dans la majorité meilleures que celles du mode de chargement uniforme [53].

3.4.2. Le rapport de déplacement relatif

Pour l'étude du comportement non linéaire des modèles, nous calculons le rapport de déplacement relatif à la limite de plasticité de chaque mode de chargement en utilisant les résultats de l'analyse pushover, les résultats ainsi obtenus pour chaque mode sont représentés sur le même graphe et cela pour chaque modèle et ils sont communiqués dans l'annexe C. Les figures (3-23), (3-24), (3-25), (3-26), font apparaître le rapport de déplacement inter niveau des modèles (5-1), (5-2), (8-1) et (8-2).

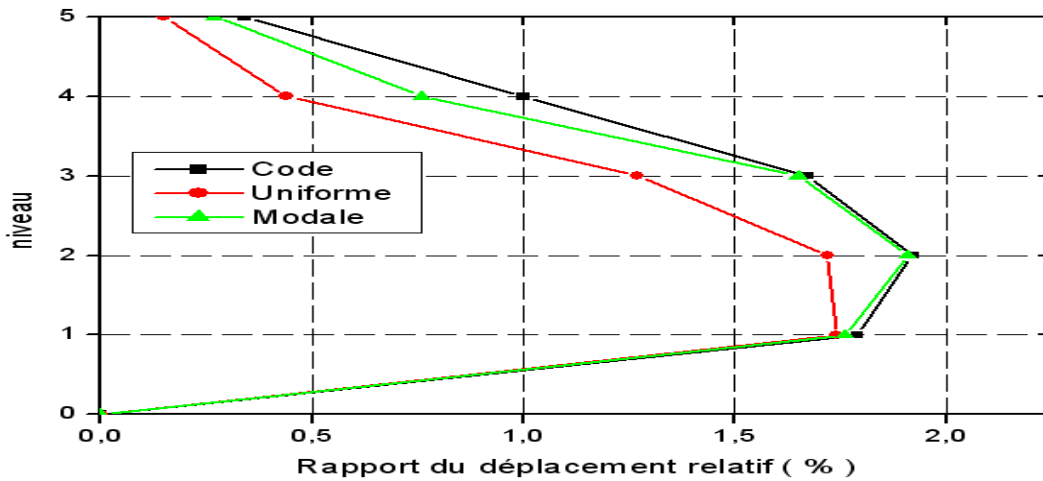


Figure 3-23: Rapport de déplacement relatif du modèle 5-1 (réponse non élastique)

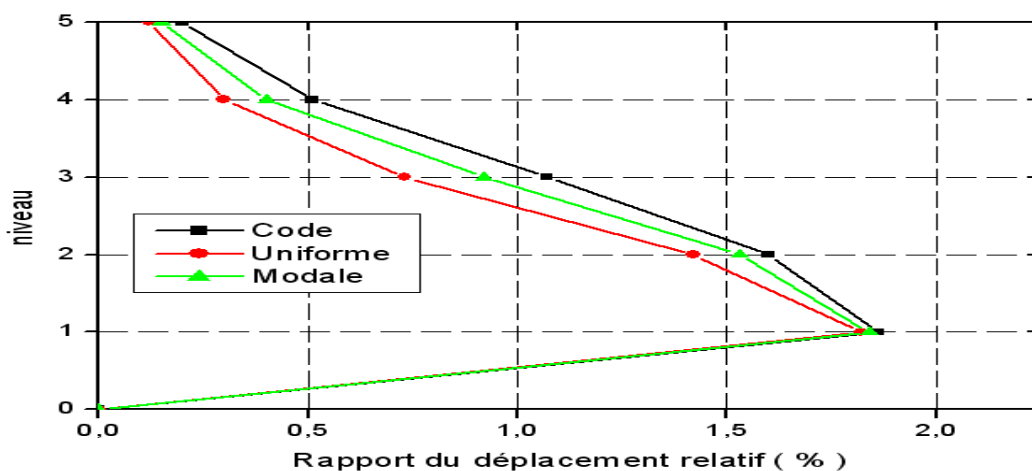


Figure 3-24: Rapport de déplacement relatif du modèle 5-2 (réponse non élastique)

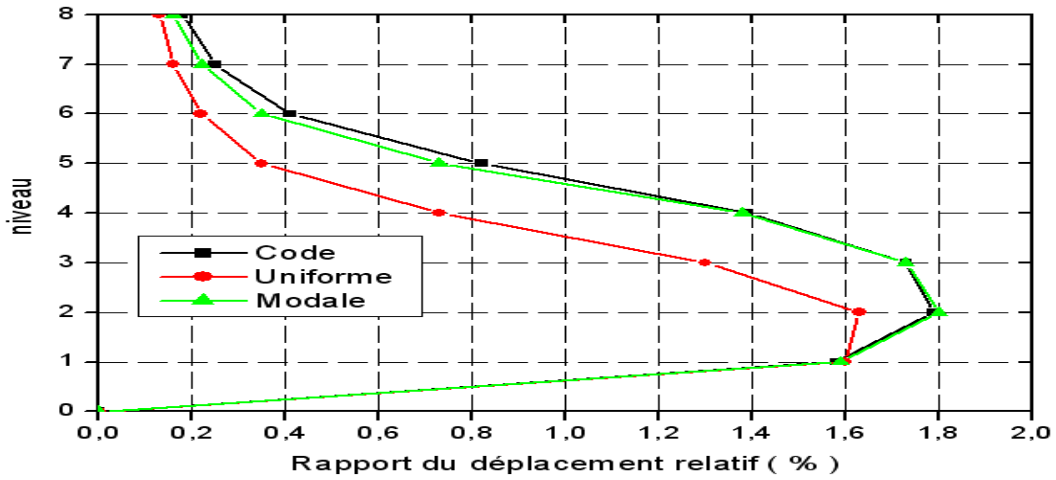


Figure 3-25: Rapport de déplacement relatif du modèle 8-1 (réponse non élastique)

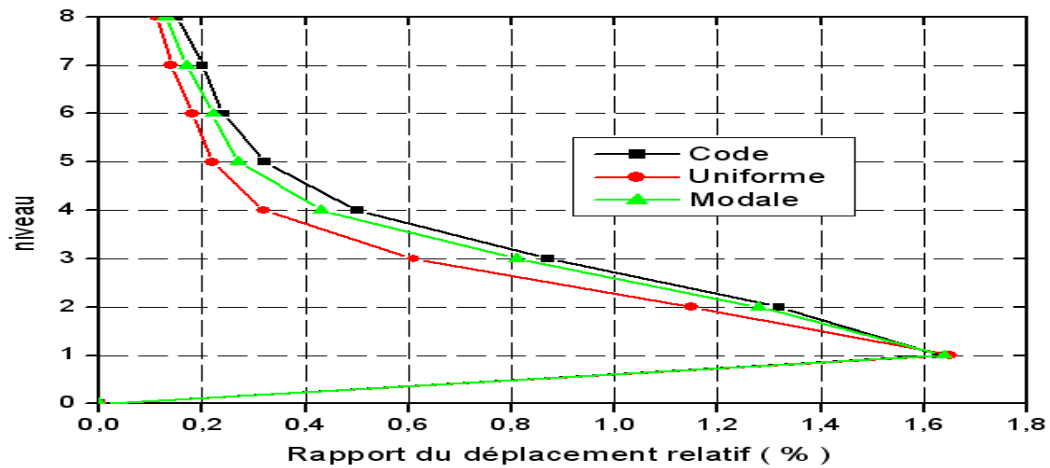


Figure 3-26: Rapport de déplacement relatif du modèle 8-2 (réponse non élastique)

Ces figures font apparaître que le mode de chargement triangulaire (code et modal) donne les valeurs maximales du rapport de déplacement relatif sur toute la hauteur de la construction différemment à ce que nous avons constaté dans les résultats du domaine élastique de déformation. Alors que le mode de chargement uniforme donne à peu près les valeurs minimales sur toute la hauteur de la construction.

La différence entre les valeurs données des modes de chargement latéral concernant les modèles réguliers augmente par comparaison aux résultats du domaine élastique. Cette différence devient plus claire par l'augmentation du nombre de niveau.

Comme dans le domaine élastique, le rapport de déplacement relatif maximal des modèles irréguliers est observé au niveau un, cette valeur est très grande par comparaison au niveau

au dessus, les rapports maximales de déplacement relatif des modèles réguliers ont été observés comme étant proches l'un de l'autre dans les niveaux un et deux.

Le pourcentage maximal du déplacement relatif dans le domaine non élastique est très grand par comparaison au domaine élastique, par exemple, de 0,24 % dans le domaine élastique et devient 1,92 % dans le domaine non élastique pour le modèle (5-1) et pour le mode de chargement uniforme, ce qui est logique car le domaine de déformation devient plus grand et représente des niveaux élevés du comportement non linéaires.

Malgré que l'analyse pushover a donné des résultats très logiques pour les rapports de déplacement relatif dans le domaine non élastique; seulement il existe un pourcentage d'erreur comparativement aux résultats exacts. Ce pourcentage d'erreur augmente lors de la période de la construction, car le rapport de déplacement relatif sous la grande influence du mode supérieur, il a été observé que les erreurs concernant les prévisions du mode de chargement uniforme ont une valeur importante par comparaison aux prévisions du mode de chargement triangulaire [53].

3.4.3. L'effort tranchant d'étage

L'effort tranchant d'étage s'obtient à partir de la base de données de l'analyse pushover dans le point précédent directement l'effondrement, les figures (3-27), (3-28), (3-29) et (3-30) font apparaître les efforts tranchants d'étage des modèles (5-1), (5-2), (8-1), (8-2) et qui prennent en considération les trois modes de chargement et cela au cours du comportement non linéaires de ces modèles, le reste des résultats est communiqué dans l'annexe C.

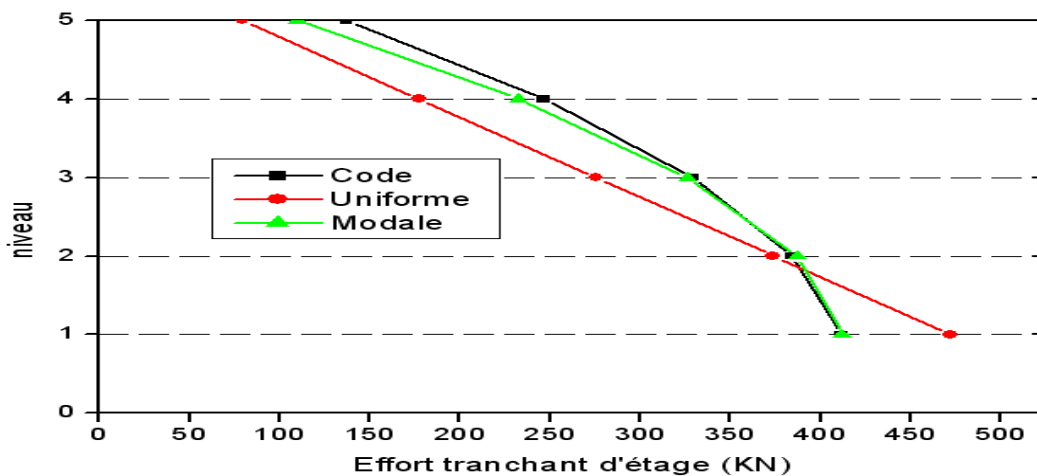


Figure 3-27: L'effort tranchant d'étage du modèle 5-1 (réponse non élastique)

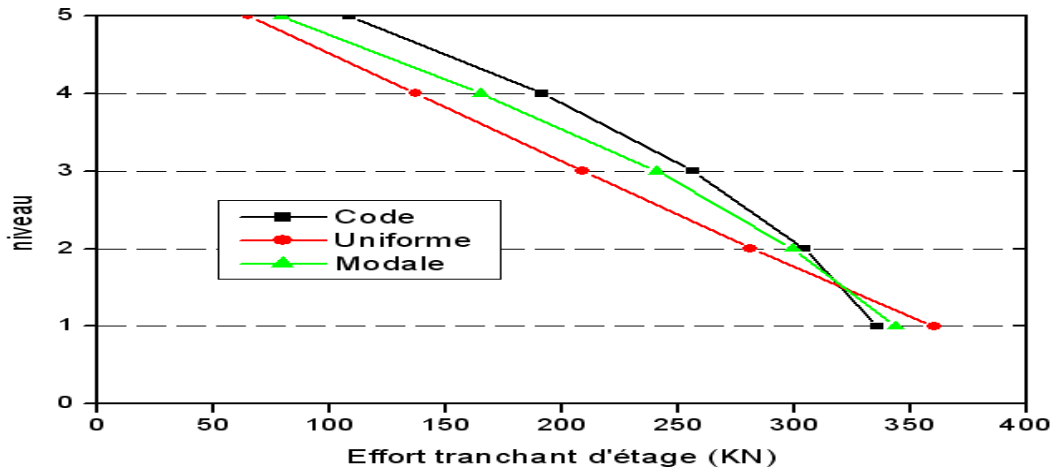


Figure 3-28: L'effort tranchant d'étage du modèle 5-2 (réponse non élastique)

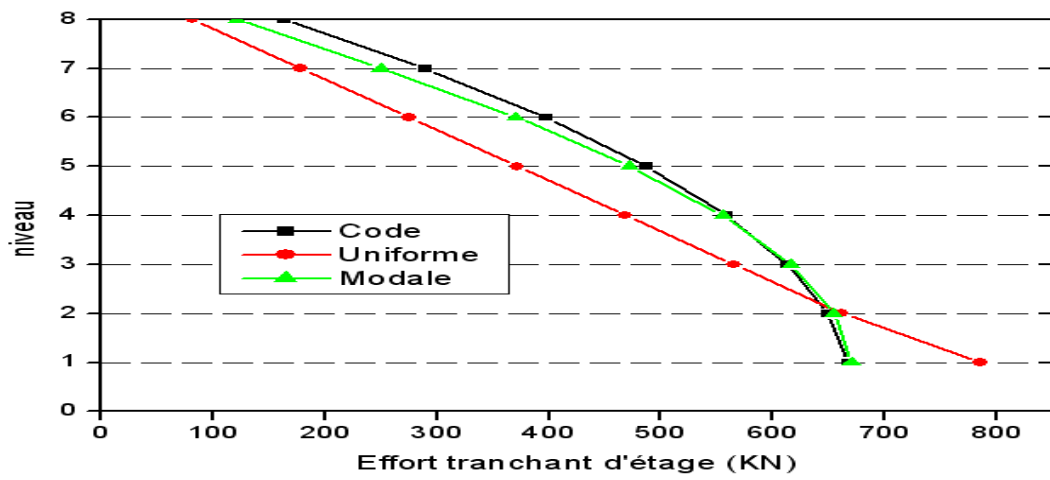


Figure 3-29: L'effort tranchant d'étage du modèle 8-1 (réponse non élastique)

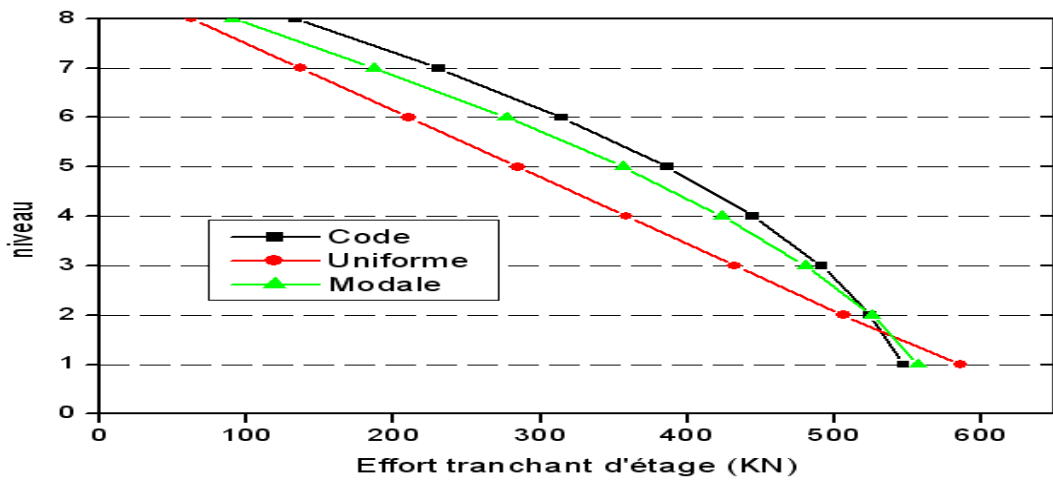


Figure 3-30: L'effort tranchant d'étage du modèle 8-1 (réponse non élastique)

A travers ces figures, nous constatons ,comme dans le cas des résultats du comportements linéaire, que les résultats du mode de chargement du code et du mode de chargement modal sont très proches et donnent des valeurs maximales dans les niveaux supérieurs, par contre le mode de chargement uniforme donne des valeurs maximales dans le niveau un et la différence entre eux est la même que dans le cas linéaire, nous pouvons constaté à partir de ces figures que l'effort tranchant à chaque niveau supporté par chaque modèle possède une valeur différente par comparaison aux résultats linéaires.

Généralement, le reste des observations est conforme aux observations dans le domaine linéaire élastique.

3.4.4. Distribution des rotules plastique

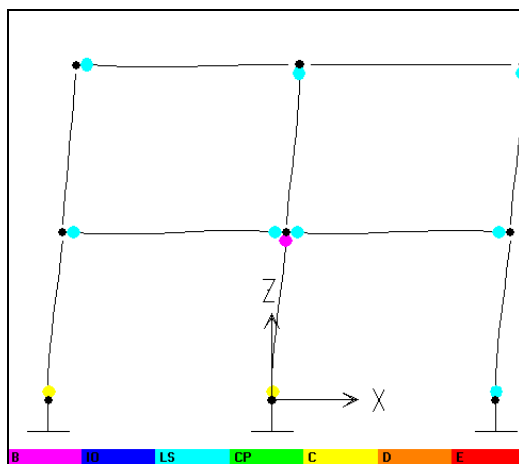
L'utilisation de l'analyse pushover permet de prévoir les emplacements des points faibles et les modes d'échec probables auxquelles la structure doit faire face lors de son exposition à un mouvement sismique, ces analyses seront effectuées en considérant les trois modes de chargement. La distribution des rotules plastiques pour chaque modèles est contrôlé au point précédant directement l'effondrement, ce point représente un niveau de déformation, représentant un haut niveau du comportement non linéaire.

Les figures (3-30), (3-31) ,(3-32) font apparaître la distribution des rotules plastiques à la limites de plasticité pour les modèles (2-1), (8-3),(8-4) et cela par l'utilisation des trois modes (03) de chargement.

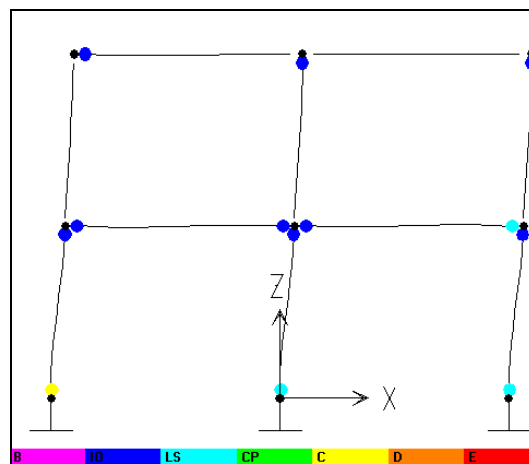
Ces figures font apparaître que les rotules dans les modèles réguliers sont distribuées dans les premiers niveaux, mais pour les modèles irréguliers, les rotules plastiques sont concentrées dans le premier niveau. Car dans ces modèles la concentration des chargements latéraux seront dans le premier niveau.

La différence dans la distribution des rotules plastiques au moyen des modes de chargement latéral est petite, particulièrement entre le mode de chargement du code et le mode de chargement modal pour les modèles réguliers, pour les modèles irréguliers les résultats sont presque conformes.

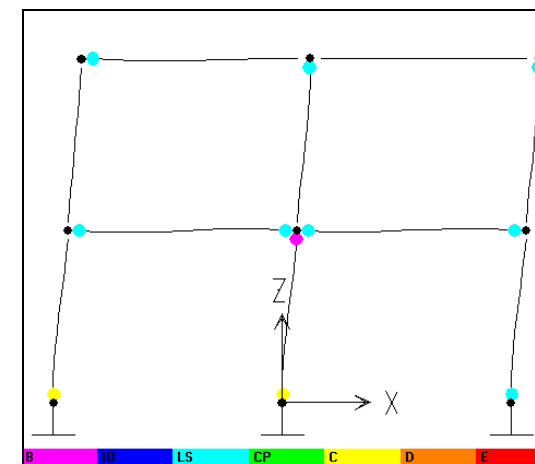
Pour les modèles de grande période, le mode de chargement uniforme prévoit des rotules plastiques généralement dans les niveaux inférieurs et ne peut prévoir aucune rotule plastique dans les niveaux supérieurs.



a)-Distribution du code

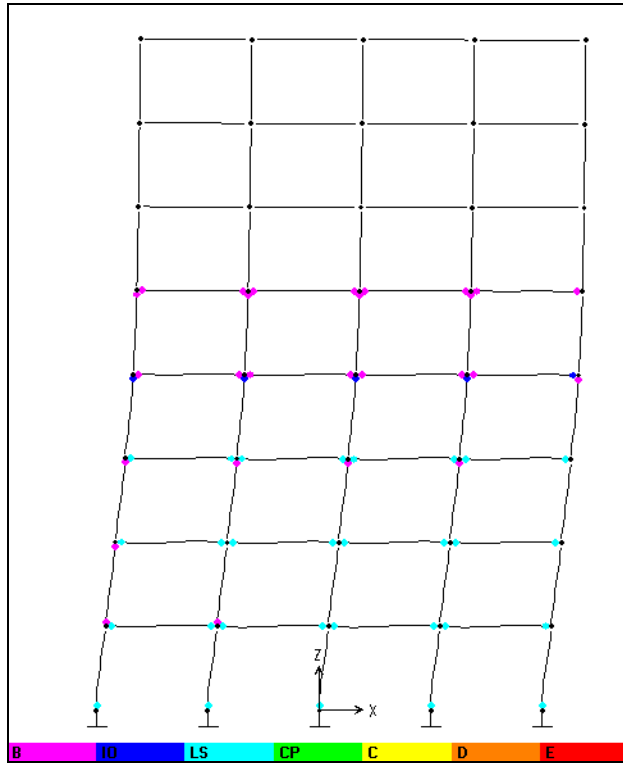


b)-Distribution uniforme

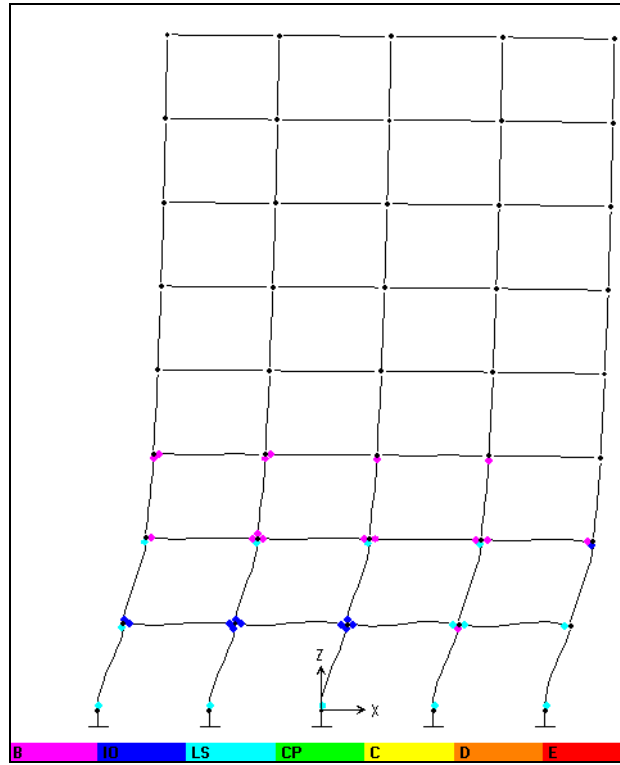


c)-Distribution modale

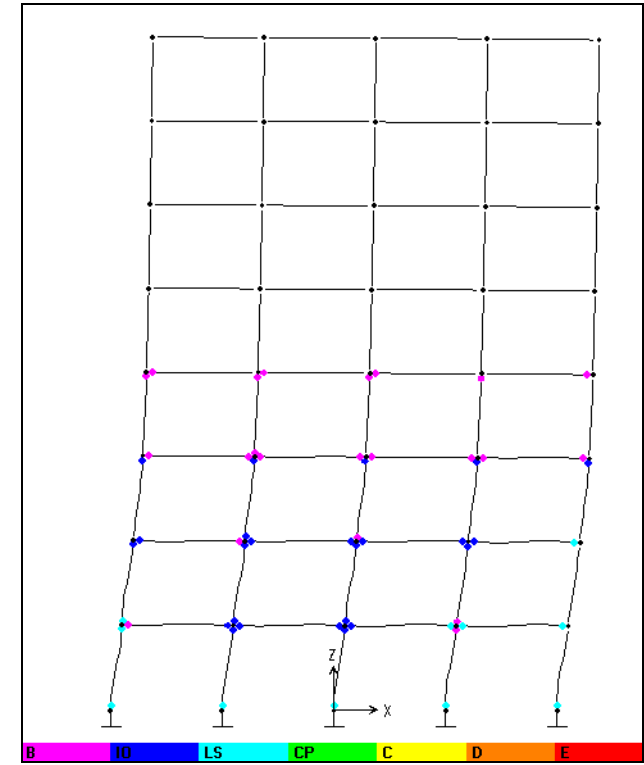
Figure 3-30 : Distribution des rotules plastiques à la limite de plasticité du modèle 2-1



a)- Distribution du code

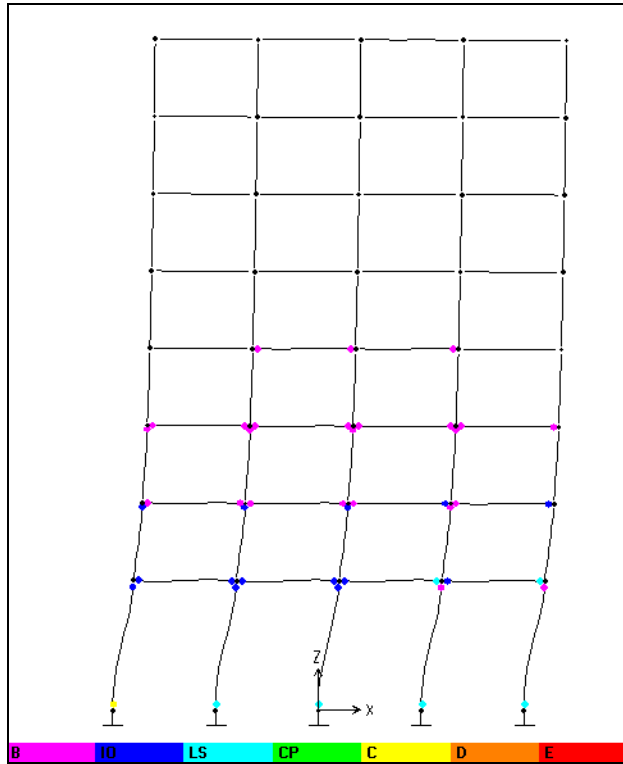


b)- Distribution uniforme

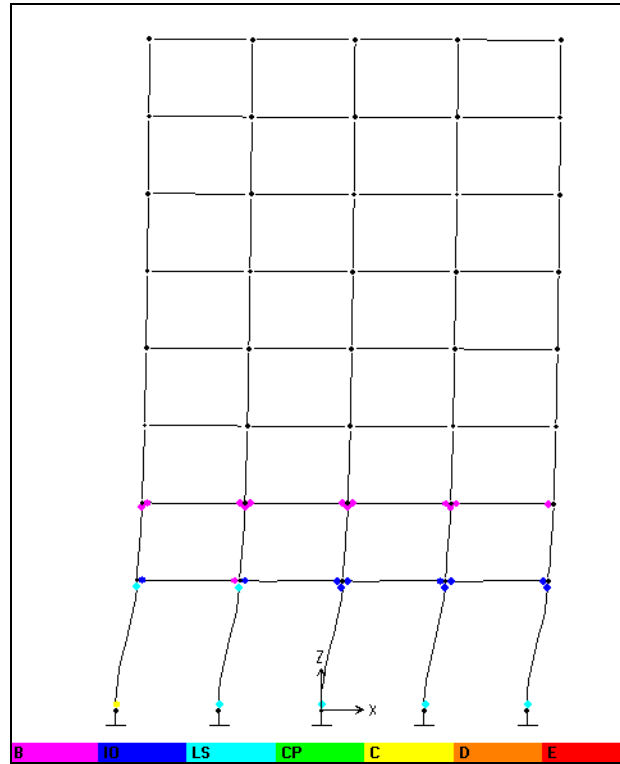


c)- Distribution modale

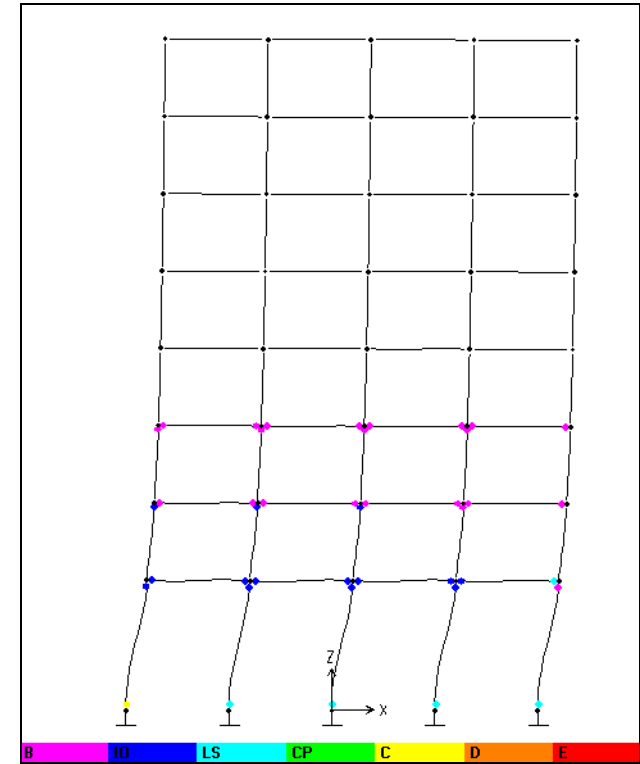
Figure 3-31 : Distribution des rotules plastiques à la limite de plasticité du modèle 8-3



a)- Distribution du code



b)-Distribution uniforme



c)- Distribution modale

Figure 3-32 : Distribution des rotules plastiques à la limite de plasticité du modèle 8-4

Malgré que la distribution des rotules plastiques soit généralement concentrée dans les extrémités des travées et les rotules formées dans les poteaux sont peu nombreuses, la rotation maximale de la rotule plastique apparaît dans les poteaux auprès des appuis.

Les modes de chargement latéral utilisés dans la méthode d'analyse pushover, donne une idée concernant les emplacements prévisionnels pour le comportement non élastique, mais la prévision des emplacements des rotules plastiques est moindre généralement en comparaison aux résultats d'analyses temporelle non linéaire spécialement dans les grands niveaux de déformation [53].

Malgré que ces modes de chargement latéral évite les points faibles importants et ne peut représenter les effets des modes supérieurs, il a été constaté que les prévisions des modes de chargement latéral triangulaire sont meilleures que les prévisions de mode de chargement uniforme des portiques réguliers en béton armé [53].

Après notre observation des emplacements des rotules plastiques au point précédent directement l'effondrement, nous passons à l'observation de la formation des rotules plastiques par l'analyse pushover à d'autres niveaux de déformations qui représente des bas niveaux du comportement non linéaire. Comme exemple, nous étudierons la formation des rotules plastiques du modèle (5-3) sous le mode de chargement du code et cela à trois niveaux de déformation non linéaire, le niveau un (01) lors d'un déplacement du sommet atteint 0,24 % de la hauteur totale de la construction et cela lors du 3^{ème} pas du chargement qui correspond à un effort tranchant à la base de valeur 613,2 Kn, le niveau deux (02) lors d'un déplacement du sommet atteint 0,35 % de la hauteur totale de la construction et cela lors du 5^{ème} pas du chargement qui correspond à un effort tranchant à la base de valeur 676,4 Kn, le niveau trois (03) lors du déplacement du sommet atteint 1,22 % de la hauteur totale de la construction et cela lors du huitième pas du chargement qui correspond à un effort tranchant à la base de valeur 511,98 Kn.

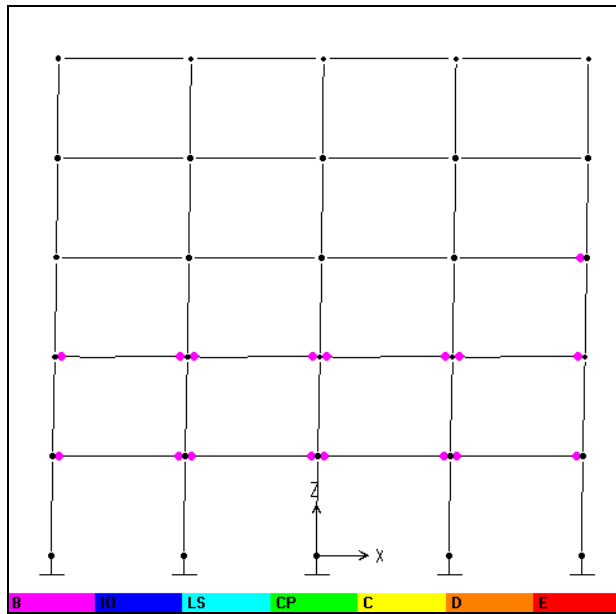
La figure (3-33-a) permet l'observation de la formation des rotules plastiques au niveau de déformation 01, ici, les éléments plastifiés sont considérés comme peu nombreux, il est d'importance que nous observons que les rotules se sont formés dans les poutres en premier lieu, alors que les poteaux ne se sont pas plastifiés, ce qui permet à la structure de dissiper l'énergie emmagasiné tout en gardant sa stabilité par ce qu'il existe des éléments travaillant encore dans le domaine élastique, Ce phénomène peut être produit en jouant sur les

dimensions des poutres et des poteaux, soit en respectant le principe « poteau fort- poutre faible ».

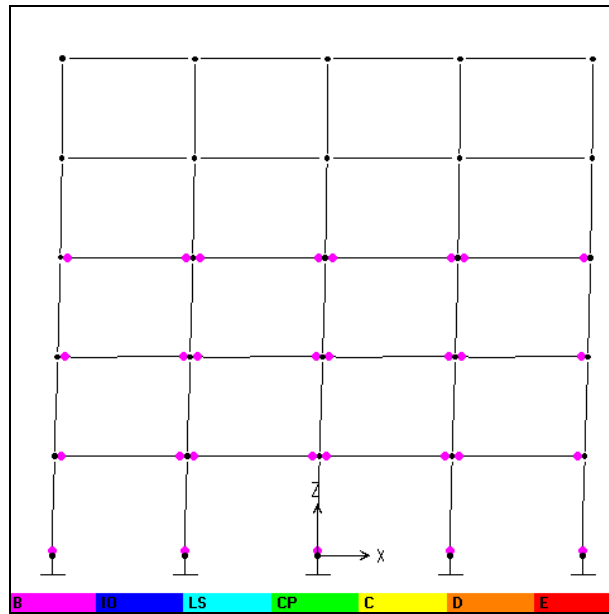
La figure (3-33-b) permet l'observation des la formation des rotules plastiques au niveau 02 de déformation, ici, les poteaux du niveau un se sont plastifiés et cela près des appuis, additionnellement à la plastification de toutes les poutres des trois premiers niveaux et ce qui explique dans la courbe pushover par la baisse dans la rigidité.

La figure (3-33-c) permet l'observation de la formation des rotules plastiques au niveau 03 de déformation, ici, les rotules se sont formées dans plusieurs éléments structurels, et la valeurs des rotations des rotules a augmenté par rapport à ce qu'elle était dans l'étape précédente de déformation, les valeurs de rotation des rotules est croissante du niveau supérieur au niveau inférieur et les valeurs extrêmes de rotation des rotules plastiques apparaissent au niveau un au trois poteaux centraux.

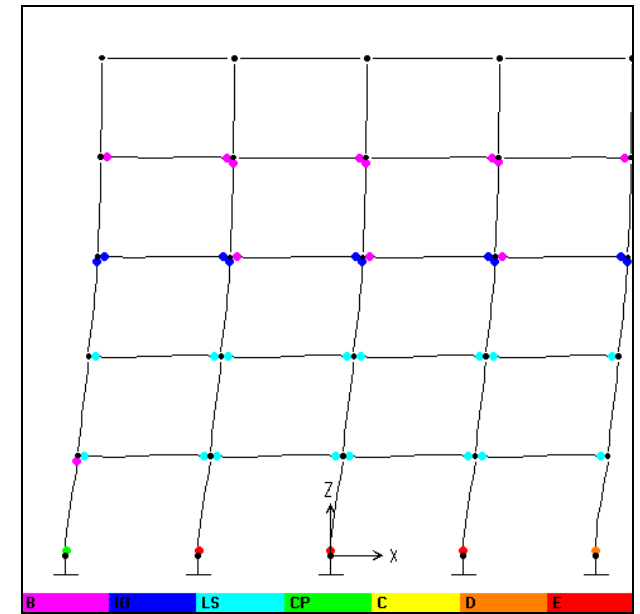
Les valeurs des rotations et la distribution de rotules plastiques à ce niveau de déformation conduit à la baisse de la rigidité globale de la structure et qui atteint à son déplacement ultime, c'est l'effondrement.



a)-au niveau de déformation 1



b)- au niveau de déformation 2



c)-au niveau de déformation 3

Figure 3-33 : Distribution des rotules plastiques

