



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

جامعة البليدة -1-

UNIVERSITE DE BLIDA -1-

كلية التكنولوجيا- قسم الهندسة المدنية -  
Faculté de technologie  
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

MEMOIRE DE MASTER  
POUR L'OBTENTION DU DIPLOME  
DE MASTER 2 EN GENIE CIVIL  
Option : STRUCTURES.

THEME :

**Influence de la régularité en plan et en élévation dans le  
comportement non linéaire des structures en béton armé  
R+3, R+6 et R+9 (Méthode Push-over)**

Soutenu par :

Mlle BOUMAZA FEDOUA.

Mlle FERROUK RAOUIA.

Encadré par :

Mme BELHEOUANE IMENE.

Mr DERBAL ISMAIL.

ANNEE UNIVERSITAIRE 2019/2020.



**UNIVERSITE SAAD DAHLEB DE BLIDA -1-**

**Faculté de technologie**

**DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL**

**MEMOIRE DE MASTER EN GENIE CIVIL**

**Option : STRUCTURES.**

**THEME :**

**Influence de la régularité en plan et en  
élévation dans le comportement non  
linéaire des structures en béton armé  
R+3, R+6 et R+9 (Méthode Push-over)**

Soutenu par :

**Mlle BOUMAZA fedoua.**

**Mlle FERROUK raouia.**

Devant le jury composé de :

Blida, septembre 2020



## ملخص

من أجل التقليل من عواقب المخاطر الزلزالية، فإن دراسة المباني في المجال الخطي المطاطي غير كافية لفهم سلوكها بشكل جيد في حالة الزلزال.

ومع ذلك، فإن دراسة المباني في المجال غير الخطي هي طريقة فعالة لتقدير أدائها، وتسمح بفهم أفضل لسلوكهم أثناء الزلازل.

من أجل تحديد مشكلة سلوك هياكل الإطارات الخرسانية المسلحة المستقرة ذاتياً في إطار مختلف التصاميم غير المنتظمة ودراستها بشكل أفضل باستخدام طريقة «PUSH-OVER». التي تسمح برسم منحنى القدرة الذي يقارن مع منحنى الطلب الزلزالي لتقييم نقطة أداء الهيكل.

قد سمح لنا تفسير نتائج الدراسة المقارنة التي أجريت على ثلاثة أنواع من خلال المعايير بتسليط الضوء على تأثير عدم انتظام المبنى على سلوكه الزلزالي.

**الكلمات المفتاحية:** تحليل غير خطي، منحنى القدرة، قدرة الطيف، الأداء الزلزالي، إطار الاستقرار الذاتي عدم انتظام المستوى، عدم انتظام الارتفاع.



# ABSTRACT

Earthquake research is becoming increasingly essential with the increasing complexity of the problems to be addressed, and which is an ongoing challenge for research. This is an area that has become very delicate, especially as earthquakes are becoming more intense and devastating. This is in particular, in determining the characteristics of earthquakes in different sites, and the dynamic behavior of structures and their responses. The proper functioning of structures and structures has become a concern of builders and researchers in the field of construction and civil engineering. As it stands, considerations of service adaptation and sustainability are of particular importance. Hence the need for good modeling of the real system to take into account the effect of all phenomena that have an influence on the dynamic response of structure.

In practice, the design of a seismic structure for a building can be done in several ways, but for good behavior towards the earthquake, the current seismic regulations recommend that simple, compact and regular forms be moved, both in plan and elevation but, often for architectural or aesthetic reasons, of available spaces, of complaints of master of the work, some buildings have one or more stalls.

Irregularity results in irregular mass distribution, or rigidity, causing an irregular distribution of horizontal seismic loading that can lead to serious concentrations of stresses precisely to the law of structural changes.

In order to assess the effects of irregularities on the seismic response of building structures, Nonlinear Static Procedures (NSP) become practical. The NSP requires us to use calculation methods that take into account post-elastic effects for exact prevention of seismic demands. Among them, the 'PUSH-OVER' method is the basis of a new seismic evaluation procedure, "design in performance".

The main objective of this paper is to estimate by the «PUSH-OVER» method the non-linear response of a series of self stable reinforced concrete structures with irregular profiles at small, medium and large heights. In more detail, the objectives are:

- The evaluation of the most important performance parameters such as: the capacity curve, the displacement of levels, and the performance point.

- Describe the actual behaviour of the structure for determining the actual failure load and the corresponding mechanisms.
- Develop capacity for scientific demonstration, resonance and interpretation of results.

Then the irregularity is one of the parameters; which influences the dynamic behavior of the structures in the event of an earthquake.

To answer the question, how does the irregularity affect the dynamic behaviour of these structures? We will try through this work to answer the question, methodically within the framework of this manuscript which is structured in six chapters plus an introduction and a general conclusion.

In the general introduction we give the context of the study as well as the organization of the research.

The first three chapters are devoted to bibliographic study. The first chapter provides an overview of the art of seismic design of buildings and their seismic behaviour. In the second chapter, the parameters of the plane and elevation irregularity affecting the seismic behaviour of BA structures were identified. As well as the different methods of seismic analysis in recent seismic codes, static and dynamic analysis methods, linear and non-linear.

In chapter three the theoretical background of the Push-over method is explained, the chapter therefore includes a demonstration of the principle, the purpose of the analysis also the advantages and limitations of the method.

In the fourth chapter, we are interested in presenting the different variants of the structures performed for the push-over analysis, and explaining the steps for determining the capacity curve (push-over curve) using the non-linear calculation software "SAP2000V.14".

In chapter five and six we discussed the results for each parameter studied, namely the ultimate resistance of each variant under seismic action, its capacity curve, the performance points and its failure mode.

We determine the influence that can have the irregularity of a structure on its behaviour and especially during a given seismic shock. To achieve the objective assigned to it, this work had to be based on nonlinear static analyses, they allow indeed to make studies to identify the sensitivity of the results to the variations of the parameters related to the type of structure. That's why we did a push-over analysis. From all the analyses carried out in

this study in terms of capacity and seismic demand, the following conclusions can be drawn:

- ✓ The understanding of factors influences the behavior of a structure, requires the analysis of several configurations of the structural system. Hence the importance of doing more research on other parameters to be able to better understand the actual behavior of construction.
- ✓ The strength capacity depends on the behaviour of each component of the structure, as the failure is related to reaching the deformation limit.
- ✓ The Push-Over method can show us the evolution of the degradation of structural performance as the structural elements laminate.
- ✓ The identification of plane and elevation resistance discontinuities which leads to variations in dynamic characteristics in the inelastic domain.
- ✓ The response of a building to an earthquake is conditioned not only by the characteristics of the seismic movement, but also by the rigidity of the stressed structure.
- ✓ The determination of the performance point by this method is very useful because it gives a clear idea of the degree of damage of the structure.
- ✓ The Push-over method is a simple and efficient non-linear analysis method that can replace complex exact methods provided it is improved.

**Key words:** non-linear analysis, capacity curve, capacity spectrum, seismic performance, stable auto frame, plane irregularity, elevation irregularity.

# RESUME

Afin de réduire les conséquences de risque sismique, l'étude des bâtiments dans le domaine linéaire seulement est insuffisante pour comprendre le comportement de ces derniers dans le cas de séisme.

Néanmoins, L'étude des bâtiments dans le domaine non linéaire est une façon efficace pour estimer leur performance, et permet de mieux comprendre leur comportement lors des séismes.

Afin de cerner le problème du comportement des structures à ossature auto-stables en béton armé sous différentes conceptions d'irrégularité et de mieux les étudier en utilisant la méthode de performance sismique « Push-over ». Permettant de tracer la courbe de capacité qui est comparée à la courbe de demande sismique pour évaluer le point de performance de la structure.

Une interprétation des résultats de l'étude comparative menée sur trois variantes nous a permis à travers des critères de mettre en valeur l'influence de l'irrégularité d'un bâtiment sur son comportement sismique.

**Mots clés :** analyse non linéaire, courbe de capacité, spectre de capacité, performance sismique, ossature auto-stable, irrégularité en plan, irrégularité en élévation.

# ***DEDICACES***

Toutes les lettres ne sauraient trouver les mots qu'il faut pour m'exprimer à dédier ce modeste travail qui est le fruit de plusieurs années d'étude. Du fond de mon cœur, je le dédie à :

**A MA TRÈS CHÈRE MÈRE : Ghetta Ibtissem.** Autant de phrases aussi expressives soient-elles ne sauraient montrer le degré d'amour et d'affection que j'éprouve pour toi. Tu m'as comblé avec ta tendresse et affection tout au long de mon parcours. Tu n'as cessé de me soutenir et de m'encourager durant toutes les années de mes études, tu as toujours été présente à mes côtés pour me consoler quand il fallait. En ce jour mémorable, pour moi ainsi que pour toi, reçoit ce travail en signe de ma profonde estime.

**A MON TRÈS CHER PÈRE : Boumaza Tarek.** L'homme de ma vie, mon exemple éternel. Tu as su m'inculquer le sens de la responsabilité, de l'optimisme et de la confiance en soi face aux difficultés de la vie. Tes conseils ont toujours guidé mes pas vers la réussite. Ta patience, et ton encouragement sont pour moi le soutien indispensable que tu as toujours su m'apporter. Je te dois ce que je suis aujourd'hui et ce que je serai demain et je ferai toujours de mon mieux pour rester ta fierté et ne jamais te décevoir.

*Puisse le tout puissant vous donnez santé, longue vie afin que je puisse vous comblez à mon tour.*

**A MA CHÈRE sœur, la prunelle de mes yeux, Nour el houda, au cœur si grand, MON PETIT frère que j'adore Rachid.** Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur.

**A MA GRAND MÈRE** maternelle chérie. Qui m'a accompagné par ses prières, sa douceur.

**A MES CHERS ONCLES, TANTES et MES CHERS COUSINS COUSINES.**

**A MA COLLEGUE Raouia,** pour que ce projet soit possible.

**A MES AMIS DE TOUJOURS, COLLEGUES D'ÉTUDE.** En souvenir de notre sincère et profonde amitié et des moments agréables que nous avons passés ensemble.

Merci à tous ceux que je n'ai pas mentionnés (pas par oubli, mais par faute de temps... !).

**Fedoua**

# **DEDICACES**

*Tous les mots ne sauraient exprimer la gratitude, l'amour, le respect, la reconnaissance, c'est tout simplement que : Je dédie cette thèse de Master 2 à :*

*A Ma tendre **Mère Karima** : Tu représentes pour moi la source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que ses enfants suivent le bon chemin dans leur vie et leurs études.*

*A Mon très cher **Père Nourddine** : aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours pour vous. Rien Au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail et le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation le long de ces années.*

*A Mon cher frère **chaouki** et mes sœurs **Loubna** et **Rym** : Aucune dédicace ne saurait exprimer tout l'amour que j'ai pour vous, votre joie et votre gaieté me comblent de bonheur. Puisse Dieu vous garder, éclairer votre route et vous aider à réaliser à votre tour vos vœux les plus chers.*

*A Mon oncle qui ne cessé pas de m'encourager **Ibrahim** : Cette humble dédicace ne saurait exprimer mon grand respect.*

*A la mémoire de Mes grands-pères et Ma grande mère : J'aurais tant aimé que vous soyez présents. Que Dieu ait vos âmes dans sa sainte miséricorde.*

*A Ma collègue Fedoua : Merci de m'avoir supporté, et raisonné quand ma détermination flanchait.*

*A Ma deuxième famille révolution Reader : En souvenir des moments agréables que nous avons passés ensemble. Veuillez trouver dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.*

*A tous les étudiants de ma promotion.*

*A tous ceux qui me sens chers et que j'ai omis de citer.*

**Raouia**

# REMERCIEMENTS

*Toute notre gratitude, grâce et remerciements vont en premier lieu à ALLAH notre créateur et maître de l'univers, de nous avoir donné le courage, la santé, la force afin d'arriver à la finalité de ce modeste travail.*

*Notre cher Prophète « sallallahou alaihi oua sallam », dit bien 'N 'a pas remercié Dieu, celui qui ne remercie pas les gens''.*

*Nous remercions très chaleureusement nos deux directeurs de mémoire **Mme Belheouane Imene** et **Mr Derbal Ismail** d'avoir accepté de nous encadrer, initié et guidé sur le chemin de la science et le moral qu'ils nous ont apporté ainsi que pour la grande confiance qu'ils nous ont accordé, toujours avec patience et d'incalculables conseils. Merci de nous avoir transmis votre savoir et savoir-faire précieux.*

*Nous tenons ensuite à remercier sincèrement le président de jury et les honorables membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce manuscrit et pour intérêt porté à nos travaux. Merci pour le temps consacré et les critiques constructives qui ont permis d'améliorer notre contribution.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé nos réflexions et ont accepté à nous rencontrer et répondre à nos questions durant notre recherche, à **Mr Hadj-Arab** et **Mr Amellal** ainsi l'ensemble des enseignants du département de génie civil qui ont contribué à notre formation de master en structure.*

*C'est avec une profonde reconnaissance et considération particulière que nous remercions l'ingénieur **Hamidache Mohamed seddik** qu'il a su nous soutenir et nous encourager.*

*Nos remerciements vont pour tous ceux ou celles qui nous ont apportés leur soutien et qui nous ont aidé de loin ou de près pour l'achèvement de ce travail. En particulier nos famille **BOUMAZA** et **FERROUK**, nos parents qui nous ont soutenus beaucoup pendant toute la vie et qui continuerons à nous aider dans tous les projets de l'avenir.*

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre IV : Modélisation et application de la méthode Push-over

Tableau IV.1 : Les caractéristiques géométriques des bâtiments étudiés	37
Tableau IV.2 : Caractéristiques du béton.	37
Tableau IV.3: Caractéristiques d'acier	38
Tableau IV.4 : Dimension et ferrailages des poutres.	38
Tableau IV.5 : Dimensionnement et ferrailage des poteaux.	39

## Chapitre V : L'influence de l'irrégularité en plan

Tableau V.1 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+3 dans le sens x-x	60
Tableau V.2 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+6 dans le sens x-x.	61
Tableau V.3 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+9 dans le sens x-x.	61
Tableau V.4 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+3 dans le sens y-y	62
Tableau V.5 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+6 dans le sens y-y.	62
Tableau V.6 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+9 dans le sens y-y	63
Tableau V.7 : Propagations des rotules suivant le sens x-x	65
Tableau V.8 : Propagations des rotules suivant le sens y-y	66

## Chapitre VI : L'influence de l'irrégularité en élévation

Tableau VI.1 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+3 dans le sens x-x	76
Tableau VI.2 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+3 dans le sens y-y	77
Tableau VI.3 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+6 dans le sens x-x	78
Tableau VI.4: Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+9 dans le sens x-x.	78
Tableau VI.5 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+6 dans le sens y-y	79
Tableau VI.6 : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures R+9 dans le sens y-y	79



# LISTE DES FIGURES

## Chapitre I : Le Séisme et les bâtiments

Figure I.1 : Origine des tremblements de terre	4
Figure I.2 : Les ondes sismiques	5
Figure I.3 : Différents modes de ruine des constructions face aux séismes	7
Figure I.4 : Forces d'inertie	8
Figure I.5 : Représentation du niveau de performance sur la courbe de capacité	12

## Chapitre II : L'irrégularité des structures en béton armé

Figure II.1 : Mécanisme plastique où se situe le décrochement en élévation	16
Figure II.2 : Schéma représente la torsion d'ensemble	17
Figure II.3 : Limites des décrochements en élévation	18
Figure II.4 : Limites des décrochements en Plan	19
Figure II.5 : Rotules plastiques au niveau des poteaux et des poutres	19

## Chapitre III : Analyse statique non linéaire en poussée progressive (Push-over)

Figure III.1 : Signification physique de la courbe de capacité	23
Figure III.2 : Système équivalent d'une structure à plusieurs degrés de libertés	25
Figure III.3 : Différentes distributions des forces latérales	25
Figure III.4 : Construction de la courbe de Capacité de la structure	26
Figure III.5 : Idéalisation de la courbe de capacité	27
Figure III.6 : Formation des zones plastifiées (rotules plastiques)	28
Figure III.7 : Courbe force-déplacement pour une définition de rotule utilisée dans SAP2000	29
Figure III.8 : Détermination du point de performance	30

## Chapitre IV : Modélisation et application de la méthode PUSH-OVER

Figure IV.1 : Portiques réguliers R+3, R+6, R+9	34
Figure IV.2 : Portiques faiblement irréguliers en plan R+3, R+6, R+9	35
Figure IV.3 : Portiques fortement irréguliers en plan R+3, R+6, R+9	35
Figure IV.4 : Portiques faiblement irréguliers en elevation R+3, R+6, R+9	36
Figure IV.5 : Portiques fortement irrégulières en élévation R+3, R+6, R+9	36
Figure IV.6 : Le choix du la loi de comportement	42

Figure IV.7 : La courbe de contrainte-déformation béton	42
Figure IV.8 : La courbe de contrainte déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) de l'acier modèle simplifié	42
Figure IV.9 : Introduction de ferrailage aux poteaux	43
Figure IV.10 : Introduction de ferrailage aux poutres	44
Figure IV.11 : Définition des rotules dans les poteaux et les poutres	45
Figure IV.12 : Propriétés des rotules poutres	45
Figure IV.13 : Propriétés des rotules poteaux	45
Figure IV.14 : Loi de comportement des rotules de type M3	46
Figure IV.15 : Loi de comportement des rotules de type couplées P-M2-M3	46
Figure IV.16 : Introduction des rotules plastiques aux poutres.	46
Figure IV.17 : Introduction des rotules plastiques aux poteaux.	47
Figure IV.18 : Définition de la charge gravitaire dans l'analyse Push-over	48
Figure IV.19 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens x-x (étape 1)	48
Figure IV.20 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens x-x (étape 2)	49
Figure IV.21 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens y-y (étape 1)	49
Figure IV.22 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens y-y (étape 2)	50
Figure IV.23 : Introduction des coefficients $C_a$ , $C_v$	51
Figure IV.24 : Définir les cas de charge à exécuter	51

## **Chapitre V : L'influence de l'irrégularité en plan**

Figure V.1 : Courbe de capacité R+3 Structure régulière xx	53
Figure V.2 : Courbe de capacité spectrale R+3 structure régulière xx	53
Figure V.3 : Courbe de capacité R+6 régulière structure régulière xx	54
Figure V.4 : Courbe de capacité spectrale R+6 structure régulière xx	54
Figure V.5 : Courbe de capacité R+9 structure régulière xx	54
Figure V.6 : Courbe de capacité spectrale R+9régulière xx	54
Figure V.7 : Courbe de capacité R+3 structure régulière yy	54
Figure V.8 : Courbe de capacité spectrale R+3 structure régulière yy	54
Figure V.9 : Courbe de capacité R+6 structure régulière yy	55
Figure V.10 : Courbe de capacité spectrale R+6 structure régulière yy	55
Figure V.11 : Courbe de capacité R+9 structure régulière yy	55
Figure V.12 : Courbe de capacité spectrale R+9 structure régulière yy	55
Figure V.13 : Courbe de capacité R+3 faiblement irrégulière en plan xx	56
Figure V.14 : Courbe de capacité spectrale R+3 faiblement irrégulier en plan xx	56
Figure V.15 : Courbe de capacité R+6 faiblement irrégulière en plan xx	56

Figure V.16 : Courbe de capacité spectrale R+6 faiblement irrégulière en plan xx	56
Figure V.17 : Courbe de capacité R+9 faiblement irrégulière en plan xx	56
Figure V.18 : Courbe de capacité spectrale R+9 faiblement irrégulière en plan xx	56
Figure V.19 : Courbe de capacité R+3 faiblement irrégulière en plan yy	57
Figure V.20 : Courbe de capacité spectrale R+3 faiblement irrégulier en plan yy	57
Figure V.21 : Courbe de capacité R+6 faiblement irrégulière en plan yy	57
Figure V.22 : Courbe de capacité spectrale R+6 faiblement irrégulière en plan yy	57
Figure V.23 : Courbe de capacité R+9 faiblement irrégulière en plan yy	57
Figure V.24 : Courbe de capacité spectrale R+9 faiblement irrégulière en plan yy	57
Figure V.25 : Courbe de capacité R+3 fortement irrégulière en plan xx	58
Figure V.26 : Courbe de capacité R+6 fortement irrégulière en Plan xx	58
Figure V.27 : Courbe de capacité spectrale R+6 fortement irrégulière en plan xx	58
Figure V.28 : Courbe de capacité R+9 fortement irrégulière en plan xx	58
Figure V.29 : Courbe de capacité spectrale R+9 fortement irrégulière en plan xx	58
Figure V.30 : Courbe de capacité R+3 fortement irrégulière en plan yy	59
Figure V.31 : Courbe de capacité spectrale R+3 fortement irrégulière en plan yy	59
Figure V.32 : Courbe de capacité R+6 fortement irrégulière en plan yy	59
Figure V.33 : Courbe de capacité spectrale R+6 fortement irrégulière en plan yy	59
Figure V.34 : Courbe de capacité R+9 fortement irrégulière en plan yy	59
Figure V.35 : Courbe de capacité spectrale R+9 fortement irrégulière en plan yy	59
Figure V.36 : Formation de rotules plastiques (2D) de la structure R+6	68
Figure V.37 : Formation de rotules plastiques (3D) de la structure R+6	68

## **Chapitre VI : L'influence de l'irrégularité en élévation**

Figure VI.1 : Courbe de capacité R+3 faiblement irrégulier en élévation xx	71
Figure VI .2 : Courbe de capacité spectrale R+3 faiblement irrégulier en élévation xx	71
Figure VI .3 : Courbe de capacité R+6 faiblement irrégulier en élévation xx	72
Figure VI .4 : Courbe de capacité spectrale R+6 faiblement irrégulier en élévation xx	72
Figure VI .5 : Courbe de capacité R+9 faiblement irrégulier en élévation xx	72

Figure VI .6 : Courbe de capacité spectrale R+9 faiblement irrégulier en élévation xx	72
Figure VI .7 : Courbe de capacité R+3 faiblement irrégulier en élévation yy	72
Figure VI.8 : Courbe de capacité spectrale R+3 faiblement irrégulier en élévation yy	72
Figure VI.9 : Courbe de capacité R+6 faiblement irrégulier en élévation yy	73
FigureVI.10 : Courbe de capacité spectrale R+6 faiblement irrégulier en élévation yy	73
Figure VI.11 : Courbe de capacité R+9 faiblement irrégulier en élévation yy	73
Figure VI.12 : Courbe de capacité spectrale R+9 faiblement irrégulier en élévation yy	73
FigureVI.13 : Courbe de capacité R+3 fortement irrégulier en élévation xx	74
Figure VI.14 : Courbe de capacité spectrale R+3 fortement irrégulier en élévation xx	74
Figure VI.15: Courbe de capacité R+6 fortement irrégulier en élévation xx	74
Figure VI.16: Courbe de capacité spectrale R+6 fortement irrégulier en élévation xx	74
FigurVI.17 : Courbe de capacité R+9 fortement irrégulier en élévation xx	74
FigureVI.18 : Courbe de capacité spectrale R+9 fortement irrégulier en élévation xx	74
FigureVI.19 : Courbe de capacité R+3 fortement irrégulier en élévation yy	75
FigureVI.20 : Courbe de capacité spectrale R+3 fortement irrégulier en élévation yy	75
FigureVI.21 : Courbe de capacité R+6 fortement irrégulier en élévation yy	75
FigureVI.22 : Courbe de capacité spectrale R+6 fortement irrégulier en élévation yy	75
FigureVI.23 : Courbe de capacité R+9 fortement irrégulier en élévation yy	75
FigureVI.24 : Courbe de capacité spectrale R+9 fortement irrégulier en élévation yy	75
FigureVI.25 : Distribution des rotules plastiques dans la structure régulière	81
FigureVI.26 : Distribution des rotules plastiques dans la structure faiblement irrégulière	81
FigureVI.27 : Distribution des rotules plastiques dans la structure fortement irrégulière	81

## LISTE DES SYMBOLES

- $A_s$  : Aire d'une section d'acier.
- $C_a$  : Coefficient sismique d'accélération.
- $C_v$  : Coefficient sismique de vitesse.
- $d_p$  : Déplacement au point de performance.
- $d_y$  : Déplacement élastique limite.
- $E_{ij}$  : Module d'élasticité instantané.
- $f_{c28}$  : Résistance caractéristique à la compression du béton à 28 jours d'âge.
- $F_e$  : Limite d'élasticité de l'acier.
- $f_{t28}$  : Résistance caractéristique à la traction du béton à 28 jours d'âge.
- $G$  : Charge permanente.
- $I_d$  : Indice de dégradation.
- $K_e$  : Raideur initiale de la structure.
- $K_p$  : Raideur de la structure au point de performance.
- $Q$  : Charge d'exploitation.
- $V_p$  : Effort tranchant au point de performance.
- $V_y$  : Effort tranchant élastique limite.
- $Z$  : Facteur de zone sismique.
- $\gamma_s$  : Coefficient de sécurité dans l'acier.
- $\mu_d$  : La demande en ductilité.
- $\sigma_s$  : Contrainte de traction de l'acier.

# TABLE DES MATIERES

**RESUME**

**DEDICACE**

**REMERCIEMENT**

**LISTE DES TABLEAUX**

**LISTE DES FIGURES**

**LISTE DES SYMBOLES**

**TABLE DES MATIERES**

**INTRODUCTION**

<b>CHAPITRE I : LE SEISME ET LES BATIMENTS</b>	<b>3</b>
I.1 Introduction	3
I.2 Origine des séismes	3
I.3 Les effets de propagation des ondes sismiques	4
I.4 Réaction des bâtiments aux séismes	5
I.5 Comportement des structures soumises à des séismes	7
I.6 La réglementation parasismique :	9
I.6.1 La construction parasismique	9
I.6.2 Principes de conception parasismique des bâtiments	10
I.7 La Conception en performance (PBD)	11
I.8 Notions sur la performance sismique et ses niveaux	11
I.8.1 Les niveaux de performance	11
I.8.2 Critères de dimensionnement pour trois niveaux de performance	13
I.8.2.1 Critère de rigidité	13
I.8.2.2 Critère de résistance	13
I.8.2.3 Critère de ductilité	13
I.9 Conclusion	14

## **CHAPITRE II : L'IRREGULARITE DES STRUCTURES EN BETON ARME** **15**

II.1 Introduction	15
II.2 L'action sismique et l'irrégularité des structures	15
II.2.1. L'action sismique et l'irrégularité en élévation	16
II.2.2. L'action sismique et l'irrégularité en plan	16
II.3 Critères de régularité en RPA	17
II.3.1. Critères de régularité en élévation	17
II.3.2 Critères de régularité en plan	18
II.4 Identification des zones potentiellement dangereuses	19
II.4.1 Rotule plastique	19
II.4.2 Poteaux fragiles	19
II.4.3 Poteaux courts	20
II.5 Les méthodes d'analyse sismique dans les codes parasismiques récentes	20
II.5.1 Les méthodes d'analyse linéaires	20
II.5.2 Les méthodes d'analyse non linéaires	21
II.6 Conclusions	22

## **CHAPITRE III : ANALYSE STATIQUE NON LINEAIRE EN POUSSEE PROGRESSIVE (PUSH-OVER)** **23**

III.1 Introduction	23
III.2 Définition de la méthode par poussée progressive « Push-over »	23
III.3 Principe de l'analyse Push-over	24
III.4 Hypothèse de l'analyse Push-over	24
III.5 Distribution des charges latérales	25
III.6 Le déplacement cible	26
III.7 Courbe de capacité	26
III.7.1 Idéalisations de la courbe de capacité	27
III.8 Formation des rotules plastiques	27
III.8.1 Les propriétés des rotules plastique dans SAP2000	28
III.9 Point de performance	29
III.10 Approche du code ATC 40	30

III.11 Étapes de l'analyse Push-over	31
III.12 Les avantages de l'analyse Push-over	31
III.13 Les limites de l'analyse Push-over	32
III.14 Conclusion	33

## **CHAPITRE IV : MODELISATION ET APPLICATION DE LA METHODE PUSH-OVER** **34**

IV.1 Introduction	34
IV.2 Différentes variantes étudiées	34
IV.3 Présentation et descriptions des structures étudiées	36
IV.3.1 Caractéristiques géométriques	37
IV.3.2 Caractéristiques des matériaux	37
IV.3.3 Evaluations des charges	38
IV.4 Dimensionnement et ferrailage des structures	38
IV.4.1 Dimensionnement et ferrailage des poutres	38
IV.4.2 Dimensionnement et ferrailage des poteaux	39
IV.5 Modélisation et analyse numérique	39
IV.5.1 Le logiciel SAP 2000.V14	39
IV.5.2 Analyse Push-over avec SAP 2000 V.14	40
IV.6 Définitions de comportement non linéaire de la structure	40
IV.6.1 Définition de comportement des matériaux Béton /Acier	41
IV.6.2 Définition du comportement non linéaire des poutres et poteaux	43
IV.6.3 Dessin de ferrailage	43
IV.6.4 Introduction des rotules plastiques	44
IV.6.5 Définition de chargement de l'analyse Push-over	47
IV.6.6 Modélisation de l'action sismique	50
IV.7 Analyse statique non linéaire	51
IV.8 Conclusion	52



## **CHAPITRE V : L'INFLUENCE DE L'IRREGULARITE EN PLAN**

**53**

V .1 Introduction	53
V.2 Résultats de l'analyse Push-over des structures	53
V.2.1 Résultats de la variante régulière (structures de référence)	53
V.2.2 Résultats de la variante irrégulière en plan	55
V.3 Comparaison des résultats obtenus	60
V.4 Conclusion	70

## **CHAPITRE VI : L'INFLUENCE DE L'IRREGULARITE EN ELEVATION**

**71**

VI.1 Introduction	71
VI.2 Résultats de l'analyse Push-over de la variante irrégulière en élévation	71
VI .2.1 Structures faiblement irrégulières en élévation	71
VI. 2.2 Structures fortement irrégulières en élévation	73
VI.3 Comparaison des résultats obtenus	76
VI.4 Conclusion	82

## **CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS**

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## **ANNEXE**

# INTRODUCTION

La recherche parasismique devient de plus en plus indispensable avec la complexité croissante des problèmes à traiter, et qui est un défi permanent pour la recherche. C'est un domaine qui est devenu très délicat, surtout que les tremblements de terre sont de plus en plus intenses et dévastateurs. Ceci est en particulier, dans la détermination des caractéristiques des séismes dans différents sites, et du comportement dynamique des structures et de leurs réponses. Le bon fonctionnement des ouvrages et des structures est devenu un souci des constructeurs et des chercheurs du domaine des constructions et de génie civil. À l'état actuel, les considérations d'adaptation au service et de durabilité ont une importance particulière. D'où la nécessité d'une bonne modélisation du système réel pour prise en compte l'effet de tous les phénomènes qui ont une influence sur la réponse dynamique de structure.

En pratique, la conception d'une structure parasismique pour un bâtiment, peut se faire de plusieurs manières mais pour un bon comportement vis-à-vis du séisme, les règlements parasismiques en vigueur préconisent de tendre vers des formes simples, compactes et régulières, tant en plan et en élévation mais, souvent pour des raisons architecturales ou esthétiques, d'espaces disponibles, de doléances de maître de l'ouvrage, certains édifices comportent un ou plusieurs décrochements.

L'irrégularité se traduit par une répartition irrégulière des masses, ou de la rigidité, provoquant une répartition irrégulière du chargement sismique horizontal qui peut engendrer de sérieuses concentrations de contraintes précisément au droit des changements structuraux.

Afin d'évaluer les effets des irrégularités sur la réponse sismique des structures de bâtiments, les procédures statiques non linéaires (Nonlinear Static Procedures, NSP) deviennent utilisables dans la pratique. La NSP nous exige l'utilisation des méthodes de calcul prenant en compte les effets post-élastiques pour une prévention exacte des demandes sismiques. Parmi eux, la méthode 'PUSH-OVER' elle est à la base d'une nouvelle procédure d'évaluation parasismique, "la conception en performance".

L'objectif principal de ce mémoire consiste à estimer par la méthode « PUSH-OVER » la réponse non linéaire d'une série de structures auto-stables en béton armé à profil irrégulier à petites, moyennes et grandes hauteurs. D'une façon plus détaillée, les objectifs visés sont :

- L'évaluation des paramètres de performance les plus importants tel que : la courbe de capacité, le déplacement des niveaux, et le point de performance.

- Décrire le comportement réel de la structure pour la détermination de la charge réelle de ruine et les mécanismes correspondants.
- Développer les capacités de démonstration et de raisonnement scientifique, et d'interprétation des résultats.

Alors l'irrégularité est l'un des paramètres ; qui influe sur le comportement dynamique des structures en cas de séisme.

Pour répondre à la question comment l'irrégularité influe sur le comportement dynamique de ces structures ? nous essayerons à travers ce travail de répondre à la question, méthodiquement dans le cadre de ce manuscrit qui est structuré en six chapitres plus une introduction et une conclusion générale.

Dans l'introduction générale nous donnons le contexte de l'étude ainsi que l'organisation de la recherche.

Les **trois premiers chapitres** sont consacrés à l'étude bibliographique. **Le premier** chapitre a pour but de donner un aperçu sur l'art de la conception parasismique des bâtiments et leur comportement sismique. Dans **le deuxième** chapitre, les paramètres de l'irrégularité en plan et en élévation influant sur le comportement sismique des structures en BA ont été identifiés. Ainsi que les différentes méthodes d'analyse sismiques dans les codes parasismiques récents, méthodes d'analyse statiques et dynamiques, linéaires et non linéaires.

En chapitre **trois** le fond théorique de la méthode Push-over est expliqué, le chapitre comprend donc une démonstration du principe, du but de l'analyse aussi les avantages et les limites de la méthode.

Dans **le quatrième** chapitre, nous nous intéressons à présenter les différentes variantes des structures effectuées pour l'analyse Push-over, et exposant les étapes de détermination de la courbe de capacité (courbe de Push-over) en utilisant le logiciel de calcul non linéaire **"SAP2000V.14"**.

Dans le chapitre **cinq et six**, nous avons procédé à une discussion des résultats pour chaque paramètre étudié, à savoir la résistance ultime de chaque variante sous l'action sismique, sa courbe de capacité, les points de performances et sa mode de ruine.

Le présent mémoire se terminera, par une conclusion générale. Cette dernière, comprend les principaux résultats présentés ainsi que quelques recommandations à la présente étude, une annexe, et une bibliographie, ont été également présentées à la fin de ce mémoire.

**CHAPITRE I :**  
**LE SEISME ET LES BATIMENTS**

## CHAPITRE I : LE SEISME ET LES BATIMENTS

### I.1 Introduction

La sécurité parasismique des bâtiments n'est pas uniquement une question de calculs et de dimensionnement de la structure porteuse. Elle dépend en grande partie de la conception et de l'exécution de la structure porteuse et des éléments non porteurs.

Les scientifiques nous expliquent comment un bâtiment se déforme, se dégrade, puis se casse sous l'effet des secousses. Les architectes et ingénieurs se forment pour en tenir compte dans leurs projets en zone sismique. Sur le chantier, nous avons l'ultime responsabilité, celle de réaliser correctement les travaux.

Mais d'abord, essayons de comprendre que les phénomènes internes au bâtiment qui peuvent mener sa ruine sont multiples, pour cela nous étudions les séismes et la façon dont les bâtiments se déforment.

### I.2 Origine des séismes

Le séisme est provoqué par une rupture de la roche dans le sous-sol, sur des distances qui peuvent aller de quelques centaines de mètres (à peine ressenti si on est très proche) à des centaines de kilomètres d'un coup (grandes catastrophes). Ces ruptures peuvent être très superficielles et se voient en surface, ou profondes. Leur localisation aura une large influence sur leurs effets en surface qui seront très variables d'un séisme à l'autre.

Aussi, les séismes n'ont pas une répartition aléatoire à la surface de la planète, mais sont localisés pour leur immense majorité sur les frontières des plaques, là où les contraintes sont les plus élevées. Ce sont ces zones qu'il faut étudier et surveiller plus particulièrement, car c'est là que le risque est le plus élevé [1].

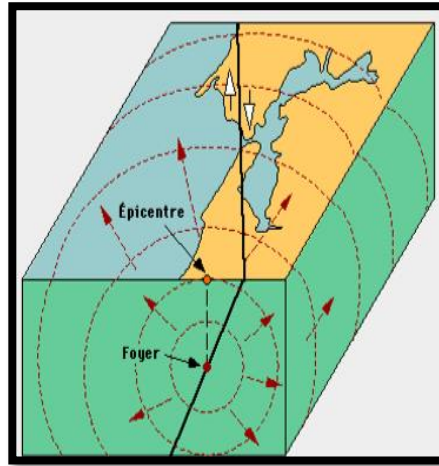


Figure I.1 : Origine des tremblements de terre [1].

### I.3 Les effets de propagation des ondes sismiques

Les ondes sismiques se propagent dans toutes les directions. Plusieurs types d'ondes aux effets différents sur les sols et les structures sont générés par le séisme.

La connaissance des caractéristiques des différents types d'ondes (et de leurs conditions de propagation) permet de prévoir leur action sur un bâtiment en fonction du site géologique où se situe la construction et de sa distance au foyer. On distingue les ondes de volume et les ondes de surface.

Les ondes sismiques qui détruisent les bâtiments sont « **les ondes de volume** » : lorsqu'elles arrivent sous les bâtiments, leurs accélérations provoquent des déformations des constructions sous l'effet des forces d'inertie.

- **Les ondes de volumes :**

- **Les ondes P :** (primaires car, plus rapides, elles arrivent en premier) progressent en animant les particules des sols traversés en compression/dilatation. Elles secouent essentiellement les bâtiments verticalement. Elles se propagent dans tous les milieux.

- **Les ondes S :** (secondaires) se sont des ondes de cisaillement, à leur passage, le mouvement du sol s'effectue perpendiculairement au sens de propagation de l'onde. Elles introduisent un mouvement horizontal dans les ouvrages.

- **Les ondes de surface :**

Ces ondes se propagent à la surface de la Terre, elles sont plus lentes que les ondes de volume mais leur amplitude est plus forte. Elles concentrent davantage d'énergie. On note deux types d'ondes :

- **Les ondes de Love** : ou le déplacement des particules du sol se fait dans un plan tangent à la surface et perpendiculaire au sens de la propagation d'onde. Ces ondes provoquent généralement un ébranlement horizontal. Ce qui engendre des contraintes de cisaillement qui peuvent être la cause de nombreux dégâts aux fondations.

- **Les ondes de Rayleigh** : le déplacement est donc à la fois vertical et horizontal. Ces mouvements sont ressentis de manière très forte par les structures construites sur ces sols ayant ce mouvement [1].

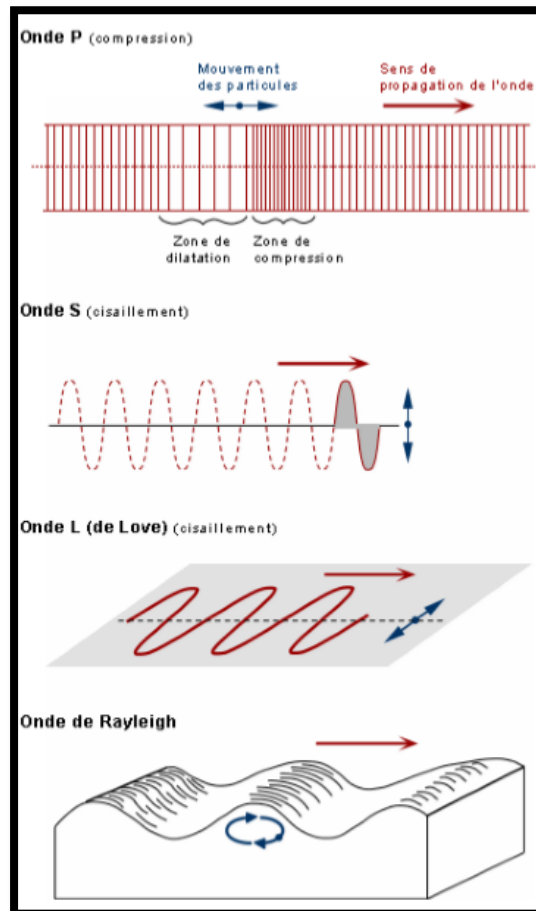


Figure I.2 : Les ondes sismiques [1].

#### I.4 Réaction des bâtiments aux séismes

Les photos suivantes nous montrent des destructions d'immeubles dont la structure en béton armé. Elles illustrent bien le fait qu'il existe une grande variété de modes de ruine pour un même type apparent de construction. Nous pourrions illustrer une même variété d'effets sur les petits bâtiments comme les maisons individuelles ou pour d'autres matériaux de structure comme le bois, l'acier ou la maçonnerie porteuse. Le fait qu'une construction soit détruite d'une façon ou d'une autre... ou ne soit pas détruite n'est pas l'effet du hasard. Si nous regardons de plus près comment la construction a été conçue, nous pouvons expliquer les phénomènes en cause.



Désolidarisation des façades, destruction des étages

✚ Dommages dus à la présence d'un niveau plus souple que le niveau supérieur :



Kobé, Japon 1995



Boumerdès, Algérie 2003

✚ Dommages dus à l'effet de poteau court :



Chi-Chi, Taïwan 1999.



El Asnam, Algérie 1980



✚ Eclatement des panneaux de remplissage :



Boumerdès, Algérie 2003.



Caracas, Venezuela.

✚ Dommages dus à la torsion de la construction :



Mexico 1985.



Philippines 1976.

**Figure I.3** : Différents modes de ruine des constructions face aux séismes [3].

## I.5 Comportement des structures soumises à des séismes

- **La déformabilité des éléments de la construction**

En situation de séisme, les différents éléments d'un bâtiment sont tous soumis à une force identique, la « poussée » des secousses à un moment donné. Cependant, ils se déforment de manière différente, en fonction de plusieurs facteurs : leurs formes, leurs matériaux, leurs masses (qui engendrent des forces d'inertie différentes) et la nature des liaisons entre les éléments [2].

- **Les forces d'inertie**

Les secousses de sol provoquent des oscillations forcées des constructions qui y sont fondées. Leurs fréquences peuvent éteindre plusieurs cycles par seconde. Lorsque le tremblement de terre

s'arrête, les mouvements cycliques des constructions se poursuivent sous forme d'oscillation libre.

Pendant leur oscillation, les constructions tendent à résister au déplacement de leur base et à conserver leur immobilité, ce qui donne naissance à des forces d'inertie qui agissent dans le sens opposé au mouvement [4].

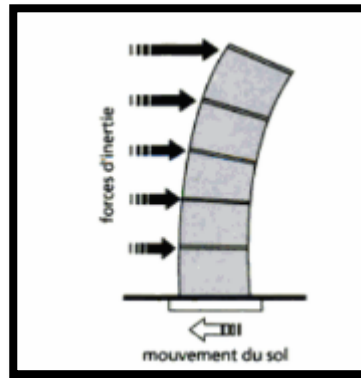


Figure I.4 : Forces d'inertie [4].

- **Résonance des matériaux**

La résonance est une augmentation de l'amplitude de l'oscillation qui a lieu à une fréquence propre à chaque système appelée fréquence de résonance.

Cela signifie que lorsqu'on fait vibrer une structure à une certaine fréquence, qui dépend de ses caractéristiques géométriques (longueur, largeur, hauteur) et mécaniques (masse, rigidité), elle peut réagir en amplifiant considérablement les vibrations et oscillations. Cette fréquence est appelée fréquence de résonance.

Pour un immeuble soumis à un séisme, il en va de même : en effet, les ondes sismiques sont complexes et peuvent être considérées comme la superposition d'ondes de différentes fréquences. Si ces fréquences correspondent à la fréquence de résonance de l'immeuble, celui-ci va être sollicité de façon importante et se déformer, donc risquer de subir des dégâts [5].

- **Influence de la masse**

Un autre paramètre important modifiant la fréquence propre est la masse du bâtiment, le comportement d'un bâtiment lors d'un séisme dépend également de sa masse. En effet, le phénomène de résonance est un phénomène complexe qui met notamment en jeu la masse du bâtiment. Ainsi, plus sa masse sera importante, plus sa fréquence propre sera faible.

Donc si les ondes du séisme sont lentes, un bâtiment de masse importante entrera en résonance et risquera donc de se briser alors qu'une construction ayant les mêmes dimensions mais un poids

plus léger ne subira que de plus faibles oscillations. Nous pouvons donc voir que les deux modèles d'oscillateurs permettent de montrer l'influence qu'ont la masse et la taille d'un bâtiment sur sa fréquence de résonance et ainsi sa réaction lors d'un séisme [5].

## I.6 La réglementation parasismique

Les normes de construction parasismique sont un ensemble de règles à appliquer lors de la conception des bâtiments pour qu'ils résistent le mieux possible à un séisme.

L'application de ces règles parasismiques actuelles en général concerne le calcul des charges sismiques et les dispositions constructives. Leur application est obligatoire pour toutes les constructions situées dans toutes les zones sauf les zones de sismicité négligeable [6].

### I.6.1 La construction parasismique

Une construction parasismique, c'est-à-dire construite dans le respect des règles parasismiques en vigueur, est une construction qui ne s'effondre pas sur ses occupants, en limitant les désordres structurels. Si les désordres sont trop importants, la démolition du bâtiment peut être nécessaire.

Construire parasismique suppose de tenir compte du risque sismique à toutes les étapes de la construction, puis de la vie du bâtiment. Cinq aspects de la construction parasismique peuvent être définis, chacun essentiel à la limitation des dommages en cas de tremblement de terre :

- **le choix du site** : les terrains situés au sommet des collines ou des pentes, les zones à la limite entre les sols rocheux et des sols mous sont à proscrire.
- **La conception architecturale** : la construction doit également être parasismique permettant ainsi un bon comportement au séisme (forme, hauteur, élancement du bâtiment).
- **Le respect des règles parasismiques** : pour les constructions neuves et certains bâtiments existants faisant l'objet de travaux importants, des niveaux de protection sont requise selon la zone de sismicité et le type de bâtiment.
- **La qualité de l'exécution** : elle concerne les matériaux, l'assemblage des éléments, et le respect des règles de l'art.
- **La bonne maintenance des bâtiments** : permet de maintenir l'efficacité de la construction parasismique sur le long terme. Toute modification ultérieure de la construction doit prendre en compte le risque sismique [7].

### I.6.2 Principes de conception parasismique des bâtiments

- ✚ **Principe 1-Continuité** : toute discontinuité dans le dessin d'une structure conduit à une concentration de contraintes et de déformations. Une structure discontinue est toujours mauvaise, car le mécanisme de ruine qu'elle fait intervenir est local.
- ✚ **Principe 2-Régularité en plan** : la structure du bâtiment doit être capable de résister à des actions horizontales suivant toutes les directions et les éléments structuraux doivent avoir des caractéristiques de résistance et de rigidité similaires dans les deux directions principales, ce qui se traduit par le choix de formes symétriques.
- ✚ **Principe 3-Régularité en élévation** : dans la vue en élévation, les principes de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure, sans variation brutale de raideur.
- ✚ **Principe 4- Raideur et résistance à la torsion** : la disposition constructive des éléments susceptibles de donner la raideur/résistance torsionnelle à la structure soient portés le plus possible vers la périphérie du bâtiment pour atteindre leur effet maximal.
- ✚ **Principe 5- Diaphragmes efficaces** : les diaphragmes d'un bâtiment sont les structures horizontales qui reportent l'action horizontale, résultant de la mise en mouvement des masses des planchers et de leurs charges, vers les structures verticales de contreventement. Les diaphragmes sont indéformables dans leur plan, de manière à assurer une distribution efficace de l'action horizontale entre les différentes structures verticales.
- ✚ **Principe 6- Créer les conditions d'un mécanisme plastique global** : il est fondamental pour la sécurité de développer les déformations plastiques dans les poutres et non dans les poteaux car des poutres même fortes endommagées ne s'effondrent pas individuellement, ils restent suspendus par les armatures ou les parties restantes des assemblages, alors que les dégâts aux poteaux entraînent facilement un effondrement d'ensemble.
- ✚ **Principe 7-Choix relatifs aux masses** : car les planchers représentent environ 80% de la masse d'un bâtiment, il faut, lorsqu'on a le choix, éviter de les placer dans des zones de la structure où elles engendrent des sollicitations importantes de flexion ou de torsion.
- ✚ **Principe 8- Largeur des contreventements** : on peut réduire les contraintes correspondant à ces sollicitations dans la structure en élargissant le contreventement.
- ✚ **Principe 9- Largeur des fondations** : il est bien évident que les contraintes à la fondation diminuent avec la largeur de cette dernière donc, opter pour le choix d'un radier général peut être solution en cas de semelles isolées peuvent être critiques.
- ✚ **Principe 10-Partition en sous structures** : lorsque pour une raison quelconque (usage, esthétique), les principes de régularité en plan et de symétrie ne peuvent être respectés, on peut penser à effectuer une partition du bâtiment en plusieurs « blocs » ou sous structures ; celles-ci sont séparées pour leur comportement structural.
- ✚ **Principe 11-Fixation des éléments non structurels** : l'ors d'un séisme, et même avec une bonne conception structurelle le désintérêt souvent accorder aux éléments non

structurels(décoratifs) peut avoir de très graves résultats. Par la chute d'éléments mal fixés ou peu résistants placés en hauteur [8].

## I.7 La conception en performance (PBD)

La procédure de conception des structures qui se base en multi niveau ou critère n'est pas nouvelle. La conception aux états limites considère les niveaux : de service et ultime.

Dans le cas du chargement sismique, le but déclaré des codes de construction est de produire des constructions capables d'achever les objectifs de performances suivantes :

- Résister à des séismes mineurs sans dommages significatifs.
- Résister à des séismes modérés avec des dommages réparables.
- Résister à des séismes majeurs sans effondrement.

Mais comme la majorité des codes ne considèrent explicitement qu'un seul niveau (objectif) de performance, définit comme : protection des occupants ; durant la vie des constructions, donc le contrôles des dommages doit être mieux explicite en terme des considérations à prendre en compte durant la conception. Alors, durant ses dernières années, une nouvelle philosophie pour la conception des constructions a été discutée entre les communautés des ingénieurs, adoptant la philosophie de conception en performances « *Performance Based Design* » [9].

## I.8 Notions sur la performance sismique et ses niveaux

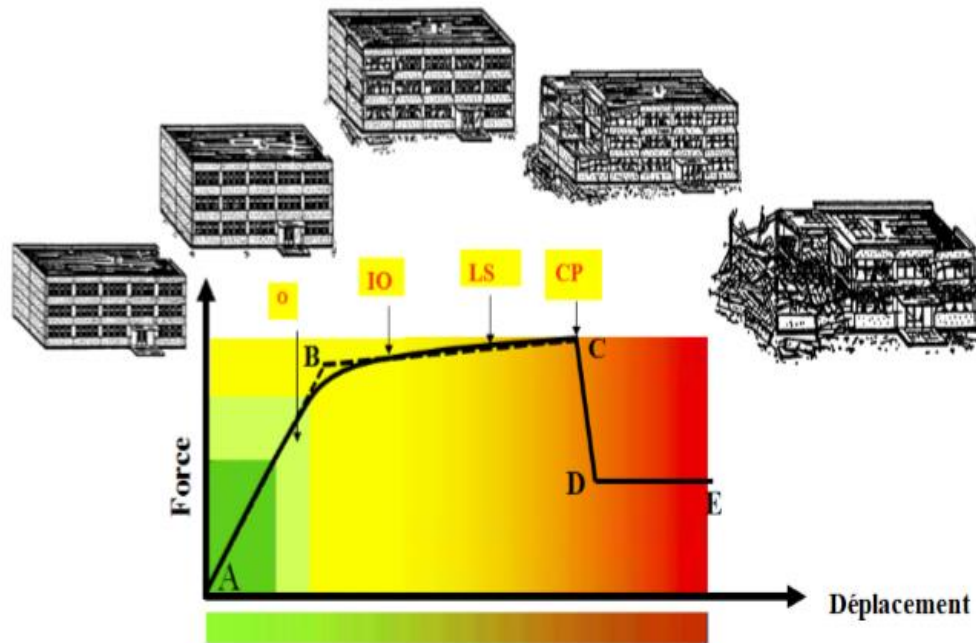
Un niveau de performance décrit une condition limite d'endommagement d'une structure donnée sous une action sismique donnée. Le niveau de performance dans le dimensionnement sismique est associé par les états limites de la structure. Les états limites concernant la vie sauve des occupants ou la sécurité de la structure sont définis comme étant les états limite ultimes, ceux concernant, le bon fonctionnement et l'occupation sans danger de la structure avec endommagement des éléments secondaires sont les états limite de service [6].

### I.8.1 Les niveaux de performance

Le niveau de performance pour un bâtiment pendant le tremblement de terre est mesuré par la nature des pertes, en fonction des différents degrés des dommages qui peuvent subir les constructions. Cependant, l'objectif d'un niveau de performance est de définir un état de dommage du bâtiment pour un séisme.

Les niveaux de performances, ainsi définis peuvent être représentés sur une courbe de capacité de la structure obtenue par une analyse Push-over :

- a) **Le premier niveau** : correspond au comportement élastique de la structure, 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 [9].



**Figure I.5:** Représentation du niveau de performance sur la courbe de capacité [10].

- **Opérationnel « O »** : le bâtiment reste opérationnel et les dommages sont négligeables.
- **Occupation immédiate « IO »** : le bâtiment reste dans ses fonctions et les dommages sont relativement limités, la structure garde une grande partie de sa raideur initiale.
- **Sécurité de la vie humaine « LS »** : la structure subit des dommages importants et il peut y avoir une perte significative de sa raideur.
- **Non effondrement « CP » : collapse prévention**, la structure a subi des dommages extrêmes si elle est encore soumise à des déplacements latéraux, elle peut subir une instabilité et s'effondrer [10].

## I.8.2 Critères de dimensionnement pour trois niveaux de performance

En fonction de la structure et les éléments non structuraux, l'approche de conception en performance considère les critères suivants :

### I.8.2.1 Critère de rigidité

La vérification de la résistance est traditionnellement considérée par les concepteurs comme le premier critère à satisfaire dans le processus de dimensionnement, le contrôle de l'endommagement à travers la vérification de la rigidité structurelle est devenu un critère incontournable, afin de :

- Éviter un endommagement dangereux des éléments non structuraux.
- Limiter l'endommagement structurel.

La vérification est généralement concrétisée à travers la relation :

$$\text{Rigidité requise} \leq \text{Rigidité disponible}$$

### I.8.2.2 Critère de résistance

La conception parasismique courante autorise l'endommagement structurel lors d'un séisme sévère ou les structures sont appelées à enregistrer d'importantes déformations inélastiques. Pour que la structure reste dans le domaine élastique. Le critère de résistance est traditionnellement introduit comme un but dans le dimensionnement parasismique.

La structure doit donc satisfaire ce critère à travers la relation suivante :

$$\text{Demande de résistance} \leq \text{Capacité de résistance}$$

### I.8.2.3 Critère de ductilité

On entend par ductilité dans la conception structurelle, la capacité d'une structure de supporter de larges déformations dans le domaine post-élastique sans jamais enregistrer une réduction substantielle de résistance.

Pour ce, une méthodologie claire et cohérente pour le contrôle direct de ductilité doit être développée. Cet objectif est atteint si le critère de ductilité est satisfait :

$$\text{Demande de ductilité} \leq \text{Capacité de ductilité [11]}.$$

## I.9 Conclusion

Le séisme est parmi les phénomènes naturels imprévisibles est qui représente un véritable danger ainsi que des pertes des vies humaines. Dans le but de réduire les pertes il paraît évident d'utiliser l'approche de conception à plusieurs niveaux (critères) de performance. Plusieurs paramètres ont été observées lors des dégâts et endommagements lors d'un séisme parmi eux l'irrégularité en plan et en élévation et d'autres. Ces deux dernières vont être exposées dans le chapitre suivant.



**CHAPITRE II :**  
**L'IRREGULARITE DES STRUCTURES EN**  
**BETON ARME**

---

## CHAPITRE II : L'IRREGULARITE DES STRUCTURES EN BETON ARME

### II.1 Introduction

La distribution irrégulière de la masse, de la rigidité ou de la résistance en élévation ou en plan est considérée comme une irrégularité structurelle. Ce type de conception architecturale est connu comme étant l'une des principales causes de dommage ou effondrements des constructions durant les séismes passés. Cette source de vulnérabilité est due essentiellement à une distribution irrégulière des charges ou des rigidités qui donne naissance à de sérieuses concentrations de contraintes au niveau de la discontinuité et affecte ainsi défavorablement le comportement de la structure sous l'action des séismes. Les méthodes traditionnelles ne peuvent pas décrire exactement le comportement réel de ces structures [12].

### II.2 L'action sismique et l'irrégularité des structures

L'action sismique est une action accidentelle qui est définie dans les règles parasismiques algériennes. Il faut noter ici, qu'en amont du dimensionnement proprement dit, une conception parasismique judicieuse assure un comportement sismique adéquat. En pratique, les bâtiments à ossature en portiques en béton armé peuvent présenter deux formes géométriques différentes forme régulière ou irrégulière. Pour la deuxième, l'irrégularité peut être en plan et/ou en élévation. Dans la plupart des cas, les constructeurs choisissent en général la forme la plus simple pour le bâtiment à concevoir et à réaliser, forme répondant aux critères de régularité en plan et en élévation. Elle est dite forme simple de par sa facilité de réalisation sur chantier et aussi de par son comportement favorable (sécuritaire) sous l'effet de l'action sismique. Le recours à ce type de structure n'est pas toujours possible, car dans certains cas, le concepteur est contraint de concevoir le bâtiment sous une forme irrégulière, que ce soit en plan ou en élévation, pour des raisons architecturales [13].

### II.2.1 L'action sismique et l'irrégularité en élévation

Les bâtiments à ossature en portiques en béton armé irréguliers en élévation, dont l'irrégularité est caractérisée par un décrochement en élévation, ne se comportent pas de façon sécuritaire sous l'action sismique, car ce type de structure présente une irrégularité de la résistance et de la rigidité suivant la hauteur du bâtiment. L'étage où se situe le décrochement en élévation de la structure constitue une zone de concentration des contraintes et des déformations, c'est-à-dire une zone fortement sollicitée de la structure sous l'action sismique, en raison de la réduction brusque de résistance et de raideur. Cette réduction va induire, sous l'action sismique, une concentration des efforts et des contraintes dans les poutres et poteaux de cet étage, et, par conséquent, une concentration des déformations dans ces derniers. Avec l'accroissement des forces sismiques donc des sollicitations et des déformations. Dans quelques littératures, nous trouvons que les murs de remplissage en maçonnerie de l'étage où se situe le décrochement en élévation atteignent leur résistance ultime puis leur ruine par excès de compression ou de cisaillement.

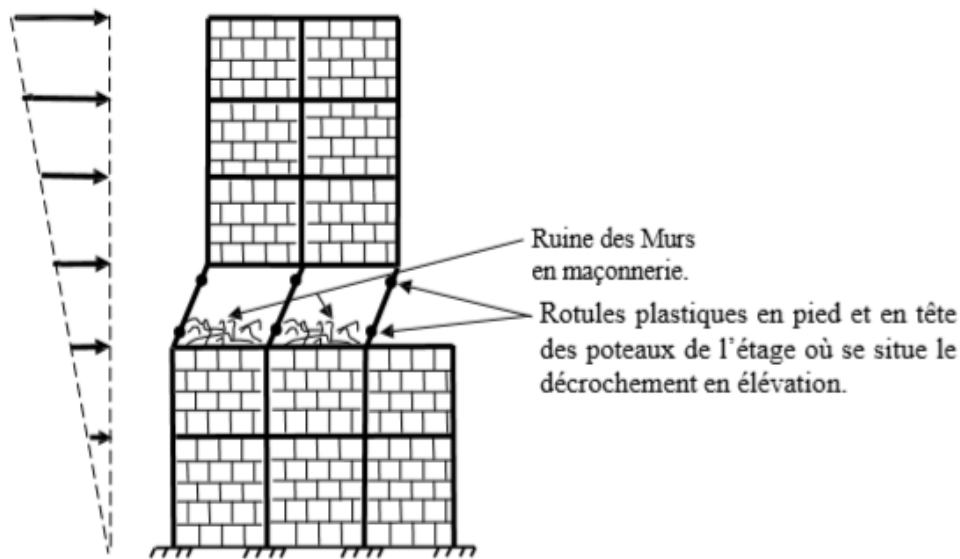


Figure II.1 : Mécanisme plastique où se situe le décrochement en élévation [14].

Un tel mécanisme de ruine n'est pas souhaitable, car il limite la capacité de déformation de la structure dans le domaine plastique, donc réduisant sa ductilité, et, par conséquent, réduisant sa résistance à l'action sismique [13].

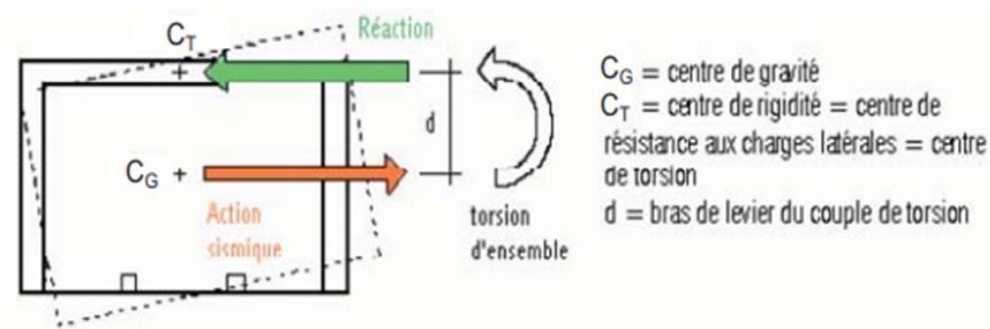
### II.2.2 L'action sismique et l'irrégularité en plan

Lors d'un séisme, plusieurs facteurs n'étant pas considérés explicitement dans la conception peuvent amplifier la réponse des éléments de la structure. Ces facteurs incluent entre la position

exacte du centre de masse (CM) et du centre de rigidité (CR) par rapport à celles considérées lors de la conception de même qu'une sollicitation non-uniforme du bâtiment lors du séisme. Celle-ci peut induire une accélération en rotation du bâtiment [15].

Généralement, la torsion autour de l'axe vertical est un phénomène destructeur lors d'un séisme car elle tend à solliciter de façon non uniforme les différents éléments de la structure, Il convient que les bâtiments puissent disposer en plus de leur rigidité vis-à-vis des actions latérales, et d'une rigidité appropriée à la torsion.

Afin de prendre en compte ce phénomène, il est nécessaire de comprendre son origine et ensuite comment calculer le CM et le CR.



**Figure II.2 :** Schéma représente la torsion d'ensemble [16].

Il existe deux contributions à la torsion en fonction de l'origine de ce phénomène. La « torsion naturelle » due à « excentricité structurale » qui représente la distance entre CG et CT et la « torsion accidentelle » due à la différence dans l'exploitation des charges dans la structure ce qui provoque un comportement différent des parties de la structure lors d'un séisme [16].

### II.3 Critères de régularité en RPA

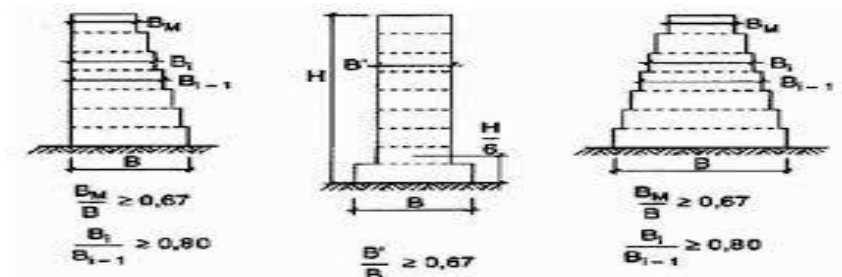
Chaque bâtiment doit être classé selon sa configuration en plan ou en élévation en bâtiment régulier ou non, selon les critères ci-dessous :

#### II.3.1 Critères de régularité en élévation

Les conditions qui sont nécessaires pour permettre l'utilisation de la méthode de calcul simplifiée, elles s'expriment de la manière suivante [17] :

- **b1.** Le système de contreventement ne doit pas comporter d'élément porteur vertical discontinu, dont la charge ne se transmette pas directement à la fondation.
- **b2.** Aussi bien la raideur que la masse des différents niveaux restent constants ou diminuent progressivement et sans chargement brusque de la base au sommet du bâtiment.

- **b3.** Le rapport masse sur rigidité de deux niveaux successifs ne doit pas varier de plus de 25% dans chaque direction de calcul.
- **b4.** Dans le cas de décrochements 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. Toutefois, au dernier niveau, les éléments d'ouvrage, tels que buanderies, salle de machines d'ascenseurs etc. pourront ne pas respecter les règles b3 et b4 et être calculés conformément aux prescriptions relatives aux éléments secondaires. D'une manière générale, se reporter aux schémas illustratifs ci-après :



**Figure II.3:** Limites des décrochements en élévation [17].

### II.3.2 Critères de régularité en plan

La régularité en plan est visée pour limiter les phénomènes de torsion d'axe vertical. Les critères de régularité en plan peuvent être :

- **a1.** Le bâtiment doit présenter une configuration sensiblement symétrique vis à vis de deux directions.
- **a2.** Chaque niveau et pour chaque direction de calcul la distance entre le centre de gravité des masses et de centre des rigidités ne dépasse pas 15% de la dimension du bâtiment mesurée perpendiculairement à la direction de l'action sismique considérée.
- **a3.** La forme du bâtiment doit être compacte avec rapport longueur / largeur du plancher inférieure ou égale 4.

La somme des dimensions des parties rentrantes ou saillantes du bâtiment dans une direction donnée ne doit pas excéder 25% de la dimension total du bâtiment dans cette direction.

- **a4.** Les planchers doivent présenter une rigidité suffisante vis-à-vis de celle des contreventements verticaux pour être considéré comme indéformable [17].

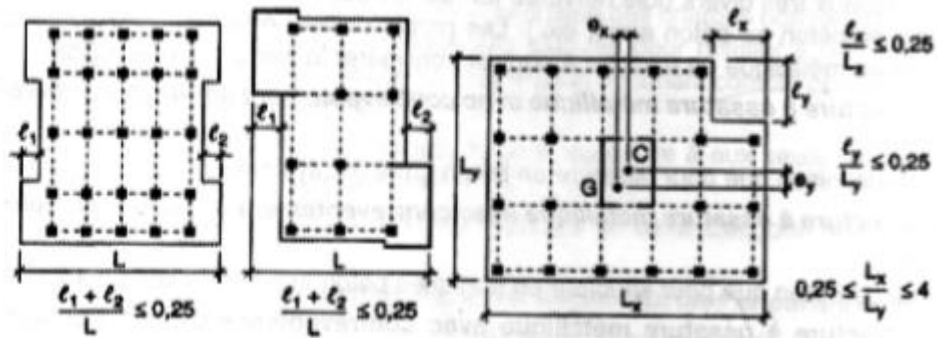


Figure II.4: Limites des décrochements en Plan [17].

Un bâtiment est classé régulier si tous les critères de régularité sont respectés. Par contre, il est classé irrégulier si l'un de ces critères n'est pas satisfait.

## II.4 Identification des zones potentiellement dangereuses

### II.4.1 Rotule plastique

La rotule plastique est une zone d'un élément de structure (poutres, poteaux, voiles) subissant des déformations irréversible et capables de dissiper de l'énergie sous sollicitations alternées. Au-delà d'un seuil de sollicitation, elle se comporte comme une articulation autorisant la rotation des autres parties de l'élément [18].

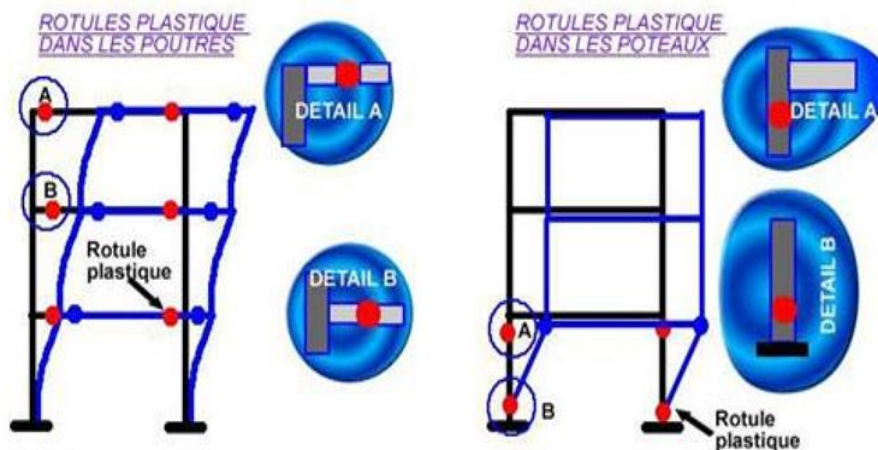


Figure II.5: Rotules plastiques au niveau des poteaux et des poutres [18].

### II.4.2 Poteaux fragiles

Ce type de dommages se manifeste par l'échec dans la base et le sommet du poteau. Il se produit dans les poteaux ayant un coefficient d'élançement moyen à élever, le moment fléchissant élever

combiner avec la force axiale, mènent à l'écrasement de la zone de compression du béton, qui sera manifesté d'abord par l'éclatement du béton de l'enrobage des armatures. Plus le nombre des cadres transversales dans les zones critiques est petit, plus leur vulnérabilité est grande. Dans ce type de dommages, la cause principale de l'échec est l'espacement très large des cadres aux régions critiques du poteau.

Ce type de dommages est très sérieux parce que le poteau ne perd seulement sa rigidité, mais également, il perd sa capacité de supporter les charges verticales [19].

### II.4.3 Poteaux courts

Lorsque la hauteur des remplissages est inférieure à la hauteur libre des poteaux adjacents, il subsiste, au-dessus du remplissage, un poteau court qui va nécessairement subir un cisaillement plus important que prévu qui est manifesté par des fissures formées dans la zone la plus faible du poteau, la forme finale ultime de ce type de dommages est l'éclatement de la surface extérieure du béton sans dommages des armatures ; puis l'écrasement du béton, rupture des cadres et flambement des armatures [19].

## II.5 Les méthodes d'analyse sismique dans les codes parasismiques récentes

Une analyse structurelle du modèle mathématique de la structure est nécessaire pour déterminer la force et les déplacements demandés dans les différents étages de la structure. Plusieurs méthodes d'analyse, à la fois élastique et inélastique, sont disponibles pour prédire le comportement sismique des structures.

### II.5.1 Les méthodes d'analyse linéaires

La déformation élastique est définie comme une déformation sensiblement proportionnelle à la force qui la provoque (notion de linéarité) et qui disparaît après la suppression des charges qui l'ont provoquée (déformation réversible) [20].

#### ➤ Méthode Statique équivalente : (equivalent lateral force analysis)

C'est la méthode d'analyse la plus ancienne, la plus simple est la plus utilisée pour le dimensionnement des bâtiments réguliers faiblement élevés. Elle est basée sur l'hypothèse que le comportement structurel est dicté par le mode de vibration fondamental. 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.

D'après cette méthode, telle qu'elle est exposée dans le règlement parasismique Algérien RPA99, l'effort tranchant maximal à la base est donné par la relation [17] :

$$V = A D Q W / R$$

**A** : coefficient d'accélération de zone.

**D** : facteur d'amplification dynamique moyen.

**Q** : facteur de qualité.

**R** : coefficient de comportement.

**W** : poids propre de la structure comprenant la totalité des charges permanentes ainsi qu'une fraction des surcharges.

➤ **Méthode d'analyse temporelle (time-history analysis)**

Cette méthode est applicable aussi bien pour les systèmes linéaires que pour les systèmes non linéaires, elle se base sur les acclérogrammes, la réponse d'une structure donnée pour une excitation temporelle en utilisant diverses techniques telle que l'intégrale de Duhamel, méthodes d'intégration pas à pas.

Elle est précise car elle permet d'analyser le maximum de la somme des déformations engendrées par des séismes dans le temps [21].

➤ **Méthode d'analyse modale spectrale (mode analysis method)**

Un outil d'analyse de demandes induites dans les structures par un spectre de réponse d'un mouvement de sol donné pour déterminer les quantités maximales des réponses, les modèles d'analyse utilisés pour l'analyse modale spectrale sont des modèles linéaires élastiques basés sur les propriétés effectives des rigidités et sur un coefficient d'amortissement. La méthode permet d'entreprendre une analyse statique latérale équivalente sous charges sismiques. Aussi, elle permet une meilleure compréhension de l'influence de chaque mode de vibration sur la réponse totale de la structure. En plus, elle permet de déterminer de manière relativement aisée les forces de calcul dans chaque élément de la structure [22].

## II.5.2 Les méthodes d'analyse non linéaires

Une structure est non-linéaire si le chargement entraîne des changements sensibles de sa rigidité avec le temps.

Les non linéarités qu'on observe peuvent se classer en deux grandes catégories la non linéarité géométrique et la non-linéarité matérielle.



**a) Non linéarité géométrique :** cette non linéarité est due au déplacement même de la structure, En effet, lorsque ces déplacements deviennent importants, l'équilibre du système doit être étudié dans la configuration déformée. Au sein de cette catégorie, on peut distinguer les grands déplacements et les grandes rotations.

**b) Non linéarité matérielle :** elle peut provenir, de la fissuration du matériau, du comportement du béton tendu, du mode d'assemblage entre les poteaux et les poutres [20].

➤ **La méthode d'analyse pas à pas**

Les procédures pas à pas tentent à déterminer la réponse dynamique temporelle des systèmes, cette méthode est fondée sur l'intégration sur chaque pas de calcul pour obtenir le vecteur vitesse et l'intégration de la vitesse qui donne le vecteur de déplacement.

La précision de cette méthode dépend de la valeur des pas ; deux facteurs essentiels doivent être considérés lors du choix de cette valeur :

1-accélération du sol.

2-la période propre de la structure linéaire associée à l'accélérogramme du séisme [20].

➤ **La méthode d'analyse non linéaire Push-over**

La méthode d'analyse Push-over est une méthode d'analyse approximative dans laquelle la structure soumise à des forces latérales augmente de façon monotone avec une distribution invariante sur la hauteur jusqu'à ce qu'un déplacement prédéterminé soit atteint.

Elle permet d'évaluer les mécanismes d'effondrement attendus et la distribution des dommages dans la construction. La relation avec le problème dynamique est assurée par la définition d'un déplacement cible. La procédure de la performance est fondée sur deux mots clés : la demande et la capacité [20].

## II.6 Conclusions

Dans ce chapitre on a essayé de présenter un problème très important lors de la conception des structures, qui est le problème de l'irrégularité en plan et en élévation. Alors pour comprendre bien le comportement dynamique de ces structures on a proposé d'utiliser la méthode statique non-linéaire **Push-over**. Et cette dernière va être présentée dans le chapitre suivant.

**CHAPITRE III :**

**ANALYSE STATIQUE NON LINEAIRE EN**

**POUSSEE PROGRESSIVE (PUSH-OVER)**

## CHAPITRE III : ANALYSE STATIQUE NON LINEAIRE EN POUSSEE PROGRESSIVE (PUSH-OVER)

### III.1 Introduction

Le principe de base du calcul parasismique consiste essentiellement à assurer un degré de sécurité acceptable permettant de réduire les risques relatifs aux défaillances, une structure soumise à un violent séisme est sollicitée au-delà du domaine élastique et se comporte de manière fortement non-linéaire. Par conséquent, l'utilisation de l'analyse linéaire devient insuffisante du fait qu'il n'approche pas au comportement réel de la structure.

Un outil performant souvent utilisé dans ce domaine est fourni par les courbes de capacité qui décrivent la probabilité d'atteindre ou dépasser un état de dommage provoqué par un séisme, c'est la procédure d'analyse statique non linéaire.

### III.2 Définition de la méthode par poussée progressive « Push-over »

'Push-over' est une procédure statique non linéaire dans laquelle la structure subit des charges latérales suivant un certain modèle prédéfini en augmentant l'intensité des charges jusqu'à ce que les modes de ruine commencent à apparaître dans la structure. Les résultats de cette analyse sont représentés sous forme de courbe qui relie l'effort tranchant à la base en fonction du déplacement du sommet de la structure [21].

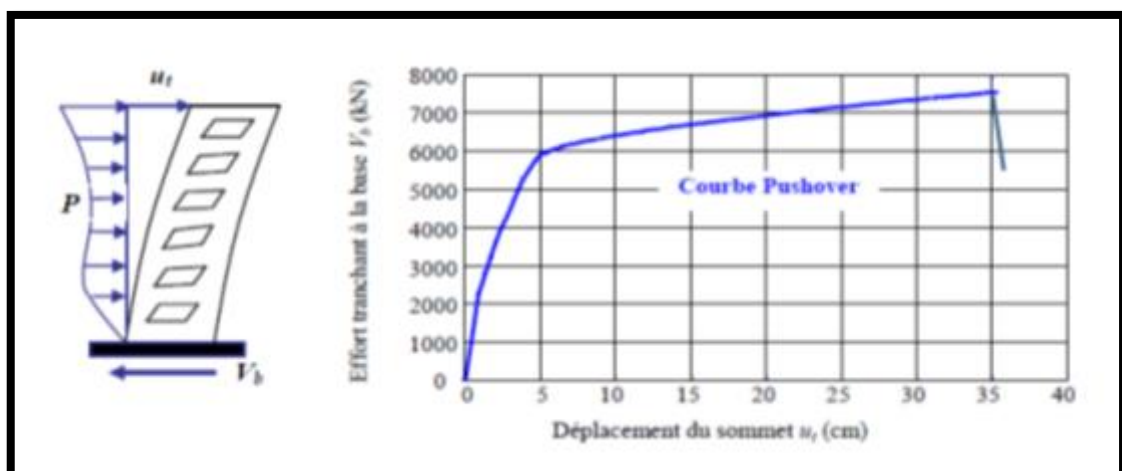


Figure III.1 : Signification physique de la courbe de capacité [21].

### III.3 Principe de l'analyse Push-over

Une traduction littérale du terme anglais donne une bonne idée du principe général : il s'agit de pousser le bâtiment construit jusqu'à l'effondrement afin de déterminer l'effort maximal auquel il peut résister. Cet « essai destructif » n'est évidemment pas entrepris dans la réalité, mais la méthode Push-over vise à donner les outils nécessaires à le réaliser virtuellement par le calcul. Il s'agit donc d'une analyse sous charge permanente constante qui consiste à augmenter progressivement les actions horizontales tout en respectant leur distribution jusqu'à atteindre la rupture. Le but est de vérifier une structure dans l'état de son dimensionnement. Si la structure est capable de résister à une force horizontale supérieure à la valeur réglementaire, le dimensionnement est jugé satisfaisant, quel que soit la valeur du coefficient de comportement réellement atteint.

Etant donné la nature non linéaire du comportement du bâtiment, il s'agit en fait d'une analyse en déplacement. L'idée est de fixer un objectif en déplacement et de vérifier que le bâtiment peut résister aux efforts qui en résultent. Cet objectif est censé représenter le déplacement maximal qu'aura à subir le bâtiment lors du séisme. Il en résulte que l'outil de base de cette méthode est la courbe de capacité du bâtiment qui donne la relation entre le déplacement horizontal en tête du bâtiment et la force horizontale à la base de celui-ci. C'est cette courbe qui tient compte du comportement non linéaire de l'ouvrage [22].

### III.4 Hypothèse de l'analyse Push-over

L'analyse statique Push-over 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, ce qui implique que la réponse est fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration et 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 [23].

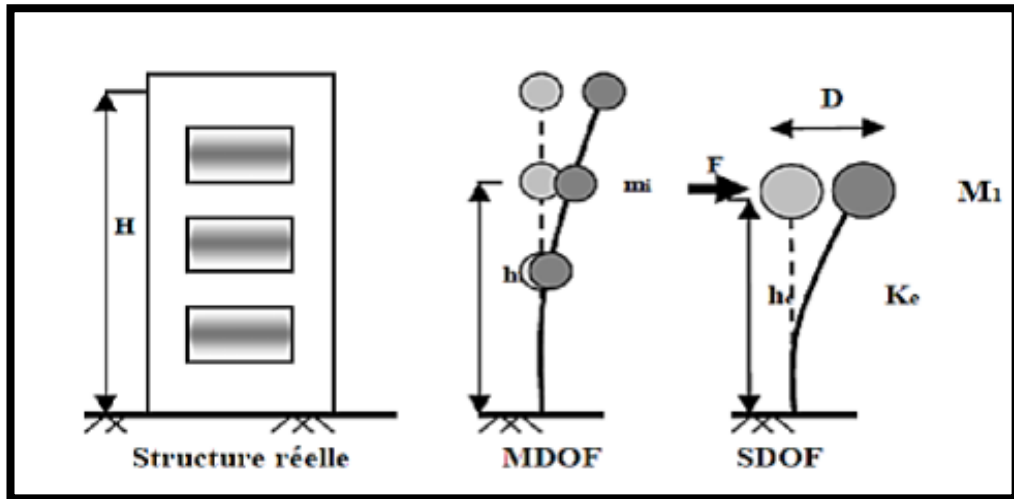


Figure III.2 : Système équivalent d'une structure à plusieurs degrés de libertés [22].

### III.5 Distribution des charges latérales

Les charges sismiques horizontales doivent être appliquées dans un profil qui représente approximativement la distribution verticale des forces d'inertie pendant un événement sismique. On peut comprendre alors qu'à cause du changement de la rigidité de la structure et de l'influence des différents modes de vibration pendant un séisme, la distribution des forces horizontales ne peut pas être clairement définie.

La distribution idéale est celle développée dans l'analyse temporelle élasto-plastique, qui varie au cours du séisme selon le schéma de déformation plastique de la structure : ainsi, partant d'une déformée de type « 1er mode ».

La forme de la distribution consiste à considérer plusieurs distributions verticales de forces horizontales appliquées à l'emplacement des masses dans le modèle. La figure suivante montre différentes distributions des forces latérales selon les travaux de Chopra & Goel, 2001, [13].

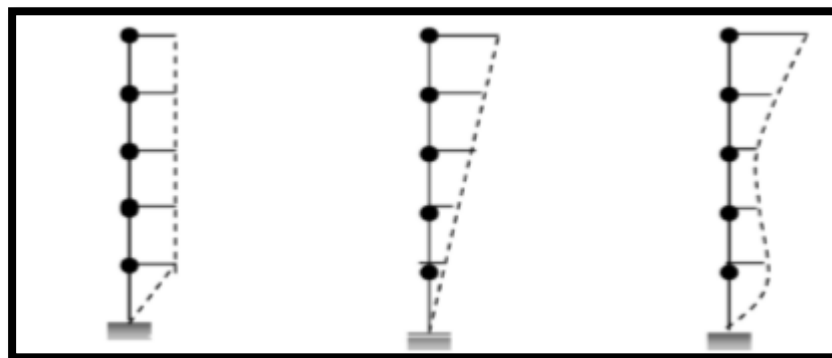


Figure III.3 : Différentes distributions des forces latérales [13].

### III.6 Le déplacement cible

La relation entre l'analyse Push-over, 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 [24].

### III.7 Courbe de capacité

Le calcul non linéaire permet d'obtenir une courbe de capacité de la structure. Cette courbe représente l'effort horizontal à la base du bâtiment en fonction du déplacement au sommet. La courbe de capacité est en général formée par une phase à caractère élastique linéaire suivie par une phase non linéaire correspondant à la formation des rotules de flexion et de cisaillement, jusqu'au moment de la rupture (défaut de résistance). La rupture est identifiable par une chute de l'effort à la base suite à un petit déplacement de la structure. Les stades (Steps) de plastification, ainsi que les différents degrés d'endommagement, peuvent donc être donnés sur cette courbe [24].

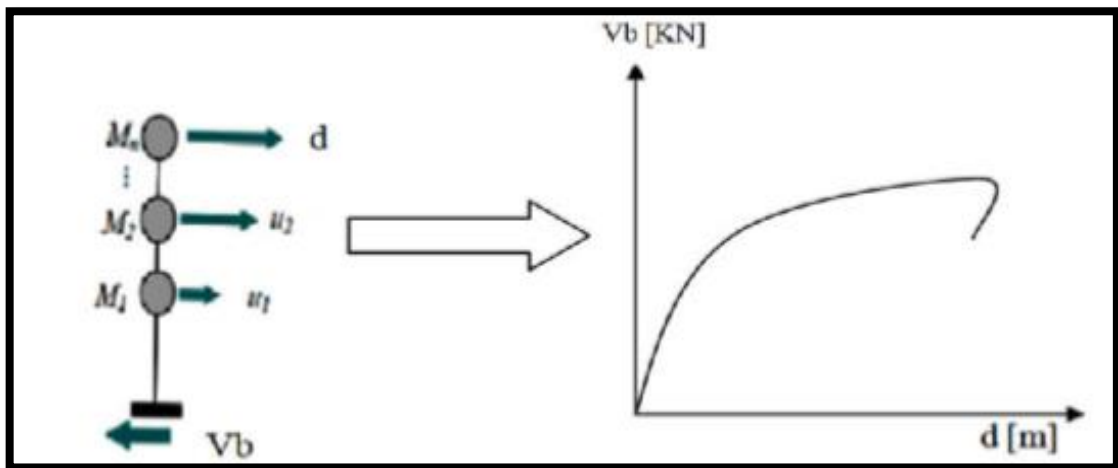


Figure III.4 : Construction de la courbe de Capacité de la structure [24].

### III.7.1 Idéalisé 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 [24].

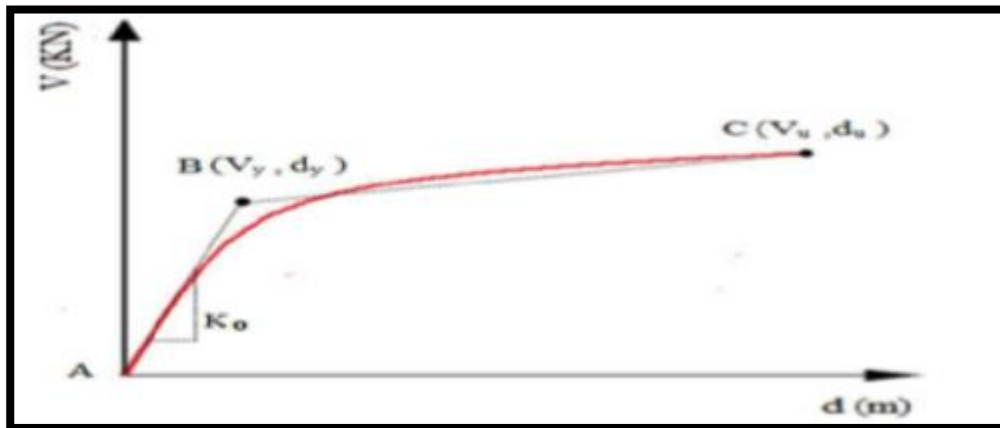


Figure III.5 : Idéalisé de la courbe de capacité [24].

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 ( $K_o = V_y / d_y$ ).

### III.8 Formation des rotules plastiques

L'analyse Push-over nous permet d'évaluer l'état de comportement des éléments de la structure si ces derniers passent aux domaines plastiques (rotules plastiques), et vérifier l'emplacement des rotules plastiques dans les différents éléments structurels (poteaux, poutres). De préférence ces rotules plastiques doivent être formées dans les éléments horizontaux (poutres) plutôt que dans les éléments verticaux (poteaux), ce qui est conforme au principe du poteau fort/poutre faible. Après le début de plastification des barres longitudinales, la déformation se concentre dans une région appelée rotule plastique [18].

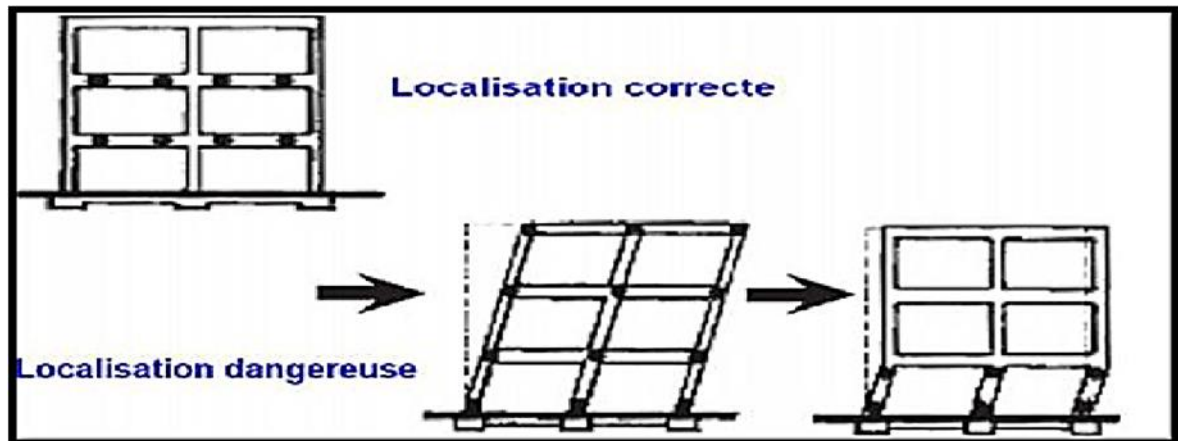


Figure III.6 : Formation des zones plastifiées (rotules plastiques) [18].

### III.8.1 Les propriétés des rotules plastique dans SAP2000

Dans SAP 2000, le comportement linéaire des éléments d'ossature est déterminé par les dimensions des sections et les propriétés des matières assignées à ces éléments. Les caractéristiques non linéaires force-déplacement pour les éléments d'ossature individuels sont modélisées comme des rotules plastiques représentées par une série de segments de droite. Dans cette étude, les rotules plastiques sont situées aux extrémités des éléments parce que ce site représente la zone des contraintes maximales pour les poteaux et les poutres [18].

Les propriétés des différents types de rotules plastiques définies par défaut par le logiciel sont extraites des règlements américains ATC40 et FEMA 273. Pour chaque type de rotule, le comportement non linéaire est défini par un modèle idéalisé, représenté par une courbe force-déformation [19].



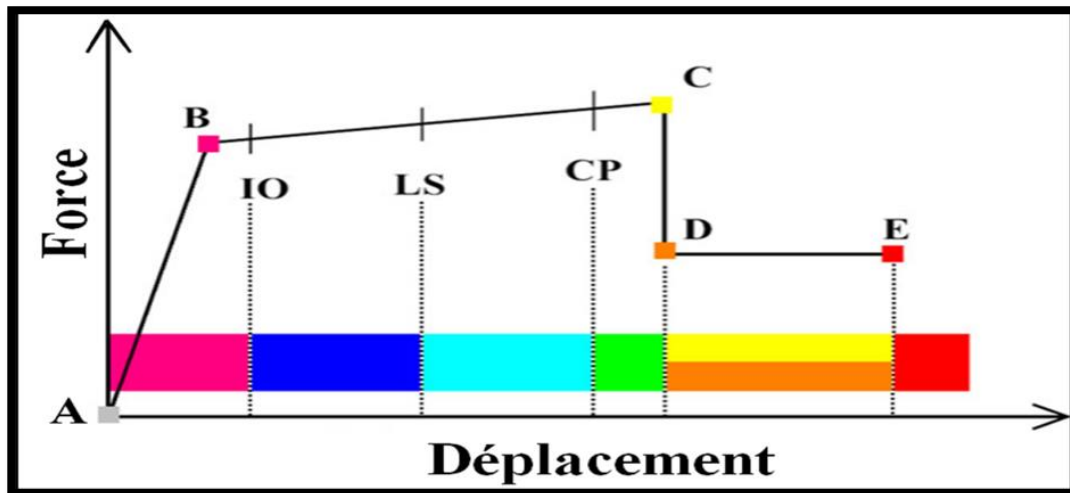


Figure III.7 : Courbe force-déplacement pour une définition de rotule utilisée dans SAP2000 [18].

Le point (A) représente l'origine.

Le point (B) représente l'état de plastification.

Le point (C) représente la capacité ultime pour l'analyse Push-over.

Le point (D) représente la résistance résiduelle pour l'analyse Push-over.

Le point (E) représente l'échec total.

Avant d'atteindre le point B, la déformation est linéaire et se produit dans l'élément d'ossature lui-même, et non dans la rotule.

La déformation plastique au-delà du point B se produit dans la rotule en plus de n'importe quelle déformation élastique pouvant se produire dans l'élément, la résistance résiduelle à partir de D à E permet aux éléments d'ossature de supporter des charges de gravité [18].

### III.9 Point de performance

Point de performance correspond à l'intersection entre la courbe de capacité et le spectre de réponse sismique réglementaire, l'obtention de ce point se fait par itération successif en variant le coefficient d'amortissement visqueux, il traduit le comportement réel de la structure vis-à-vis un spectre réglementaire moyen représentatif de la région étudié.

Plusieurs méthodes sont développées pour déterminer le point de performance. C'est à dire la demande de déplacement sur la structure induite par le séisme à savoir les règlements FEMA 273 et 356, ATC40 et Eurocode 8 [25].

Dans notre recherche nous intéressons uniquement au règlement de l'ATC40.

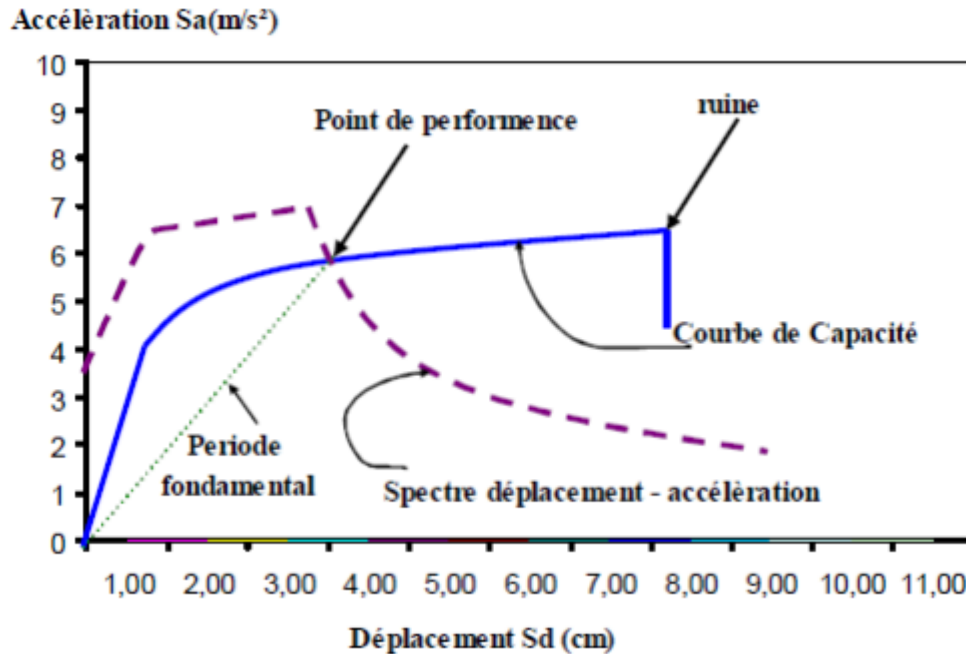


Figure III.8 : Détermination du point de performance [25].

### III.10 Approche du code ATC 40

La méthode d'analyse proposée dans ATC 40 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 Push-over 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 [24].

### III.11 Étapes de l'analyse Push-over

Nous résumons les étapes à suivre pour l'exécution de l'analyse Push-over des structures au moyen du programme SAP2000, ces étapes se présentent comme suit :

- ✓ **Etape 1** : création d'un modèle représentant la structure, les charges verticales (les charges permanentes, les charges d'exploitation), les propriétés et les dimensions des éléments sont définies et assignés pour le modèle.
- ✓ **Etape 2** : les propriétés des rotules du portique sont définies et assignées aux éléments du portique.
- ✓ **Etape 3** : les cas de charges indispensables pour l'analyse Push-over sont définis, ces cas incluent :
  - Les charges de gravité.
  - Les charges horizontales utilisées pour la poussée de la structure.
- ✓ **Etape 4** : définition du nœud de contrôle, de la direction et de la valeur du déplacement cible.
- ✓ **Etape 5** : exécution des cas Push-over au moyen du programme.
  - Application des charges de gravité comme conditions initiales de l'analyse Push-over, qui doivent être maintenues constantes durant l'analyse ;
  - Application des charges horizontales représentant le séisme, que l'on fait croître de façon monotone.
- ✓ **Etape 6** : en augmentant les forces latérales appliquées durant l'analyse, il y a apparition graduelle des rotules plastiques, l'évolution des mécanismes plastiques et l'endommagement progressif de la structure est fonction de l'intensité du chargement latéral et des déplacements résultants. Pour effectuer cette analyse qui se base sur des poussées progressives appliquées sur la structure on aura recours au logiciel SAP2000.

Dans l'ultime étape, le programme SAP2000 dessine la courbe Push-over, la forme déformée qui fait apparaître les rotules plastiques, les forces et autres résultats concernant l'analyse Push-over dont nous avons besoin [18].

### III.12 Les avantages de l'analyse Push-over

L'avantage de l'analyse Push-over est qu'il s'applique également à l'évaluation des structures existantes et à la conception des neufs. L'analyse Push-over fournit des informations sur beaucoup de caractéristiques de réponse qui ne peuvent pas être obtenues à partir d'une analyse statique ou dynamique élastique linéaire. Ce qui suit sont des exemples de telles caractéristiques de réponse :

- Les demandes en force dans les éléments potentiellement fragiles, comme les demandes axiales en force dans les poteaux, les demandes en moments dans les zones de connexion poteau-poutre etc.
- L'estimation de la demande en déformation pour les éléments qui doivent déformer inélastiquement afin d'absorber l'énergie donnée à la structure par les mouvements de sol.
- Conséquence de la détérioration de différents éléments sur le comportement du système structural.
- L'identification des régions critiques dans lesquelles on s'attend que la demande en déformation soit haute.
- L'identification des discontinuités de force en plan ou en élévation qui mèneront aux changements des caractéristiques dynamiques dans le domaine non élastique.
- L'évaluations des déplacements inter-étages, qui expliquent les discontinuités de force ou de rigidité et peuvent être employées pour contrôler les dommages et pour évaluer les effets P-delta.

L'analyse Push-over fournit des données sur la force et la ductilité de la structure qui ne peut pas être obtenue par l'analyse élastique. En outre, elle expose les faiblesses de conception qui peuvent demeurer cachées dans une analyse élastique [26].

### III.13 Les limites de l'analyse Push-over

Comme la méthode statique non linéaire présente des avantages elle a plusieurs limitations :

On doit souligner que l'analyse Push-over est approximative en nature et basée sur le chargement statique. Car elle ne peut pas représenter des phénomènes dynamiques avec un grand degré d'exactitude. Une évaluation complète de l'exactitude des prévisions de demande de Push-over exigera l'exécution d'un grand nombre de cas d'études pour plusieurs configurations différentes. Ainsi, elle est en principe imprécise pour des structures où les effets des modes plus élevés, et il peut ne pas détecter les faiblesses structurales qui peuvent être produites quand les caractéristiques dynamiques de la structure changent après la formation du premier mécanisme plastique local et elle peut exagèrent d'autres.

La discussion sur le déplacement cible et le modèle latéral de charge indique que l'analyse Push-over suppose que la réponse de la structure peut être liée à cela d'un système équivalent à un seul degré de liberté [26].

### III.14 Conclusion

L'analyse Push-over est un outil puissant et très utile fournit l'information concernant la résistance, la déformation, la ductilité et la distribution de la demande statique non linéaire aux ingénieurs de structures. Malgré quelques limitations qui lui sont inhérente cette méthode donne une estimation raisonnable de la capacité de déformation globale de la structure en termes de demande, de capacité et de rotules plastiques.

Dans le chapitre suivant on va utiliser cette méthode pour étudier le comportement sismique des structures irrégulières en élévation et en plan.

**CHAPITRE IV :**  
**MODELISATION ET APPLICTION DE LA**  
**METHODE PUSH-OVER**

## CHAPITRE IV : MODELISATION ET APPLICTION DE LA METHODE PUSH-OVER

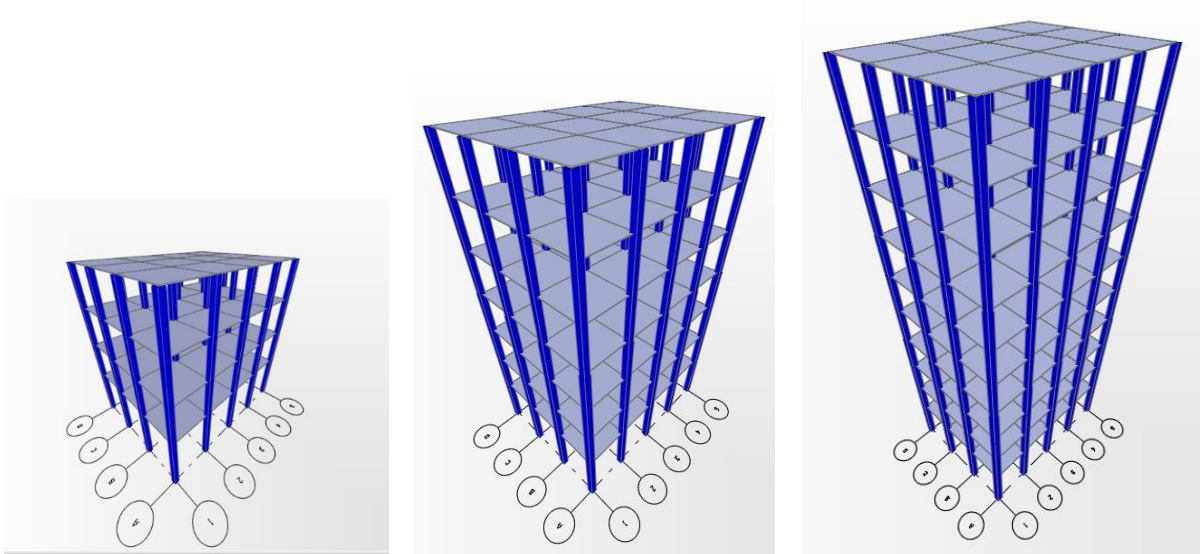
### IV.1 Introduction

Dans ce travail, nous allons entamer deux études paramétriques comparatives, pour ce faire trois variantes sont considérées : deux variantes désignées par portiques auto-stables irréguliers en plan et en élévation, et une troisième régulière prise comme portique de référence en béton armé, en utilisant la méthode statique non linéaire push over en vue de son analyse sismique.

### IV.2 Différentes variantes étudiées

Nous présentons ci-dessous les différentes conceptions qu'on va étudiées avec une augmentation d'étages et changement du conception (régularités) qui nous a mené en usant de l'analyse push over à déduire nos propres conclusions.

❖ **Variante1 : Régulière (référence)**



**Figure IV.1** : Portiques réguliers R+3, R+6, R+9.

❖ Variante 2 : Irrégulière en plan

➤ Faiblement irrégulière

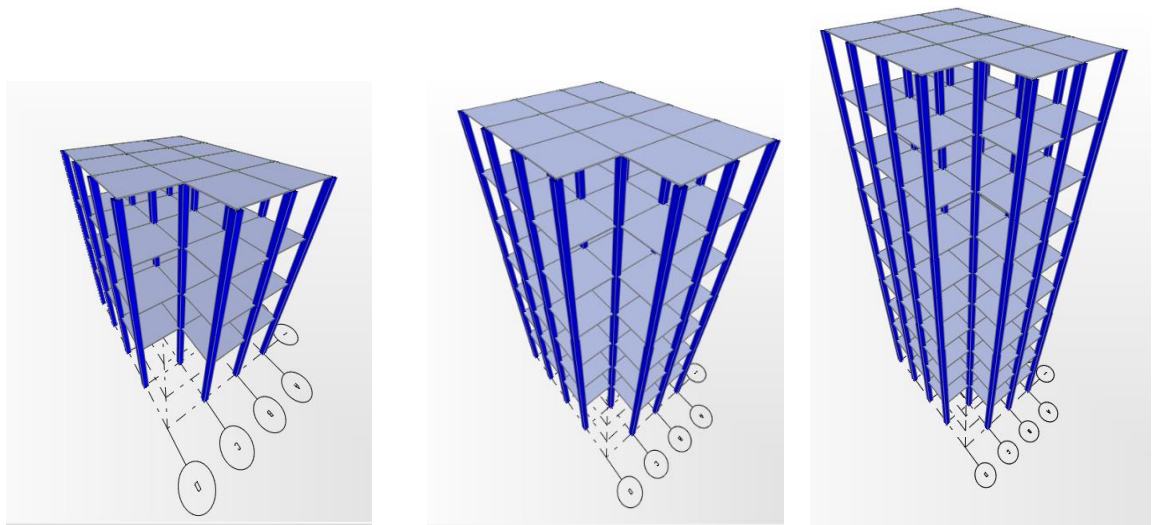


Figure IV.2 : Portiques faiblement irréguliers en plan R+3, R+6, R+9.

➤ Frottement irrégulière

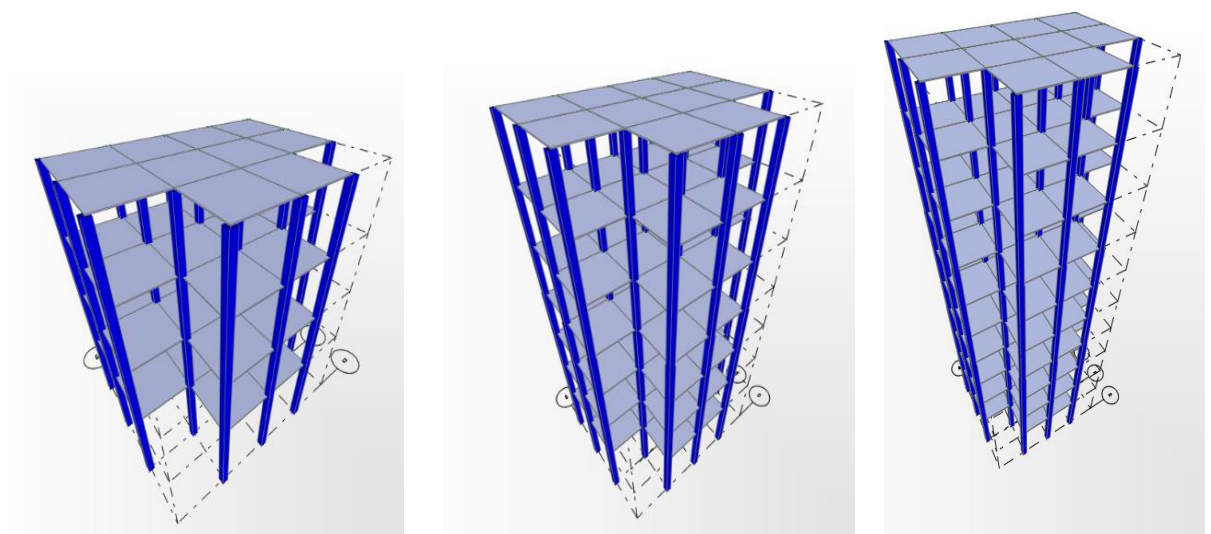


Figure IV.3 : Portiques fortement irréguliers en plan R+3, R+6, R+9.



## ❖ Variante 3 : Irrégulière en élévation

## ➤ Faiblement irrégulière

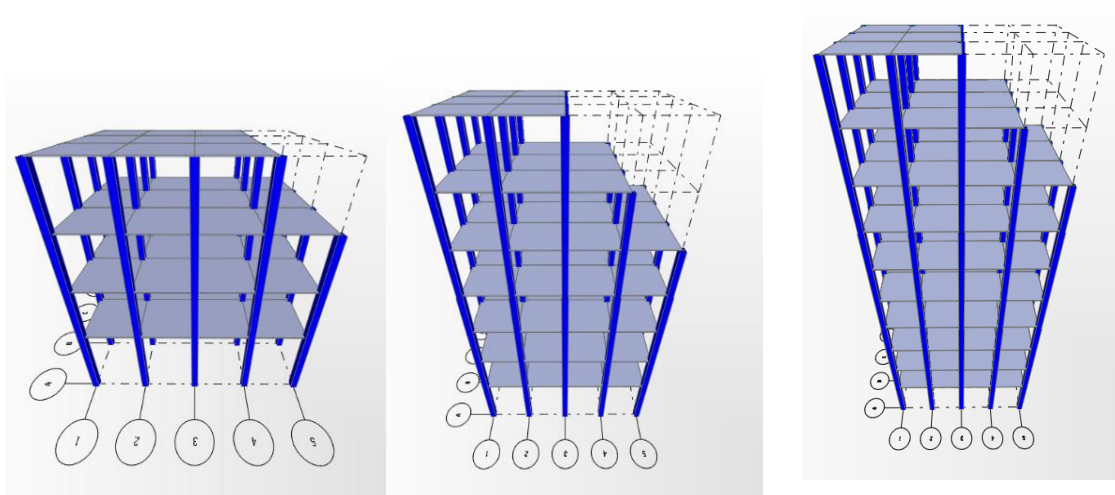


Figure IV.4 : Portiques faiblement irréguliers en élévation R+3, R+6, R+9.

## ➤ Fortement irrégulières

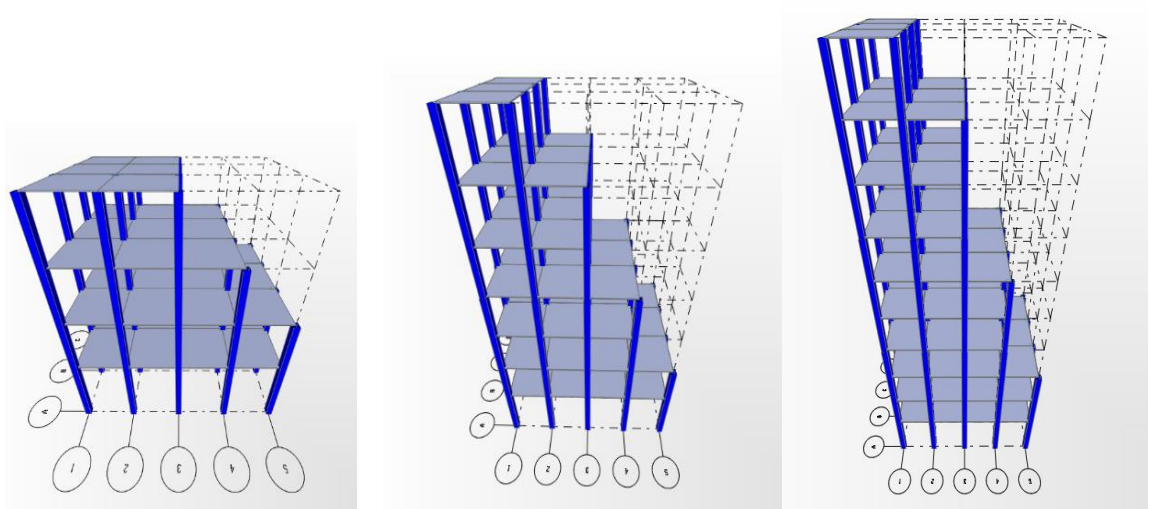


Figure IV.5 : Portiques fortement irréguliers en élévation R+3, R+6, R+9.

### IV.3 Présentation et descriptions des structures étudiées

Les structures choisies dans notre recherche sont des bâtiments (R+3 ; R+6 ; R+9) à usage d'habitation en portique auto-stable (poteaux, poutres) encastrés à leur base avec une portée des poutres égales dans les deux directions et une terrasse inaccessible ; les planchers sont en corps creux d'épaisseur (16+4) cm. Supposer implantées dans une zone de forte sismicité (zone III) dans un site ferme de classe 2.

### IV.3.1 Caractéristiques géométriques

Les caractéristiques géométriques des bâtiments sont résumées dans le tableau suivant :

**Tableau IV.1 :** Les caractéristiques géométriques des bâtiments étudiés.

Structures	Sens xx		Sens yy		Hauteurs		
	L/travée (m)	Longueur (m)	L/travée (m)	Largeur (m)	RDC(m)	Etage courant (m)	H Totale (m)
<b>R+3</b>	3	12	3	9	4	3	13
<b>R+6</b>	3	12	3	9	4	3	22
<b>R+9</b>	3	12	3	9	4	3	31

### IV.3.2 Caractéristiques des matériaux

Les principaux matériaux utilisés sont :

- Le béton.
- L'acier

#### Le béton :

Le béton qui sera utilisé doit être conforme aux règlements exigés par le B.A.E.L 91. La masse volumique du béton armé est de 25 KN/m<sup>3</sup>.

**Tableau IV.2 :** Caractéristiques du béton.

Contrainte de compression $f_{c28}$	25 MPa
Contrainte de traction $f_{t28}$	2,1 MPa
Module de Young $E_{ij}$	32164 MPa

### L'acier

Utilisant dans ce projet des barres à haute adhérence de nuance FeE500,  $f_e = 500$  MPa.

**Tableau IV.3:** Caractéristiques d'acier.

Limite élastique $f_e$	500 MPa
Contrainte de calcul $\sigma_s = f_e / \gamma_s$	500 MPa ( $\gamma_s = 1$ , cas accidentel)
Module de Young $E_s$	200000 MPa

### IV.3.3 Evaluations des charges

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

- ❖ **Charges permanentes :**
  - Plancher terrasse :  $G = 6,33$  KN/m<sup>2</sup>.
  - Plancher étage courant :  $G = 5,44$  KN/m<sup>2</sup>.
- ❖ **Charges d'exploitations :**
  - Plancher terrasse :  $Q = 1$  KN/m<sup>2</sup>.
  - Plancher étage courant :  $Q = 1.5$  KN/m<sup>2</sup>.

## IV.4 Dimensionnement et ferrailage des structures

Le ferrailage des sections a été déterminé selon le ferrailage minimal imposé par le Règlement Parasismique Algérien RPA99, modifié en 2003 pour la zone de sismicité III.

### IV.4.1 Dimensionnement et ferrailage des poutres

Toutes les poutres des structures sont en section rectangulaire, les résultats sont récapitulés dans le tableau suivant :

**Tableau IV.4 :** Dimension et ferrailages des poutres.

Poutre	Section (cm <sup>2</sup> )	As (cm <sup>2</sup> )	Ferrailage longitudinale
Aux Appuis	30×40	12,62	6HA14 , 3HA12
En Travée	30×40	11,40	3HA14 , 6HA12

#### IV.4.2 Dimensionnement et ferrailage des poteaux

On a affecté pour chaque type des structures les sections des poteaux qui convient, sont résumés dans ce tableau :

**Tableau IV.5 :** Dimensionnement et ferrailage des poteaux.

Structures	Niveaux	Section (cm <sup>2</sup> )	As (cm <sup>2</sup> )	Ferrailage longitudinal
R+3	RDC - 3 <sup>eme</sup> étage	35×35	12,31	8HA14
R+6	RDC - 3 <sup>eme</sup> étage	40×40	16,08	8HA16
	4 <sup>eme</sup> - 6 <sup>eme</sup> étage	35×35	12,31	8HA14
R+9	RDC - 3 <sup>eme</sup> étage	45×45	24,12	12HA16
	4 <sup>eme</sup> - 6 <sup>eme</sup> étage	40×40	16,08	8HA16
	7 <sup>eme</sup> - 9 <sup>eme</sup> étage	35×35	12,31	8HA14

#### IV.5 Modélisation et analyse numérique

Une modélisation s'impose pour obtenir la capacité totale du bâtiment face à un séisme et le niveau de dommage en fonctions des sollicitations. Pour ce faire, on va utiliser un logiciel basé sur les éléments finis (SAP2000.V14) permettre d'évaluer la vulnérabilité des bâtiments face à un séisme.

##### IV.5.1 Le logiciel SAP 2000.V14

SAP2000 est un progiciel développé par la compagnie "Computers and Structures, Inc." pour l'analyse et la conception des structures. C'est un système entièrement intégré pour modéliser, analyser, concevoir et optimiser des types particuliers de structures. SAP 2000 est utilisé pour des structures générales, y compris ponts, stades, tours, usines industrielles, structures en mer, systèmes de canalisation, bâtiments, barrages, sols, pièces de mécanique, etc. Pour analyser et concevoir une structure en utilisant SAP 2000 les étapes générales suivantes sont exigées :

1. Créer ou modifier un modèle qui définit numériquement les paramètres de géométrie, de propriétés, de chargement et d'analyse pour la structure.
2. Exécuter une analyse du modèle.
3. Passer en revue les résultats de l'analyse.
4. Vérifier et optimiser la conception de la structure.

Toutes ces étapes peuvent être exécutées sans aucune difficulté en utilisant l'interface utilisateur graphique de SAP 2000.

Le logiciel SAP 2000 facilite considérablement l'interprétation des résultats, en offrant notamment la possibilité de visualiser : la déformée du système, les diagrammes des efforts et courbes enveloppes, les champs de contraintes, les modes propres de vibration, etc.

#### **IV.5.2 Analyse Push-over avec SAP 2000 V.14**

L'analyse statique non linéaire ou l'analyse Push-over pourrait être exécutée directement par des logiciels spéciaux qui peuvent modéliser le comportement non linéaire pour les éléments de la structure qui résistent aux charges latérales.

L'analyse Push-over est une caractéristique très puissante offerte dans la version non linéaire de SAP 2000, et elle peut être exécutée sur les deux modèles structuraux bidimensionnels et tridimensionnels.

Le SAP 2000 peut comprendre tout nombre de cas de Push-over et chaque cas peut avoir une distribution différente de charge latérale sur la structure. Un cas de Push-over peut commencer à partir des conditions initiales zéro ou à partir de la fin d'un cas de Push-over précédent.

Le SAP 2000 exécute l'analyse Push-over en contrôlant soit la force ou soit en contrôlant le déplacement. Pour notre analyse, la courbe de capacité de la structure ( $V_{base} - D_{sommet}$ ) est déterminée en effectuant les étapes suivantes :

**Etape 1 :** Définition du comportement non linéaire des éléments.

**Etape 2 :** Définition du chargement de l'analyse statique non linéaire (Push-over).

**Etape 3 :** Analyse statique non linéaire et extraction de la courbe de capacité.

#### **IV.6 Définition de comportement non linéaire de la structure**

Le caractère non linéaire de cette analyse exige un raffinement dans la formulation des lois de comportement des :

- Matériaux utilisés.
- Éléments résistants de la structure.

### IV.6.1 Définition de comportement des matériaux Béton /Acier

L'approche de modélisation adoptée relie directement la réponse non linéaire globale au comportement des matériaux à utiliser. L'accent est mis sur le choix d'un modèle fiable représentant les lois de comportement définies pour le béton et l'acier. Il est nécessaire que les relations choisies soient validées par des données expérimentales.

De nombreux modèles numériques de comportement du béton et de l'acier existent dans la littérature, permettant ainsi de mettre en évidence les phénomènes physiques et les caractéristiques intervenant lors de la dégradation des matériaux.

Dans cette étude, les modèles d'endommagement retenus sont ; le modèle développé par Mander pour le béton, et le modèle simplifié pour l'acier.

#### ✚ Loi de MANDAR de béton :

Le béton a un comportement complexe difficile à représenter par une seule loi homogène. Cette difficulté est liée notamment à la forte hétérogénéité du béton qui est un matériau composite constitué de granulats de différentes tailles, d'une matrice cimentaire et de cavité. Le comportement du béton en compression, se traduit principalement par une relation contrainte-déformation non linéaire.

Le modèle constitutif développé par Mander a été également retenu dans la modélisation des bâtiments (définition des matériaux), ce permet de simuler efficacement le comportement du béton confiné et non confiné, ordinaire ou à haute résistance à la compression comme à la traction.

- La courbe contrainte – déformation pour le béton non confiné :
- ✓ Define → Materials → béton → Modify/show matériel proprieties  
→ Nonlinear material data.

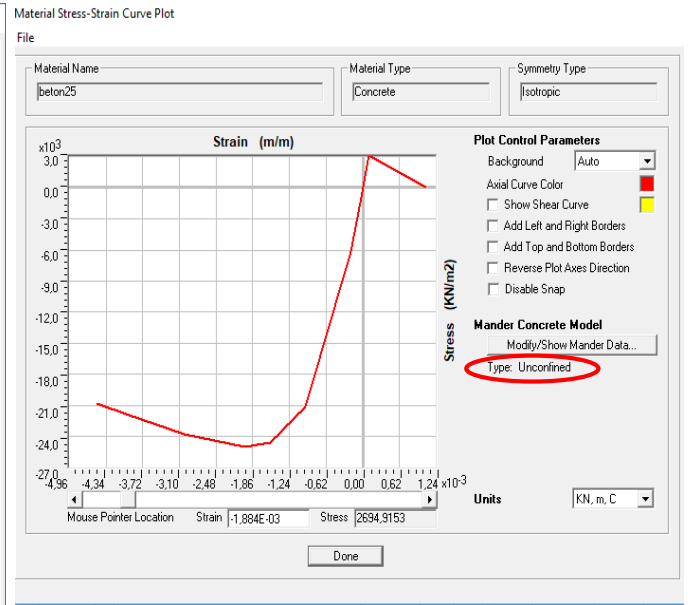
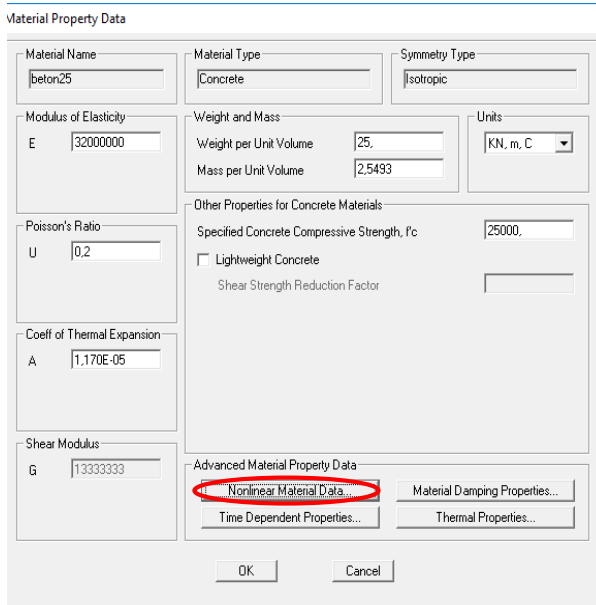


Figure IV.6 : Le choix de la loi de comportement Figure IV.7 : La courbe de contrainte-déformation béton.

**Modèle de l'acier :**

Contrairement au béton, le comportement de l'acier est quasi identique en traction et en compression. La courbe montre l'allure du comportement de l'acier soumis.

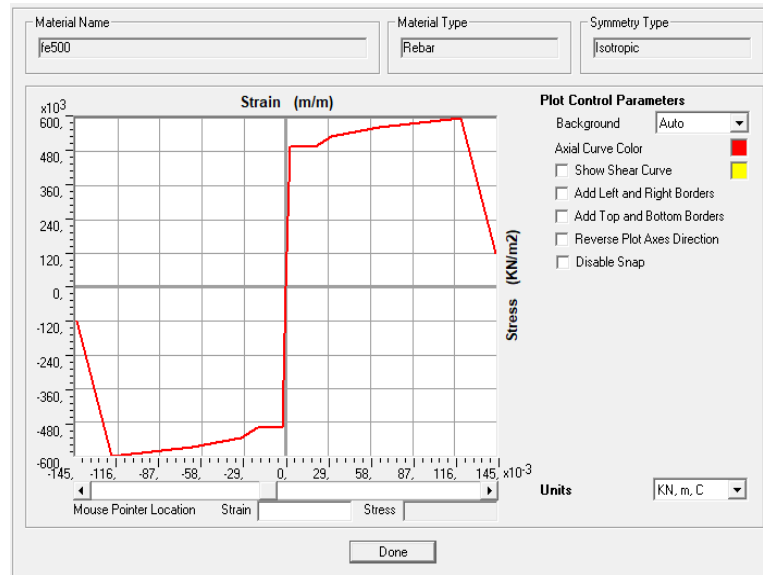


Figure IV.8 : La courbe de contrainte déformation ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) de l'acier modèle simplifié.

### IV.6.2 Définition du comportement non linéaire des poutres et poteaux

Les poutres et les poteaux sont modélisés par des éléments ayant des propriétés élastiques linéaires. Le comportement non linéaire des éléments structuraux poutres et poteaux est représentés par l'attribution des rotules plastiques concentrés 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. 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 SAP 2000, qui sont issus des deux règlements de constructions FEMA 273 et ATC 40.

### IV.6.3 Dessin de ferrailage

#### Ferrailage Poteaux

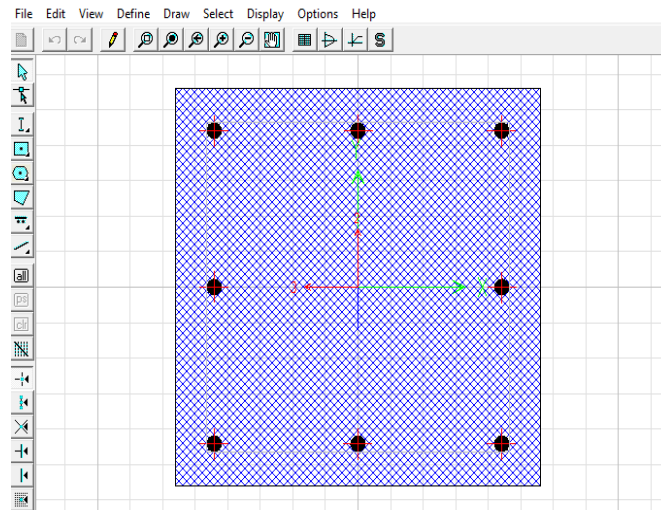
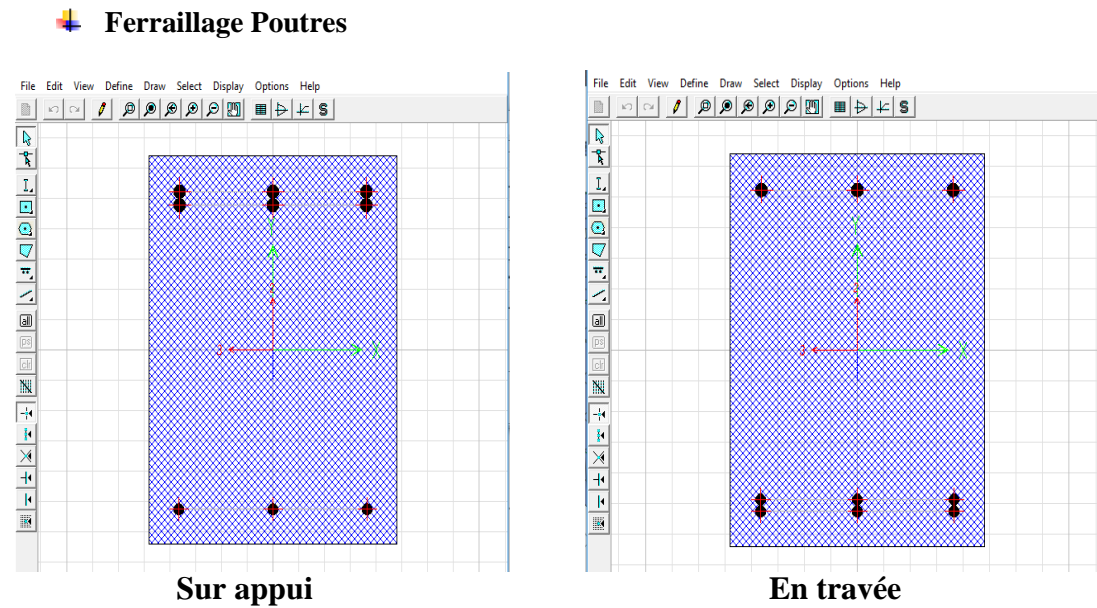


Figure IV.9 : Introduction de ferrailage aux poteaux.





**Figure IV.10** : Introduction de ferrailage aux poutres.

#### IV.6.4 Introduction des rotules plastiques

Pour nos modèles de calculs, nous allons introduire dans les poutres et les poteaux des rotules plastiques avec des lois de comportements définies par le logiciel. Extraites du règlement américain **FEMA 356** Comme suit :

- Poteaux : rotules de flexion de type (**P- M<sub>2</sub>-M<sub>3</sub>**).
- Poutres : rotules de flexion de type (**M<sub>3</sub>**).

Pour introduire les rotules plastiques, on va suivre le cheminement suivant :

✓ Define  $\longrightarrow$  Section propities  $\longrightarrow$  Hinge propities.

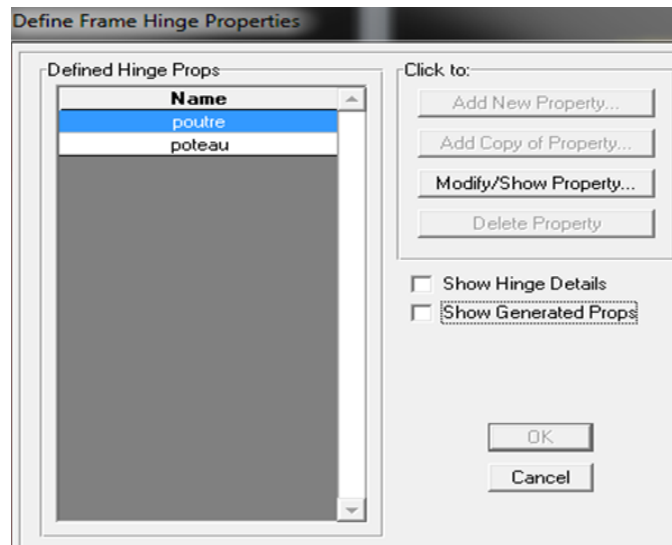


Figure IV.11 : Définition des rotules dans les poteaux et les poutres.

✚ Poutres (flexion M3) / Poteaux (P-M2-M3)



Figure IV.12 : Propriétés des rotules poutres.

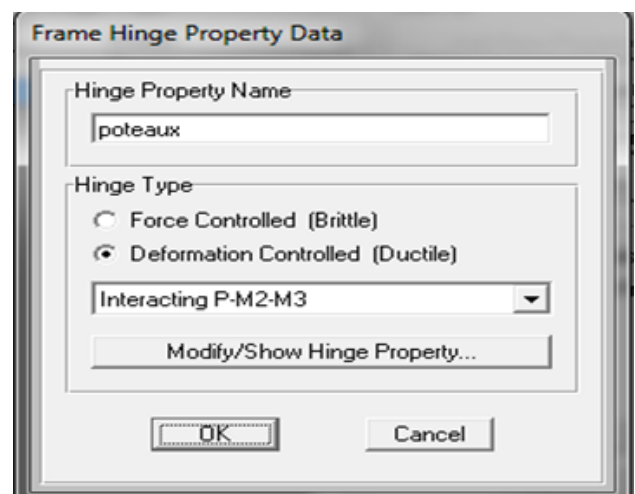


Figure IV.13: Propriétés des rotules poteaux.

- Les niveaux de dommage qui contrôle la loi de comportement des rotules plastiques, définies précédemment sont comme suit :

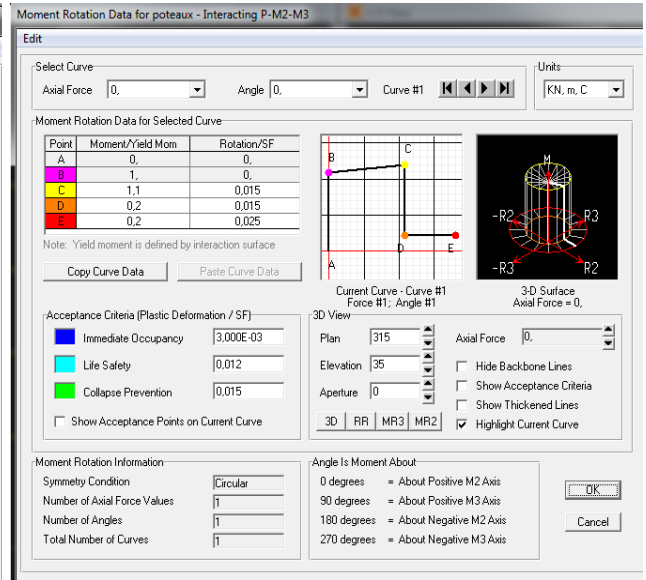
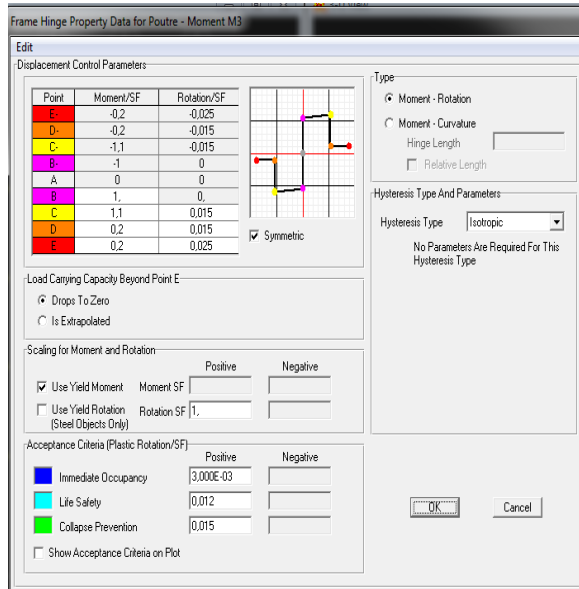


Figure IV.14 : Loi de comportement des rotule de type M3.

Figure IV.15 : Loi de comportement des rotule de type couplées P-M2-M3.

a) Les rotules de flexion « M3 » sont introduites aux niveaux des zones nodales des poutres comme suit :

- ✓ Select → Frame section → Poutres → Assign → Frame → Hinges.

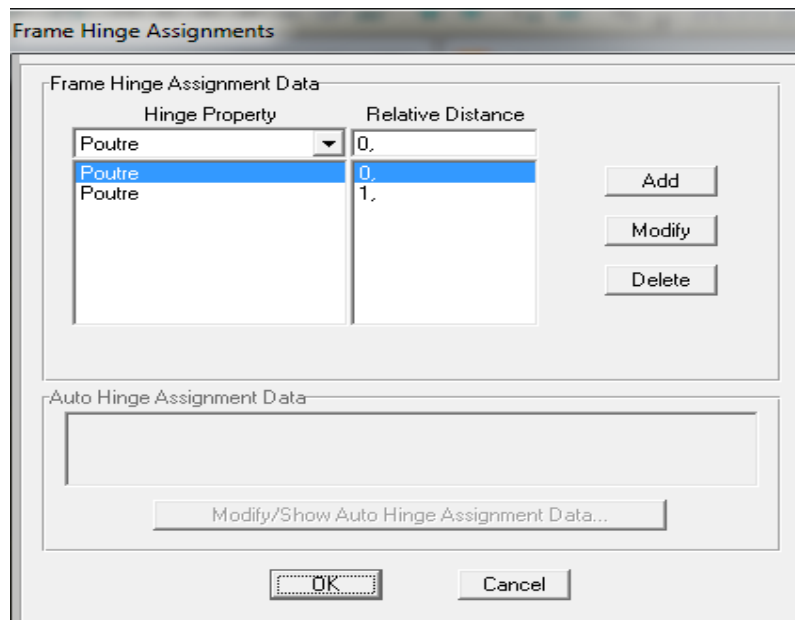


Figure IV.16 : Introduction des rotules plastiques aux poutres.

b) Les rotules de « P-M2-M3 » sont introduites aux niveaux des zones nodales des poteaux comme suit :

- ✓ Select → Frame section → Poteaux → Assign →  
Frame → Hinges.

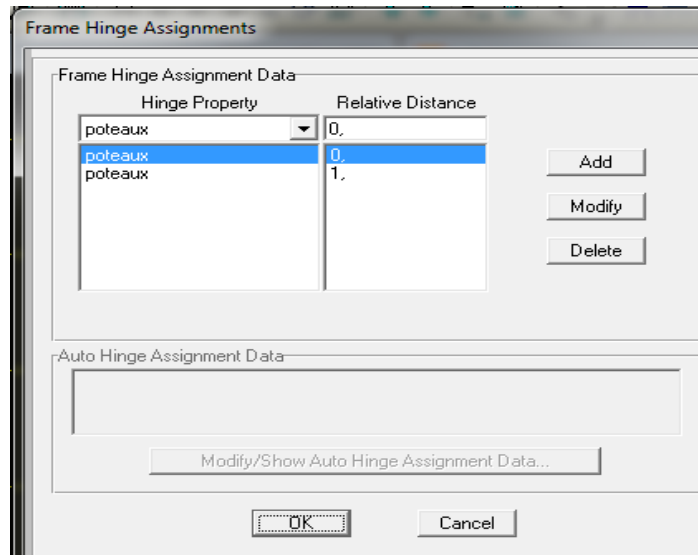


Figure IV.17: Introduction des rotules plastiques aux poteaux.

#### IV.6.5 Définition de chargement de l'analyse Push-over

L'analyse Push-over est exécutée en appliquant des charges horizontales distribuées sur la hauteur de la structure incrémentée de façon progressive jusqu'à ce que le déplacement au sommet de la structure atteigne un déplacement cible (Analyse en mode "Déplacement contrôlé").

Ce type d'analyse est mené lorsque les charges ne sont pas connues, ou lorsque l'augmentation des charges pendant l'analyse est susceptible de provoquer l'instabilité de la structure. En plus de l'analyse en mode "Déplacement contrôlé", le programme offre la possibilité d'effectuer des analyses en mode "Force contrôlée", ce type d'analyse est choisie lorsque les charges appliquées à la structure sont connues et ne risquent pas de provoquer l'instabilité de la structure.

##### 1. Sous charge gravitaire

- ✓ Define → load cases → add new load case →

Name : gravite.

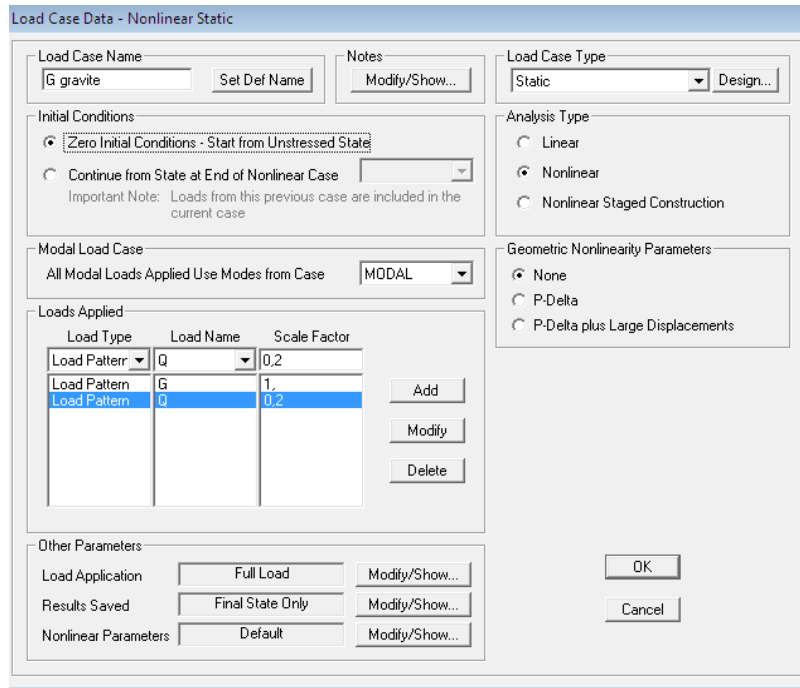


Figure IV.18: Définition de la charge gravitaire dans l’analyse Push-over.

2. Sous charge horizontale

a) Sens x-x

✓ Define → load case → add new load case →

Name : Push xx.

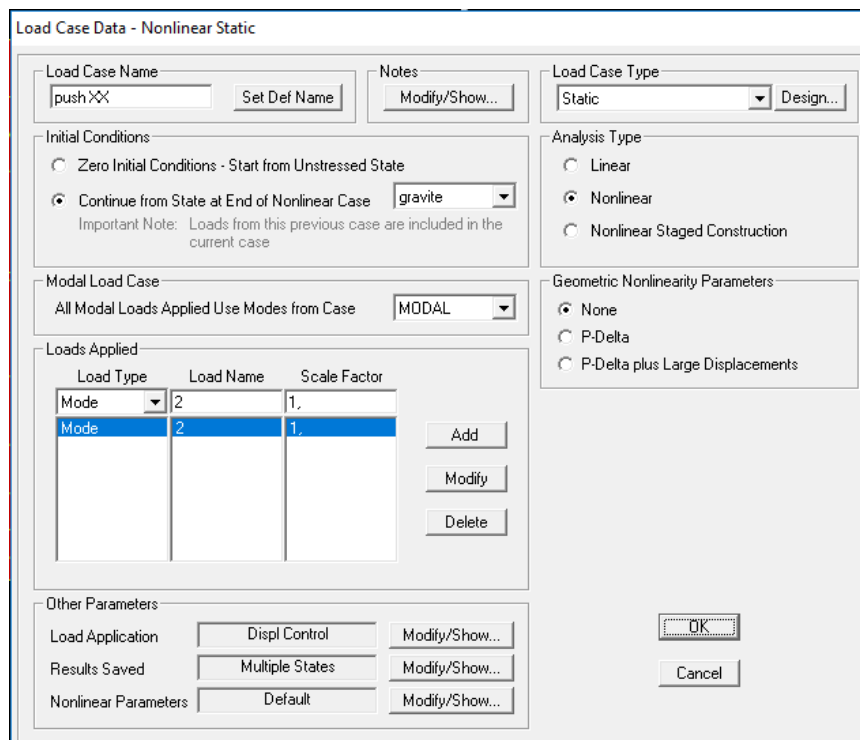


Figure IV.19 : Définition du chargement de l’analyse Push-over dans le sens x-x (étape 1).

Le déplacement cible est définie par défaut par le logiciel en fonction de la hauteur de l'ouvrage

$$D_{cible} = \frac{h}{25} [27].$$

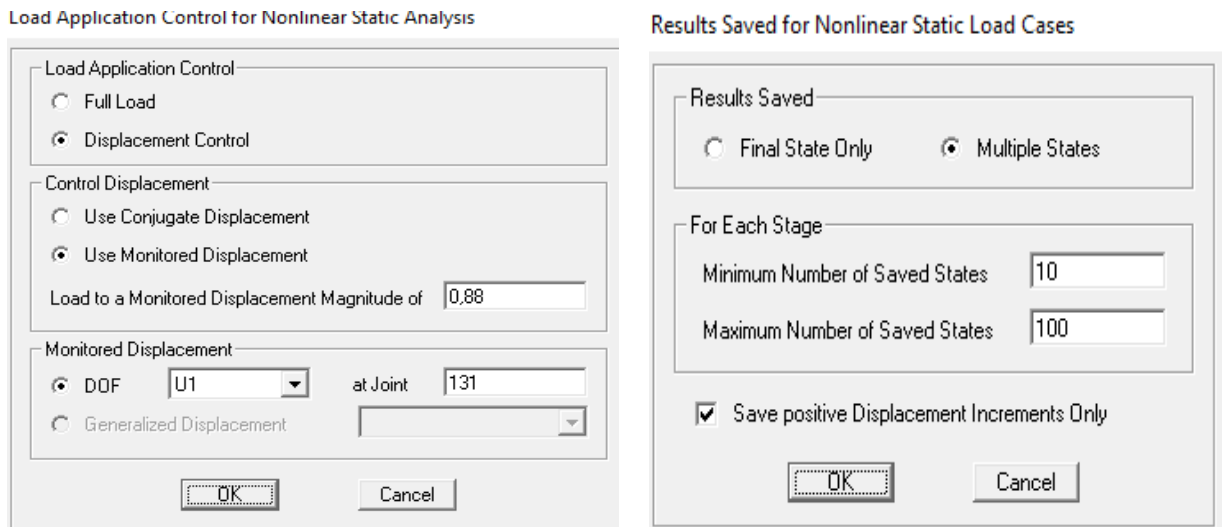


Figure IV. 20 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens x-x (étape 2).

**b) Sens y-y :**

✓ Define → load cases → add new load case →

Name : Push yy.

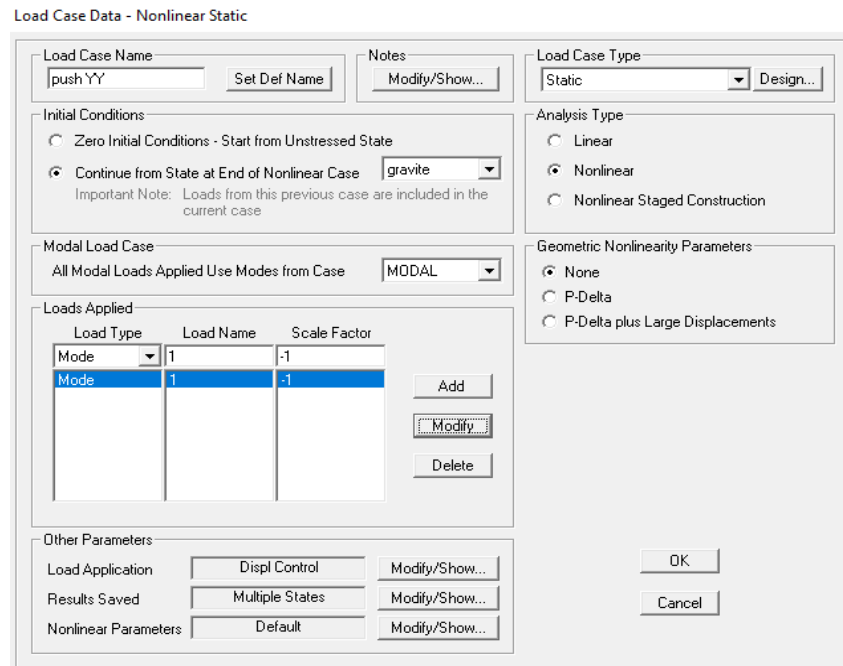


Figure IV. 21 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens y-y (étape 1).

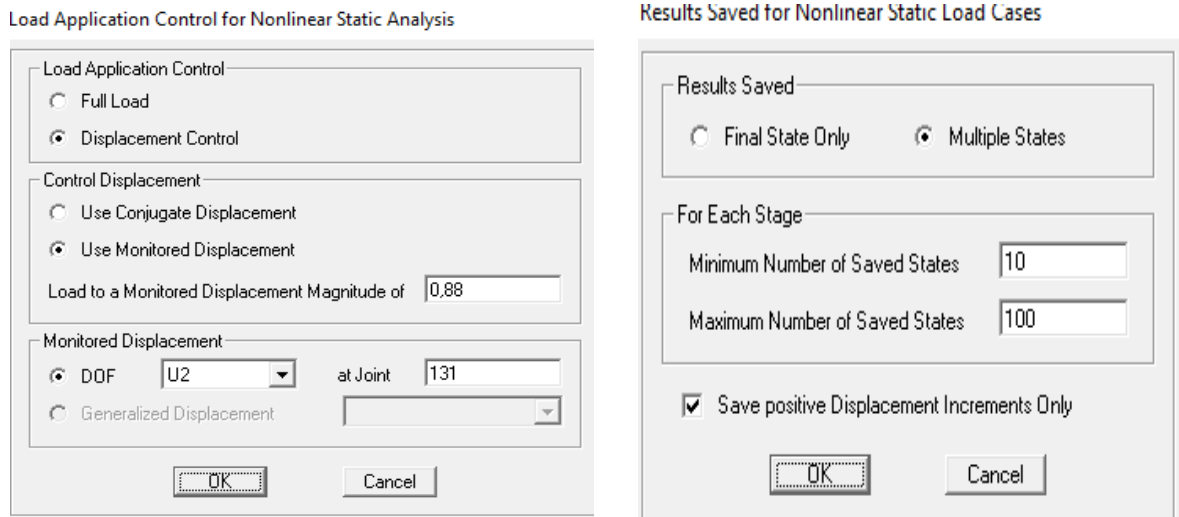


Figure IV. 22 : Définition du chargement de l'analyse Push-over dans le sens y-y (étape 2).

#### IV.6.6 Modélisation de l'action sismique

Pour la méthode de spectre de capacité "ATC40" qui est basée sur les déplacements, l'action sismique est représentée par les spectres de dimensionnement élastiques en déplacement – accélération, format (A- D). Il est à noter que ces types de spectres propres aux différents types de sol n'existent pas dans les Règles Parasismiques algériennes RPA.

En utilisant la méthode d'établissement du spectre format (A-D), il faut donc introduire les coefficients  $C_a$  (coefficient sismique d'accélération) et  $C_v$  (coefficient sismique de vitesse) qui permettent de caractériser le type de sol et l'action sismique. Dans notre cas, la structure est située dans la zone III, et sur un sol de classe S2, donc  $C_a = 0.33$  et  $C_v = 0.45$  [28] (Annexe A).

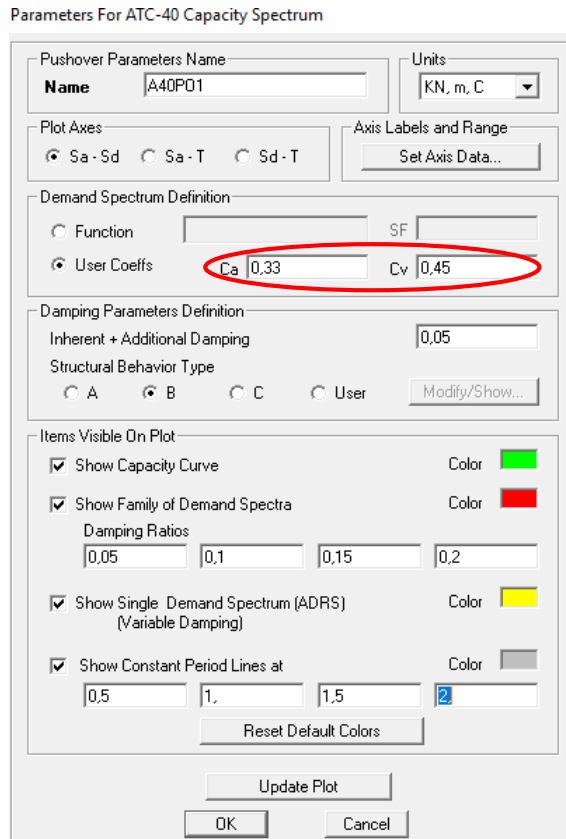


Figure IV. 23 : Introduction des coefficients Ca, Cv.

### IV.7 Analyse statique non linéaire

On clique sur analyse → run analyses, une boite de dialogue apparaitre.

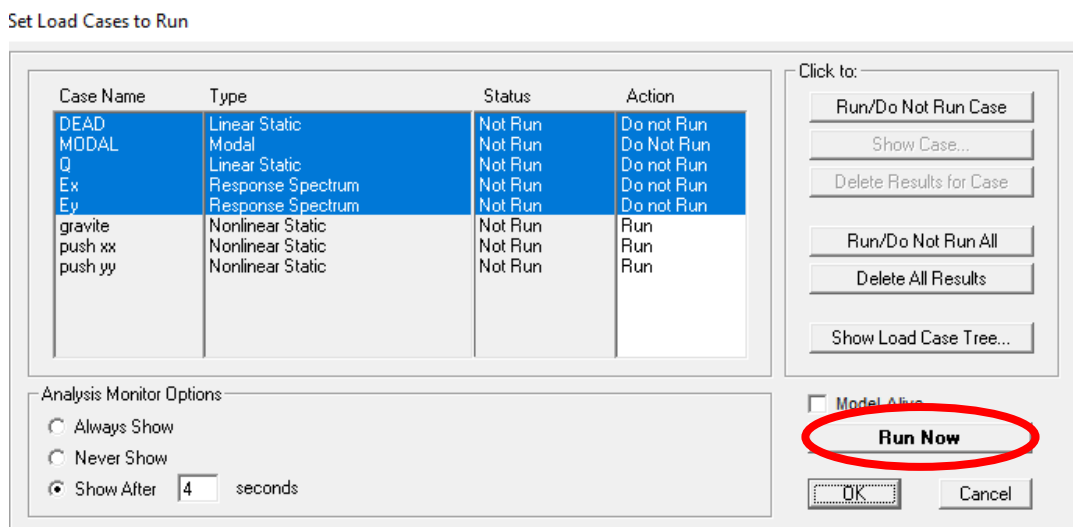


Figure IV. 24 : Définir les cas de charge à exécuter.



Pour visualiser la courbe de capacité :

✓ Display  $\longrightarrow$  Show Static Pushover Curve.

### IV.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les modèles des structures ainsi la modélisation et l'application de la méthode Push-over et comment introduire les lois de comportement des matériaux (Béton/ Acier), ainsi que les lois de comportement des éléments résistants (poteaux, poutres).

Les résultats de cette analyse seront présentés et interprétés dans les chapitres suivants.

**CHAPITRE V :**  
**L'INFLUENCE DE L'IRREGULARITE EN**  
**PLAN**

# CHAPITRE V : L'INFLUENCE DE L'IRREGULARITE EN PLAN

## V.1 Introduction

Les analyses statiques non linéaires (Push-Over) sont effectuées sur les bâtiments présentés au chapitre 4 en tenant compte de chacune des deux variantes régulière et irrégulière en plan, 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 les bâtiments donnant.

On effectue une comparaison des résultats obtenus, l'analyse comparative porte sur leurs caractéristiques : l'effort tranchant à la base ; les points de performances ; la demande en ductilité ainsi l'indice de dégradation et les distributions des rotules plastiques.

## V.2 Résultats de l'analyse Push-over des structures

### V.2.1 Résultats de la variante régulière (structures de référence)

✚ Analyse des structures dans le sens (x-x) :

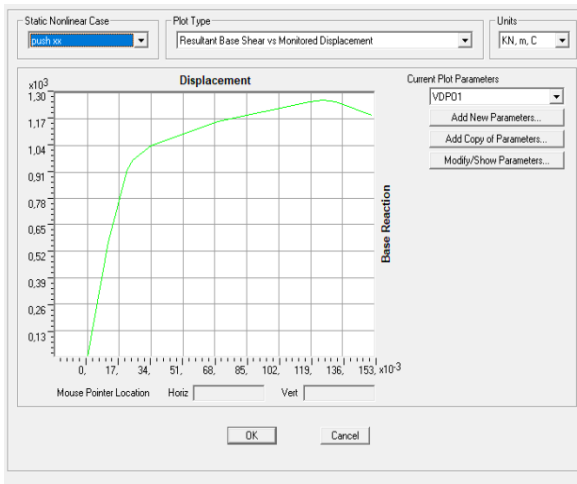


Figure V.1 : Courbe de capacité R+3.

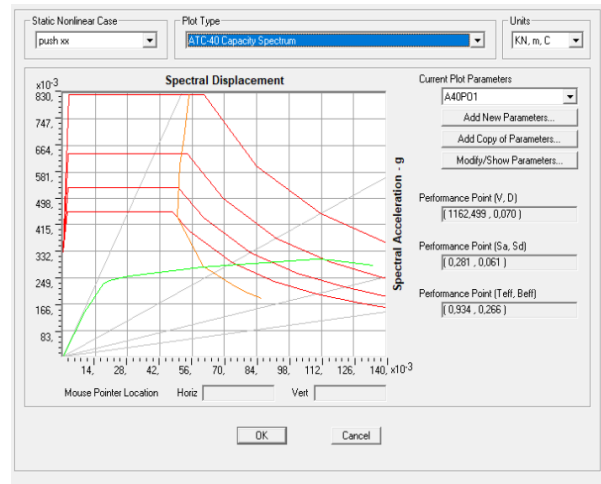


Figure V.2 : Courbe de capacité spectrale R+3.

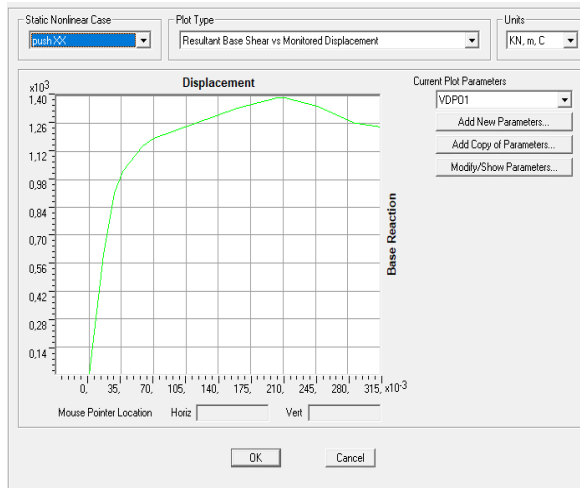


Figure V.3 : Courbe de capacité R+6.

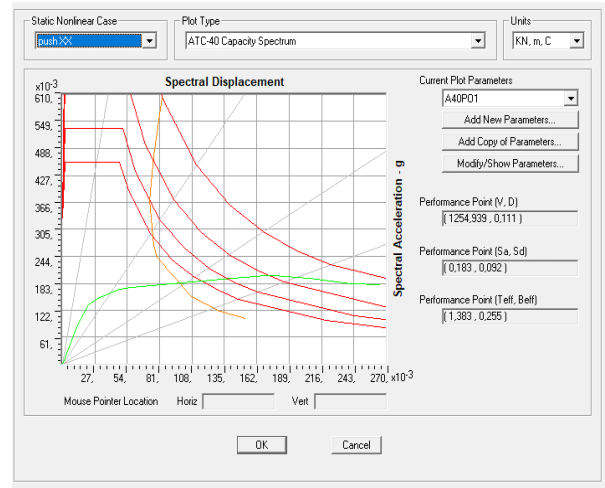


Figure V.4 : Courbe de capacité spectrale R+6.

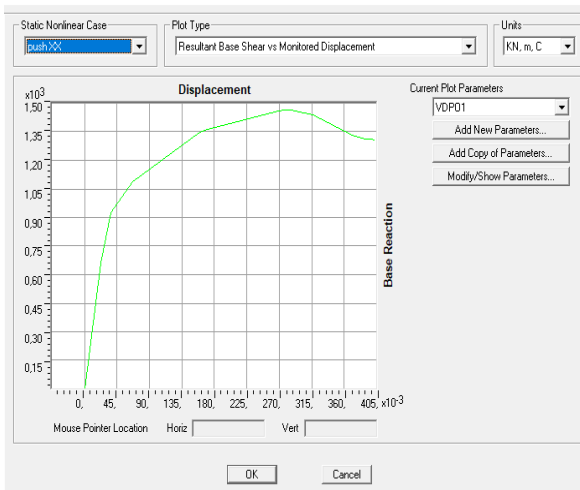


Figure V.5 : Courbe de capacité R+9.

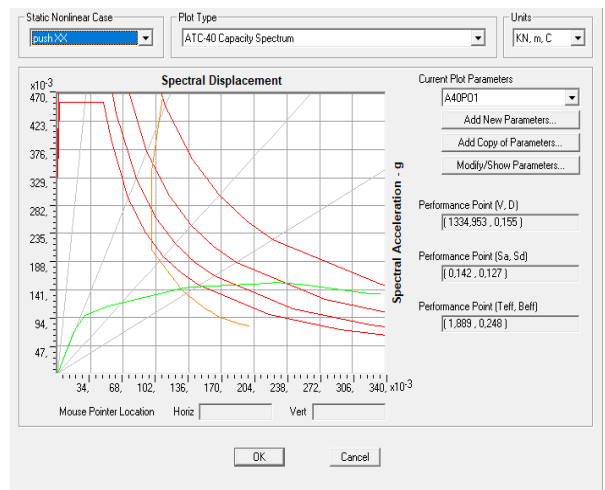


Figure V.6 : Courbe de capacité spectrale R+9.

**+** Analyse des structures dans le sens (y-y) :

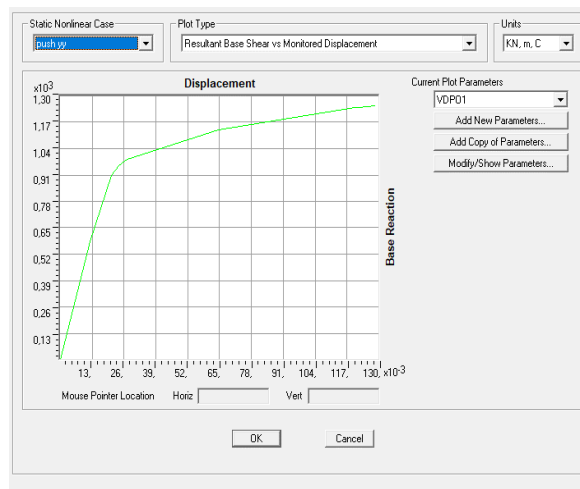


Figure V.7 : Courbe de capacité R+3.

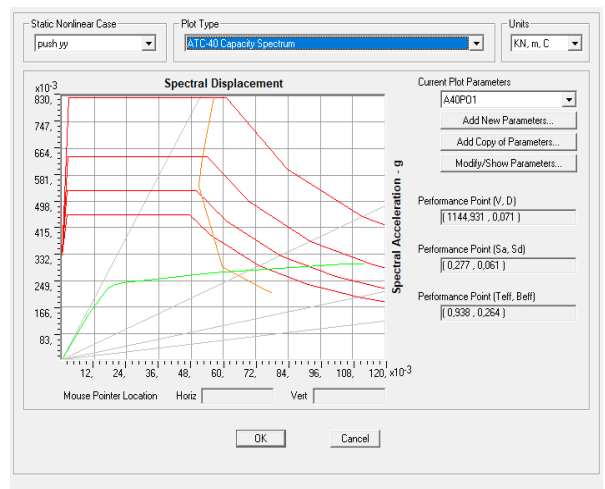


Figure V.8 : Courbe de capacité spectrale R+3.

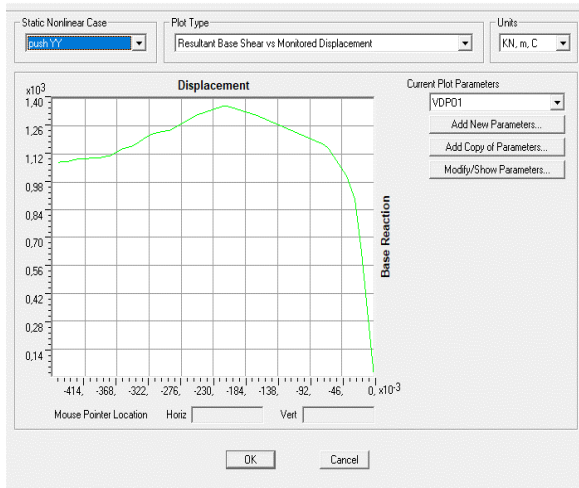


Figure V.9 : Courbe de capacité R+6.

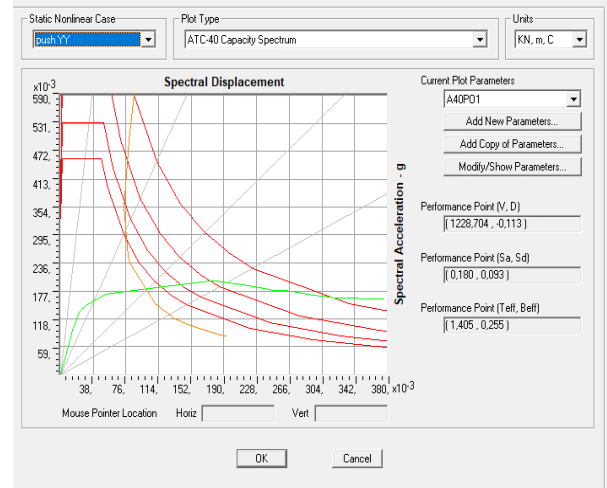


Figure V.10 : Courbe de capacité spectrale R+6.

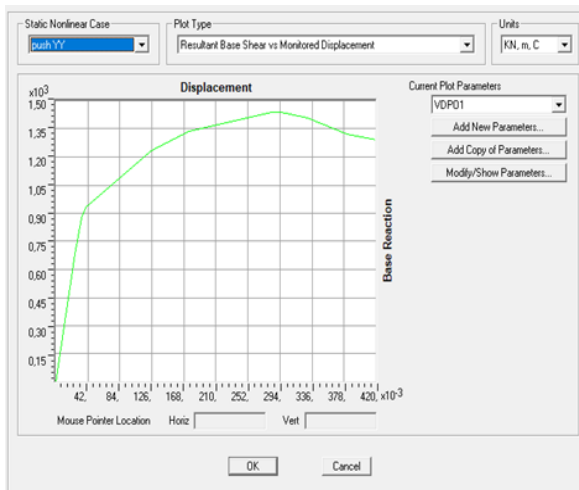


Figure V.11 : Courbe de capacité R+9.

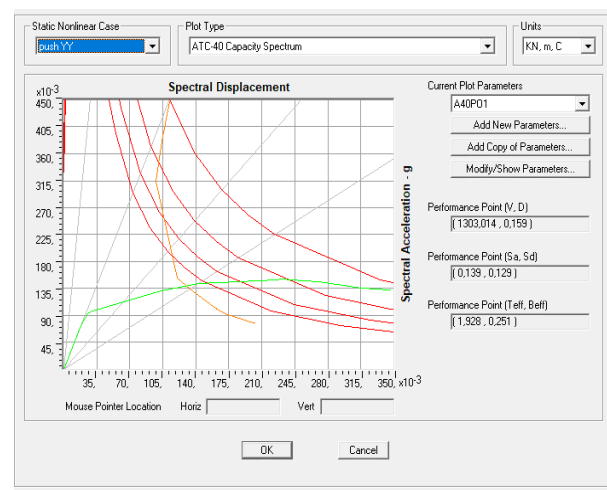



Figure V.12 : Courbe de capacité spectrale R+9.

## V.2.2 Résultats de la variante irrégulière en plan

### a) Structures faiblement irrégulières en plan

 Analyse des structures dans le sens (x-x) :

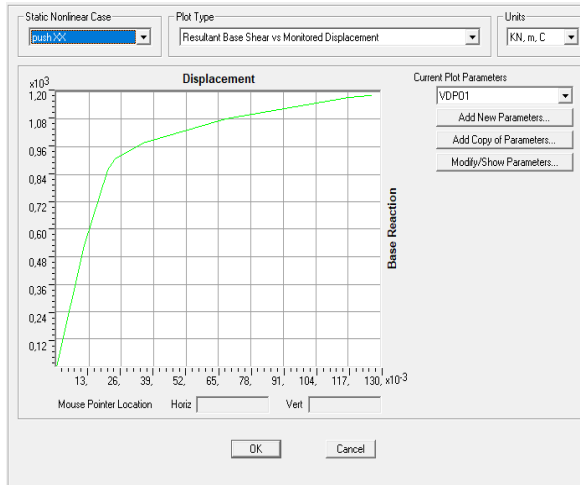


Figure V.13 : Courbe de capacité R+3.

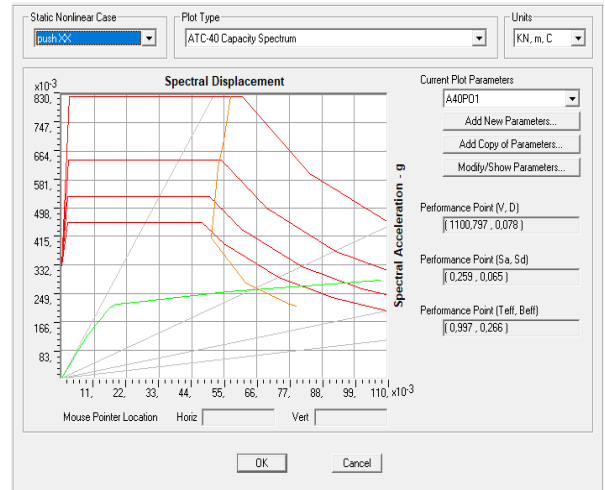


Figure V.14 : Courbe de capacité spectrale R+3.

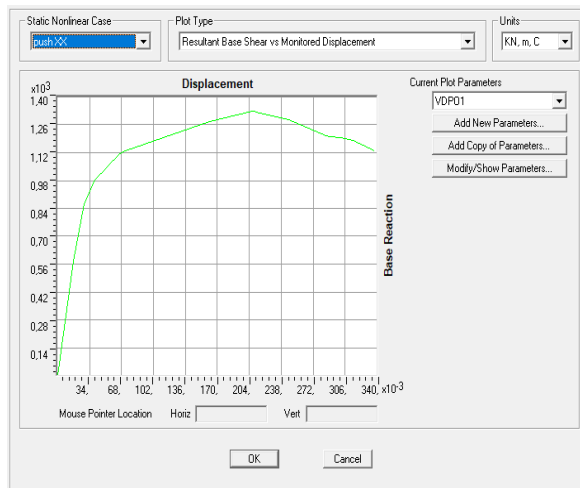


Figure V.15 : Courbe de capacité R+6.

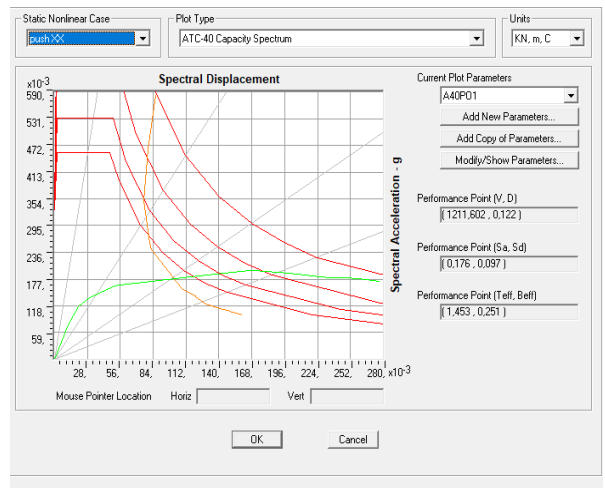


Figure V.16 : Courbe de capacité spectrale R+6.

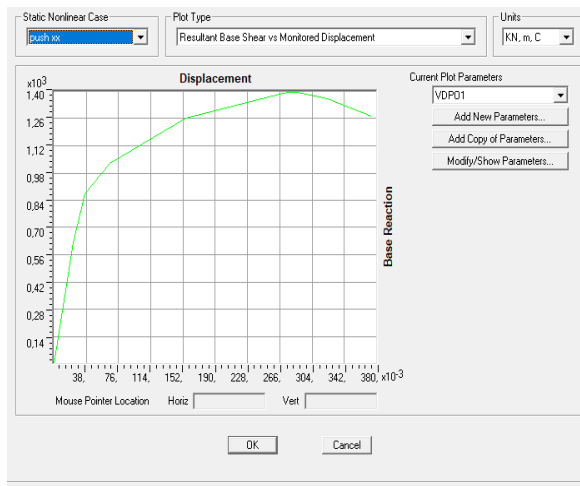


Figure V.17 : Courbe de capacité R+9.

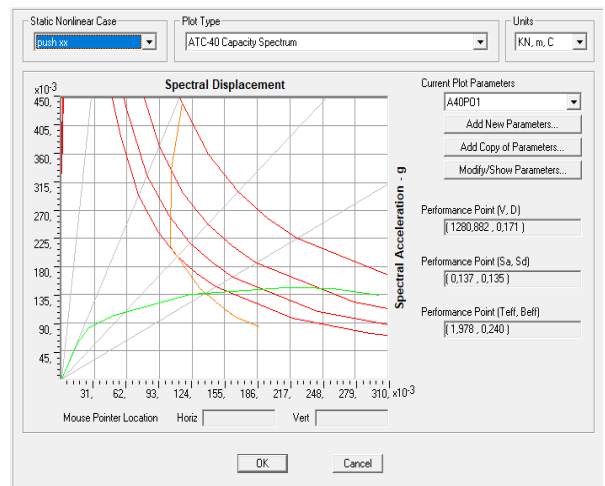


Figure V.18 : Courbe de capacité spectrale R+9.

✚ Analyse des structures dans le sens (y-y) :

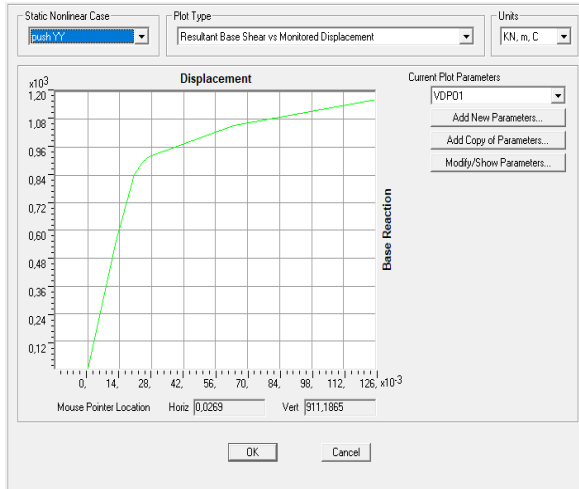


Figure V.19 : Courbe de capacité R+3.

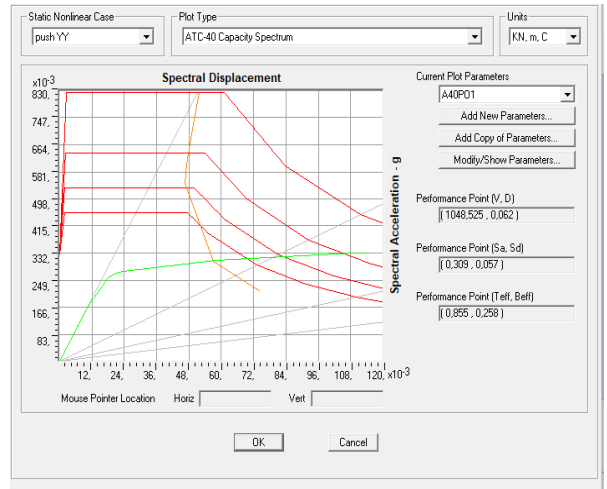


Figure V.20 : Courbe de capacité spectrale R+3.

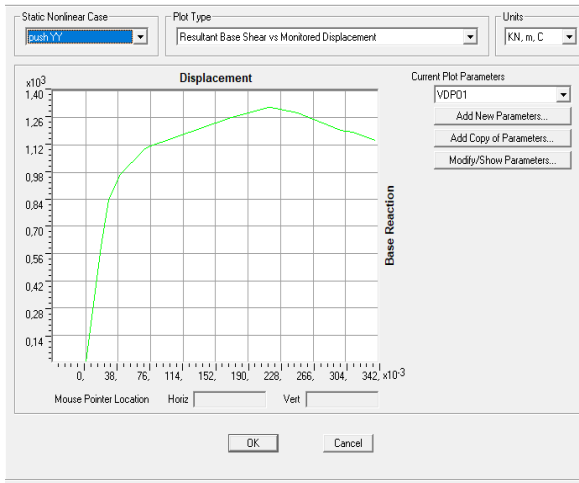


Figure V.21 : Courbe de capacité R+6.

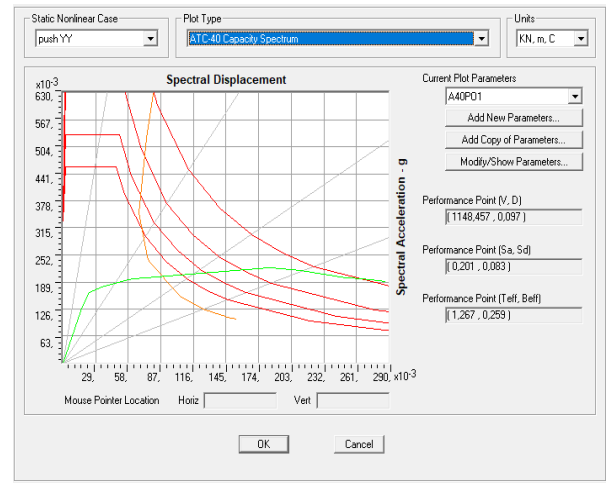


Figure V.22 : Courbe de capacité spectrale R+6.

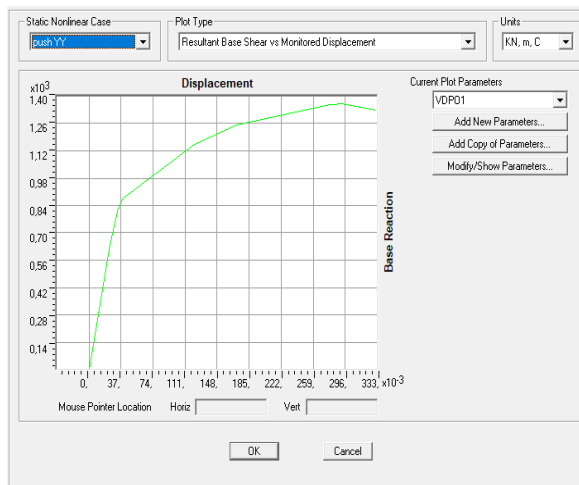


Figure V.23 : Courbe de capacité R+9.

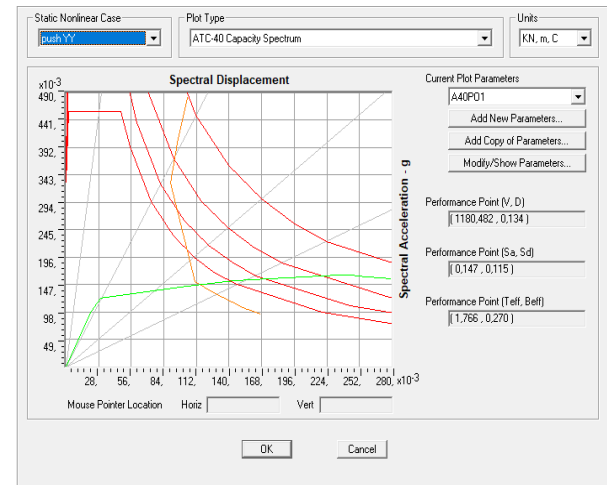


Figure V.24 : Courbe de capacité spectrale R+9.

b) Structures fortement irrégulières en plan

✚ Analyse des structures dans le sens (x-x) :

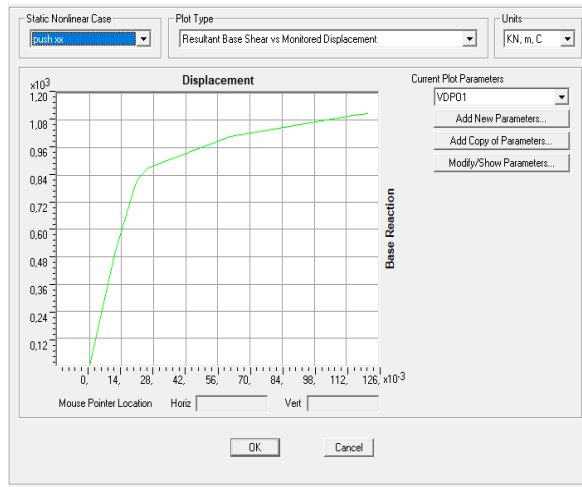


Figure V.25 : Courbe de capacité R+3.

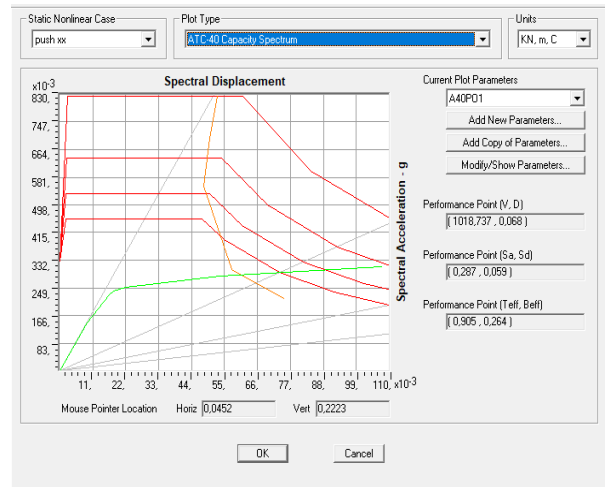


Figure V.26 : Courbe de capacité spectrale R+3.

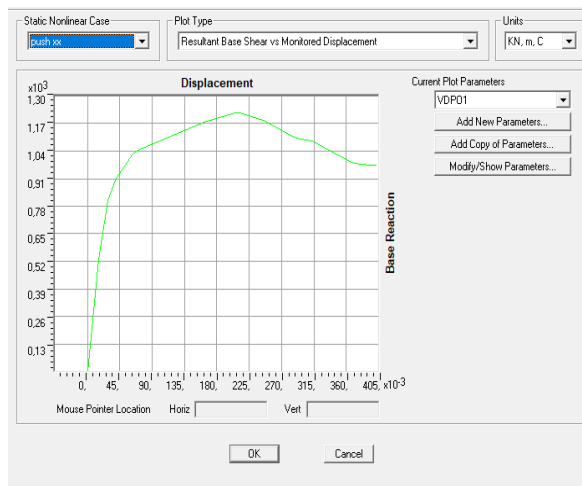


Figure V.26 : Courbe de capacité R+6.

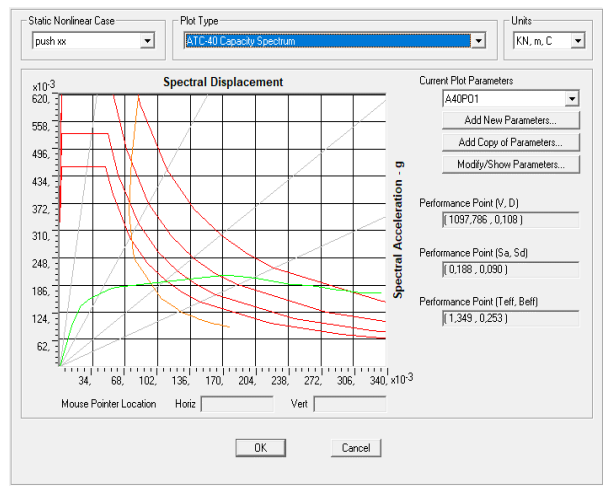


Figure V.27 : Courbe de capacité spectrale R+6.

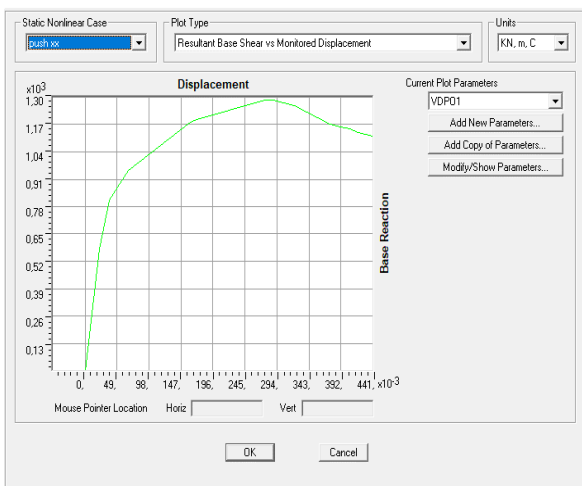


Figure V.28 : Courbe de capacité R+9.

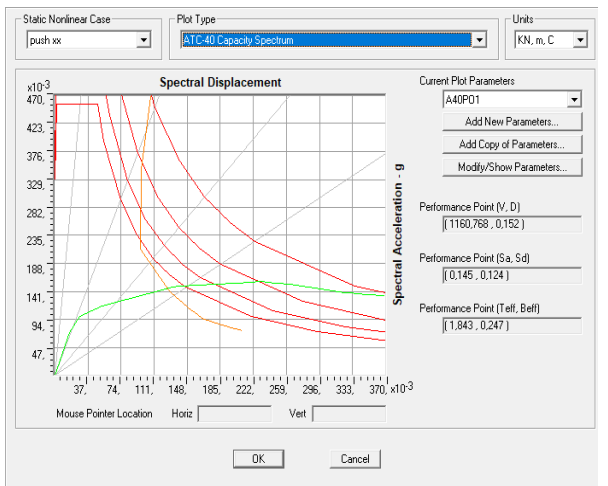


Figure V.29 : Courbe de capacité spectrale R+9.



➤ Analyse des structures dans le sens (y-y) :

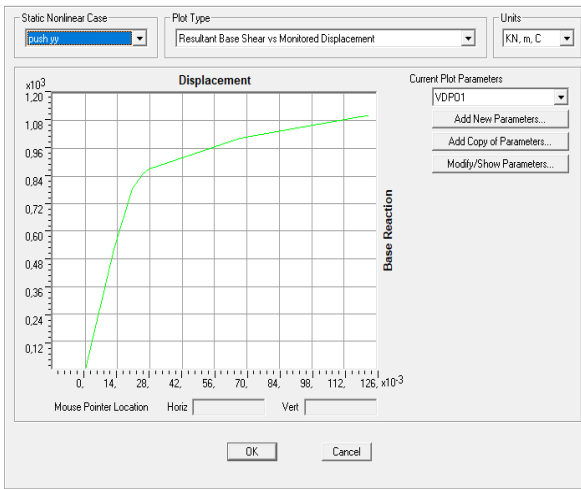


Figure V.30 : Courbe de capacité R+3.

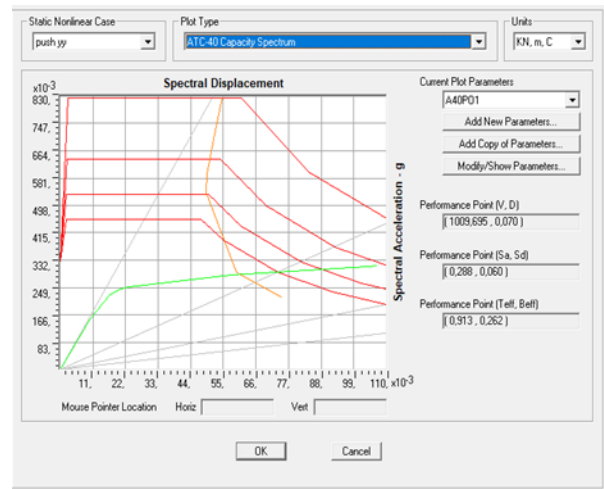


Figure V.31 : Courbe de capacité spectrale R+3.

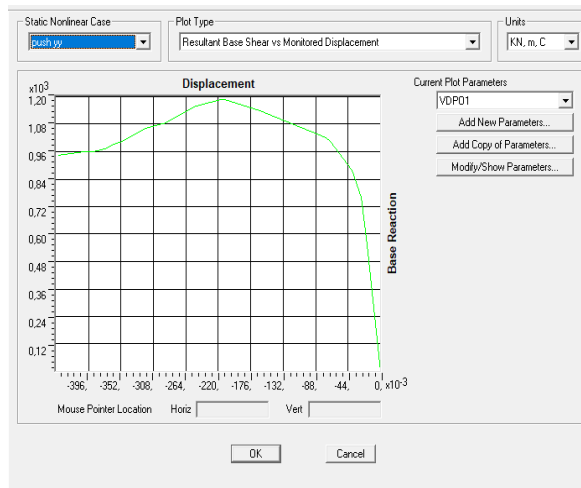


Figure V.32 : Courbe de capacité R+6.

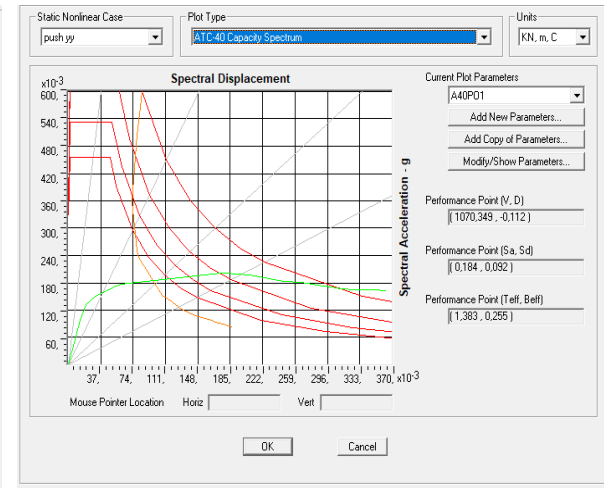


Figure V.33 : Courbe de capacité spectrale R+6.

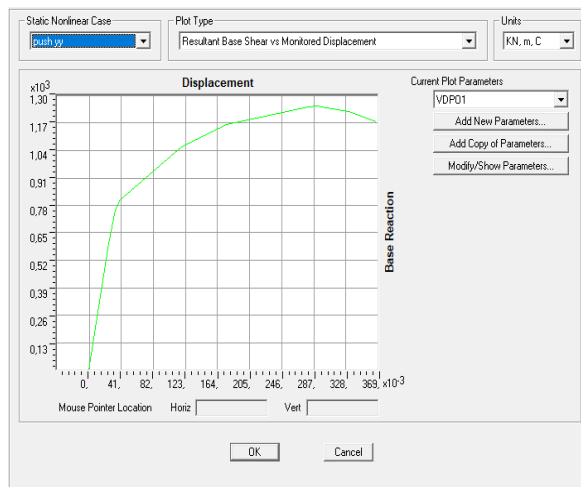


Figure V.34 : Courbe de capacité R+9.

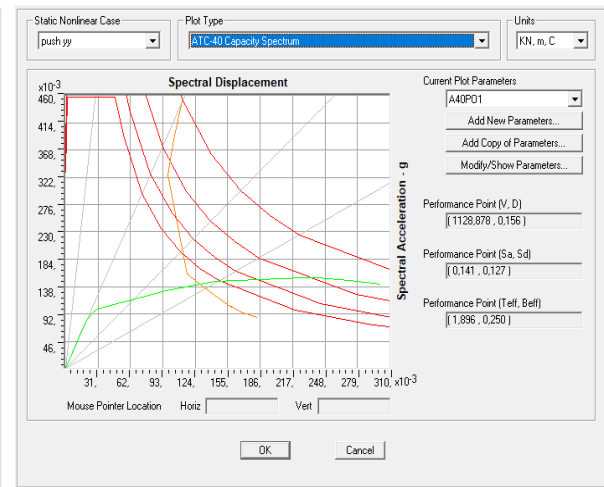


Figure V.35 : Courbe de capacité spectrale R+9.

Au terme de ces analyses non linéaires, nous procédons au tracé des courbes de capacité pour les bâtiments. Ces courbes, permettent de nous renseigner sur la réponse du modèle suivant les charges de Push, dont on peut clairement distinguer la phase élastique du comportement (état réversible), et la phase poste élastique (état irréversible), jusqu'au point de performance qui représente le dernier point de résistance de cette structure.

Les résultats exprimés dans cette étude, sont en fonction de la raideur initiale de la structure  $K_e$ , la raideur de la structure au point de performance  $K_p$ , la demande de ductilité  $\mu_d$  et en fin l'indice de dégradation global  $I_d$  [29].

### V.3 Comparaison des résultats obtenus

Dans ce qui suit, on passe à la comparaison des résultats des structures régulières (références) et celle irrégulières en plan obtenus selon la direction (x-x) et (y-y) pour les trois types de structures (R+3, R+6, R+9).

**Tableau V.1** : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+3** dans le sens **x-x**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu_d$ ( $dp/dy$ )	$I_d$ ( $1 - \frac{K_p}{K_e}$ )
	$V_y$ (kN)	$dy$ (m)	$K_e$ (KN/m)	$V_p$ (kN)	$dp$ (m)	$K_p$ (KN/m)		
<b>R+3 régulière</b>	907,7966	0,019	47778,768	1162,499	0,07	16607,1286	3.68	65%
<b>R+3 faiblement irrégulière</b>	850,1695	0,0202	42087,599	1100,797	0,078	14112,7821	3.86	66%
<b>R+3 fortement irrégulière</b>	825,7627	0,0215	38407,567	1018,737	0,068	14981,4265	3.16	61%

**Tableau V.2 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+6** dans le sens **x-x**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_p}{K_e}$ )
	Vy (kN)	dy (m)	Ke (KN/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (KN/m)		
<b>R+6 régulière</b>	920,687	0,0274	33601,7153	1254,939	0,111	11305,756	4,05	66%
<b>R+6 faiblement irrégulière</b>	861,7288	0,0277	31109,343	1211,602	0,122	9931,1639	4,4	68%
<b>R+6 fortement irrégulière</b>	815,2543	0,0283	28807,5724	1097,786	0,108	10164,685	3,81	64%

**Tableau V.3 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+9** dans le sens **x-x**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_p}{K_e}$ )
	Vy (kN)	dy (m)	Ke (KN/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (KN/m)		
<b>R+9 régulière</b>	925,4238	0,0352	26290,4489	1334,953	0,155	8612,6	4,4	67%
<b>R+9 faiblement irrégulière</b>	873,2203	0,036	24256,1194	1280,882	0,171	7490,53801	4,75	69%
<b>R+9 fortement irrégulière</b>	810,8475	0,0371	21855,7278	1160,768	0,152	7636,63158	4,09	65%

**Tableau V.4 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+3** dans le sens **y-y**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_p}{K_e}$ )
	Vy (kN)	dy (m)	Ke (KN/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (KN/m)		
<b>R+3 régulière</b>	912,2034	0,021	43438,2571	1144,931	0,071	16125,7887	3,38	62%
<b>R+3 faiblement irrégulière</b>	837,9661	0,0196	42753,3724	1048,525	0,062	16911,6935	3,16	60%
<b>R+3 fortement irrégulière</b>	785,0847	0,0186	42208,8548	1009,695	0,07	14424,2143	3,76	65%

**Tableau V.5 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+6** dans le sens **y-y**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_p}{K_e}$ )
	Vy (kN)	dy (m)	Ke (KN/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (KN/m)		
<b>R+6 régulière</b>	925,4238	0,0296	31264,3176	1228,704	0,113	10873,4867	3,81	65%
<b>R+6 faiblement irrégulière</b>	843,7458	0,0271	31134,5314	1148,457	0,097	11839,7629	3,57	62%
<b>R+6 fortement irrégulière</b>	768,8135	0,0261	29456,4559	1070,349	0,112	9556,6875	4,29	67%

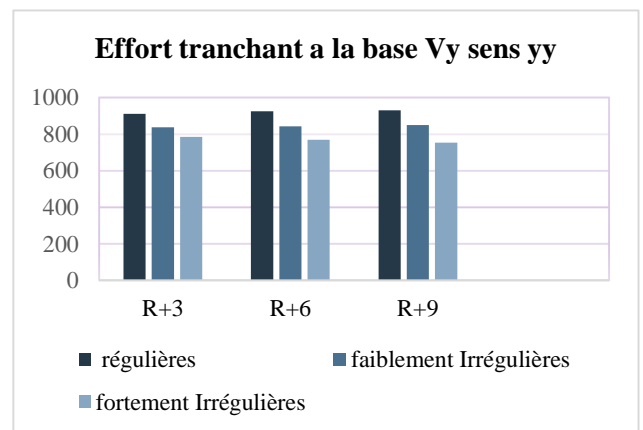
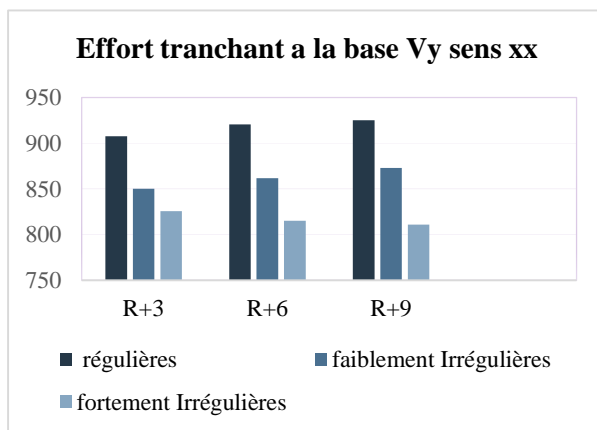
**Tableau V.6 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+9** dans le sens **y-y**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_p}{K_e}$ )
	Vy (kN)	dy (m)	Ke (KN/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (KN/m)		
<b>R+9 régulière</b>	930,5085	0,038	24487,0658	1303,014	0,159	8195,0566	4,18	66%
<b>R+9 faiblement irrégulière</b>	849,4915	0,0350	24271,1857	1180,482	0,134	8809,56716	3,82	64%
<b>R+9 fortement irrégulière</b>	753,5593	0.0332	22697,5693	1128,878	0,156	7236,39744	4,69	68%

➤ **Constations**

**NB :** ces constations sont similaire pour les 3 types des structures (**R+3, R+6, R+9**)

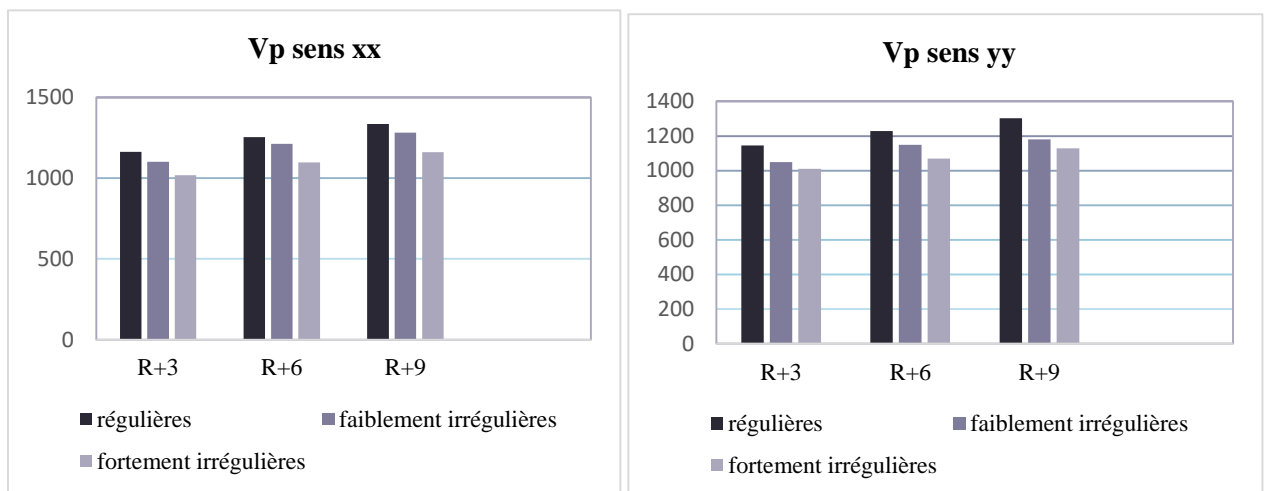
✚ En premier lieu, on peut remarquer pour les deux directions x,y, une diminution progressive de l'effort tranchant élastique (**Vy**) de la structure régulière vers la structure fortement irrégulière, qui est dû à la diminution de la masse et la rigidité à cause de l'enlèvement des panneaux dans les planchers ainsi que quelques poteaux par rapport à la structure de référence (régulière).



Histogrammes de l'effort tranchant élastique

✚ À propos du déplacement élastique (**dy**), nous avons constaté une variation inverse entre les deux directions :

- Les déplacements élastiques s'agrandissent respectivement de la structure régulière aux structures fortement irrégulières en plan, et cela dû à la torsion significative dans le sens x. qui provoque une augmentation de ces derniers.  
Cela peut s'expliquer par la distribution non uniforme de la masse et la rigidité ainsi à la non symétrie du plancher du bâtiment. ( $P_s$  :  $b_x=12m$  ,  $b_y=9m$ ) [30].
- Par contre la variation des déplacements suivant le sens y est en diminution de la structure régulière aux fortement irrégulières en plan, cela est justifié par la relation proportionnelle entre la masse et les déplacements.
- ✚ Afin d'évaluer la vulnérabilité sismique de la structure (détermination de point de performance  $V_p, dp$ ) qui désigne le niveau de performance de la structure :



Histogrammes de l'effort tranchant plastique

- L'effort tranchant plastique ( $V_p$ ) de la structure régulière est plus important que celui des structures irrégulières pour les deux directions. Dans ce cas, la structure régulière donne une performance meilleure à celles des structures irrégulières, donc on peut déduire que la structure régulière est plus ductile.
- Concernant le déplacement de demande ( $dp$ ), on constate qu'il varie d'une façon aléatoire d'une structure à l'autre pour les deux directions. Pour mieux comprendre le comportement sismique réel des structures on a choisi un autre critère qui se base sur le niveau d'endommagement des structures. On doit vérifier les mécanismes de ruine dans les éléments structuraux jusqu'à l'apparition des rotules de type ( $CtoD$ ).

Les résultats sont récapitulés dans les tableaux suivants :

Tableau V.7 : Propagations des rotules suivant le sens x-x.

		TABLE : Push-over Curve : Push xx										
Structures		Step	Displacement (m)	Base force (KN)	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
<b>R+3</b>	Régulière	6	0,118	1256,057	756	44	56	44	0	4	0	0
	Faiblement régulière	6	0,117	1176,321	707	43	49	46	0	3	0	0
	Fortement irrégulière	6	0,115	1104,339	662	38	55	36	0	1	0	0
<b>R+6</b>	Régulière	7	0,204	1389,943	1376	54	72	66	0	14	0	0
	Faiblement irrégulière	7	0,205	1313,577	1291	43	75	66	0	9	0	0
	Fortement irrégulière	7	0,205	1219,196	1203	46	67	62	0	8	0	0
<b>R+9</b>	Régulière	6	0,268	1460,395	1990	30	128	100	0	12	0	0
	Faiblement irrégulière	6	0,269	1390,412	1866	25	124	91	0	14	0	0
	Fortement irrégulière	6	0,269	1282,560	1743	24	115	88	0	10	0	0

Tableau V.8 : Propagations des rotules suivant le sens y-y.

		TABLE: Push-over Curve : Push yy										
Structures		Step	Displacement (m)	Base force (KN)	AtoB	BtoIO	IOtoLS	LStoCP	CPtoC	CtoD	DtoE	BeyondE
<b>R+3</b>	Régulière	6	0,120	1241,936	764	40	54	44	0	0	0	0
	Faiblement régulière	6	0,120	1156,833	714	40	50	43	0	1	0	0
	Fortement irrégulière	6	0,122	1103,188	660	44	49	43	0	1	0	0
<b>R+6</b>	Régulière	7	0,210	1359,845	1386	49	69	60	0	18	0	0
	Faiblement irrégulière	7	0,210	1288,662	1301	43	61	65	0	14	0	0
	Fortement irrégulière	7	0,211	1187,481	1215	40	60	61	0	10	0	0
<b>R+9</b>	Régulière	6	0,277	1436,220	1997	33	120	98	0	12	0	0
	Faiblement irrégulière	6	0,278	1356,120	1874	31	118	85	0	11	0	0
	Fortement irrégulière	6	0,280	1246,989	1751	29	104	86	0	10	0	0



- Ces résultats montrent : après chaque étape (Step) de chargement de l'analyse push-over on a remarqué que les rotules plastiques de type (**CtoD**) se forment exactement jusqu'au pas 6 et 7 pour les trois types des structures suivant les deux sens.

D'autre part, à ce niveau de steps et en présence d'un grand chargement latéral on constate l'apparition des rotules de type d'effondrement (C) pour les structures régulières suivant les deux directions, par contre l'effondrement des structures irrégulières soit sous un effet d'une force latérale moins importante.

**NB** : malgré la différence marquée dans les déplacements des demandes **dp**, les résultats sont considérés acceptables vis-à-vis de la force latérale.

➤ **Propagations des rotules**

Le logiciel SAP 2000.V14 nous permet de donner des illustrations graphiques sur la formation des rotules plastiques à n'importe quel point de la structure. Les différentes couleurs indiquent l'état de déformation de chaque section et ainsi son degré de pénétration dans le domaine plastique.

Le mécanisme de ruine, constitue un outil très important dans l'analyse des dommages causés par une action sismique, car l'apparition des rotules plastiques dans les éléments structuraux conditionne l'état de stabilité structurelle de l'ensemble de l'ossature.

La figure montre le mécanisme de ruine de la variante fortement irrégulière pour la structure R+6 en arrivant jusqu'à le step 7.

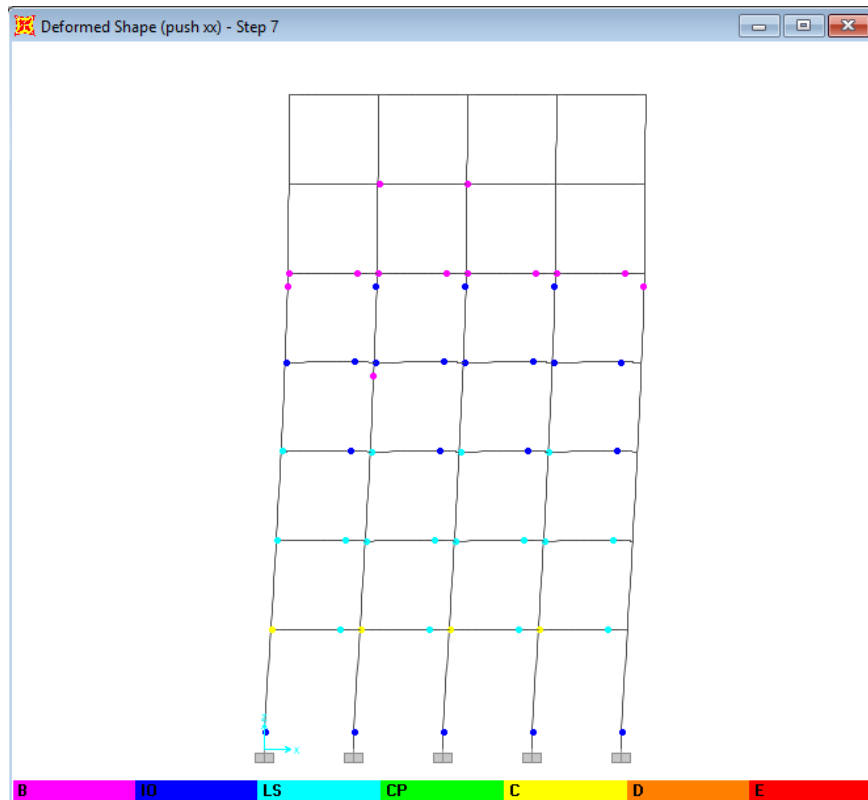


Figure V.36 : Formation de rotules plastiques (2D) de la structure R+6.

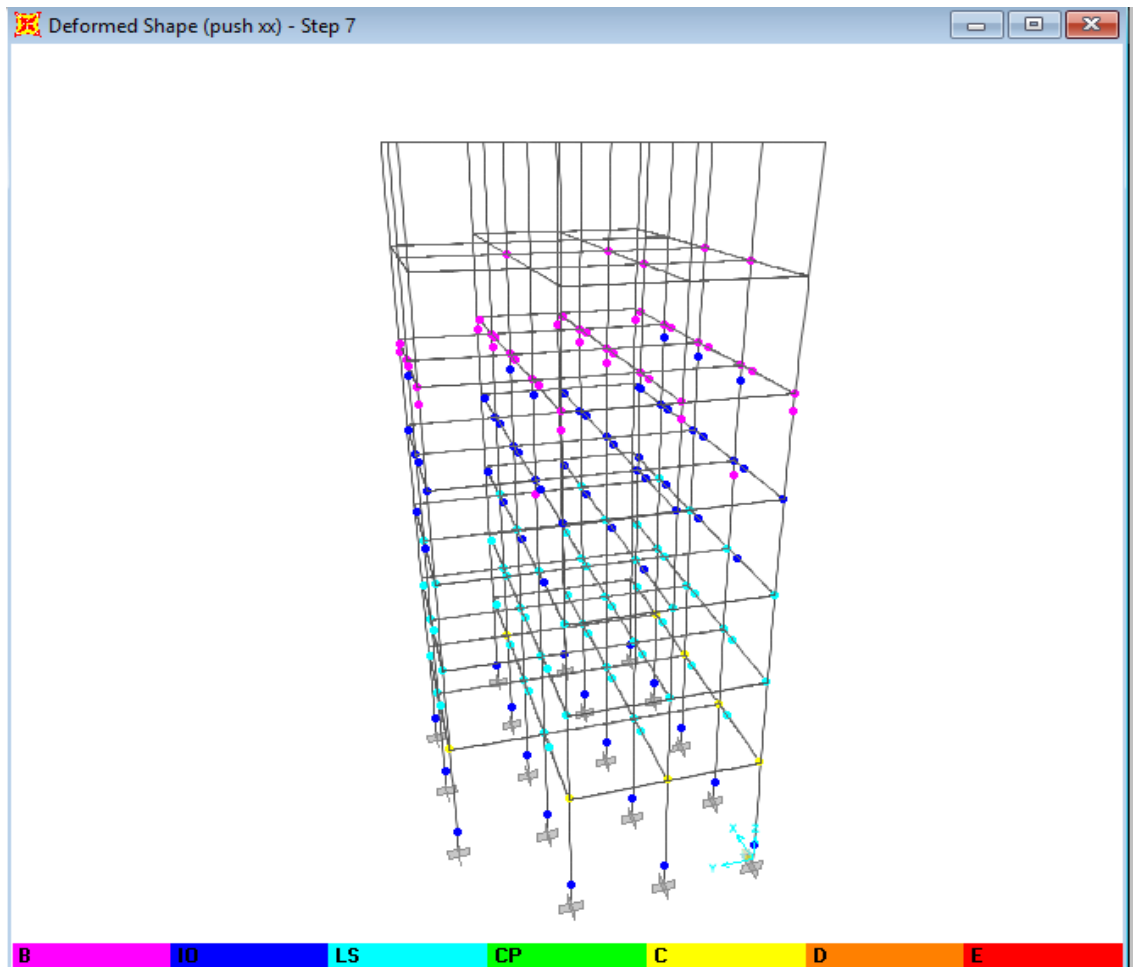
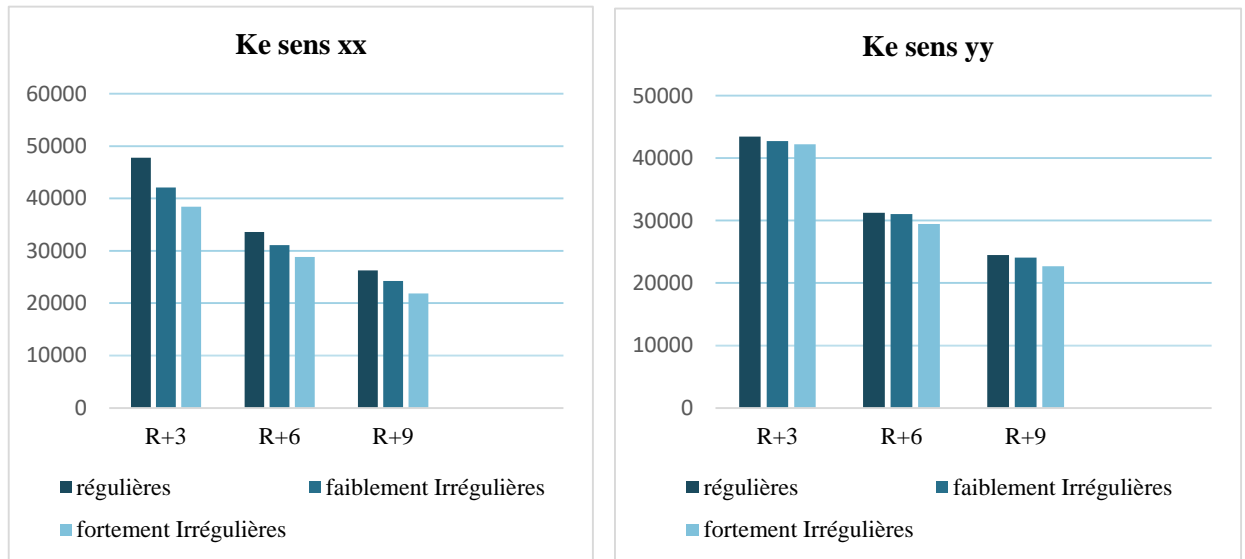


Figure V.37 : Formation de rotules plastiques (3D) de la structure R+6.

Après la distribution des rotules plastiques dans la structure, on remarque l'apparition des rotules du type C au niveau de certaines zones nodales de la structure exactement au niveau de rez de chaussé ce qui confirme la fragilité de ces zones, et indique que l'état des dommages est important. Ceci entraîne la chute de la construction.

D'autre part, on remarque des rotules plastiques de type (B) et des rotules de type (IO) apparaissent aux derniers étages.

- ✚ Pour la rigidité on aperçoit que la raideur initiale (**Ke**) pour tous les modèles est évidemment plus importantes que la raideur (**Kp**), et comparant entre les 3 types des structures (R+3, R+6, R+9) on constate que la structure régulière possède une rigidité élastique importante que les structures irrégulières.



Histogrammes de la raideur initiale **Ke**

- ✚ Au point de performance, la raideur (**Kp**) des variantes étudiées variées de la même manière comme le déplacement de demande (**dp**) suivant les deux directions.
- ✚ Le critère la demande en ductilité est estimée à travers le facteur ( $\mu d = dp / de$ ), on peut dire que sa variation tourne autour [3.16-4.69] pour les deux directions.
- ✚ En analysant les indicateurs de dégradations de chaque variante, la variation constatée est entre 60% ,69% pour les deux directions x et y, cette variation est d'un ordre croissant de R+3-R+9 respectivement.

## V.4 Conclusion

L'ensemble des analyses effectuées sur les différentes variantes étudiées et les paramètres élaborés à partir des résultats de l'analyse statique non linéaire (Push-over), ont été utilisés comme critères de comparaison pour déterminer l'influence de l'irrégularité en plan lors d'un séisme.

L'interprétation des résultats de l'étude comparative menée sur les deux variantes nous a montré que :

- ✓ L'analyse des courbes de capacités montre clairement l'impact significatif de la configuration des différents bâtiments qui influent directement sur la rigidité et la résistance de ces derniers.
- ✓ La variante régulière présente un bon comportement global, même si elle n'a pas atteint le déplacement cible mais il y a lieu de noter que cette variante donne une rigidité importante dans le domaine réversible, et sert à bien supporter les efforts sismiques comparant à la variante irrégulière en plan.
- ✓ L'effet torsionnel est un facteur important qui caractérise le comportement sismique global des bâtiments. La torsion induite dans des structures non symétriques en raison de variations inattendues de la force des charges latérales.
- ✓ D'après les résultats obtenus, le déplacement des niveaux de performances a indiqué une tendance particulière parce que l'effet structural affecte la réponse en termes de déplacements.
- ✓ Les mécanismes de ruine peuvent être considérés comme des critères de comparaisons pour l'évaluation de la performance des structures.

On a montré que certains paramètres (irrégularité en plan) peuvent avoir une influence considérable sur le comportement de la structure et sa performance sismique, d'où la nécessité de faire plus de recherches sur d'autres paramètres pour pouvoir mieux comprendre le comportement sismique de cette dernière.

**CHAPITRE VI :**  
**L'INFLUENCE DE L'IRREGULARITE EN**  
**ELEVATION**

# CHAPITRE VI : L'INFLUENCE DE L'IRREGULARITE EN ELEVATION


## VI.1 Introduction

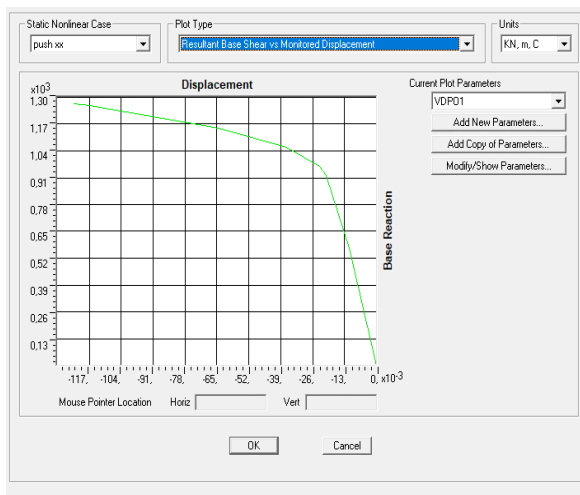
La prise en compte de l'impact de l'irrégularité en élévation dans le cas des portiques auto-stables de différentes configurations de l'irrégularité avec des structures régulières present comme structures de références, est présenté dans ce chapitre.

## VI.2 Résultats de l'analyse Push-over de la variante irrégulière en élévation

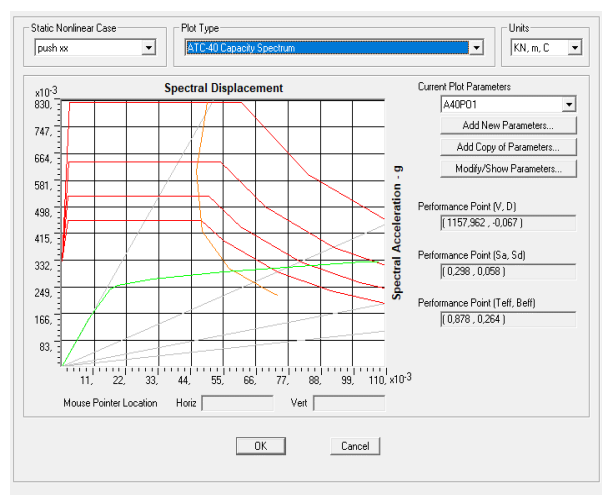
Les résultats d'analyse Push-over de la variante régulière ont été présentées dans le chapitre précédent (voir chapitre 5).

### VI .2.1 Structures faiblement irrégulières en élévation

 Analyse des structures dans le sens (x-x) :



**Figure VI .1 :** Courbe de capacité R+3.



**Figure VI .2 :** Courbe de capacité spectrale R+3.

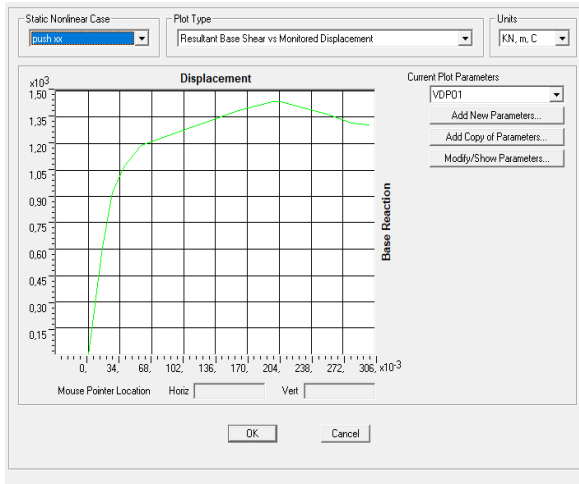


Figure VI.3 : Courbe de capacité R+6.

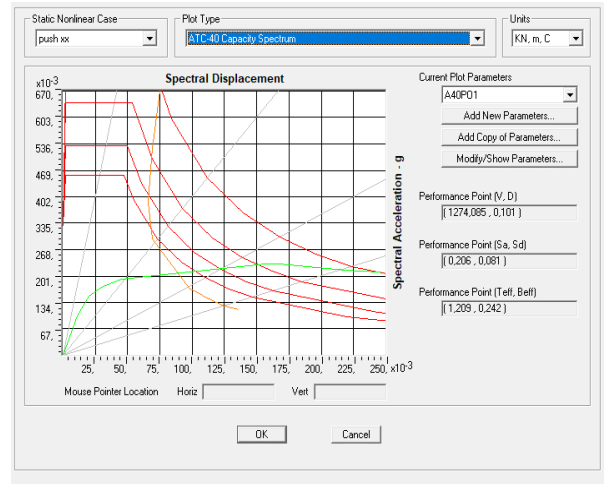


Figure VI.4 : Courbe de capacité spectrale R+6.

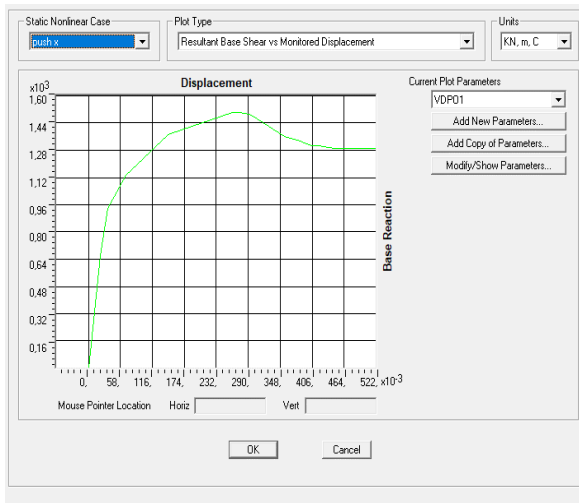


Figure VI.5 : Courbe de capacité R+9.

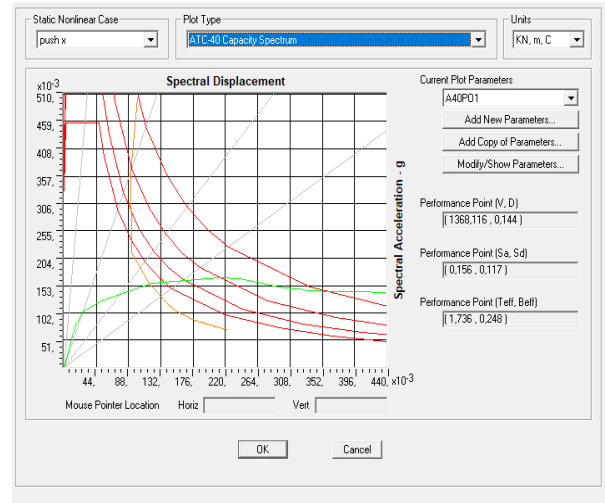


Figure VI.6 : Courbe de capacité spectrale R+9.

✚ Analyse des structures dans le sens (y-y) :

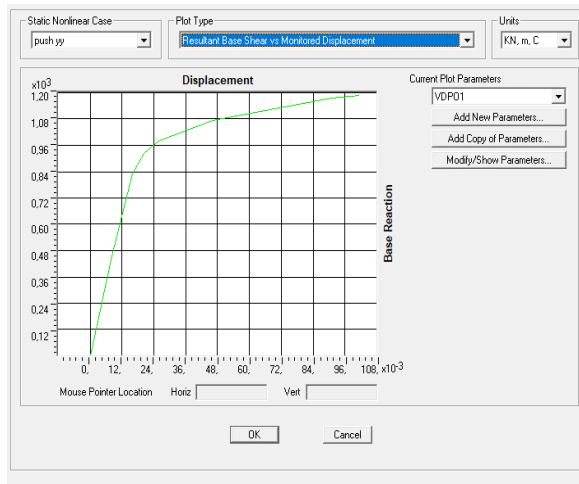


Figure VI.7 : Courbe de capacité R+3.

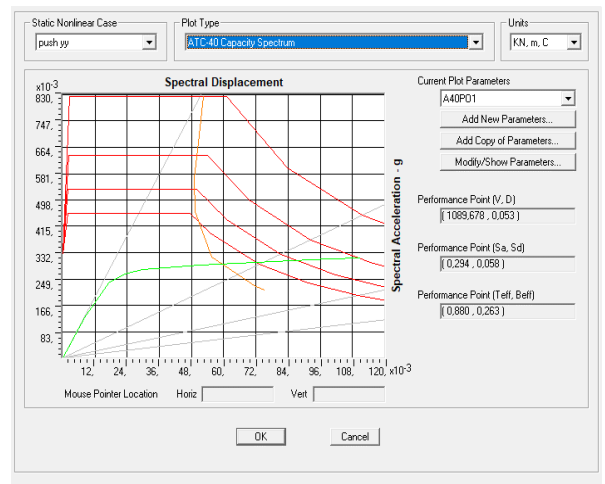


Figure VI.8 : Courbe de capacité spectrale R+3.

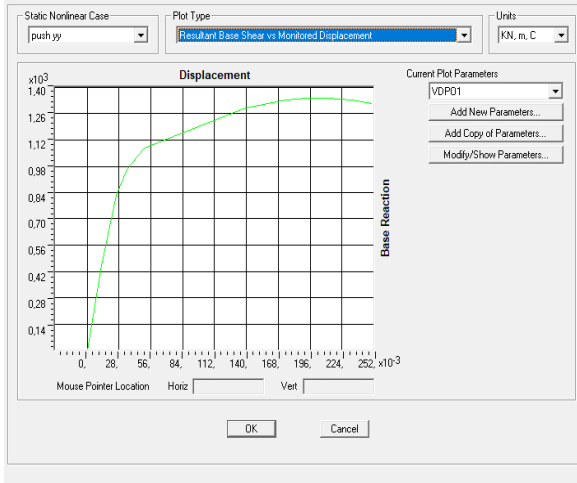


Figure VI.9 : Courbe de capacité R+6.

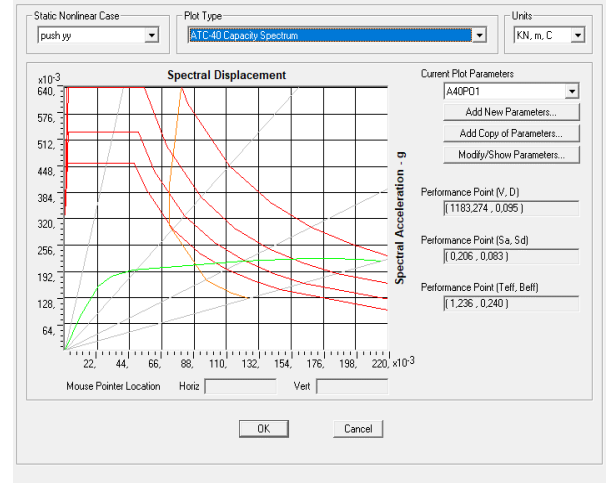


Figure VI.10 : Courbe de capacité spectrale R+6.

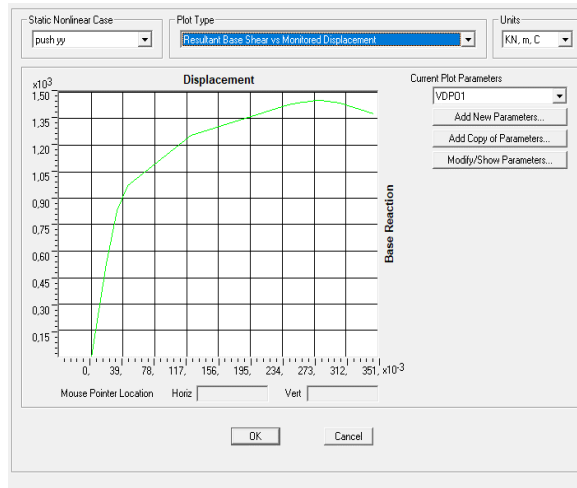


Figure VI.11 : Courbe de capacité R+9.

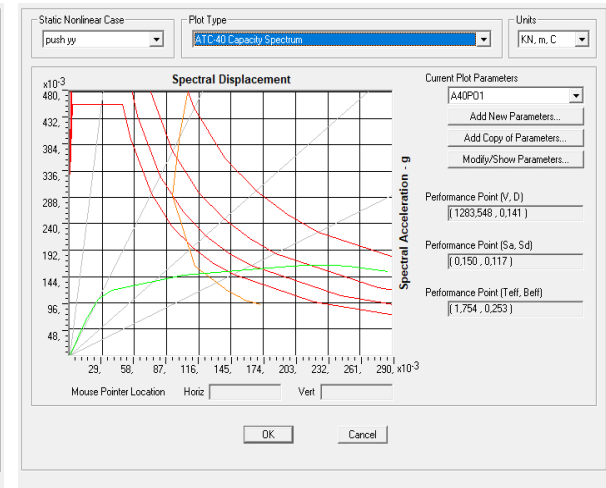


Figure VI.12 : Courbe de capacité spectrale R+9.

VI.2.2 Structures fortement irrégulières en élévation

✚ Analyse des structures dans le sens (x-x) :



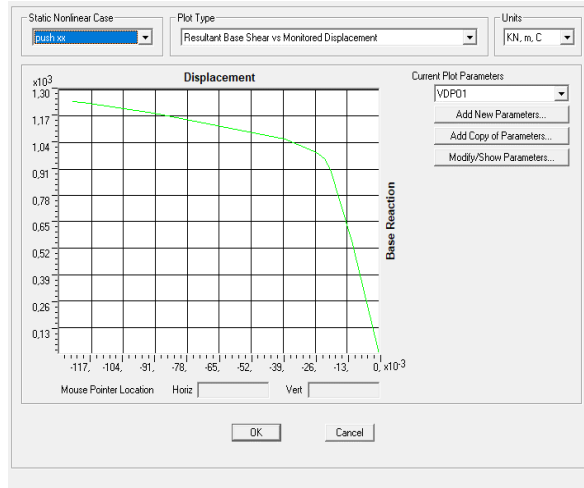


Figure VI.13 : Courbe de capacité R+3.

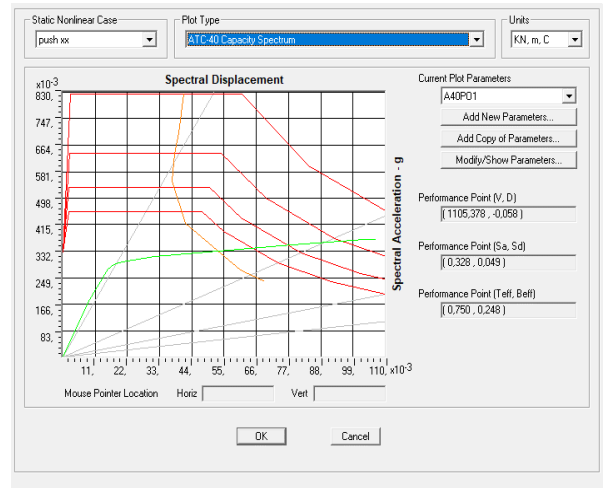


Figure VI.14 : Courbe de capacité spectrale R+3.

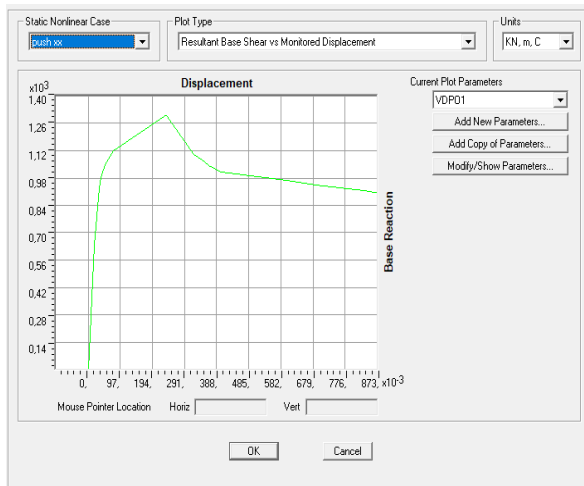


Figure VI.15: Courbe de capacité R+6.

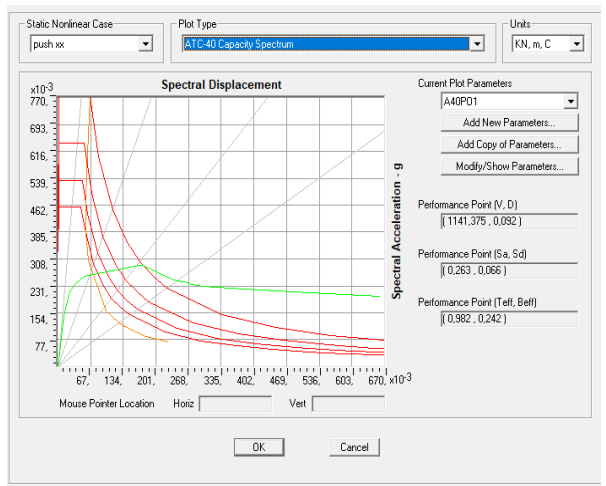


Figure VI.16: Courbe de capacité spectrale R+6.

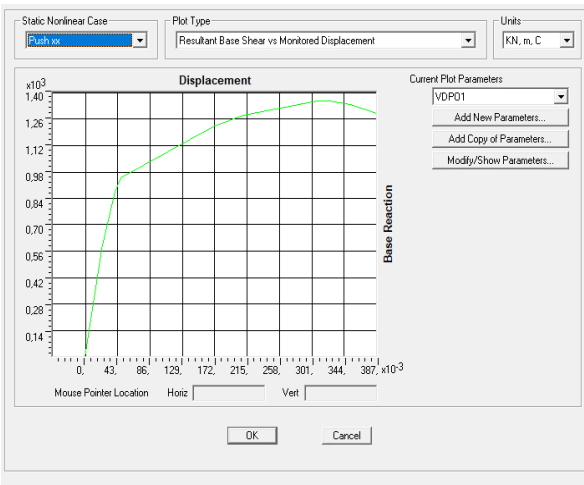


Figure VI.17 : Courbe de capacité R+9

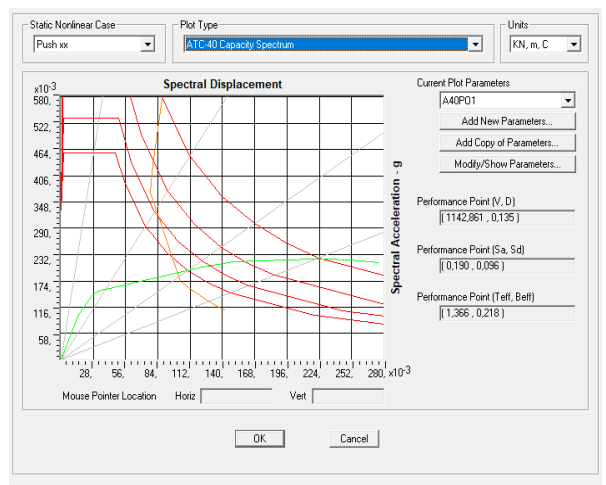


Figure VI.18 : Courbe de capacité spectrale R+9.

🚦 Analyse des structures dans le sens (y-y) :

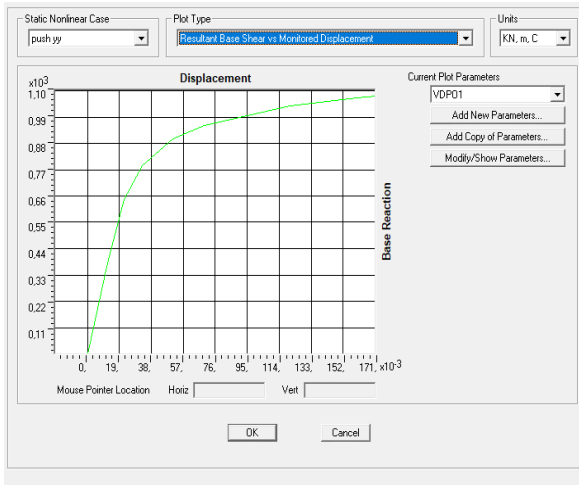


Figure VI.19 : Courbe de capacité R+3.

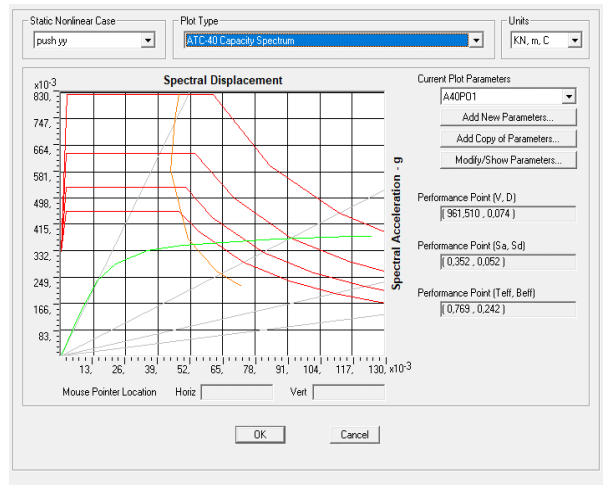


Figure VI.20 : Courbe de capacité spectrale R+3.

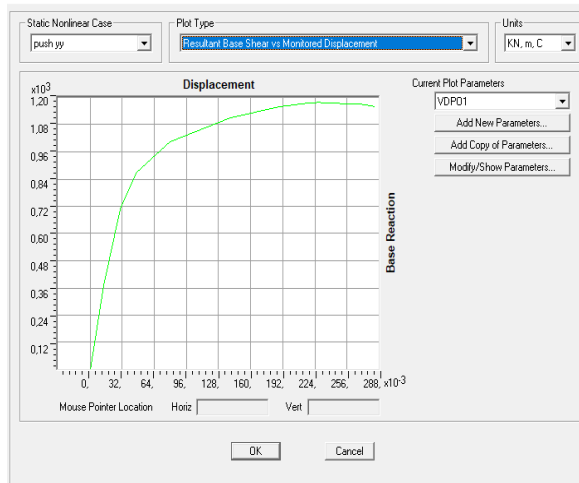


Figure VI.21 : Courbe de capacité R+6.

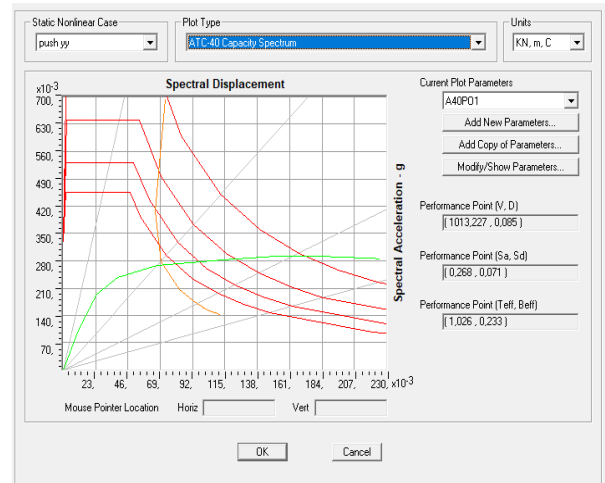


Figure VI.22 : Courbe de capacité spectrale R+6.

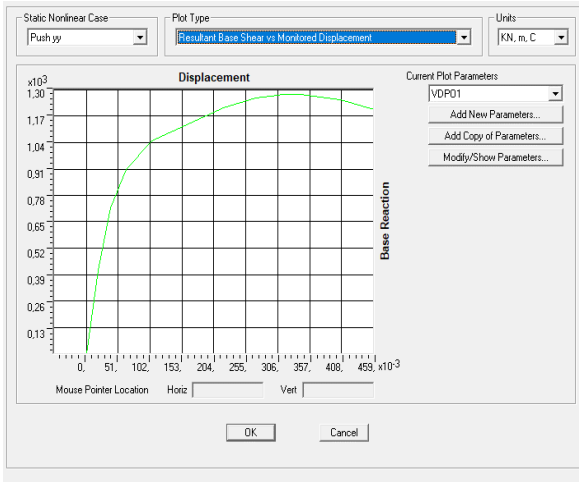


Figure VI.23 : Courbe de capacité R+9.

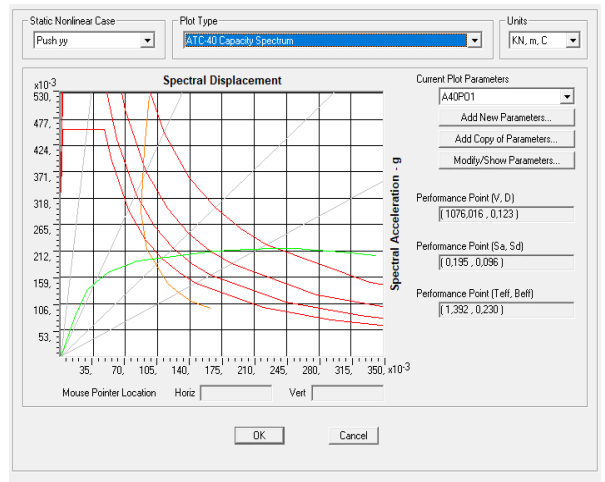


Figure VI.24 : Courbe de capacité spectrale R+9.

### VI.3 Comparaison des résultats obtenus

En récapitulant dans les tableaux ci-dessous les différents résultats selon les différents critères de comparaison entre les variantes choisis :

**Tableau VI .1** : Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+3** dans le sens **x-x**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu_d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_e}{K_p}$ )
	Vy (kN)	dy(m)	Ke (Kn/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (Kn/m)		
<b>R+3 régulières</b>	907,7966	0,019	47778,7684	1162,499	0,07	16607,1286	3,68	65%
<b>R+3 faiblement irrégulière</b>	912,2034	0,0202	45158,5842	1157,962	0,067	17283,0149	3,31	62%
<b>R+3 fortement irrégulière</b>	925,4238	0,0205	45142,6244	1105,378	0,058	19058,2414	2,82	58%

Pour ce type de variation de l'irrégularité en élévation des portiques en R+3 on a constaté pour les directions xx que :

- ✚ L'effort tranchant élastique (**Vy**) de R+3 fortement irrégulière est important que celui de R+3 faiblement irrégulière et régulière. Contrairement à l'effort tranchant (**Vp**) l'augmentation est inversée c'est-à-dire (**Vp**) de R+3 fortement irrégulière est moins importante que celles de R+3 régulières et faiblement irrégulière.
- ✚ Les déplacements élastiques s'agrandissent respectivement de R+3 régulières au R+3 fortement irrégulières, par contre les déplacements maximaux (**dp**) sont en variation inversée, aussi on remarque que les déplacements (**dp**) sont plus importants que les déplacements (**dy**)
- ✚ Les résultats montrent également la relation inverse entre la raideur initiale (**ke**) et la rigidité au point de performance (**kp**), on constate que la rigidité élastique des trois modèles est évidemment plus importante que la rigidité (**kp**).

**Tableau VI .2 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+3** dans le sens **y-y**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_e}{K_p}$ )
	Vy(kN)	dy (m)	Ke (Kn/m)	Vp (kN)	dp (m)	Kp (Kn/m)		
<b>R+3 régulière</b>	912,2034	0,021	43438,2571	1144,931	0,071	161125,788	3,38	62%
<b>R+3 faiblement irrégulière</b>	833,8983	0,0159	52446,434	1089,678	0,053	20559,962	3,33	61%
<b>R+3 fortement irrégulière</b>	715,9323	0,0267	26813,9438	961,51	0,074	12993,378	2,77	52%

Pour le sens yy on aperçoit de ces résultats obtenus que :

- ✚ Les critères varient de la même manière ; comme l'effort tranchant élastique (**Vy**) et l'effort au point de performance (**Vp**) remarqués sont en diminution de R+3 régulières au R+3 fortement irrégulière.
- ✚ D'après le déplacement élastique (**dy**) et le déplacement au point de performance (**dp**) on a eu les mêmes observations. Le tableau **VI.2** montre que le déplacement de portique faiblement irrégulier (**dy**) est de 24,9% et (**dp**) est de 25,35% inférieures à celui de portique régulier par contre celui de portique fortement irrégulier (**dy**) est de 27,14 % et (**dp**) est de 4,22% qui est supérieure à celui de portique régulier.
- ✚ Concernant la demande en ductilité suivant les deux directions xx et yy est en diminution considérable due à l'irrégularité en élévation. En effet, la ductilité de portique régulier est largement notable que la ductilité des portiques irréguliers.
- ✚ La perte des rigidités dans les deux domaines élastiques et au point de performance est entre 65%, 52% dans les deux directions, cette variation est d'un ordre décroissant de R+3 régulière à R+3 fortement irrégulière.

**Tableau VI.3 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+6** dans le sens **x-x**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ $(dp/dy)$	Id $(1 - \frac{K_e}{K_p})$
	Vy (kN)	dy(m)	Ke (Kn/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (Kn/m)		
<b>R+6 régulière</b>	920,78	0,0274	33601,7153	1254,939	0,111	11305,7568	4,05	66%
<b>R+6 faiblement irrégulière</b>	940,7627	0,0284	33119,4789	1274,085	0,101	12614,703	3,55	62%
<b>R+6 fortement irrégulière</b>	915,9322	0,0333	27505,4715	1141,375	0,092	12406,25	2,76	54%

**Tableau VI.4:** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+9** dans le sens **x-x**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ $(dp/dy)$	Id $(1 - \frac{K_e}{K_p})$
	Vy (kN)	dy (m)	Ke (Kn/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (Kn/m)		
<b>R+9 régulière</b>	925,4238	0,0352	26290,4489	1334,953	0,155	8612,6	4,4	67%
<b>R+9 faiblement irrégulière</b>	954,5763	0,0364	26224,6236	1368,116	0,144	9500,80556	3,95	64%
<b>R+9 fortement irrégulière</b>	882,7119	0,0392	22518,1607	1142,861	0,135	8465,63704	3,44	62%

**Tableau VI.5 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+6** dans le sens **y-y**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_e}{K_p}$ )
	Vy (kN)	dy(m)	Ke (Kn/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (Kn/m)		
<b>R+6 régulière</b>	925,4238	0,0296	31264,3176	1228,704	0,113	10873,486	3,81	65%
<b>R+6 faiblement irrégulière</b>	840	0,0263	31939,1635	1183,274	0,095	12455,515	3,61	61%
<b>R+6 fortement irrégulière</b>	724,0678	0,0308	23508,6948	1013,227	0,085	11920,3176	2,75	49%

**Tableau VI .6 :** Caractéristiques à l'état élastique limite et à l'état ultime de résistance des structures **R+9** dans le sens **y-y**.

	Etat élastique limite			Etat ultime de résistance			$\mu d$ ( $dp/dy$ )	Id ( $1 - \frac{K_e}{K_p}$ )
	Vy (kN)	dy(m)	Ke (Kn/m)	Vp (kN)	dp(m)	Kp (Kn/m)		
<b>R+9 régulière</b>	930,5085	0,038	24487,0658	1303,014	0,159	8195,056	4,18	66%
<b>R+9 faiblement irrégulière</b>	860,0678	0,034	25296,118	1283,548	0,141	9103,1773	4,14	64%
<b>R+9 fortement irrégulière</b>	731,5255	0,0399	18333,9724	1076,016	0,123	8748,09756	3,08	52%

➤ **Constations**

En analysant les résultats, on remarque que les critères de R+6 et R+9 ont presque le même comportement :

- ✚ La comparaison de ces résultats nous montre que les efforts (**Vy**) et (**Vp**) importants sont enregistrés dans la structure faiblement irrégulière suivant les directions xx, par contre les structures régulières et fortement irrégulières représentent un effort minimum.

- ✚ On voit qu'on a eu les mêmes observations des déplacements suivant la direction xx que les résultats préalables (R+3), le déplacement élastique ( $\mathbf{dy}$ ) est toujours croissant de la structure régulière aux structures fortement irrégulières inversement au déplacement de point de performance ( $\mathbf{dp}$ ) qui est décroissant, il y a lieu de noter que le déplacement plastique est plus marquant que le déplacement élastique toujours.
- ✚ Dans la direction yy, l'effort tranchant et le déplacement élastique garde la même variation que ceux des portiques R+3. Ces résultats montrent que les déplacements importants sont enregistrés dans les structures fortement irrégulières. Par ailleurs au niveau du point de performance ( $\mathbf{Vp}$ ,  $\mathbf{dp}$ ) diminuent d'une manière régulière de portique régulier au portique irrégulier en élévation.
- ✚ On confirme les constatations précédentes ; concernant la demande en ductilité on aperçoit les mêmes constatations que celles observées en portiques R+3 suivant des deux directions xx et yy tel que les ductilités des portiques irréguliers sont relativement inférieures aux celles des portiques réguliers. En dernier lieu ; on conclut pour l'indice de dégradation que les portiques irréguliers sont dans un état de plastification plus avancé que l'autre variante étudiée (régulière).

#### ➤ Propagation des rotules

D'après l'illustration graphique des rotules plastiques des trois structures ; la distribution des rotules plastiques dans les structures après chaque étape de chargement de l'analyse de Push-over a montré que le mécanisme de ruine de chaque variante est un mécanisme plastique global, et que les états de dégradations des éléments étaient presque similaires pour les variantes.

Dans ce qui suit les figures (IV /25-26-27) présentent la formation des rotules plastiques de la structure R+3 régulière, faiblement irrégulière et fortement irrégulière pour trois steps graduels qui sont : 1-le premier step, 2-un step intermédiaire et 3- le dernier step.

▪ R+3 régulière

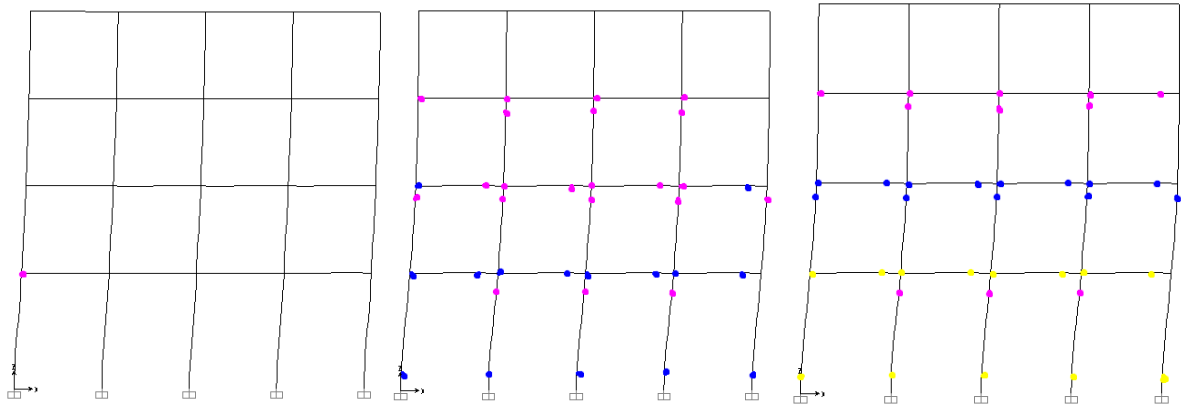


Figure VI.25 : Distribution des rotules plastiques dans la structure régulière.

▪ R+3 faiblement irrégulière

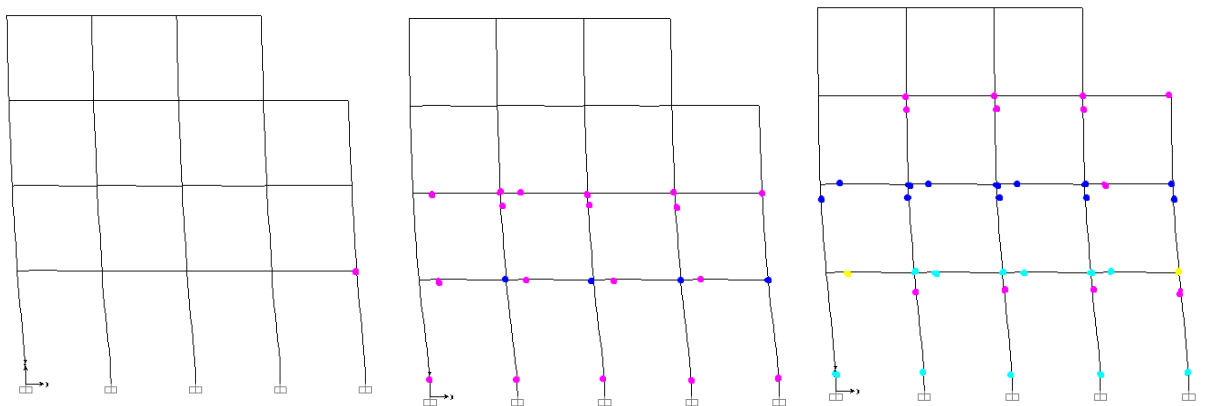


Figure VI.26 : Distribution des rotules plastiques dans la structure faiblement irrégulière.

▪ R+3 fortement irrégulière

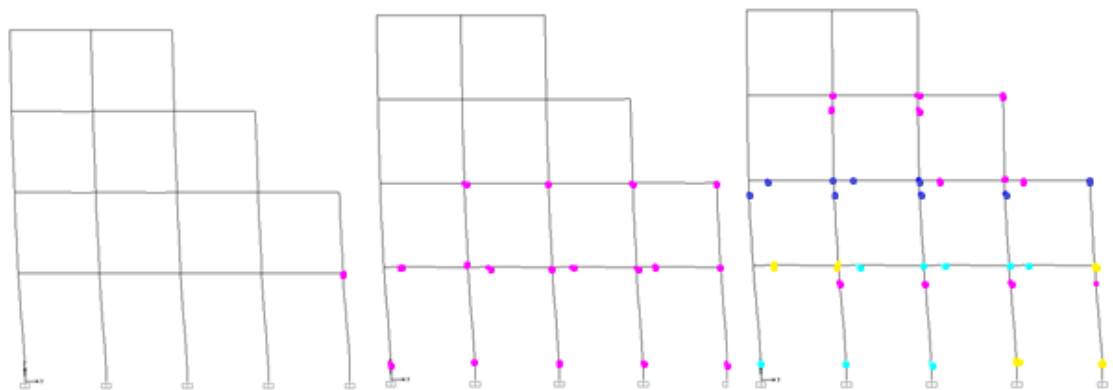







Figure VI.27 : Distribution des rotules plastiques dans la structure fortement irrégulière.



 IO :Occupation immédiate.	 CP :Prévention contre l'effondrement.	 D : Ruine.
 LS :Sécurité de vie.	 C : Effondrement.	

On peut voir que les rotules se propagent ensuite sur les différents niveaux. Le mécanisme de ruine est donc un mécanisme plastique global.

## VI.4 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de mettre en œuvre l'analyse push-over par la modélisation des structures irrégulières en élévation des différentes configurations avec des structures régulières prise comme structure de références.

Dans l'analyse des dommages causés par les séismes, on doit choisir le bon outil (Critère de comparaison), qui présente une vision plus approfondie, sur la question.

A travers quatre critères de comparaison, il a été constaté que l'utilisation des différents modèles pourrait mener a des différents résultats. On peut dire que le critère qui nous a servi de guide et celui qui nous a permis de situer le degré de pénétration de la structure dans le domaine post élastique, c'est-à-dire la demande en ductilité.

En se référant à ce critère décisif on ne peut que constater qu'au fur à mesure que la structure devient irrégulière la ductilité diminuée. Autrement dit l'irrégularité en élévation réduit considérablement la ductilité du portique, c'est-à-dire réduisant sa résistance à l'action sismique. Par conséquent, elle n'est pas recommandée en zone sismique.

Le dernier critère que nous avons utilisé, afin d'étudier l'impact de l'irrégularité des structures en élévation sur leur performance sismique était l'indice de dégradation, il pourra gérer et fournir d'avantage de constatation. En effet les variantes irrégulières subissent des pertes de résistance plus importantes.

# **CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS**

# CONCLUSIONS ET RECOMMANDATIONS

Certains paramètres peuvent avoir une influence considérable sur le comportement des constructions en béton armé. Alors dans notre thème de recherche, nous nous sommes intéressés à l'étude de deux paramètres intéressants dans la conception parasismique : l'influence de l'irrégularité en plan et en élévation des structures en portiques auto-stable en béton armé.

En effectuant une étude comparative sur des variantes de structures dont la différence est liée aux configurations structurales (irrégularité en plan et en élévation) et à la hauteur (R+3, R+6, R+9) et une variante régulière, prise comme référence. Les autres dimensions ainsi que le ferrailage sont les mêmes.

Nous déterminons l'influence que peut avoir l'irrégularité d'une structure sur son comportement et surtout durant une secousse sismique donnée. Pour atteindre l'objectif qui lui est assigné, ce travail devait être basé sur des analyses statiques non linéaires, ils permettent en effet de faire des études pour identifier la sensibilité des résultats aux variations des paramètres liés au type de structure. C'est pour ça, nous avons procédé à une analyse par la méthode Push-Over. Elle est à la base de la nouvelle conception parasismique dite 'conception en performance'.

De l'ensemble des analyses effectuées dans notre présente étude en terme de capacité et demande sismique, on peut tirer les conclusions suivantes :

- La compréhension des facteurs influe sur le comportement d'une structure, nécessite l'analyse de plusieurs configurations du système structural. D'où l'importance de faire plus de recherche sur d'autres paramètres pour pouvoir mieux comprendre le comportement réel de la construction.
- La capacité résistante dépend de comportement de chaque composant de la structure, car la ruine est liée à une atteinte de la limite de déformation.
- La méthode Push-Over peut nous montrer l'évolution de la dégradation des performances des structures au fur et à mesure que les éléments structuraux se plastifient.
- L'identification des discontinuités de résistance en plan et en élévation qui entraîne des variations dans les caractéristiques dynamiques dans le domaine inélastique.
- La réponse d'un bâtiment à un tremblement de terre est conditionnée non seulement par les caractéristiques du mouvement sismique, mais aussi par la rigidité de la structure sollicitée.
- La détermination du point de performance par cette méthode est très utile car il donne une idée claire sur le degré de dommage de la structure.

- La méthode Push-over est une méthode d'analyse non linéaire simple et efficace qui peut remplacer les méthodes exactes complexes sous réserve d'être améliorée.

A la fin nous pouvons recommander aux futures chercheurs les points suivants :

- ✓ Notre étude présente quelques limites qui rendent nécessaires des développements ultérieurs. Les propositions qui suivent constituent un ensemble de sujets de recherche qu'il semble intéressant d'explorer pour approfondir les connaissances actuelles sur le comportement non linéaire des structures en béton armé sous action sismique pour évaluer la sensibilité des réponses globales aux changements des paramètres liés au modèle. Il conviendrait donc de poursuivre et d'enrichir les recherches aussi bien dans la voie numérique que dans la voie expérimentale s'il est possible.
- ✓ Faire une analyse complète qui répond aux exigences de l'RPA99/2003.
- ✓ Intégrer l'enseignement de cette méthode dans le cursus universitaire des étudiants de Master.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **Patricia Balandier** ; « Le séisme et les sites constructibles », Direction Départementale de l'équipement de la Guadeloupe Document d'information à l'usage du constructeur.
- [2] **Patricia Balandier** ; « Le séisme et les bâtiments », Direction Départementale de l'équipement de la Guadeloupe Document d'information à l'usage du constructeur.
- [3] **Milan Zacek** ; « Risque sismique, Constructions et vulnérabilité des bâtiments existants », 21 octobre 2008.
- [4] **Milan Zacek** ; Construction parasismique, Edition parenthèse, France 1996.
- [5] Institut National Des Sciences Appliquées de rouen ; Etude des mouvements d'une structure lors d'un séisme, Département sciences et techniques pour l'ingénieur, 2015.
- [6] **Chertout Abba** ; Evaluation du rapport des moments aboutissants aux nœuds poteaux-poutres des portiques auto stables en béton armé, mémoire de magister, Université de Constantine 2010.
- [7] Ministère français de l'écologie et du développement durable ; risque naturel majeur, les séismes sous-direction de la prévention des risques majeurs, 2004.
- [8] **Drouna Karima** ; Evaluation des performances parasismiques des portiques en BA renforcés par chemisage en béton armé et par bandage en CFRP, mémoire de magister, Université de Constantine, 2010.
- [9] **Fajfar P and EERI M**; A Nonlinear Analysis Method for Performance Based Seismic Design, Earthquake Spectra, August 2000.
- [10] **Boussa Leila** ; Effet de confortement sur les structures en béton armé, mémoire de magister, Université de M'hamed bougara, Boumerdas, 2011/2012.
- [11] **Hassani Karim** ; Effet des séismes proches et lointains sur la performance sismique des structures auto-stables en béton armé, mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.

- [12] **Vahid Mosenian** and **Ali Nikko**; « A study of effects of vertical mass irregularity on seismic performance of tunnel frame structural system», University Tehran, Iran, 2019.
- [13] **Rezazga Saad** ; Etude de l'effet de l'irrégularité et élévation des structures en béton armé par la méthode push-over, mémoire master, Université Ziane Achour de Djelfa, 2014.
- [14] **Hamdani Naima** ; Influence de l'irrégularité en élévation de structures en portique en béton armé sur leur comportement SISMIQUE, Mémoire de magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.
- [15] **Pierre Georges Fronteddu** ; Considération de la torsion accidentelle pour la conception parasismique, Mémoire maîtrise et sciences appliquées, école polytechnique de Montréal, Mars 2018.
- [16] **VU Thanh Kien** ; Incidence de la torsion sur la résistance sismique de bâtiments courants avec diaphragmes horizontaux rigides application aux structures en bois, Thèse doctorat, Université Blaise pascal, 2011.
- [17] **RPA2003** : Règlement parasismique Algérien 99V2003.
- [18] **Djelti Nesrine** et **Allal Halima** ; Analyse Numérique d'un bâtiment R+6 en BA Avec la méthode modale spectrale et la méthode des poussées progressives "PUSHOVER», Mémoire de master, Université Blida 2019.
- [19] **Kassoul Amar** ; Cour Vulnérabilité et Réhabilitation des Structures, Université Hassiba Benbouali de Chlef.
- [20] **Mansouri Salim** ; Analyse Non Lineaire d'une structure en voile, Mémoire de master, Université Mohamed Boudiaf Msila, 2015/2016.
- [21] **Belazouz Lynda** ; Influence de la disposition des voiles sur le comportement dynamique des structures, Mémoire de magister, Université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2016.
- [22] **Medjerab Mohammed** ; Modélisation Parasismique Des Structures En Béton Armé, Mémoire de magister, Université Mohamed Khider–Biskra, 2012.
- [23] **Krawinkler H**; Pushover analysis: why, how, when, and when not to use it, structural engineers association of California, 17-36.

[24] **Djeddou Imene** et **Bouraoui Amel**, Influence de la hauteur totale sur les performances sismiques des batiments ; Mémoire de master, Université Badji Mokhtar, Annaba ;2017.

[25] **Smahi Mohamed** et **Kadid Walid** ; Etude comparative sur la conception structurelle d'une tour de type R+14 avec sous-sol-application de l'approche non linéaire (pushover), Mémoire de master, Université Djilali Liabes ,2019.

[26] **Krawinkler H** and **Seneviratna K**; Pros and Cons of a Pushover Analysis of Seismic Performance Evaluation, Engineering Structure.

[27] **ATC 40**; Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings, Applied Technology Council, 1996.

[28] **UBC 1997**, Structural Engineering Design Provisions, Uniform Building Code, California, 1997.

[29] **Abada Majda** et **Balahouane Amira** ; Modélisation des paramètres influant sur le comportement sismique des constructions en BA (R+3, R+6, R+9) en utilisant la Push-over, Mémoire de master, Université Blida, 2019.

[30] **Bourahla N**, **DerbaL I.** and **Allal N**; Neural network for localization of mass and rigidity centers from dynamic responses of buildings, Proceedings of the 10th National Conference in Earthquake Engineering, Earthquake Engineering Research Institute, Anchorage, AK, 2014.



# **ANNEXE A**

## ANNEXE A

Nous indiquons clairement dans les tableaux suivants la classification des sites selon UBC97 par rapport au classification donné par le RPA99V2003.

**Tableau A.1 : Valeurs de coefficient sismique d'accélération  $C_a$**

Soil profil type		Seismic coefficient $C_a$				
UBC97	RPA 2003	Z=0,075	Z=0,15	Z=0,2	Z=0,3	Z=0,4
<b>S<sub>A</sub></b>	-	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32 $N_a$
<b>S<sub>B</sub></b>	S1	0,08	0,15	0,2	0,30	0,40 $N_a$
<b>S<sub>C</sub></b>	S2	0,09	0,18	0,24	0,33	0,40 $N_a$
<b>S<sub>D</sub></b>	S3	0,12	0,22	0,28	0,36	0,44 $N_a$
<b>S<sub>E</sub></b>	S4	0,19	0,3	0,34	0,36	0,36 $N_a$
<b>S<sub>F</sub></b>	Soil requiring site specific evaluation					

**Tableau A.2 : Valeur de coefficient sismique de vitesse  $C_v$**

Soil profil type		Seismic coefficient $C_v$				
UBC97	RPA2003	Z=0,075	Z=0,15	Z=0,2	Z=0,3	Z=0,4
<b>S<sub>A</sub></b>	-	0,06	0,12	0,16	0,24	0,32 $N_v$
<b>S<sub>B</sub></b>	S1	0,08	0,15	0,20	0,30	0,40 $N_v$
<b>S<sub>C</sub></b>	S2	0,13	0,25	0,32	0,45	0,56 $N_v$
<b>S<sub>D</sub></b>	S3	0,18	0,32	0,40	0,54	0,64 $N_v$
<b>S<sub>E</sub></b>	S4	0,23	0,50	0,64	0,84	0,96 $N_v$
<b>S<sub>F</sub></b>	Soil requiring site specific evaluation					

**Tableau A.3 : Facteur de la zone sismique Z UBC97**

Zone	1	2A	2B	3	4
<b>Z</b>	0,075	0,15	0,20	0,3	0,4

**Tableau A.4 : Classification des sites RPA version 2003**

<b>Catégorie</b>	<b>Description</b>	<b>qc (MPa) (c)</b>	<b>N (d)</b>	<b>P<sub>1</sub> (MPa) (e)</b>	<b>E<sub>p</sub> (MPa) (e)</b>	<b>q<sub>u</sub> (MPa) (f)</b>	<b>V<sub>s</sub> (m/s) (g)</b>
<b>S1</b>	Rocheau	-	-	> 5	> 100	> 10	≥ 800
<b>S2</b>	Ferme	> 15	> 50	> 2	> 20	> 0,4	≥ 400–< 800
<b>S3</b>	Meuble	1,5-15	10-50	1-2	5-20	0,1-0,4	≥ 200–< 400
<b>S4</b>	Très meuble	< 15	< 10	< 1	< 5	< 0,1	≥ 100–< 200

**Tableau A.5 : Classification des sites UBC97**

<b>Soil profil type</b>	<b>Soil profil name</b>	<b>V<sub>s</sub> (m/s)</b>	<b>Standard penetration test N</b>	<b>Undrained shear strength KPa</b>
<b>S<sub>A</sub></b>	Roche dure	1500	-	-
<b>S<sub>B</sub></b>	Roche	760 to 1500		
<b>S<sub>C</sub></b>	Ferme	360 to 760	> 50	100
<b>S<sub>D</sub></b>	Meuble	180 to 360	15 to 50	50 to 100
<b>S<sub>E</sub></b>	Très meuble	< 180	< 15	< 50
<b>S<sub>F</sub></b>	Soil requiring site specific evaluation			