



**Ministère de l'Enseignement Supérieur  
et de la Recherche Scientifique**

**Université Mohamed Boudiaf - M'sila**

**Faculté de Technologie**



**Département de GENIE CIVIL**

**MEMOIRE**

**Présenté pour l'obtention du diplôme de  
MASTER**

**FILIERE : Génie Civil**

**SPECIALITE : Structure**

**THEME**

**MÉTHODE  
D'ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ  
SISMIQUE DES BATIMENTS**

**Dirigé par :  
Mr. BOULAOUAD Abderrachid**

**Présenté par :  
BENOUMHANI Amina**

**Promotion : 2015/2016.**

## Remerciements

En tout premier lieu , je remercie le bon dieu pour m'aider à aboutir ce travail , en suite je tiens à adresser mes sincères remerciements et mon grand respect à Mr. BELAOUAD Abderrachid pour avoir accepté d'encadrer mon mémoire et qui a suivi de près mon travail. Sans lui ce travail de thèse ne serait pas ce qu'il est.

Je remercie chaleureusement mes parents et ma famille, sans qui je ne serais pas ce que je suis.

J'adresse mes remerciements aux personnes qui m'ont aidé dans la réalisation de ce mémoire.

Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à tous mes proches et ami(e)s , qui m'ont toujours soutenue et encouragée au cours de la réalisation de ce mémoire. Merci à tous et à toutes.

Je dédie ce modeste travail à :

Mes chers parents  
Ma grand-mère.  
Mes sœurs et frère.  
Ma grande famille.  
Mes proches.

# Sommaire

Page

Introduction générale : .....	1
<b>chapitre I : Notions de sismologie .....</b>	<b>3</b>
Introduction : .....	4
I-1-les catégories de séismes :.....	4
I-1-1-les séismes tectonique :.....	5
I-1-2-Les séismes d'origine volcanique : .....	5
I-1-3-Les séismes d'origine polaire : .....	5
I-1-4-Les séismes d'origine induite : .....	5
I-2-caractéristiques d'un séisme :.....	5
I-2-1-Distance hypocentrale et épicentre : .....	5
I-2-2-la magnitude :.....	5
I-2-3-Intensité macrosismique : .....	6
I-3-les ondes sismiques : .....	7
I-3-1-les ondes de volume : .....	8
I-3-2-les ondes de surface : .....	10
I-4-les échelles sismiques :.....	10
I-4-1-La force sismique :.....	10
I-4-2-L'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik :.....	10
I-4-3-L'échelle de Richter : .....	11
<b>chapitre II : Effet des séismes sur les bâtiments .....</b>	<b>12</b>
Introduction : .....	13
II-1-les sollicitations sismiques : .....	13
II-1-1-Caractère horizontal : .....	13
II-1-2-Caractère cyclique : .....	14
II-1-3-Caractère Dynamique : .....	14
II-2-Dégâts sismiques typiques : .....	14
II-2-1-Types de dégâts : .....	15
a-inssuffisance de la stabilisation latérale : .....	15
b-Fissures en croix : .....	15

c- Etage souple :	16
d- Colonne captive et colonne courte :	<b>16</b>
e- Martèlement :	17
f- Longueur d'appui insuffisante :	<b>17</b>
g- Liquéfaction :	17
II-3-Exemples des séismes :	<b>18</b>
II-3-1-En Algérie :	19
<b>Chapitre III :Réglementation parasismique (zonage sismique) .....</b>	<b>20</b>
Introduction :	21
III-1-L'apparition du code parasismique :	22
III-1-2-Réglementation parasismique en Algérie :	22
III-2 L'évolution de la réglementation parasismique en Algérie :	23
III-2-1-les premières mesures parasismiques sont celles prises par le Dey Ali CHAOUCH d'Alger, après le séisme d'Alger de 1716 :	23
b-Points à retenir :	23
II-2-2- Les recommandations AS55 :	24
a-carte de zonage sismique de l'Algérie :	24
II-2-3-Apparition des règles parasismique après as55 :	24
a- le règlement ps 69:	24
b-la naissance des RPA :	24
* cartes de zonage sismique :	25
III-3- le règlement parasismique après 2003 :	27
III-3-1-SEISME DE BOUMERDES EN MAI 2003.....	28
III-3-2- PRINCIPES DE CONCEPTION :	28
a- Forme en plan :	28
b-Irrégularité en élévation :	28
c-Système de contreventement :	28
* Portique en béton armé :	28
* Voiles :	29
* Charpente métallique :	29
d-Joints de dilatation .....	29
e-Matériaux de construction :	29
III-4-METHODES DE CALCUL :	29

III-4-1-Par une méthode statique équivalente : .....	30
III-4-2- Par une méthode modale spectrale : .....	30
III-4-3-Par la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes : .....	30
III-5- les modifications apportées au zonage sismique : .....	31
<b>Chapitre IV : Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité.</b>	<b>32</b>
Introduction : .....	33
IV-1- Risque sismique : .....	33
IV-2-sismicité historique en Algérie : .....	34
IV-3- Surveillance sismique : .....	35
IV-4- Activité sismique : .....	35
Iv-5- Aléa sismique : .....	36
IV-6- vulnérabilité sismique : .....	36
IV-7-Le risque sismique en Algérie : .....	37
IV-7-1-Éléments de discussion sur le risque sismique à Alger : .....	37
IV-8-stratégie de réduction du risque sismique : .....	39
IV-9- la prevention : .....	40
IV-10- la vulnérabilité sismique des structures : .....	41
IV-10-1- Facteurs de vulnérabilité : .....	41
IV-10-2-les classes de vulnérabilité EMS-98 : .....	42
IV-10-3-Tableaux de vulnérabilité utilisée par l'EMS98 : .....	42
IV-11- L'analyse de la vulnérabilité sismique : .....	46
IV-11-1-courbe de capacité, fonction de vulnérabilité et courbe de fragilité : .....	46
* courbe de capacité : .....	46
* La fonction de vulnérabilité : .....	47
* courbe de fragilité : .....	48
IV-12- Méthodes existantes d'analyse de la vulnérabilité : .....	49
IV-12-1- Méthodes de jugement : .....	50
IV-12-2- Méthodes empiriques : .....	51
IV-12-3- Méthodes analytiques : .....	53
a- Méthodes déterministes basées sur la performance : .....	55
<b>Chapitre V : Application</b> .....	<b>58</b>
V-1-Méthode empirique.....	59
V-2-Méthode analytique .....	62

V-2-1-Exemple d'application de l'analyse de vulnérabilité d'une structure par la méthode de calcul dite Push-over : .....	62
a- Diagramme des moments (méthode approchée) : .....	63
b- Mécanisme de ruine : .....	63
* Phase élastique ( $M_{\max} \leq M_{em}$ ) .....	64
* Phase élasto-plastique : .....	66
V-2-2-Remarques : .....	69
V-3- Proposition d'une nouvelle formule pour l'évaluation du risque sismique qui tienne compte beaucoup plus du côté humain : .....	70
<b>Conclusion et Recommandation</b> .....	71
<b>Bibliographie</b> .....	74

## Liste des tableaux

Page

Tableau III.1 :séisme et dégâts .....	21
Tableau III.2 : l'apparition du règlement parasismique en algérie .....	22
Tableau V.1 : Résultats 1 ( calcul de l'indice de vulnérabilité) .....	61
Tableau V.2 : Résultats 2 ( Calcul de l'indice de vulnérabilité) .....	61
Tableau V.3 : Résultats et interprétation .....	62

## Liste des figures

page

### Chapitre I :

Figure I.1: définition des caractéristiques d'un séisme .....	4
Figure I.2 : les modes de propagation des ondes .....	7
Figure I.3: la succession d'arrivée des ondes sur un sismogramme .....	8
Figure I.4: les différents mouvements des ondes.....	9
Figure I.5 : Échelle de Richter.....	11

### Chapitre III :

Figure III.1 : carte de zonage sismique de l'Algérie (Ancienne) .....	24
Figure III.2 : carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA81).....	25
Figure III.3: carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA88).....	26
Figure III.4 : Carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA99).....	26
Figure III.5 : la nouvelle carte de zonage sismique (RPA99/V2003) .....	27

### Chapitre IV :

Figure IV.1 : les principales failles intra-plaque de l'Algérois.....	38
Figure IV.2 : tableau de vulnérabilité utilisée par l'EMS-98 .....	43
Figure IV.3 : les degrés de dégâts de 1 à 5 de l'EMS-98 .....	45
Figure IV.4 : Echelle d'intensité macrosismique EMS-98 .....	46
Figure IV.5: courbe de capacité d'un bâtiment.....	48
Figure IV.6 : fonction de vulnérabilité d'un bâtiment .....	48
Figure IV.7 : le principe de la fonction de vulnérabilité .....	49
Figure IV.8 : exemple de courbes de fragilité pour une classe de bâtiments .....	50
Figure IV.9 : matrice de probabilité de dommage d'après ATC-13 .....	52
Figure IV.10 : courbe de capacité d'une structure ( <b>V<sub>base</sub>-D<sub>sommet</sub></b> ) .....	57

### Chapitre V :

Figure V.1 : courbe push-over.....	68
Figure V.2 : courbe push-over idéalisée.....	68
Figure V.3 : point de performance = point d'intersection des 2 courbes.....	69

## ملخص

بما أن معظم وأخطر الأضرار الناجمة عن الزلازل تعود إلى انهيار المباني فإنه يجب الإهتمام بالمنشآت الموجودة لحمايتها من الخطر الزلزالي. وذلك بمعرفة الوضع الحالي لها من أجل تحديد قابليتها للإنهيار. وهذا هو موضوع ما يعرف ب: "تحليل القابلية للإنهيار".

هذا التحليل يمكن إجراؤه بطريقتين: الأولى تجريبية قائمة على المعاينة الميدانية والثانية حسابية لتحديد تصرف المنشأة حتى الإنهيار. في دراستنا هذه طبقنا الطريقتين على أمثلة بسيطة.

يمكن اعتبار هذه الدراسة بمثابة تنبيه إلى أهمية الموضوع في بلدنا حيث معظم البنايات قديمة والدراسات في هذا المجال قليلة.

## Résumé

Etant donné que la plupart des destructions provoquées par les séismes sont dues à l'effondrement des constructions, il est nécessaire de se préoccuper des structures existantes afin de les prémunir contre le risque sismique. Cela implique la connaissance de leur état actuel pour évaluer leur susceptibilité à la destruction. C'est le sujet même de l'analyse de vulnérabilité.

Cette analyse peut être faite selon deux approches: la méthode empirique basée sur le constat visuel et la méthode de calcul pour déterminer le comportement de la structure jusqu'à la rupture.

Dans notre étude, nous avons utilisé l'approche empirique pour l'analyse de deux structures usuelles sur la base de trois critères principaux préalablement établis, affectés de coefficients choisis selon l'importance. Pour illustrer la deuxième approche, nous avons traité un exemple simple.

Cette étude peut être considérée comme une sensibilisation sur le problème de la vulnérabilité des bâtiments dans un pays où le parc immobilier est relativement ancien et les études dans ce domaine rares.

## Abstract

Since most of the destructions due to earthquakes are caused by construction collapse, it is necessary to pay close attention to the existing structures in order to protect them against seismic risk. This involves the knowledge of their state in order to estimate their susceptibility to collapse. This is the subject of vulnerability analysis.

There are two approaches for this analysis: the empiric method based on observations and the computing one which is used to the structure behaviour until failure.

In our study, we have applied the first approach on two usual structures using three main criteria for which we have assigned appropriate coefficients. We have also treated a simple example to illustrate the second approach.

By this work, we call attention to the problem of vulnerability in our country where most of the buildings are relatively old and studies in this area are scarce.

---

## Introduction

Les tremblements de terre ont été et resteront, probablement pour longtemps, les phénomènes naturels les plus dangereux, du fait de leur caractère imprévisible (aléatoire) et leur effet particulièrement destructeur surtout dans les villes où les dégâts peuvent aller jusqu'à l'effondrement complet des constructions engendrant des pertes économiques, sociales et surtout humaines comme cela a été le cas à Boumerdes en 2003 (plus de 2000 morts, 10000 blessés, 15000 sans abri et des pertes économiques se chiffrant par milliards). Le danger est aggravé par l'existence de nombreux bâtiments construits avant l'application des nouveaux règlements parasismiques (RPA 2003 par ex).

Etant donné que plus de 90% des destructions provoquées par les séismes sont dues à l'effondrement des constructions, il est primordial de se préoccuper des structures existantes afin de les prémunir contre le risque sismique ou de le réduire. Cela implique la connaissance de leur état actuel pour évaluer leur susceptibilité à la destruction. C'est le sujet même de l'analyse de vulnérabilité.

Littéralement, la vulnérabilité est la susceptibilité d'être touché, elle est synonyme de faiblesse (Larousse). Dans le langage technique, la définition varie selon les références.

La plupart des références relie la vulnérabilité à deux autres facteurs qui sont l'aléa sismique et le coût. Le produit des trois facteurs permet de quantifier la notion de risque sismique. Pour notre part, nous avons choisi la définition de l'Association Canadienne de Normalisation (CSA, 2000) qui peut s'énoncer ainsi: " La vulnérabilité d'une structure est l'état qui la rend susceptible d'être détruite partiellement ou complètement par une menace (séisme en l'occurrence)".

D'autre part, ces mêmes références s'accordent dans la détermination du risque sismique, à donner plus d'importance à l'aspect économique (pertes d'argent) sans grand souci pour l'aspect humain (pertes en vies), chose que nous contestons. En conséquence, nous projetons de proposer une autre définition du risque sismique qui tienne compte de ce fait important.

La réglementation Algérienne en la matière ne semble pas préoccupée pour le moment par ce problème puisqu'il n'y a aucune allusion à la question même dans les règles les plus récentes (RPA 2003). Il y a là un manque à combler et nous estimons que notre étude qui va dans ce sens peut être considérée comme une interpellation de la conscience collective (surtout celle des spécialistes du génie civil) à se pencher sur le problème de la vulnérabilité des bâtiments sachant que dans notre pays le parc immobilier est relativement ancien et que les études dans ce domaine sont rares.

Les résultats de l'analyse de vulnérabilité des constructions intéressent l'utilisateur particulier soucieux de sa sécurité, les compagnies d'assurances immobilières dont les prix sont liés au risque encouru et enfin les institutions étatiques qui peuvent ordonner des réparations ou même une démolition complète en cas de danger majeur. C'est dire toute l'importance d'une telle analyse.

On peut considérer qu'il y a deux familles d'approches dans l'analyse de la vulnérabilité: les méthodes empiriques basées sur le constat visuel (implantation, structure, entretien, ...) et les méthodes de calcul fondées sur la modélisation des structures et l'étude de leur comportement (courbe de capacité, demande sismique, ...).

La première approche nécessite un travail d'équipe puisqu'elle se fait normalement au niveau de toute une ville ou tout au moins d'un quartier.

---

C'est pour cette raison que nous avons limité notre investigation à un nombre réduit de bâtiments relevant du Ministère de l'Education Nationale (Ecoles, Lycées). Les problèmes rencontrés pour pouvoir accéder aux différents organismes (CTC et établissements concernés) nous ont contraints à réduire encore davantage le nombre de bâtiments visés (un lycée et une école seulement).

Dans notre étude, nous avons focalisé notre attention sur la première approche (empirique) en étudiant l'état de deux structures usuelles sur la base de trois critères principaux préalablement établis (implantation, structure et utilisation), ces mêmes critères divisés en sous critères, tous affectés de coefficients choisis selon leur importance.

Concernant la deuxième approche (analyse par calcul), qui ne fait pas l'objet de notre étude en réalité, nous nous sommes contentés de traiter un exemple simple afin d'introduire de façon brève et simple les notions essentielles qui permettent de tracer la courbe de fragilité d'une structure (courbe de capacité, demande sismique,...). A noter que ce dernier type d'analyse concerne les structures à titre individuel.

Ce travail est présenté en cinq chapitres. Après une brève introduction-problématique, il nous a paru utile de rappeler dans le premier chapitre quelques notions préliminaires de sismologie. Le second chapitre a été réservé à la présentation des effets néfastes des séismes sur les bâtiments. Le troisième traite du zonage sismique proposé par les RPA suite aux événements sismiques survenus sur le territoire Algérien. Le sujet de la vulnérabilité et des méthodes de son évaluation fait l'objet du quatrième chapitre. Les résultats des applications sont regroupés au cinquième chapitre. Enfin, le tout est couronné par une conclusion et quelques recommandations.



# Chapitre I Notion de sismologie

## Introduction :

Les séismes sont parmi les catastrophes naturelles les plus dévastatrice, jusqu'à maintenant l'homme essaye de limiter ses effets ainsi éviter leur conséquence désastreuses, le séisme de Lisbonne en 1755 est l'origine d'une nouvelle spécialité : la sismologie ; est la science qui étudie ces phénomènes , Pour bien comprendre il faut savoir ce qui se passe lors d'un séisme.

Les séismes sont des secousses ou des mouvements du sol due a une libération de l'énergie du fond de la terre cette libération se résulte par la rupture de la surface le long duquel deux blocs rocheux se déplace l'un par rapport a l'autre c'est ce qu'on appel une faille, le lieu de la rupture en profondeur est le foyer (hypocentre) sa projection a la surface est l'épicentre c'est le point ou le séisme est le plus ressenti, le mouvement des roches a coté du foyer engendrent des vibrations qui se propagent en forme d'ondes sismiques autour ou a travers la terre , il produit aussi un dégagement de chaleur par frottement , la majorité des séismes passent inaperçus mais certains sont destructifs . [1]

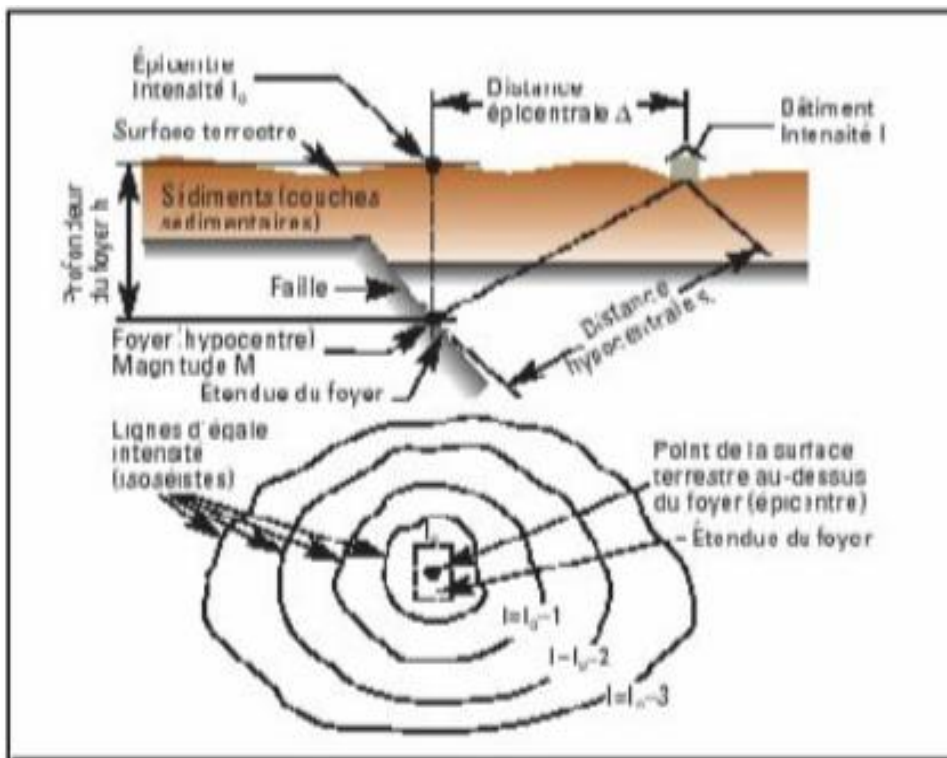


Figure I.1 Définition des caractéristiques d'un séisme

## I-1-les catégories de séismes :

Il existe quatre catégories de séismes :

- les séismes tectoniques
- les séismes d'origine volcanique

---

# Chapitre I Notion de sismologie

---

- les séismes d'origine polaire
- les séismes d'origine induite (ou artificielle)

la grande majorité des séismes se passent a la limite entre les plaque (interplaque) de la terre, mais il peut y avoir au milieu de la plaque (intraplaque) plus rares sont les séismes dus a l'activité volcanique ou d'origine artificielle (explosions). [2],[3]

## **I-1-1-les séismes tectonique :**

Les séismes causé par une libération soudaine de l'énergie aux limites des plaques, au niveau de ces limites les roches sont soumises a des contraintes dues a des chocs, la rupture a lieu lorsque les roches ne résistes plus a ces contraintes . [4]

## **I-1-2-Les séismes d'origine volcanique :**

sont associés a l'activité volcanique et dus a des remontés de magma au dessous du volcan, les ondes sont provoqué par des frottements des blocs ou de gaz contre les parois de la cheminée si la majorité des ces séismes ne cause pas des dégâts mais ils annoncent l'imminence d'une éruption volcanique .

## **I-1-3-Les séismes d'origine polaire :**

se passent dans les glacier et sont de faible magnitude ,ils sont provoqué par des coulées de glace et sont bien plus fréquent en été .[2]

## **I-1-4-Les séismes d'origine induite :**

sont également de faible magnitude ils sont dus a des activités humaines , toutes modification du sous-sols par des actions humaines peuvent entrainer des séismes.[5]

## **I-2-caractéristiques d'un séisme :**

### **I-2-1-Distance hypocentrale et épicentre :**

Foyer ou Hypocentre: on appelle hypocentre ou foyer le point intérieur du globe où se forme la rupture engendrant le séisme. L'épicentre est le lieu de la surface terrestre situé exactement à la verticale du foyer, où l'intensité du séisme est la plus importante.

### **I-2-2-la magnitude :**

La puissance d'un tremblement de terre peut être quantifiée par sa *magnitude*, notion introduite en 1935 par le sismologue Charles Francis Richter [6] . La magnitude se calcule à partir des différents types d'ondes sismiques en tenant compte de paramètres comme la distance à

---

## Chapitre I Notion de sismologie

---

l'épicentre, la profondeur de l'hypocentre, la fréquence du signal, le type de sismographe utilisé, etc. La magnitude est une fonction continue logarithmique [6] lorsque l'amplitude des ondes sismiques est multipliée par 10, la magnitude augmente d'une unité. Ainsi, un séisme de magnitude 7 provoquera une amplitude dix fois plus importante qu'un événement de magnitude 6, cent fois plus importante qu'un de magnitude 5.

La magnitude, souvent appelée *magnitude sur l'échelle de Richter*, mais de manière impropre, est généralement calculée à partir de l'amplitude ou de la durée du signal enregistré par un sismographe[6]. Plusieurs valeurs peuvent être ainsi calculées (Magnitude locale  $M_L$ , de durée  $M_D$ , des ondes de surfaces  $M_S$ , des ondes de volumes  $M_B$ ). Ces différentes valeurs ne sont pas très fiables dans le cas des très grands tremblements de terre. Les sismologues lui préfèrent donc la magnitude de moment (notée  $M_W$ ) qui est directement reliée à l'énergie libérée lors du séisme [6] Des lois d'échelle relient cette magnitude de moment à la géométrie de la faille (surface), à la résistance des roches (module de rigidité) et au mouvement cosismique (glissement moyen sur la faille).

### I-2-3-Intensité macrosismique :

La magnitude d'un séisme ne doit pas être confondue avec l'intensité macrosismique (sévérité de la secousse au sol) qui se fonde sur l'observation des effets et des conséquences du séisme sur des indicateurs communs en un lieu donné : effets sur les personnes, les objets, les mobiliers, les constructions, l'environnement. Le fait que ces effets soient en petit nombre ou en grand nombre sur la zone estimée est en soi un indicateur du niveau de sévérité de la secousse. L'intensité est généralement estimée à l'échelle de la commune. On prendra par exemple en compte le fait que les fenêtres ont vibré légèrement ou fortement, qu'elles se sont ouvertes, que les objets ont vibré, se sont déplacés ou ont chuté en petit nombre ou en grand nombre, que des dégâts sont observés, en tenant compte des différentes typologies constructives (de la plus vulnérable à la plus résistante à la secousse), les différents degrés de dégâts (du dégât mineur à l'effondrement total de la construction) et si la proportion des dégâts observés est importante ou non (quelques maisons, ou l'ensemble des habitations)[7].

Les échelles d'intensité comportent des degrés généralement notés en chiffres romains, de I à XII pour les échelles les plus connues (Mercalli, MSK ou EMS). Parmi les différentes échelles, on peut citer :

- l'échelle Rossi-Forel (aussi notée RF) ;

# Chapitre I Notion de sismologie

---

- l'échelle Medvedev-Sponheuer-Karnik (aussi notée MSK) ;
- l'échelle de Mercalli (notée MM dans sa version modifiée) ;
- l'échelle de Shindo (震度) de l'agence météorologique japonaise ;
- l'échelle macrosismique européenne (aussi notée EMS98);

Les relations entre magnitude et intensité sont complexes. L'intensité dépend du lieu d'observation des effets. Elle décroît généralement lorsqu'on s'éloigne de l'épicentre en raison des atténuations dues à la distance (atténuation géométrique) ou au milieu géologique traversé par les ondes sismiques (atténuation anélastique ou intrinsèque), mais d'éventuels effets de site (écho, amplification locale, par exemple par des sédiments ou dans des pitons rocheux) peuvent perturber les courbes moyennes de décroissance que l'on utilise pour déterminer l'intensité et l'accélération maximale du sol qu'ont à subir les constructions sur les sites touchés, ou qu'ils auront à subir sur un site précis lorsqu'on détermine un aléa sismique.

Statistiquement, à 10 kilomètres d'un séisme de magnitude 6, on peut s'attendre à des accélérations de 2 mètres par seconde au carré, des vitesses du sol de 1 mètre par seconde et des déplacements d'une dizaine de centimètres; le tout, pendant une dizaine de secondes [8] .

## I-3-les ondes sismiques :

Les ondes sismiques se divisent en deux grandes

catégories :

- les ondes de volume P et S .
- les ondes de surface de Rayleigh et de Love .[9]

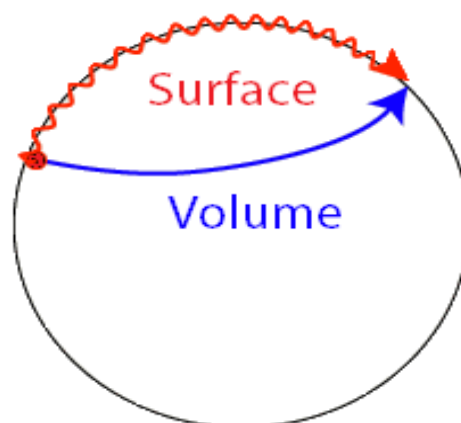


Figure I.2 les modes de propagation des ondes .

# Chapitre I Notion de sismologie

Les ondes de surface ne peuvent se déplacer qu'à la surface de la terre par contre les ondes de volumes peuvent la traverser de part en part ,deux trains d'ondes se propageant a des vitesses différentes sont formé : onde de compression et onde de distorsion, les premières sont appelé ondes longitudinal ; compriment et dilatent successivement le milieu parcouru , les secondes ondes transversales, font osciller les particules des sols perpendiculairement a la direction de la propagation, la vitesse des ondes sismiques est variable selon la nature des milieux traversés , les ondes longitudinales arrivent toujours en premier et dons sont plus rapides pour cette raison elles portent le nom d'ondes p ,les secondes enregistrées sont des ondes transversales appelées aussi ondes s .

## I-3-1-les ondes de volume :

la vitesse des ondes P est donnée par la relation suivante :

$$V_P = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$$

K : module d'incompressibilité (Pa ou kg/m.s<sup>2</sup>)

$\mu$  : module de cisaillement (Pa ou kg/m.s<sup>2</sup>)

$\rho$  : masse volumique (kg/m<sup>3</sup>)

VP : vitesse des ondes P (m.s<sup>-1</sup>)

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$$

La vitesse des onde S se traduit par une autre relation :

K et  $\mu$  étant des valeurs positives, les ondes P sont toujours plus rapides que les ondes S dans un même milieu.

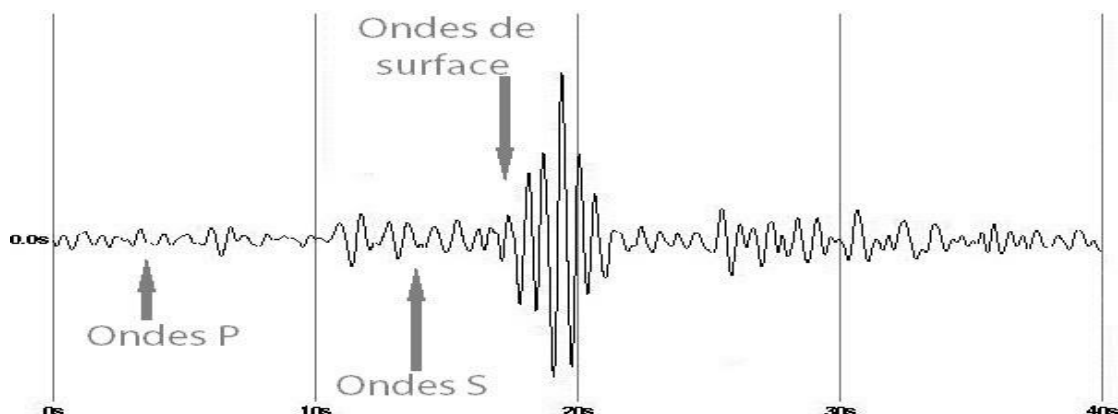


Figure I.3 la succession d'arrivée des ondes sismique sur un sismogramme .

# Chapitre I Notion de sismologie

plus le milieu traversé est difficile à comprimer, plus il se détend vite et plus l'onde se propage vite. plus le milieu traversé est difficilement déformé par des cisaillements, plus il revient vite à sa position initiale, et plus l'onde se propage vite. un liquide n'est pas déformable par des cisaillements ( $\mu = 0$ ), c'est pourquoi les ondes P sont plus lentes dans un milieu liquide, et les ondes S ne peuvent pas s'y déplacer ( $V_S = 0 \text{ km/s}$ ).

Le module d'incompressibilité  $K$  représente la relation de proportionnalité entre la pression et le taux de variation du volume, ce qui explique que, en profondeur, malgré l'augmentation de la densité et donc de la masse volumique, la vitesse des ondes augmente du fait de l'augmentation de la pression, plus importante que celle de la densité.

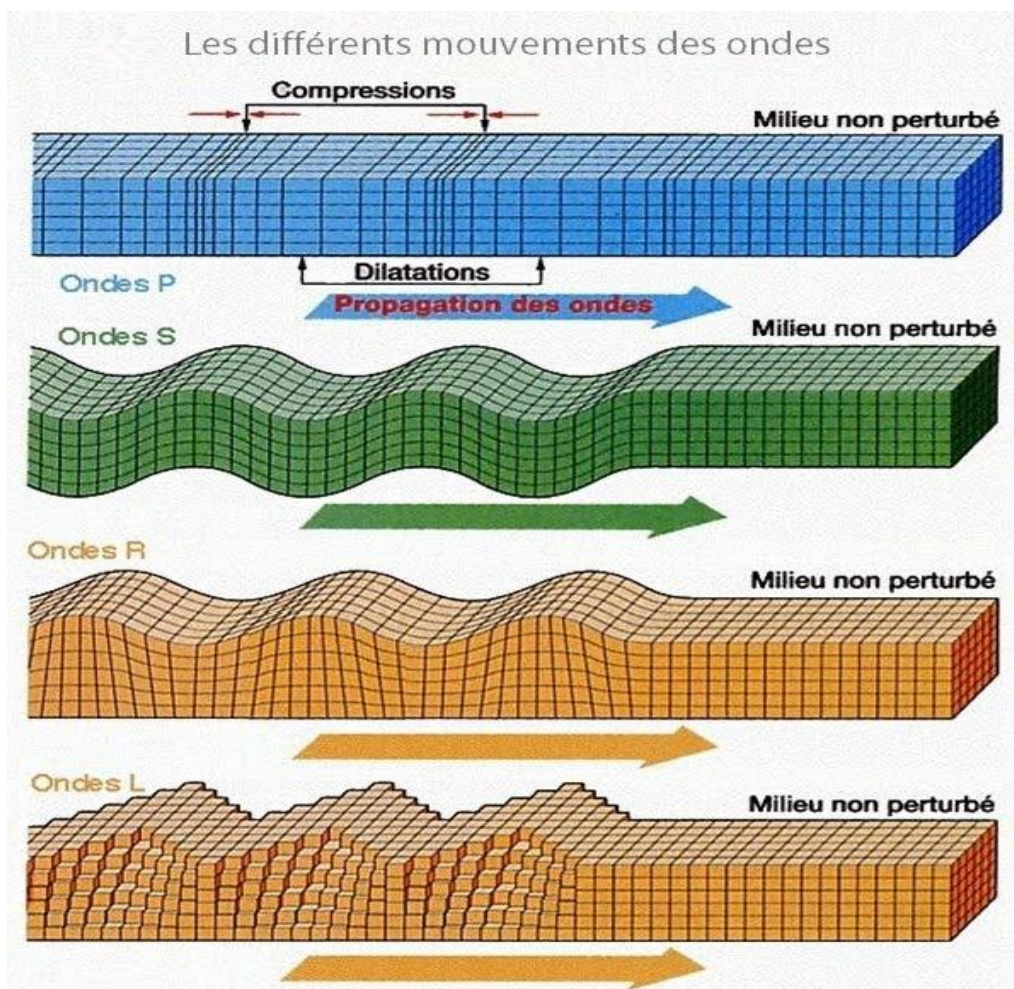


Figure I.4 : les différents mouvements des ondes

# Chapitre I Notion de sismologie

---

## **I-3-2-les ondes de surface :**

Les ondes de surfaces sont les seules provoquant de réels dégâts lors d'un séisme. Les plus connues sont les ondes de Rayleigh et de Love. Leurs mouvements sont très complexes : celles de Rayleigh ont un mouvement comparable à celui d'un objet porté par une vague tandis que celles de Love mélangent des déplacements longitudinaux et transversaux.[9]

## **I-4-les échelles sismiques :**

### **I-4-1-La force sismique :**

Les séismes ne sont pas tous aussi puissants. Leur force dépend du type de séisme, mais aussi de l'énergie déployée par le séisme. Il existe plusieurs moyens de calculer la force d'un séisme.

L'échelle MSK, du nom de ses développeurs, Medvedev, Sponheuer et Karnik, prend en compte les dégâts produits par le séisme, tandis que l'échelle de Richter permet de calculer la force d'un séisme en fonction de sa magnitude, de son énergie.

### **I-4-2-L'échelle de Medvedev-Sponheuer-Karnik :**

Cette échelle est issue de l'échelle de Mercalli, mise au point par le sismologue italien Giuseppe Mercalli en 1902. L'échelle de Mercalli était considérée trop subjective, puisqu'elle prenait en compte les réactions des victimes face au séisme[8]. Elle a été modifiée à de nombreuses reprises, avant d'être définitivement remplacée par l'échelle de MSK en 1964. C'est l'échelle la plus employée pour mesurer les dégâts provoqués par un séisme de nos jours.

### **I-4-3-L'échelle de Richter :**

L'échelle de Richter a été mise au point par le sismologue Charles Francis Richter en 1935. Cette échelle est logarithmique de telle sorte qu'un séisme ayant une unité de magnitude de plus qu'un autre sera en fait 1000 fois plus puissant. Puisque cette échelle est logarithmique, elle n'a théoriquement pas de limite supérieure. Ainsi, le séisme de Valdivia, au Chili, de 1960, avait une magnitude de 9,5 tandis que l'échelle de Richter ne comporte que 9 unités. [10]

De nos jours, on utilise d'avantage l'échelle de magnitude du moment, mise au point en 1979 par le japonais Hiroo Kanamori. Elle dépend également d'un logarithme, mais est plus précise

## Chapitre I Notion de sismologie

---

que l'échelle de Richter, qui n' était véritablement efficace que pour les séismes de type californien.

Magnitude	Effets engendrés
9	Destruction totale à l'épicentre, et possible sur plusieurs milliers de km
8	Dégâts majeurs à l'épicentre, et sur plusieurs centaines de km
7	Importants dégâts à l'épicentre, secousse ressentie à plusieurs centaines de km
6	Dégâts à l'épicentre dont l'ampleur dépend de la qualité des constructions
5	Tremblement fortement ressenti, dommages mineurs près de l'épicentre
4	Secousse sensible, mais pas de dégâts
3	Seuil à partir duquel la secousse devient sensible pour la plupart des gens
2	Secousse ressentie uniquement par des gens au repos
1	Secousse imperceptible

Figure I.5 : Echelle de Richter



## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

### Introduction :

Il est d'abord important de souligner que ce ne sont pas les séismes qui tuent, mais les bâtiments qui s'écroulent sur leurs occupants. En règle générale, la majorité des constructions a été construite sans tenir compte de l'aspect sismique ou, au mieux, avec des méthodes inadaptées. Comme les sollicitations sismiques sont très différentes des sollicitations que l'ingénieur a communément l'habitude de considérer, les méthodes de dimensionnement traditionnelles ne conduisent pas à un comportement sismique avantageux. Les dernières générations des normes de construction tiennent compte des récents progrès du génie parasismique et elles incluent. On peut donc dire que le problème des nouveaux bâtiments est résolu et que les édifices construits selon ces nouvelles normes sont sûrs. L'enjeu principal se situe au niveau des ouvrages existants qui ont été construits selon les anciennes générations de normes et dont la sécurité sismique est largement inconnue. Après chaque tremblement de terre majeur, les images de désolation se répètent invariablement. Pour cerner la difficulté du problème, il faut comprendre les particularités des sollicitations sismiques et la raison pour laquelle elles sont si redoutables pour les bâtiments.

Un séisme est un événement violent et extraordinaire qui peut provoquer l'endommagement, voire même l'effondrement, des structures. Cependant, si les secousses sismiques provoquent des catastrophes, c'est surtout parce qu'elles agissent sur les structures d'une façon très particulière, bien différente de celle des autres charges[12].

### II-1-les sollicitations sismiques :

Par rapport aux charges habituelles, les sollicitations sismiques possèdent les caractères spécifiques suivants:

- horizontal
- cyclique
- dynamique

#### II-1-1-Caractère horizontal :

Durant un séisme, la base d'une structure est soumise à de brusques accélérations dans toutes les directions [12]. Cependant, les accélérations sismiques sont principalement horizontales, la composante verticale étant généralement moindre. C'est précisément le caractère horizontal des accélérations sismiques qui est particulièrement redoutable pour les structures car ces dernières sont prévues pour résister à des charges essentiellement verticales. En effet, les sollicitations

## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

auxquelles les structures doivent habituellement faire face sont en grande majorité verticales. Dans les bâtiments, c'est le poids propre qui domine. Le vent agit bien sur les structures de manière horizontale, mais son intensité est généralement beaucoup plus faible que celle des séismes

### II-1-2-Caractère cyclique :

Contrairement aux charges habituelles, les sollicitations sismiques agissent de manière alternée, dans un mouvement brutal de va-et-vient qui se répète plusieurs fois. L'aspect cyclique du séisme laisse des signatures caractéristiques, telles les fissures en croix dans les éléments fragiles comme les murs en maçonnerie.

Couplé au fait que les séismes endommagent les structures[12], l'aspect cyclique est particulièrement ravageur car il est lié à une dégradation rapide et progressive de la résistance de la structure. C'est exactement le même phénomène qui permet de rompre un fil de métal en le pliant "à bloc" à plusieurs reprises.

### II-1-3-Caractère Dynamique :

Durant un séisme, la base d'un bâtiment, jusqu'alors immobile, subit de brusques mouvements dans toutes les directions pendant une durée de quelques dizaines de secondes au plus[12], avant de se figer à nouveau. Les mouvements de la base étant rapides et saccadés, les étages n'arrivent pas à les suivre instantanément. En raison de leur masse, les étages suivent les mouvements avec un temps de retard. Plus la masse est élevée plus la force nécessaire pour l'accélérer est importante (il s'agit de la force d'inertie) et, donc plus le temps de retard est important. Une fois mises en mouvement les masses d'étage ne peuvent pas s'arrêter et repartir instantanément dans la direction opposée lorsque la base subit une des nombreuses inversions du mouvement imprimées par le séisme. Les étages sont soumis à des temps de retard différents de sorte que l'ensemble du bâtiment se met à vibrer un peu comme une corde (verticale) de guitare. Le caractère dynamique de la sollicitation sismique se traduit donc par une réponse oscillatoire, des vibrations, de la structure.

### II-2-Dégâts sismiques typiques :

En raison principalement de leurs caractères horizontal, cyclique et dynamique, les sollicitations sismiques causent des dégâts typiques aux structures[12]. Après chaque séisme important, le même constat se répète invariablement, des erreurs récurrentes sont à l'origine de la

## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

majorité des dégâts et des effondrements des constructions. Pourtant, ces erreurs sont aisément évitables par une conception parasismique .

### II-2-1-Types de dégâts :

Les dégâts qui se retrouvent immanquablement lors de chaque catastrophe sismique [11] peuvent être classés dans l'une des catégories suivantes:

- insuffisance de la stabilisation latérale
- fissures en croix
- étage souple (niveau souple)
- colonne captive et colonne courte (poteaux court)
- martèlement (entrechoquement)
- longueur d'appui insuffisante
- liquéfaction des sols

#### **a-Insuffisance de la stabilisation latérale :**

Evidemment, pour résister aux sollicitations sismiques horizontales, la stabilisation latérale de la structure est primordiale. Celle-ci requiert des éléments verticaux capables d'encaisser les charges horizontales sans se déformer démesurément (c'est-à-dire présentant une certaine rigidité). Ces éléments peuvent être des voiles (des murs porteurs), des cadres (structures formées d'un assemblage de traverses horizontales et de colonnes verticales, aussi appelés portiques) ou des contreventements (souvent des poutres triangulées, des treillis en acier)[12]. Cependant, même dans des régions sujettes à une forte sismicité, un grand nombre de bâtiments est doté d'une stabilisation latérale nettement insuffisante, ou inexistante. La sanction de cette lacune est implacable et se traduit souvent par un effondrement général de la structure.

#### **b-Fissures en croix :**

Les fissures en croix dans les murs sont la signature typique des sollicitations sismiques. En effet, elles mettent en évidence le caractère cyclique ainsi que la direction principalement horizontale de l'action sismique. Les efforts horizontaux provoquent une rupture oblique à  $45^\circ$  dans les murs verticaux fragiles (il s'agit de la traction diagonale perpendiculaire à la compression principale issue du cisaillement). La surface de rupture est alors inclinée à  $45^\circ$ . La forme en croix découle du fait que l'action sismique ne s'exerce pas uniquement dans une seule direction mais qu'elle s'inverse plusieurs fois durant l'événement.

## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

Les fissures en croix apparaissent principalement dans les murs en maçonnerie car ceux-ci présentent une faible résistance à la traction. Une fois les fissures en croix formées, l'endommagement va se poursuivre avec l'ouverture des fissures jusqu'à la rupture de l'élément et l'effondrement éventuel de la structure.

### **c- Etage souple :**

L'étage souple ou "soft-story" est certainement le dégât sismique le plus répandu car, à chaque reprise, il est responsable d'une majeure partie des effondrements de bâtiments.

Malheureusement souvent fortement exposées sismiquement, le premier étage des bâtiments est traditionnellement réservé à une affectation commerciale et doit donc offrir un espace maximum. Pour cette raison, il est libéré d'éléments structuraux encombrants comme les voiles (ou murs porteurs) qui y sont interrompus et remplacés par des colonnes. Cette configuration implique un comportement sismique particulièrement défavorable car l'immeuble s'affaisse alors sur son rez-de-chaussée. La prolongation des éléments de stabilisation jusqu'aux fondations constitue le remède à l'étage souple[12].

### **d- Colonne captive et colonne courte :**

Un autre problème courant concerne les colonnes (nommées aussi poteaux). Il s'agit des colonnes captives et des colonnes courtes. Ces deux phénomènes sont apparentés et sont souvent réunis sous la dénomination "short column". La colonne (généralement celle d'un cadre) devient captive lorsqu'elle est entravée sur une partie de sa hauteur dans ses déformations latérales par un autre élément, souvent un mur en maçonnerie. Ainsi, les mécanismes de colonnes captives sont souvent liés à des discontinuités des murs de remplissage en maçonnerie. Les discontinuités sont dues à la présence d'interruptions de murs ou de fenêtres, par exemple.

Pour suivre les déplacements horizontaux des dalles, les colonnes ne peuvent se déformer que sur une partie de leur hauteur, ce qui conduit à concentrer les déformations plastiques (rotules) où elles n'avaient pas été prévues. La capacité de déformation de la structure s'en trouve considérablement réduite, précipitant ainsi son effondrement. Il faut souligner que, dans la plupart des cas, les colonnes sont entravées par des éléments non porteurs mis en place après l'intervention de l'ingénieur, souvent à son insu. Le problème se retrouve dans le cas de colonnes courtes (peu élancées).

Pour remédier au problème des colonnes captives, il faut éviter les murs de remplissage partiel des cadres ou, s'ils sont souhaités, il faut les séparer du cadre par un vide (on parle de joint) qui autorise les déformations du cadre.

## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

### e- Martèlement :

Etant donné que les bâtiments sont sujets à des déformations horizontales importantes durant un séisme, deux bâtiments voisins peuvent entrer en collision si l'espace qui les sépare est insuffisant. Le martèlement (entrechoquement) des bâtiments constitue un dégât sismique typique en zone urbaine. Le danger est particulièrement important si les bâtiments sont de hauteurs différentes car ils n'oscillent de la même manière, en raison de leurs caractéristiques dynamiques différentes (fréquences fondamentales), augmentant les possibilités de collision qui intervient lorsque les directions de leurs mouvements vont s'opposer (déphasage). Si les étages coïncident, les dalles se percutent et les dégâts se limitent généralement autour de la zone de contact. Les dégâts sont plus importants si les étages sont décalés des hauteurs d'étage qui ne correspondent pas constituent en effet la situation la plus défavorable car les dalles percutent alors de plein fouet les colonnes du bâtiment voisin, pouvant les trancher net. Les dégâts engendrés par la collision entraînent souvent dans ce cas l'effondrement des deux bâtiments [12]. Le remède pour éviter le martèlement consiste à éloigner les bâtiments voisins en intercalant un joint parasismique (espace) suffisamment large.

### f- Longueur d'appui insuffisante :

Les zones d'appui (de liaison) des structures non monolithiques, tels que les structures en béton préfabriqué et surtout les ponts constitués d'une suite de poutres simples par exemple, sont très sensibles aux sollicitations sismiques qui imposent d'importantes déformations horizontales. Dans ces zones, les déplacements entre les éléments assemblés peuvent être bloqués, par un goujon par exemple, ou être guidés dans une ou plusieurs directions. Cependant les appuis fixes ne résistent généralement pas au caractère dynamique de l'action sismique qui engendre des efforts colossaux. Après leur rupture, l'élément appuyé n'est alors plus fixé et risque de tomber si les longueurs des zones d'appui ne sont pas suffisantes pour l'empêcher, d'autant que les mouvements sismiques peuvent conduire à un écartement des appuis. Dans le cas des ponts, leurs grandes longueurs accentuent encore le problème car les déformations sismiques ne sont alors plus synchrones au droit des appuis qui peuvent alors subir des mouvements opposés. Le remède consiste à prévoir une zone d'appui assez longue pour que les éléments ne tombent pas entre les appuis

### g- Liquéfaction :

Même si il ne s'agit pas à proprement parler d'un dégât de la structure, la liquéfaction du sol ou la perte de portance du sous-sol de fondation sont des phénomènes qui peuvent provoquer dans

## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

certains cas des dégâts sismiques à une large échelle. Une couche de terrains meubles en surface peut amplifier de manière très significative les secousses sismiques (effet de site). Mais, en plus, s'il s'agit de sables fins ou de limons peu compacts et saturés en eau le phénomène de liquéfaction peut apparaître induisant un comportement momentanément semblable à celui d'un liquide. Intuitivement, on peut expliquer le phénomène de liquéfaction de la manière suivante: sous l'effet des ébranlements, les grains de sable des dépôts lâches et saturés en eau veulent se compacter et gagner ainsi du volume, mais en se déplaçant pour le compactage, ils se mettent à flotter. L'exemple type est celui de la ville de Mexico qui est bâtie sur des dépôts sédimentaires mous avec un niveau de la nappe phréatique proche de la surface. Ces conditions géotechniques provoquent de nombreuses défaillances liées à la liquéfaction du sol de fondation: les bâtiments touchés s'enfoncent dans le sol alors que sur leur pourtour, le terrain reste à son niveau original ou est soulevé par l'expansion latérale du sol sous la fondation (figure 11, à droite).

Comme l'enfoncement ne se produit généralement pas de manière totalement uniforme, les bâtiments voisins se décollent au niveau de leurs joints. Les cas extrêmes conduisent à l'inclinaison, voire au renversement en bloc des bâtiments. Il faut relever que dans ces cas, même si les bâtiments sont irrémédiablement endommagés et doivent être démolis, ce type de dégâts a plutôt protégé les occupants en évitant l'effondrement des immeubles. En pente, il en résulte un danger accru de glissements de terrain qui peuvent être dévastateurs.

En présence de sols sensibles à la liquéfaction, la meilleure solution consiste à les éviter en construisant ailleurs. Si ce n'est pas possible, une fondation sur des pieux traversant la couche sensible pour s'appuyer sur un sol de meilleure qualité est un remède efficace [12].

### II-3-Exemples des séismes :

- Le tremblement de terre de Sumatra, en Indonésie ; le 26 décembre 2004, sa magnitude est comprise entre 9,1 et 9,3.

Bilan officiel : environ 230 000 victimes dont la plupart imputables au tsunami qui a suivi. C'est d'ailleurs le tsunami le plus grave et le plus meurtrier de l'histoire.

- Le tremblement de terre de Tangshan en Chine, le 28 juillet 1976, de magnitude 8,2, fait un ravage. Si les chiffres officiels parlent de 242 500 victimes, d'autres sources tablent sur 500 000, voir 800 000 morts.
- Le tremblement de terre d'Haïti le plus meurtrier le 12 janvier 2010, de magnitude 7,2. La secousse principale a duré près de 2 minutes 30. Au total, plus de 300 000 victimes.

## Chapitre II Effet des séismes sur les bâtiments

---

➤ Le séisme de Valdivia au Chili, le 22 mai 1960, de magnitude 9,5.

Bilan officiel : cette combinaison tremblement de terre / tsunami a causé environ 3000 à 6000 morts et deux millions de sans-abri principalement au Chili

### II-3-1-En Algérie :

- Séisme d'El Asnam : la ville d'El Asnam a connu deux tremblements de terre majeurs le premier : le 9 septembre 1954 de magnitude 6,7 ; bilan 1340 morts et 5000 blessés et le second le 10 octobre 1980, de magnitude 7,2 ; le séisme a causé la mort d'environ 3000 personnes et la destruction de la ville à 80% .
- Séisme de Boumerdes le 21 mai 2003, sa magnitude est de 6,7 le bilan fait état de 2.278 morts , 10.147 blessés et plus de 15 000 sans-abri .
- Séisme d'Oran (2012 )
- Séisme de Beni Ilmen Msila (mai 2010)
- Séisme de Bejaïa (2012-2013)



### Introduction :

La plupart des séismes tectoniques se produisent aux limites des plaques, dans les zones où une plaque glisse le long d'une autre où s'enfonce sous une autre plaque.

Une grande partie du Nord de l'Algérie est susceptible d'être soumise à d'importantes secousses sismiques dont les effets sont catastrophiques, (ces séismes font peser de graves menaces sur les populations, peuvent semer la mort en détruisant les habitations, les édifices publics, les ponts, les barrages et glissement de terrains, ...) comme on peut le remarquer sur le tableau 1.

Le désastre de Chlef en 1980 a réveillé les consciences, c'est ainsi le centre national de recherche appliquée en génie sismique CGS est créé en 1985. [13]

lieu	Année	Magnitude	Morts	Bâtisses détruites
Boumerdes	2003	6,8	2200	-
Ain temouchent	1999	5,5	25	600
Mascara	1994	5,6	171	751
Tipaza	1989	6,1	35	4116
Chlef	1980	7,3	2633	20000
Chelf	1954	6,7	1243	20000

**Tableau III.1 : Séisme et dégâts [16]**

l'action des séismes sur les constructions même si elle est dite accidentelle est maintenant une action réglementaire dont il faut tenir compte de cette action dans le calcul et la conception pour obtenir une structure parasismique.

la seule et la meilleure solution pour sauvegarder les vies humaines, les structures et l'économie de notre pays lors d'un séisme est la construction parasismique. [14]

De nombreuses règles et recommandations ont été éditées dont en particulier : Les règles parasismiques. (RPA 88), (RPA 1998) et le (RPA 1999).

Les règlements parasismiques définissent suivant la zone de sismicité :

- Dispositions et principes de conception.
- Règles de calcul.
- Dimensionnement des éléments structuraux.

### III-1-L'apparition du code parasismique :

Un code sismique de la construction, est «de mettre à la disposition des intervenants dans l'acte de bâtir des règles minimales pour protéger la vie en particulier et celle sociale qui taxe sévèrement l'économie non seulement de la zone touchée par le séisme mais nationale.

le code sismique seulement n'est pas suffisant pour garantir une bonne construction parasismique mais il faut aussi :

- La conception architecturale par l'architecte
- La conception parasismique et le calcul sismique par l'ingénieur
- Le respect de ces règles de construction parasismique par l'entrepreneur
- La foi technique d'application de ces règles par toute entité de contrôle et public et privé.
- Et la conviction de protéger son investissement,sa propre vie et celle de ses proches et des autres par le propriétaire ou maître de l'ouvrage.

D'après le tableau suivant,il est à constater qu'un règlement est souvent,pour ne pas dire toujours,un enfant de la douleur

### III-1-2-Réglementation parasismique en Algérie :

<i>Année</i>	<i>Séisme au Maghreb</i>	<i>Parution de</i>
1716	Alger	Mesures parasismiques – Dey CHAOUCH Alger
1954	Orleans Ville Algérie	Recommandations de constructions parasismiques AS 55
1980	El Asnam – Algérie	« Addenda 02/82 » au PS 69 – Règles parasismiques Algériennes RPA 81 et 83- Révision en RPA88
1985	Constantine Algérie	
1989	Tipaza -Alger	
1999	Aïn Témouchent Algérie	Révision du zonage en RPA99
2003	Boumerdes - Algérie	Révision du RPA99 en RPA2003

**Tableau III.2 : L'apparition du règlement parasismique en Algérie**

### III-2 L'évolution de la réglementation parasismique en Algérie :

#### III-2-1-les premières mesures parasismiques sont celles prises par le Dey Ali CHAOUCH d'Alger, après le séisme d'Alger de 1716 :

D'après les désordres constatés, ces mesures parasismiques concernent :

- Structure en maçonnerie porteuse
- Structure flexible : Type arcade
- Planchers constitués par des poutres en bois en saillie des murs sur lesquels elles sont posées.
- Les baies
- Renforts en bois pour les encorbellements

#### b-Points à retenir :

- Pas de calcul
- Pas de zonage sismique
- Pas de coefficients et paramètres sismiques
- Distinction entre type de contreventement :
  - Structure rigide : CV par refends
  - Structure flexible : Ossature déformable
- Recommandation de faire dépasser les poutres : Eviter la perte d'appui
- Raidisseurs au droit des ouvertures : les baies
- Disposition constructive pour les éléments qui seront appelés «secondaires» :

Ces renforts souvent appelés jambages contribuent sous l'action sismique de réduire l'effet dynamique local sous le séisme vertical.

#### II-2-2- Les recommandations AS55 :

après le séisme d'El Assnam 1954 :Le premier code parasismique « Recommandations AS55 » ,a été crée après le séisme de 1954 de Chlef (El Asnam ) Les recommandations AS55 (Mai 1955) a été «appliquées pour la construction après le séisme.

a-carte de zonage sismique de l'Algérie :

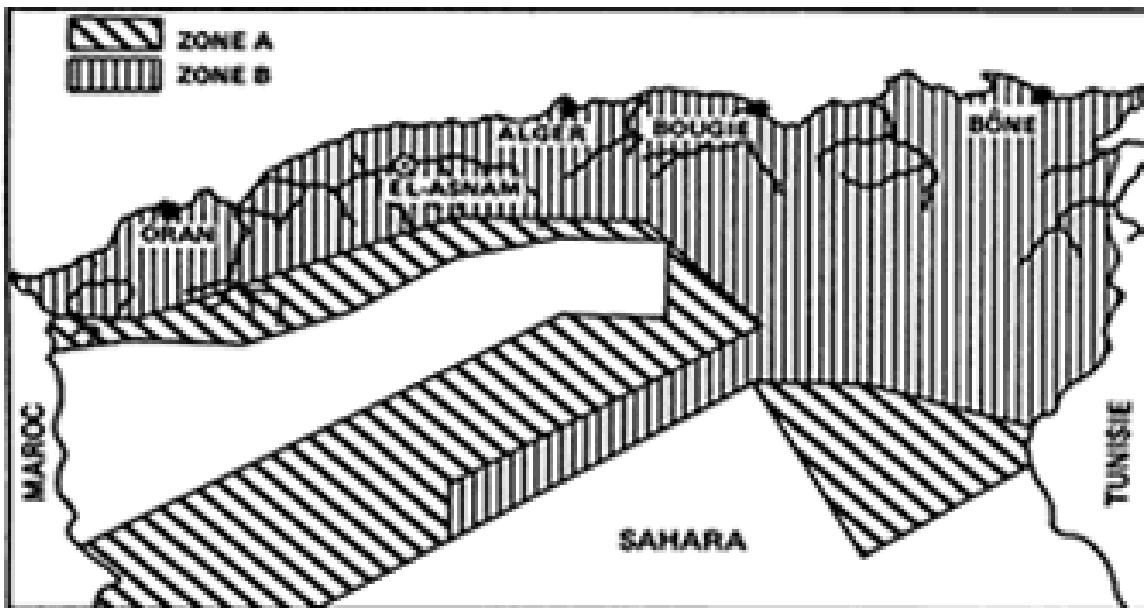


Figure III.1 : l'ancienne carte de zonage sismique de l'Algérie

### II-2-3-Apparition des règles parasismique après as55 :

Après les bases primaires donnés par les as55 l'Algérie a connu succinctement :

#### a- le règlement ps 69:

Les règles PS69 ont été élaborées après le tremblement de terre d'Agadir 1960 .

#### b-la naissance des RPA :

- Mise en place de la réglementation parasismique par la mise en œuvre de la carte microsismique de l'Algérie : De 1976 à 1978. Préparation du 1er RPA 80 avec l'université de Stanford-Professeur CHAH .
- Le séisme du 10 Octobre 1980 apporta son « accélération » pour donner naissance au premier RPA 80 qui va cohabiter avec le PS69 qui reçoit l'addenda 82.
- Les « Règles parasismiques Algérienne 1981Version 1983» est un document élaboré sur l'étude de sismicité de l'Algérie et du projet de règlement en collaboration de l'université de Stanford et des remarques des experts de Socotec, B.R.I Japon, CSTB, de Roumanie et Yougoslavie.
- Le RPA 88 est érigé « Document Technique Règlementaire : DTR B-C 2-48 » par ar- rêté n° 61 portant approbation du règlement parasismique Algérien version 1988 (RPA 88) .

- Le séisme de Témouchent de 1999 donna la version RPA99 Les principales modifications :

- Revue : Méthode statique équivalente
- Méthode dynamique spectrale
- Mise en chapitres des fondations et des matériaux

- Le séisme de Boumerdes/Alger 2003 est la 5ème version dite RPA99/version 2003

RPA99/2003 – Principales modifications :

\* **Reconnaissance et Etudes de Sol , Etudes de sol sont obligatoires :**

Sauf pour R+2 au maximum ou 11m de hauteur moyenne ( Surface totale des planchers : 400m<sup>2</sup>).

\* **Classification des Zones Sismiques. Passage à 5 zones :**

La zone II éclatée en 2 sous zones

3.4 : Classification des systèmes de contreventement.

\* **cartes de zonage sismique :**



Figure III.2. carte de zonage de l'Algérie (RPA 81)

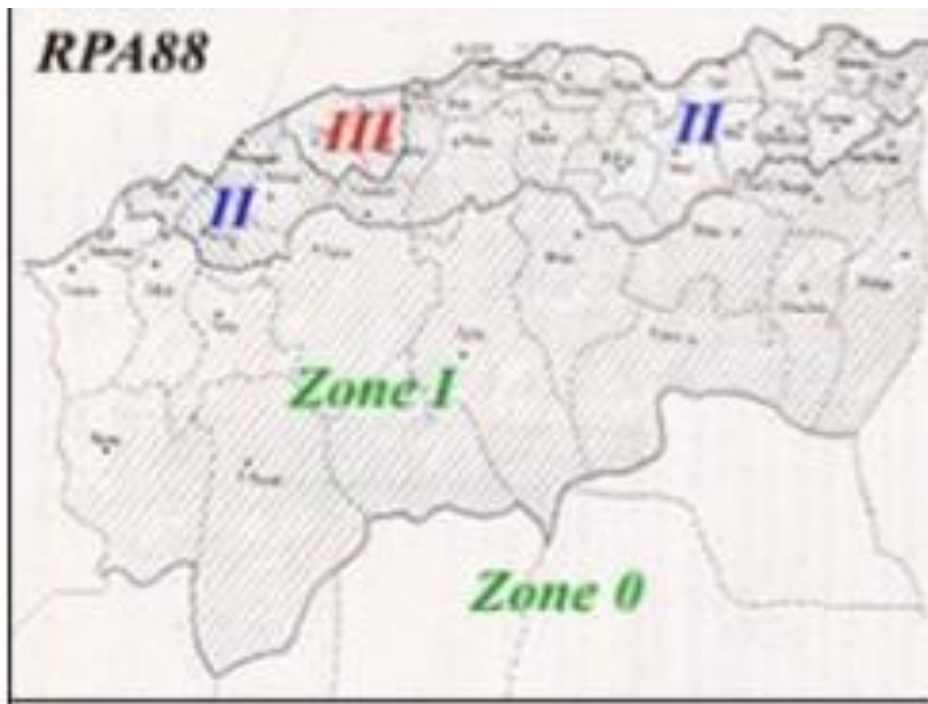


Figure III.3. carte de zonage de l'Algérie (RPA 88 )

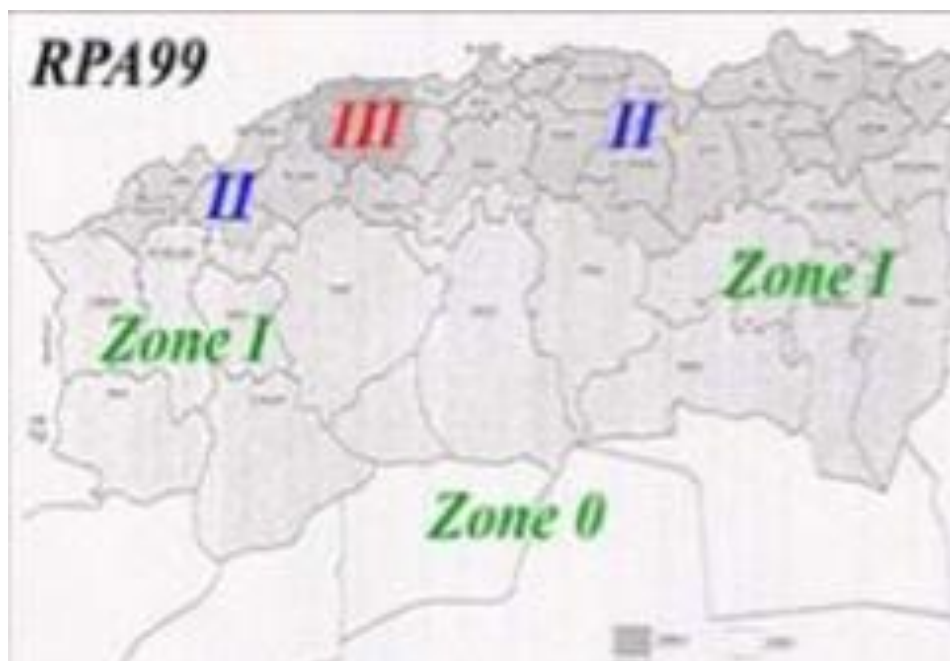


Figure III.4. carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA 99 )

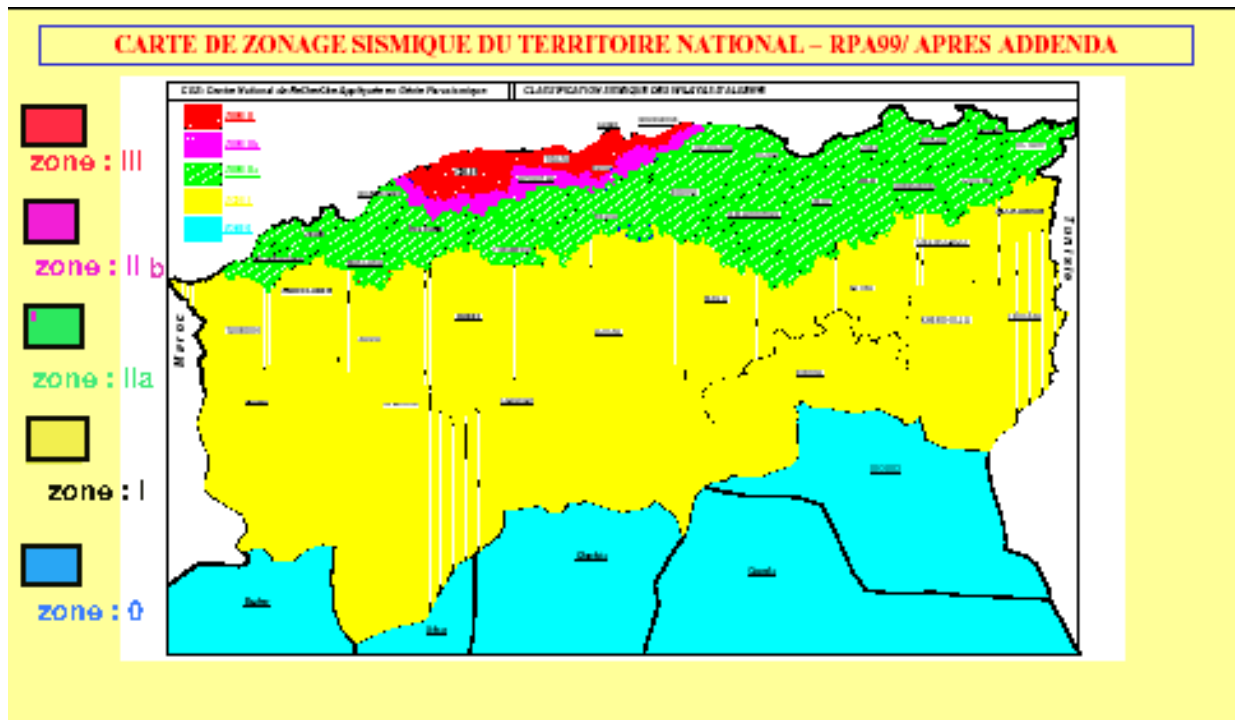


Figure III.5.la nouvelle carte de zonage sismique de l'Algérie (RPA 99/ v 2003)

### III-3- le règlement parasismique après 2003 :

Le séisme du 21 Mai 2003 d'Alger et Boumerdes a fait preuve de la fragilité des structures et de la négligence totale des règlements parasismiques dans la réalisation des bâtiments.

Les dommages importants et la ruine des constructions causés par ce séisme sont dus non pas au choix du type de matériau ou tu type de structure, mais à la conception et l'étude non conforme aux exigences parasismiques et à la mauvaise qualité des matériaux.

#### III-3-1-SEISME DE BOUMERDES EN MAI 2003

Le tout dernier séisme qui a frappé durement Boumerdes et sa région le 21 Mai 2003 s'est soldé par 2.250morts et 11000 blessés, il a endommagé 100 bâtiments et 343 maisons individuelles ce qui représente 128.000 logements dont 13.300 sont complètement détruits. [16]

Le bilan lourd est dû au non-respect des spécifications techniques de construction :

- Les poteaux de battisses sont armés avec un ferrailage sans rapport aucun avec la structure.
- Les constructions privées ont été plus touchées (négligence des règlements).

### III-3-2- PRINCIPES DE CONCEPTION :

Le respect des principes de conception des structures construites en zones sismiques à pour résultat de minimiser le supplément de prix nécessaire pour passer de la structure normale à la structure parasismique ils peuvent se résumer en :

#### a- Forme en plan :

Lorsque la forme en plan des bâtiments est dissymétrique (forme en L.T.U) cela entraîne des efforts de torsion dont les conséquences sont :

- L'effondrement de la partie commune des deux corps.
- L'effondrement d'une aile. [17]

#### b-Irrégularité en élévation :

Les variations brusques des rigidités en altitude présentent des risques (coup de fouet) ainsi que les grands porte à faux (Balcons) provoquent des conséquences aggravantes pour la stabilité d'une construction.

#### c-Système de contreventement :

Le respect des règles parasismiques et les dispositions constructives assure un bon comportement de constructions en béton armé :

##### \* *Portique en béton armé :*

Dans ce type de structure les poteaux sont les éléments les plus vulnérables, leur dégradation se produise aux extrémités en fonction de l'effort suivant le processus suivant :

- Fissures horizontales dues à l'allongement des armatures.
- Fissures des armatures longitudinales (insuffisance des armatures transversales)[15].

Dans le cas des poteaux courts la dégradation est due à l'importance de l'effort tranchant et l'insuffisance des armatures transversales (même cas est observé aux nœuds). [17]

### *\* Voiles :*

Le contreventement par les voiles apparaisse comme bien adapté à la construction parasismique parce qu'ils limitent les déformations relatives et protègent l'intégrité des éléments non structuraux.

### *\* Charpente métallique :*

La flexibilité et la légèreté des constructions métalliques rendent les efforts sismiques modérés. Cependant, l'association de l'ossature métallique avec des panneaux de façade préfabriqués où des panneaux de remplissage en maçonnerie constitue des points de faiblesse difficiles à éliminer.

### **d-Joints de dilatation**

Sous l'action des secousses, tous les joints doivent permettre aux blocs adjacents le libre déplacement (les structures ne vibrent pas à la même fréquence).

### **e-Matériaux de construction :**

Il y a de manière générale, dans notre pays un réel besoin de mise en place de procédures de normalisation et l'homologation des matériaux ainsi que le contrôle des points de leur production. (la qualité physique et mécanique des fers à béton importés a été incriminée dans les battisses détruites de Boumerdes).

Le choix du matériau de construction dépend de plusieurs facteurs : résistance – coût – destination de l'ouvrage.

La qualité du matériau de construction est estimée selon quelques critères déterminés à partir des contrôles effectués dans les laboratoires.

L'utilisation des matériaux fragiles (béton non armé, maçonnerie non chaînée en briques où en pierres est interdite dans les éléments contreventement. [18].

### **III-4-METHODES DE CALCUL :**

La quasi-totalité des méthodes d'évaluation de la charge sismique est basée sur la "théorie dynamique du génie sismique", d'où l'analogie qui doit en résulter, tant pour la définition de cette charge que pour les facteurs qui la conditionnent [19].

Les méthodes de calcul doivent tenir compte de la séismicité du site, des caractéristiques dynamiques de la construction et des conditions du sol.

Le calcul des forces sismiques peut être mené suivant trois méthodes :

### **III-4-1-Par une méthode statique équivalente :**

Qui est basée sur les conceptions parasismiques les plus récents au USA, dont le principe est de remplacer les forces dynamiques réelles développées dans la construction par des forces statiques fictives dont les effets sont considérés équivalents à ceux de l'action sismique, elle définit l'action sismique  $V$  où l'effort tranchant à la base de la

construction considérée par :  $V = 1/R(A.D.q.\omega)$

### **III-4-2- Par une méthode modale spectrale :**

Cette méthode est sans doute, la méthode la plus fréquemment utilisée pour l'analyse sismique des structures, elle est caractérisée par :

- La définition du mouvement sismique imposé aux supports sous la forme d'un spectre de réponse.
- L'hypothèse d'un comportement global linéaire de la structure permettant l'utilisation des modes propres.

Elle comporte les étapes suivantes :

- Etablissement d'un modèle de calcul reproduisant au mieux le comportement dynamique réel de la structure.
- Calcul des modes propres et fréquences propres du modèle.
- Lecture sur le spectre de réponse des valeurs maximales des réponses des modes propres.
- Calcul des réponses de la structure par combinaison des réponses modales.

### **III-4-3-Par la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes :**

Son application demande un personnel bien qualifié. Lors de la réalisation des constructions en zones sismiques il faut avoir le réflexe «construction parasismique» dès les premières esquisses.

[17] L'utilisation stricte des règles normales de construction permet de résister convenablement aux séismes. Les contreventements longitudinaux et transversaux sont importants et doivent être pensés à la naissance du projet. La qualité des matériaux de construction est souvent la cause de la gravité des conséquences des séismes. Il est essentiel de concevoir et de disposer des bâtiments sur le plan masse en fonction de la nature du sol (sol ferme, sol meuble).

### **III-5- les modifications apportées au zonage sismique :**

Le territoire national est divisé en cinq croissante: (05) zones de sismicité [18] : La zone II éclatée en 2 sous zones

Zone 0 : sismicité négligeable

Zone I : sismicité faible

Zones IIa et IIb : sismicité moyenne

Zone III : sismicité élevée



## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

### Introduction :

Pour la clarté de ce qui suit, il convient de donner ici la définition de quelques notions fondamentales.

#### - Aléa :

L'aléa est la probabilité d'occurrence dans une région et au cours d'une période donnée, d'un phénomène pouvant engendrer des dommages.

#### -Risque :

Le risque est une mesure d'un danger associant une mesure de l'occurrence d'un événement indésirable et une mesure de ses effets ou conséquences.

Le risque est souvent exprimé par la multiplication de ces deux quantités.

$$\text{Risque} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{coût}$$

#### - La vulnérabilité :

traduit la fragilité d'un système dans son ensemble et sa capacité à surmonter les effets provoqués par l'aléa.

**le craag** : Le Centre de recherches en astronomie, astrophysique et géophysique

### IV-1- Risque sismique :

le risque sismique, selon le professeur André Filiatrault, est associé à une zone géographique et est fonction de deux paramètres : l'aléa sismique et la vulnérabilité sismique. L'aléa consiste en « la probabilité associée à l'apparition d'un séisme causant un certain niveau de vibration » [20] , tandis que la vulnérabilité sismique représente le niveau de dommages causé par les secousses d'une intensité spécifique .

Du côté américain, sur le site Web du Federal Emergency Management Agency (FEMA, 2001 ), on mentionne que l'aléa sismique est stable au fil des ans, contrairement au risque sismique. Cette augmentation du risque sismique serait due au développement urbain important et à la vulnérabilité structurale des bâtiments anciens, qui sont la plupart inadéquats selon les prescriptions sismiques des codes de construction modernes. On considère qu'en un lieu particulier le risque est « l'espérance mathématique des pertes au cours d'une période de référence » [21]. Le risque est le produit de trois paramètres : l'aléa sismique, la vulnérabilité du système et la valeur exposée au risque. Le paramètre « valeur en danger » constitue un ajout par

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

rapport à la définition de Filiatrault.

$$\text{Risque} = L[(\text{aléa sismique}) \cdot (\text{vulnérabilité}) \cdot (\text{valeur en danger})] \quad (1.1)$$

Plus précisément, l'aléa sismique consiste en la probabilité d'occurrence d'un évènement destructeur d'une intensité donnée, en un lieu donné. Ensuite, la vulnérabilité du système est définie comme le degré de dommages correspondant à chaque évènement considéré. Le système peut comprendre un seul bâtiment ou un ensemble de structures, tel un quartier ou une ville entière. Dans le cas d'un groupe de bâtiments, la vulnérabilité globale est dominée par le type de bâtiments le plus vulnérable, lequel doit être identifié et caractérisé au préalable. Finalement, la valeur exposée du système comprend habituellement les montants assurés, bâtiments et biens, ainsi qu'une valeur estimée correspondant aux pertes humaines possibles. L'inclusion de la valeur permet d'évaluer les pertes associées à chaque niveau de séisme. Afin de quantifier précisément le risque, le risque associé à chaque niveau d'intensité sismique  $i$  doit être calculé. Dans la formule du risque de l'équation (1.2)

la fonction d'aléa,  $H(x)_i$ , combine l'aléa régional et les conditions locales. La fonction de conséquences,  $C(y)_i$ , tient compte de la vulnérabilité physique du bâti et des valeurs exposées. Le risque total est le résultat, pour toutes les intensités, de la double intégration du produit de la fonction d'aléa et de la fonction de conséquences.[23]

$$\text{Risque total} = \iint H(x), C(y). dx dy \quad (1.2)$$

### IV-2-sismicité historique en Algérie :

Les travaux de sismicité historique ont démontré que le premier séisme en Algérie olremonte à l'an 267 et s'est produit dans la région de Négrine (W. Tebessa). Durant l'époque romaine d'autres secousses ont put être révélées telles que les séismes de Tingad de l'an 800. D'autres séismes ont put être mis en évidence durant la période médiévale comme celui qui s'est produit à Alger en 1365.

La sismicité historique est cependant mieux connue à partir de la période turque et pendant la période coloniale où de nombreux document ont permis de mieux connaitre les événements modérés à forts qui se sont produits dans notre pays. Parmi les séismes historiques importants, il y en a deux qui retiennent l'attention parce qu'ayant touché les villes d'Alger et d'Oran et donc assez bien décrits [24].

Le premier qui s'est produit le 3 février 1716 semble avoir affecté durement la ville d'Alger. Le

## **Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité**

---

second séisme a touché la ville d'Oran et s'est produit le 9 octobre 1790. Il aurait fait près de 3000 morts et aurait contraint les forces espagnoles au départ.

Bien que ces séismes aient parfois causé des dégâts importants et la perte de nombreuses vies humaines, il faudrait cependant relativiser leur importance en raison de la mauvaise qualité du bâti de l'époque.

### **IV-3- Surveillance sismique :**

Pour surveiller l'activité sismique de notre pays, le Craag dispose d'un réseau de surveillance sismique moderne composé actuellement de près de 80 stations sismologiques numériques réparties dans la région nord. Ce réseau permet ainsi de détecter n'importe quelle secousse, la plus faible qu'elle soit.

La surveillance sismique permet :

- de suivre dans le temps le phénomène des répliques qui peut durer près de trois à quatre mois, voire même une année en cas de séisme important.
- de mener des études poussées sur l'activité sismique.

### **IV-4- Activité sismique :**

Grâce aux informations fournies par la surveillance sismique, nous pouvons affirmer :

- L'activité sismique se concentre essentiellement dans la région Nord du pays quoique de façon très épisodique, quelques microsecousses sont enregistrées dans la partie saharienne.
- L'activité sismique en Algérie du Nord est continue puisqu'elle se produit tout le long de l'année. Il faut aussi noter que chaque mois, il se produit environ une centaine de microsecousses en général non ressenties par la population.

Tous les deux mois environ se produit un séisme de magnitude supérieure à 3.5.

- Du point de vue Géodynamique et grâce à la théorie de la tectonique des plaques, on sait maintenant que les séismes qui se produisent en Algérie du Nord sont causés par l'affrontement des plaques tectoniques africaines et eurasiatiques. Cette confrontation qui est d'environ 0.6 cm par an entraîne la déformation des bordures septentrionale et méridionale des deux plaques majeures sus-citées, conduisant à la formation des chaînes de montagnes atlasique et alpine. Cette déformation génère l'existence de nombreuses failles actives qui jalonnent les régions atlasiques du pays. Le rejeu de ces failles provoque donc les séismes qui se produisent lorsque le

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

seuil de rupture de ces failles est atteint.

- L'identification des failles actives en Algérie s'est faite soit au travers des différents travaux scientifiques menées durant des décennies, soit au travers l'occurrence de séisme importants tels que les séismes d'El Asnam, de Constantine, de Tipaza ou de Boumerdes. Ces failles se répartissent tout le long des trois domaines géologiques que sont l'Atlas tellien, le domaine des Hauts Plateaux ou la région de l'Atlas saharien.

Parmi les structures actives les mieux connues, on peut donc citer: la faille d'El-Asnam : qui s'étend sur près de 40 km. Elle a donc généré le séisme du 10 octobre 1980 de magnitude 7.3 et est à l'origine du séisme de 1954. On peut également citer les failles de la région d'Oran, de Ain Temouchent, de Constantine, de Béjaia, d'Alger ou de Msila. Malgré cela, restent encore de nombreuses failles cachées à des kilomètres en profondeur et que seul un séisme peut révéler. C'est le cas des failles de la région de Guelma soupçonnées par l'existence des petits séismes[24].

### **Iv-5- Aléa sismique :**

Au travers des catalogues de sismicité reprenant l'ensemble des événements sismiques qui se sont produits, une évaluation de la probabilité d'occurrence sur une période de retour donnée est réalisée par les études d'aléa sismique. Ces estimations de l'aléa sismique ont permis d'établir les premières cartes de zonage du territoire. Ces cartes démontrent que la région tellienne est la plus exposée à l'activité sismique. Dans cette région, les niveaux d'accélération sont parfois importants (région de Chleff,...).

La région des Hauts-Plateaux est, quant à elle, moins exposée. Seules quelques événements modérés sont recensés dans cette zone. La région de l'Atlas Saharien se caractérise par une faible sismicité

### **IV-6- vulnérabilité sismique :**

Notre tissu urbain se caractérise par la diversité de son bâti puisqu'on y distingue le bâti historique matérialisé par les Casbahs, par le bâti de type colonial, le bâti récent post-séisme El Asnam, le bâti récent réalisé par les auto-constructeurs et l'habitat précaire. Si l'habitat public a bénéficié des mesures liées à la construction parasismique, il n'en va pas de même pour le reste du bâti qui présente une vulnérabilité importante. C'est pour cela que la résorption de l'habitat précaire participe pleinement à la réduction du risque dans notre pays [24].

## **Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité**

---

### **IV-7-Le risque sismique en Algérie :**

L'Algérie est concernée par le risque sismique. La possibilité qu'un séisme fort se produise et engendre des victimes et des dégâts importants est avérée. Des séismes récents nous l'ont rappelé

Le 10 octobre 1980, un séisme dévastateur à El Asnam , le 21 mai 2003 a Boumerdes , Ils ont fait de nombreuses victimes. On n'empêchera jamais un séisme de se produire, on peut cependant s'y préparer pour mieux l'appréhender

La partie nord de l'Algérie est située le long de la frontière de convergence des plaques africaine et eurasienne. Elle représente l'une des régions sismiques les plus actives de l'ouest de la méditerranée.

Plus de 800 événements sismiques de magnitude supérieure ou égale à 4, ont permis de dresser une carte de sismicité pour le nord de l'Algérie et les régions limitrophes pour la période 1790-2000. Cette carte fait ressortir le caractère hautement sismique des chaînes littorales de l'Algérie, et est assortie d'une représentation des solutions focales de vingt séismes les plus significatifs, associés à la période 1954-2000.

Parmi les séismes les plus destructeurs, nous pouvons citer celui d'Alger en 1716 d'intensité épiscopale  $I_0$  de 10, celui d'Oran en 1790 avec  $I_0 = 11$ , celui de Mascara en 1889 avec  $I_0 = 9$ , et plus récent, en 1980 El-Asnam ( $M_s = 6.0$ ), Tipaza en 1989 ( $M_s = 6.0$ ), Mascara en 1994 ( $M_s = 6.0$ ), Alger en 1996 ( $M_s = 5.7$ ), Ain Timouchent en 1999 ( $M_s = 5.9$ ), et le plus récent en 2003 de Boumerdes. Tous ces événements sont localisés sur l'Atlas Tellien .

L'analyse tectonique des bassins sismogènes des secteurs d'Alger, de l'Oranie et du Constantinois a permis de retrouver une histoire géodynamique caractérisée par trois événements néogènes importants, ayant conditionné l'activité sismique du nord de l'Algérie.

#### **IV-7-1-Éléments de discussion sur le risque sismique à Alger :**

Les études sismo-tectoniques et d'aléa sismique au nord de l'Algérie n'ont sérieusement commencé que suite au séisme d'El-Asnam en 1980 [25]. Aujourd'hui les principales failles actives intra-plaques de l'Algérie du nord sont identifiées à terre [25]. Le danger vient aussi des failles actives en mer ; en effet, plusieurs séismes historiques et récents ont eu lieu en pleine mer. On peut citer : le séisme de Chenoua ( $M_L = 6.0$ ) en 1989 dont la faille, d'après la localisation des répliques (Sébaï, 1997 ; Maouche, 2002), s'étendrait à plusieurs kilomètres en mer, le séisme d'Alger connu sous le nom de Ain-Bénian ( $M_s = 5.7$ )

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

En 1996 ou bien le dernier en date celui de Boumerdes ( $M_w = 6.8$ ) en 2003. On trouve aussi dans les archives qu'un fort séisme s'est produit en 1365 au large d'Alger détruisant une grande partie de la ville et inondant les parties basses de la ville suite au tsunami qu'il aurait occasionné (Rothé, 1950). Ceci constitue une preuve de l'existence d'accidents sous-marins actifs. La première campagne en mer pour étudier la marge algérienne a été réalisée juste après le séisme de Boumerdes.

Parmi les failles actives identifiées dans l'algérois, la faille du Sahel revêt une très grande importance car elle se situe proche de la capitale du pays où demeurent plus de trois millions d'habitants. La faille du Sahel constitue la continuation vers l'est de la faille de Ménaceur (à l'ouest du Nador). On pense que c'est une faille de chevauchement qui est à l'origine du soulèvement de la région côtière, s'étendant de l'est du mont Chenoua entre Nador et Tipasa-ville (Figure. 1.2) jusqu'à la baie d'Alger (une distance d'environ 70 km).

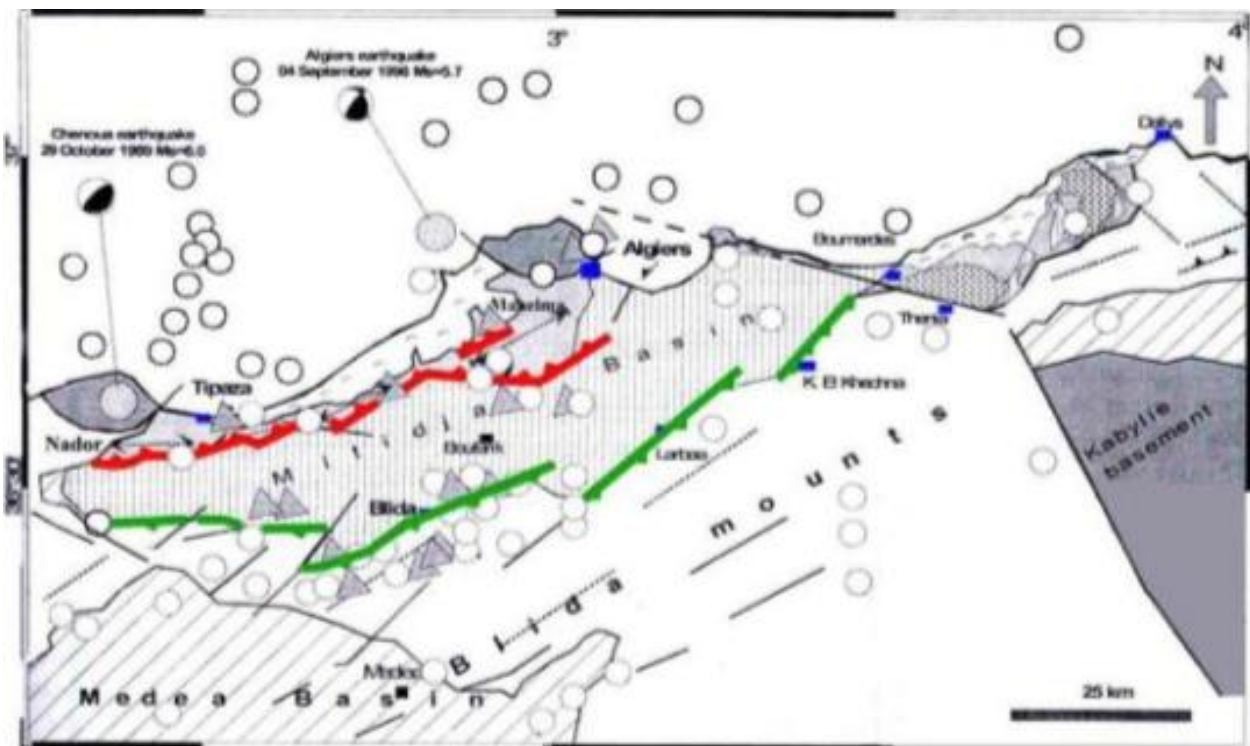


Figure IV.1 : Les principales failles intra-plaque de l'Algérois : en rouge la faille du Sahel, en vert la faille sud de la Mitidja, cercle=sismicité, triangle=sismicité historique.

Concernant le système de faille associé à la partie sud de la structure du Sahel et le long de la

## **Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité**

---

partie nord de la plaine de la Mitidja, Glangeaud pense que la Mitidja est associée à un système de failles plutôt extensif (failles normales plongeant vers le bassin). Meghraoui (1988), qui a effectué plusieurs travaux sur le séisme d'El-Asnam, trouve que le pli-faille du Sahel et celui d'El-Asnam ont une signature sismo-tectonique identique.

L'autre faille de l'Algérois probablement active et très controversée, est la faille de Thénia. Boudiaf et al, (1998) se sont ainsi demandés si des changements "récents" dans le système de drainage proche de la faille de Thénia ne seraient pas liés à l'activité de celle-ci et donc à sa capacité de produire de violents séismes.

La faille de Thénia constituant la bordure NE du bassin de Mitidja s'étend des Issers au sud-est jusqu'à quelques kilomètres off-shore au nord du massif de Bouzaréah dans la direction nord-ouest. Sa partie sud-est est la mieux cartographiée avec une direction N120°E. Le décalage des cours d'eau observé sur des images aériennes et satellites suggère un décrochement dextre le long de ce segment de faille (SE). Plusieurs épicentres de séismes historiques ont été localisés près de cette faille, mais ces analyses ne constituent pas une évidence claire de l'activité de cette dernière. On le sait, la prédiction des tremblements de terre est peu fiable, et ne permet pas d'éviter les séismes. Étant donné que les décès et blessures sont la plupart attribués à l'effondrement de bâtiments et d'ouvrages d'art, ce sont ces installations qui doivent être évaluées vis-à-vis du risque sismique encouru [25].

### **IV-8-stratégie de réduction du risque sismique :**

La première stratégie de réduction du risque sismique en Algérie a été élaborée au lendemain du séisme d'El Asnam de 1980. De nombreuses mesures ont été prises dans les premières années qui ont suivi ce séisme. Cependant la décennie noire a ralenti considérablement la prise en charge de cette stratégie. En raison des effets désastreux constatés lors du séisme de Boumerdes, une nouvelle stratégie a été mise en place au lendemain de ce séisme par la promulgation de la loi 04-20 (décembre 2004) sur la prévention des risques majeurs. Cette récente loi édicte les différentes actions à mener ou à planifier par les différents acteurs de la prévention du risque sismique[24].

Une décennie s'est écoulée depuis la promulgation de cette loi. On peut affirmer que des progrès tangibles ont été réalisées depuis qui se sont traduits par :

## **Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité**

---

le renforcement des capacités technologiques du Craag, de la DGPC, du CGS,  
par un début de prise en charge du vieux bâti dans certains grands centres urbains (Oran, Alger...),  
par le renforcement des travaux de recherche scientifique, et dans la connaissance du phénomène sismique,  
par l'ouverture dans de nombreuses universités de masters dédiés aux risques,  
par la mise en place de la délégation aux risques majeurs,  
par l'implication renforcée des médias dans l'information du public,  
par une sensibilisation renforcée des populations par les campagnes de sensibilisation de la DGPC et par les campagnes d'informations menées par le Craag.

Malgré toutes ces actions, des efforts importants doivent être encore menés :

par le renforcement des capacités de nos institutions,  
par l'implication du plus grand nombre d'acteurs,  
par une meilleure technicité dans l'acte de bâtir en zones sismiques,  
par une meilleure formation de nos ouvriers et ingénieurs,  
par une attention plus accrue au vieux bâti,  
par une plus grande sensibilisation du public.

### **IV-9-la prévention :**

En raison des dégâts importants occasionnés de façon récurrente par les séismes qui se produisent en Algérie , La seule façon efficace de se protéger contre les catastrophes naturelles reste la prévention. Elle concerne les actions à mener, de manière à diminuer l'impact de ces derniers sur les pertes humaines et aussi sur le plan économique. Diminuer le risque ne peut se faire qu'en diminuant la vulnérabilité, parce que l'aléa découle des contraintes de notre environnement naturel et ne peut être modifié. Le rôle de l'ingénieur est de fournir des procédés de construction ou de réhabilitation qui permettent de réduire la vulnérabilité des nouvelles constructions ainsi que du bâti existant [24] .

## **Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité**

---

### **IV-10- la vulnérabilité sismique des structures :**

les structures ne réagissent pas de la même manière aux secousses sismiques .Certaines structures sont plus sensible que d'autre a l'endommagement par les séismes . Cette tendance a l'endommagement se traduit par la vulnérabilité .Elle es définie d'une manière générale comme étant le niveau de perte de valeur d'un système lorsqu'il est soumis à un événement endommageant . la vulnérabilité s'applique aussi bien à un bâtiment particulier qu'à une population de bâtiment [12] .

pour les ingénieurs. l'identification des divers facteurs affectant la vulnérabilité des bâtiments est de toute première importance dans le but de guider une conception adéquate de nouveaux bâtiments ainsi que dans celui d'évaluer la tenue sismique de bâtiment existants . pour les sismologues . il s'agit de tenir compte de la vulnérabilité des bâtiments endommagés par un événement lors de la détermination de la valeur de l'intensité sismique atteinte .Dans ce but .l'EMS-98 [3.5] a introduit la notion de classe de vulnérabilité . En fin la vulnérabilité d'une population de bâtiments est utilisée lors de l'estimation du risque sismique d'une agglomération , par exemple . Dans ce cadre , des courbes de vulnérabilité traduisant le niveau de dommage en fonction de l'intensité sismique sont nécessaire[12].

### **IV-10-1- Facteurs de vulnérabilité :**

l'observation des dégâts subis par les structures lors des séismes a permis d'identifier les principaux paramètres influençant la vulnérabilité des structures . Ces facteurs déjà mis en évidence dans les paragraphes précédents sont énumérés ci-dessous :

- Dimensionnement parasismique , respect des prescriptions des normes en vigueur .
- type de construction , en premier lieu le matériau de construction , mais également le type de contreventement (cadre ou refend , par exemple ) .
- Hauteur , nombre d'étages généralement critique entre 3 et 7-8 étages .
- Irrégularité en élévation de la stabilisation , étage souple , surtout au rez-de-chaussée .
- Irrégularité en plan , problème de torsion .
- Mode de rupture défavorable , effort tranchant , colonnes captives .
- sol et fondations , amplification dans les sols mous et liquéfaction .
- Exécution , qualité des détaille constructifs et des matériaux mis en oeuvre .

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

- Etat , dégradation éventuelles .

les facteurs de vulnérabilité sont d'un usage plus qualitatif que quantitatif . Lors de la conception de nouveaux bâtiment , la considération de ces facteurs permet d'assurer un comportement sismique adéquat de l'ouvrage . En ce qui concerne les bâtiments existants , les facteurs correspondent aux paramètres à prendre en compte pour leur évaluation sismique . Il faut relever que tous ces facteurs n'ont pas la même importance . Certains ,comme l'étage souple ou les défauts des détails d'armature par exemple , sont rédhibitoires et ne peuvent pas être compensés car ils conduisent irrémédiablement à un comportement sismique catastrophique . Alors que d'autres , comme le nombre d'étages ou les problèmes de torsion par exemple , ne sont véritablement défavorables que s'ils sont accompagnés d'une stabilisation déficiente [12] .

### IV-10-2-les classes de vulnérabilité EMS-98 :

la principale évolution de l'échelle EMS-98 par rapport aux échelles précédentes réside justement dans la considération de critères supplémentaires de vulnérabilité en plus du seul type de construction . la classification de la résistance des structures utilisée dans l'EMS-98 est résumé dans le tableau de vulnérabilité reproduit à la figure [IV.2] les types de structures sont répartis en six classes de vulnérabilité dénommées de A à F un cercle désigne .

la classe de vulnérabilité la plus probable et les traits verticaux délimitent l'intervalle à l'intérieur duquel le type de structure considéré peut se situer .

La classe A est réservée aux structures les plus vulnérables comme celle composées d'éléments en maçonnerie de moellons bruts ou de briques crues . A l'autre extrémité la classe F correspond aux structures les moins vulnérables comme celles en acier ou en béton armé avec un bon niveau de conception parasismique (CPS) [12] .

### IV-10-3-Tableaux de vulnérabilité utilisée par l'EMS98 :

le principe est de tenir compte des principaux facteurs influençant l'endommagement des bâtiments dans le but d'affiner l'évaluation de la secousse qui a produit les dégâts observés .En effet la violence de la secousse nécessaire à l'écroulement d'une bâtisse en maçonnerie mal construite n'est évidemment pas la même que celle qui entraîne l'effondrement de bureaux bien exécuté . pour cette raison , la définition des degrés d'intensité EMS-98 tient compte des différence de réaction sismique des structures [12] . par exemple , dans la définition du degré d'intensité VIII (dégât importants) la partie qui concerne les structures est libellée de la manière suivante :

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

- De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité A , subissent des dégâts de degré 4 , quelques-uns de degré 5 .
- De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité B , subissent des dégâts de degré 3 , quelques-uns de degré 4 .
- De nombreux bâtiments de la classe de vulnérabilité C , subissent des dégâts de degré 2 , quelques-uns de degré 3 .
- Quelques bâtiments de la classe de vulnérabilité D subissent des dégâts de degré 2 .

Type de structure		Classe de vulnérabilité A B C D E F					
MAÇONNERIE	Moellon brut, pierre tout venant	○					
	Brique crue (adobe)	○—					
	Pierre brute	...○					
	Pierre massive	...○—					
	Non renforcée, avec des éléments préfabriqués	...○—					
	Non renforcée, avec des planchers en béton armé	...○—					
	Renforcée ou chaînée	...○—					
BÉTON ARMÉ	Ossature sans conception parasismique (CPS)	...○—					
	Ossature avec un niveau moyen de CPS	...○—					
	Ossature avec un bon niveau de CPS	...○—					
	Murs sans CPS	...○—					
	Murs avec un niveau moyen de CPS	...○—					
	Murs avec un bon niveau de CPS	...○—					
ACIER	Structures en charpente métallique	...○—					
BOIS	Structures en bois de charpente	...○—					

○ Classe de vulnérabilité la plus probable; — Intervalle probable;  
 .... Intervalle de probabilité plus faible, cas exceptionnels

**Figure IV.2 : Tableau de vulnérabilité utilisée par l'EMS\_98**

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

Les degrés de dégâts de 1 à 5 sont ceux définis dans le tableaux de la figure suivante :



Degré 1 : Dégâts négligeables à légers (aucun dégât structural, légers dégâts non structuraux)  
Fissures capillaires dans très peu de murs.  
Chute de petits débris de plâtre uniquement.  
Dans de rares cas, chute de pierres descellées provenant des parties supérieures des bâtiments.



Degré 2 : Dégâts modérés (dégâts structuraux légers, dégâts non structuraux modérés)  
Fissures dans de nombreux murs.  
Chutes de grands morceaux de plâtre.  
Effondrement partiel des cheminées.



Degré 3 : Dégâts sensibles à importants (dégâts structuraux modérés, dégâts non structuraux importants)  
Fissures importantes dans la plupart des murs.  
Les tuiles des toits se détachent. Fractures des cheminées à la jonction avec le toit ; défaillance d'éléments non structuraux séparés (cloisons, murs pignons).



Degré 4 : Dégâts très importants (dégâts structuraux importants, dégâts non structuraux très importants)  
Défaillance sérieuse des murs ; défaillance structurale partielle des toits et des planchers.



Degré 5 : Destruction (dégâts structuraux très importants)  
Effondrement total ou presque total.

Figure IV.3 les degrés de dégâts de 1 à 5 de l'EMS-98

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Intensité	Définition	Description
I	Non ressenti	Non ressenti, même dans les circonstances les plus favorables.
II	À peine ressenti	La vibration n'est ressentie que par quelques personnes au repos, en particulier dans les étages supérieurs des bâtiments.
III	Faibles secousses	Une faible vibration est ressentie à l'intérieur par quelques personnes. Des personnes au repos ressentent un balancement ou un léger tremblement.
IV	Largement observé	Le séisme est ressenti à l'intérieur par de nombreuses personnes et par un très petit nombre dehors. Quelques personnes sont réveillées. L'amplitude des vibrations reste modérée. Les fenêtres, les portes et la vaisselle vibrent. Les objets suspendus se balancent.
V	Fortes secousses	Le séisme est ressenti à l'intérieur par la plupart des personnes et par un petit nombre dehors. Les personnes endormies se réveillent. Quelques personnes sortent en courant. Les bâtiments entre en vibrations. Les objets suspendus oscillent fortement. La vaisselle, les verres tintent. La vibration est forte. Quelques objets lourds et instables se renversent. Les portes et les fenêtres s'ouvrent ou se ferment.
VI	Légers dégâts	Ressenti par la plupart des personnes à l'intérieur et par beaucoup dehors. De nombreuses personnes sont effrayées dans les bâtiments et courent vers les sorties. Les objets tombent. De légers dégâts apparaissent dans les bâtiments ordinaires, petites fissures dans les plâtres, chute de petits morceaux de plâtre
VII	Dégâts	La plupart des personnes sont effrayées et courent vers les sorties. Les meubles sont déplacés et de nombreux objets tombent des étagères. Un grand nombre de bâtiments ordinaires sont endommagés : petites fissures dans les plâtres, chutes partielles de cheminées
VIII		Dégâts importants Du mobilier peut être renversé. De nombreux bâtiments ordinaires sont endommagés chutes de cheminées, larges fissures dans les murs et un petit nombre de bâtiment peuvent s'effondrer partiellement.
IX		Destruction de bâtiments Des monuments sont renversés. Destruction partielle de nombreux bâtiments ordinaires. Quelques bâtiments s'effondrent.
X		Nombreuses destructions De nombreuses constructions s'effondrent.
XI		Destructions généralisées La plupart des constructions s'effondrent.
XII		Destruction totale Les constructions à l'air libre ou en sous-sol, sont toutes fortement endommagées ou détruites

Figure IV.4 échelles d'intensité macrosismique EMS-98

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

### IV-11- L'analyse de la vulnérabilité sismique :

Dans plusieurs pays à sismicité modérée, comme la France, ou forte comme l'Algérie, la plus part des bâtiments en béton armé a été construite avant l'application des nouvelles normes ou règlements parasismiques (EC8, RPA-2003). En raison de l'absence de prise en compte du séisme lors de leur dimensionnement ou de la modification de l'aléa sismique, de nombreuses structures en béton armé ne respectent pas les normes actuelles sans être pour autant moins sûres. Les méthodes de dimensionnement sont par ailleurs utilisées la plupart du temps sans précautions, parfois hors de leur domaine d'application, ce qui peut conduire compte tenu de l'hétérogénéité des structures existantes, à des interprétations erronées. Il est par conséquent primordial de se préoccuper de la problématique du risque et de la vulnérabilité sismique [26].

La notion de risque sismique peut s'exprimer de manière simple comme la combinaison de l'aléa et de la vulnérabilité. Une bonne connaissance de l'aléa, c'est-à-dire la probabilité qu'un événement se produise, est nécessaire pour bien comprendre les phénomènes. C'est le travail du sismologue. La vulnérabilité quant à elle peut être exprimée par la capacité de réponse d'une structure, ici d'un bâtiment, à une sollicitation sismique donnée. Elle est fonction de nombreux paramètres physiques, comme par exemple le matériau de construction utilisé, les périodes de vibration fondamentales ou encore la géométrie en plan ou en élévation de l'ouvrage.

Il existe deux familles d'approches dans l'analyse de la vulnérabilité : les méthodes empiriques qui sont fondées sur le retour d'expérience et les caractéristiques structurales des bâtiments, et les méthodes de vulnérabilité calculée qui se fondent sur le comportement des structures obtenu par modélisation numérique et essais à échelle réduite. Les méthodes de vulnérabilité calculée utilisent les méthodes d'intégration temporelle à partir d'un modèle mathématique complet du bâtiment considéré ou à partir de la modélisation simplifiée pour obtenir sa courbe de capacité reliant forces et déplacements (méthodes pushover). La combinaison avec un aléa (déterministe ou probabiliste) permet d'estimer l'endommagement de la structure.

#### IV-11-1- Courbe de capacité, fonction de vulnérabilité et courbe de fragilité :

##### \* *courbe de capacité* :

Le terme **capacité** peut être défini comme étant l'habileté d'une structure à subir un niveau de contraintes donné, exprimé en terme de force ou de déplacement. Ainsi, la courbe de capacité illustre la demande sismique totale qui agit sur une structure (sous forme de force de cisaillement ou d'accélération spectrale) en fonction de la déformation qui se produit en réponse à la demande

---

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

sismique (sous forme de déplacement spectral ou de déformation latérale il en haut du bâtiment). Cela est souvent appelé courbe *pushover*. C'est habituellement la réponse du premier mode qui est illustrée, ce mode étant prépondérant parmi l'ensemble des modes de réponse sismique [23]. Un exemple de courbe de capacité est présenté sur la figure (IV.5).

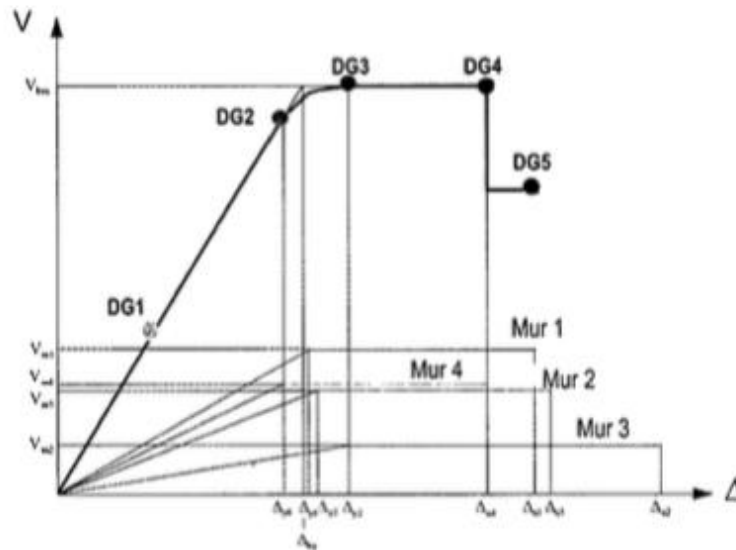


Figure IV.5 : courbe de capacité d'un bâtiment [27]

### \* La fonction de vulnérabilité :

Définit les dommages ou pertes attendues pour un bâtiment ou une classe de bâtiments, en fonction d'un paramètre de la demande sismique figure (IV.6).

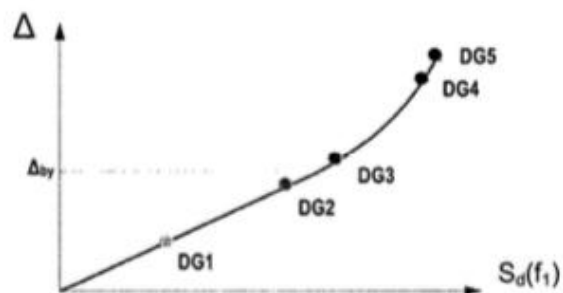


Figure IV.6: fonction de vulnérabilité d'un bâtiment [27]

La fonction de vulnérabilité est issue de la mise en commun d'une courbe de capacité propre à un bâtiment et d'une courbe de demande sismique propre au lieu où est situé ce bâtiment. Pour ce qui est de la demande sismique, auparavant c'était l'intensité qui était surtout utilisée. Cependant, les informations sur les mouvements réels du sol ne sont pas conservées lorsque l'on travaille

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

avec ce paramètre et les relations empiriques permettant de retrouver l'accélération au sol donnent des réponses variables. Les paramètres d'accélération spectrale,  $S_a$ , et de déplacement spectral,  $S_d$ , sont de meilleurs paramètres de demande sismique puisque ce ne sont pas des valeurs transformées sur une échelle. Dans le but d'effectuer la comparaison avec des études utilisant l'accélération maximale au sol (PGA), il peut être utile de calculer ce paramètre [23].

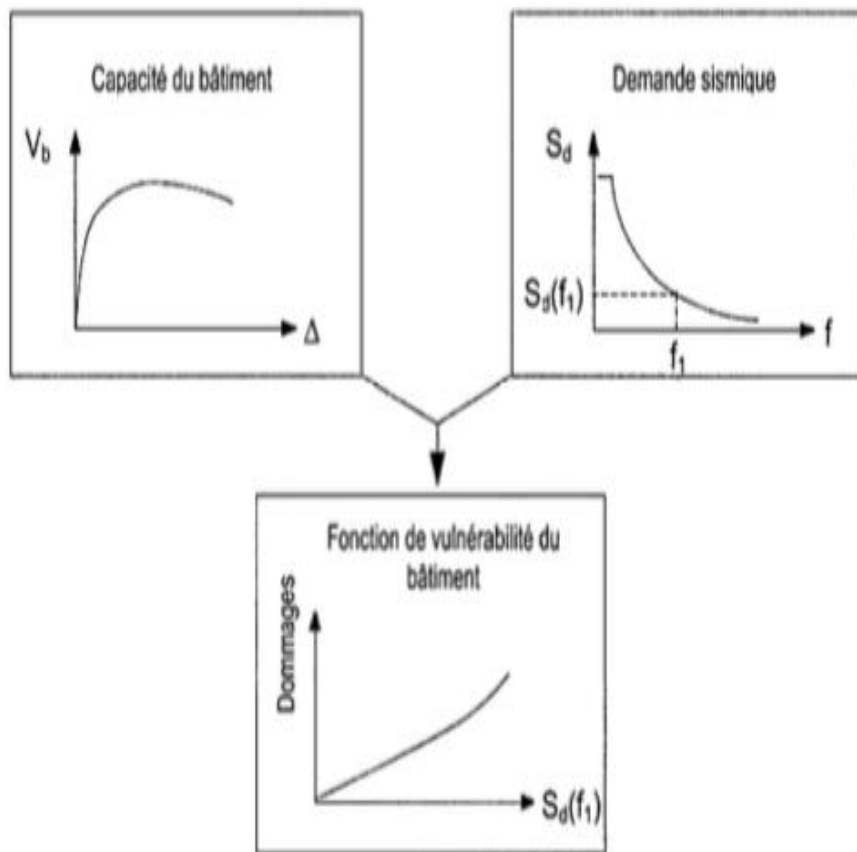


Figure IV.7 : le principe de la fonction de vulnérabilité [27]

### \* *courbe de fragilité* :

Illustre, pour une classe de bâtiments donnée, la probabilité qu'ils atteignent ou dépassent un certain degré de dégâts selon une estimation déterministe de la réponses spectrale. Ce type de courbe tient compte de la variabilité associée aux fonctions de vulnérabilité des classes de bâtiments (voir Figure IV.8).

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

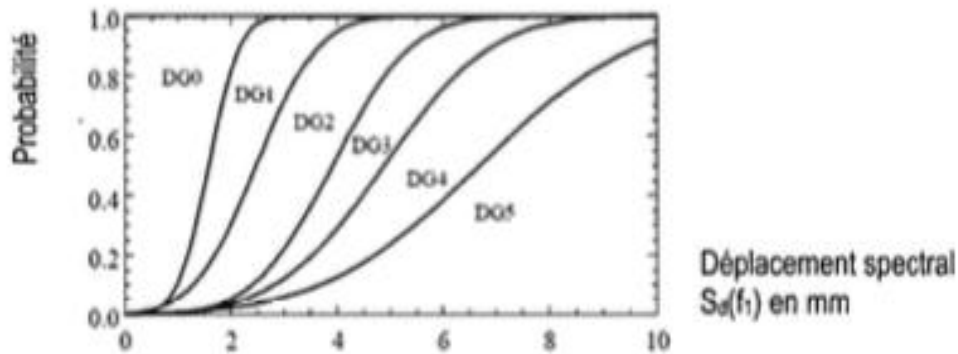


Figure IV.8 : exemple de courbes de fragilité pour une classe de bâtiments [27]

### IV-12- Méthodes existantes d'analyse de la vulnérabilité :

Les méthodes d'évaluation de la vulnérabilité sismique diffèrent par leur complexité, leur précision et leur objectif. L'évaluation d'un bâtiment typique se fait par des analyses structurales détaillées alors que les différentes approches d'évaluation de la vulnérabilité d'un ensemble de bâtiments reposent généralement sur l'utilisation de fonctions de vulnérabilité qui expriment le pourcentage de dommages subis par un type de structure pour différentes intensités sismiques. Ces fonctions de vulnérabilités sont élaborées en général à partir de l'observation des dommages causés par les séismes passés (matrice de probabilité de dommages, jugement experts, etc.). En l'absence de données suffisantes, le recours à des modèles analytiques permettant de construire les courbes de fragilités de bâtiments typiques, et donc de prédire les dommages, est une alternative intéressante. On peut considérer qu'il y a deux grandes méthodes pour évaluer la vulnérabilité sismique des bâtiments :

1. Les études statistiques basées sur les dommages observés lors de séismes passés et qui permettent d'obtenir des matrices de dommages probables associées à une classe de bâtiment. Ces matrices servent ensuite à développer des fonctions de vulnérabilité donnant pour un type de bâtiment la probabilité qu'un certain degré d'endommagement survienne en fonction de l'intensité d'un séisme. La valeur des résultats est essentiellement probabiliste.
2. les simulations par modèles numériques ou analytiques permettant d'obtenir la réponse d'une structure à un ou plusieurs scénarios de séismes. Les résultats sont généralement déterministes et valables pour un bâtiment en particulier [26].

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

### IV-12-1- Méthodes de jugement :

L'une des méthodes les plus simples pour obtenir une courbe de fragilité repose sur le jugement, basé sur les données de réponse obtenues à partir d'avis des experts. Surtout, lorsque l'information disponible sur les données enregistrées sont incomplètes ou insuffisantes, il est bon de s'appuyer sur des informations subjectives provenant des avis d'ingénieurs et de chercheurs spécialisés. Un comité d'ingénieurs des structures est réuni pour faire des estimations de la probabilité de distribution des dommages pour les différents types de structure lorsqu'ils sont soumis à des tremblements de terre d'intensités différentes. Une enquête est exécutée selon la méthode Delphi, dans laquelle plusieurs séries de questionnaires sont distribuées et leurs réponses mises à jour. Les fonctions de probabilité de distribution des prédictions d'experts, sont capable de représenter le niveau des dommages estimés des structures à chaque niveau d'intensité des mouvements du sol. La probabilité d'un état des dommages spécifié est établie à partir de la distribution des résultats et associée au niveau d'intensité des mouvements du sol correspondant pour obtenir un ensemble de courbes de vulnérabilité pour le type de structure associé [28].

L'étude la plus systématique, utilisant cette méthode, est effectuée par ATC (Applied Technology Council) aux Etats-Unis et les résultats de l'étude sont présentés dans le rapport de l'ATC-13 (ATC, 1985) [29] mis au point pour l'estimation des dommages du tremblement de terre aux installations en Californie. L'ATC a organisé un comité de plus de 70 experts en génie parasismique pour faire des estimations de la distribution des dommages probables pour les différents composants d'une infrastructure de type californien pour différentes intensités sismiques. Les questionnaires ont été préparés pour seulement deux catégories de structures et ils étaient utilisés pour répondre sur la probabilité d'une structure à avoir un état de dommage parmi les sept états de dommage pour une intensité donnée de l'échelle Mercalli (Modified-Mercalli Intensity MMI). Les résultats ont ensuite été compilés et présentés comme des matrices des probabilités de dommages pour les structures. La figure [IV.9] montre une forme générale de la matrice de probabilité de dommages définie dans ATC-13 (ATC, 1985) [29].

La fiabilité des courbes basées sur le jugement est douteuse en raison de leur dépendance à l'expérience individuelle des experts consultés. En plus de la subjectivité de l'avis des experts impliqués dans la méthode, le caractère aléatoire des mouvements du sol, leur intensité, l'incertitude sur la réponse structurale et la variété des classes de structures rendent cette méthode peu intéressante en comparaison avec les autres méthodes.

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

Damage State	Damage Factor Range (%)	Central Factor Range (%)	Probability of Damage in Percent By MMI and Damage State						
			VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
1 - NONE	0	0	95	49	30	14	3	1	0.4
2 - SLIGHT	0 – 1	0.5	3	38	40	30	10	3	0.6
3 - LIGHT	1 – 10	5	1.5	8	16	24	30	10	1
4 - MODERATE	10 – 30	20	0.4	2	8	16	26	30	3
5 - HEAVY	30 – 60	45	0.1	1.5	3	10	18	30	18
6 - MAJOR	60 – 100	80	-	1	2	4	10	18	39
7 - DESTROYED	100	100	-	0.5	1	2	3	8	38

**Figure IV.9 : Matrice de probabilité de dommages d'après ATC-13 .**

En Europe, cette méthode de jugement a été utilisée pour développer l'échelle EMS 98 (Echelle Macrosismique Européenne, 1998), qui associe un niveau d'endommagement à un niveau d'intensité. L'échelle EMS 98 est basée sur une classification des dégâts aux bâtiments en 12 degrés et pour plusieurs types de construction en acier, en béton armé et en pierre. L'échelle a été modifiée pour ne prendre en compte que cinq degrés de dommages .

### **IV-12-2- Méthodes empiriques :**

Une autre façon d'obtenir des informations sur la fragilité des structures est l'observation réelle des dommages structurels après un séisme (post-tremblement de terre). C'est pourquoi les informations concernant les dommages observés peuvent être collectées et statistiquement converties en courbes de fragilité. La méthode empirique est une approche plus réaliste que l'approche précédente, parce que l'état actuel des structures endommagées est évalué en détail compte tenu de ses ensembles structurels et les composants non structurels après un tremblement de terre bien réel.

A la suite de violents tremblements de terre, des courbes empiriques de fragilité des structures sont devenues plus courantes à la suite du mouvement de terrain et elles donnent des informations utiles sur les dommages aux structures. Plusieurs chercheurs ont utilisé des méthodes empiriques considérant des tremblements de terre ou une autre combinaison de plusieurs tremblements de terre (Shinozuka et al. [30]). Tous les chercheurs ont utilisé des procédures similaires pour déterminer les courbes de fragilité développées à l'aide des méthodes empiriques.

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

Les premières méthodes d'analyse de la vulnérabilité à grande échelle, basées sur les inspections visuelles, se sont développées dans des pays à forte sismicité, et aux Etats Unis. La méthodologie HAZUS (Hanus, 1999) [31] est une approche alternative développée par l'Institut National des Sciences de la Construction (National Institute of Building Sciences, NIBS) et soutenue par le FEMA.

A l'échelle européenne, plusieurs groupes travaillent en collaboration, parmi lesquels nous pouvons citer le Groupe National de Défense contre le Tremblement de terre en Italie GNDT (GNDT, 1993), le groupe AFPS et le CETE en France. Récemment, un projet européen (Risk-UE, 2003) [32] s'est focalisé sur la vulnérabilité de 7 grandes villes européennes et un consensus a été atteint pour la définition d'une méthodologie d'évaluation de la vulnérabilité.

Le programme Risk-UE, à l'image de la méthode HAZUS (Hanus, 1999) [31], est un programme d'évaluation du risque sismique appliqué à l'échelle européenne. Piloté par des institutions universitaires et des organismes de recherches, l'étude a abouti à une méthodologie d'analyse du risque sismique des bâtiments existants et historiques spécifiques à l'Europe. Le projet s'est focalisé sur la vulnérabilité de 7 grandes villes européennes et parmi eux la ville de Nice en France. Un consensus a été atteint pour la définition d'une méthodologie permettant une analyse plus fine du risque et de la vulnérabilité. Une étude bibliographique a été faite par le groupe de travail de l'Association Française de Génie Parasismique (AFPS) " Vulnérabilité sismique du bâti existant - Approche d'ensemble ", en vue d'une application en France [26].

Le projet VulnérAlp (Guéguen et al. [33]) " Vulnérabilité Sismique à l'échelle d'une ville Rhône-Alpine - Application à Grenoble ", propose une adaptation des méthodes italiennes au contexte français. Piloté par le LGIT (Laboratoire de Géophysique Interne et Tectonophysique, Université Joseph Fourier, Grenoble), la méthode développée permet une évaluation simplifiée de la vulnérabilité, elle s'est concentrée sur la possibilité de collecter des informations fiables sur la nature du bâtiment et sur la perception et la connaissance du risque sismique par la population. L'objectif principal du projet VulnérAlp (2003-2006) est donc l'application d'une méthode élémentaire d'évaluation sismique du bâtiment et de recensement de la vulnérabilité sociale [26].

Dans la plupart des cas, toutes ces méthodes ont été établies pour ce qui concerne la vulnérabilité physique sur la base d'observations post-sismiques, recensant les niveaux de dommage observés en fonction de la nature de la construction. Ces niveaux de dommage constatés (dans le cas notamment d'un pays à sismicité modérée), ne peuvent être reliés à un

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

mouvement du sol en l'absence d'enregistrement, mais seulement à une Intensité Macrosismique, estimée elle-même à partir des dégâts. Cette incohérence est une des limites de ces méthodes. Par ailleurs, les relations entre les paramètres structuraux et les dommages sont estimées de manière statistique. Ces approches basées sur le retour d'expérience statistique exigent beaucoup de données et elles ne sont validées que pour la région étudiée ou une région similaire. Elles n'ont pas d'intérêt pour un bâtiment isolé. Idéalement la classification typologique des bâtiments devrait être redéfinie pour chaque région en fonction des techniques de construction, des matériaux utilisés, etc. Ces méthodes ont aussi l'inconvénient de ne pas considérer les travaux de mise en conformité sismique.

Lorsque les limitations de déplacement sont utilisées par les chercheurs pour le développement des courbes de fragilité à l'aide des méthodes empiriques, il est presque impossible d'obtenir une bonne corrélation entre les données recueillies et les courbes de fragilité développées à l'aide de distributions normales ou lognormales, ou toutes fonctions d'interpolation. Par conséquent, il est essentiel que les fonctions empiriques de vulnérabilité basées sur les observations de terrain doivent compléter par une simulation analytique de données des dommages de structure.

### IV-12-3- Méthodes analytiques :

La manière la plus commune pour obtenir des courbes de fragilité est d'utiliser des modèles analytiques et des simulations structurelles. En l'absence de données d'observation et d'opinion d'experts, la seule façon d'enquêter sur la vulnérabilité des structures est d'utiliser des méthodes analytiques. Leur avantage est la possibilité d'exécuter de nombreuses analyses de structure. Dans le cas des méthodes analytiques, des simulations structurelles et les algorithmes correspondants sont importants. Le modèle de structure le plus simple est la structure à un seul degré de liberté (SDOF). Le modèle SDOF avec seulement quelques paramètres permet de calculer de nombreuses analyses dans un court laps de temps. C'est pourquoi les modèles SDOF ont été utilisés par de nombreux chercheurs (Ibarra et al. [34] et Jeong et al. [35]).

Bien qu'il soit facile d'obtenir de grand nombre des réponses statistiques dans un court laps de temps en utilisant des modèles simples (comme les modèles SDOF), l'inspection de la réponse structurale réelle et la distribution des dommages ne sont pas possibles. Habituellement, des modèles détaillés et des programmes en éléments finis sont utilisés pour obtenir la réponse d'une structure qui n'a pas un comportement simple ou possède des propriétés particulières. Il est généralement préférable dans de tels cas de procéder à une analyse élastique ou inélastique temporelle. Cependant, l'analyse temporelle est très compliquée et coûteuse en temps. Ces

---

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

difficultés ont poussé les chercheurs à utiliser des méthodes basées sur l'analyse spectrale. La plus courante des méthodes spectrales est la méthode du spectre de capacité. Dans cette méthode du spectre de capacité, des résultats de la méthode Pushover statique de la structure sont utilisés conjointement avec les résultats du spectre élastique (ou inélastique) afin d'obtenir un niveau de performance cible pour la structure (Sinozuka et al. [36]). Les analyses de fragilité fondées sur un modèle de système à plusieurs degrés de liberté (MDOF) ont été aussi utilisées par certains chercheurs [37, 38].

Les courbes de fragilité développées à l'aide des méthodes analytiques sont la seule option pour l'évaluation de la performance sismique des structures lorsque les données réelles des dommages de structures ou les avis d'experts ne sont pas disponibles. Dans cette méthode, des modèles analytiques de la structure sont créés et les mouvements du sol avec différents niveaux d'intensité sont considérés pour la simulation sismique des dégâts de structure en exécutant de nombreuses analyses.

Les résultats d'analyse sont utilisés pour élaborer des courbes de fragilité en déterminant la probabilité de dépasser un état limite des dommages spécifiés sous une intensité de mouvement du sol donnée.

En général, le modèle de distribution statistique retenu pour représenter les fonctions de fragilité de la structure dans cette méthode est un modèle de type loi cumulative lognormale dans lequel deux paramètres de la fonction cumulative de distribution sont employées pour définir la probabilité de dépasser un état de dommage :

$$P[D \geq D_{LS} | S = S_a] = \Phi\left[\frac{1}{\beta_T} \ln\left(\frac{x_{D|S}}{D_{LS}}\right)\right]$$

$$P[D \geq D_{LS} | S = S_a] \tag{5.2}$$

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

où (5.2) est la probabilité que le dommage calculé  $D$  (ou mesuré) dépasse un niveau de dommage limité  $D_{LS}$  pour un niveau d'accélération sismique  $S_a$ .  $D_{LS}$  est la valeur médiane du déplacement pour laquelle la structure atteint le seuil de l'état de dommage LS.  $\beta_T$  est l'écart type du déplacement pour l'état de dommage  $D_{LS}$ , et  $\Phi[.]$  est la fonction de distribution de la loi normale standard.  $x_{D|S}$  est le paramètre de la fonction de distribution  $\Phi$ .

### a- Méthodes déterministes basées sur la performance :

L'avènement du « Performance Based Design » en ingénierie sismique a mené au développement récent de diverses méthodes, tant pour la conception parasismique de nouveaux bâtiments que pour l'évaluation du risque des bâtiments existants. [39]

Ces nouvelles méthodes qui se fondent sur le comportement des structures obtenues par modélisation numérique et essais à échelle réduite, tendent à se substituer aux méthodes conventionnelles basées sur le retour d'expérience des séismes passés. [39]

En effet, des niveaux de performance sont définis par les différentes méthodes utilisant ce concept, l'endommagement structurel dans ce cas est déterminé par l'accélération ou le déplacement spectral au lieu et place de l'intensité macrosismique. [26]

Pour répondre à l'exigence sécuritaire susmentionnée, ces niveaux de performance sont mis en perspective avec un niveau d'aléa. Ce changement conceptuel s'est accompagné de changements fondamentaux traduits cette fois par l'évolution récente des méthodes de calculs en ingénierie sismique. [26]

La méthode de calcul la plus rigoureuse et plus complète d'analyse des structures sous l'action sismique est le calcul dynamique temporel non linéaire, qui permet de reproduire fidèlement le comportement de la structure et de connaître ses états de performance à différents instants du séisme, néanmoins ce type d'étude est difficilement envisageable pour des structures courantes car elle peut se révéler très coûteuse en temps de calcul en raison de la complexité des modèles et du nombre de calcul à réaliser. [39]

Par conséquent, le calcul non linéaire en poussée progressive (PUSH OVER) représente une alternative intéressante car les données matérielles sont similaires à celles de l'analyse temporelle non linéaire et les difficultés du calcul temporel pas à pas sont évitées. [40] [26]

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

La méthode "Push over" est basée sur le principe que la capacité d'atteindre un niveau de performance est évaluée en termes de déplacements, la structure est soumise à un chargement incrémental distribué le long de la hauteur, la courbe de capacité (Figure IV.10) est obtenue en contrôlant le déplacement en tête de structure. [41] [42]

La distribution de charges et le déplacement cible sont basés sur l'hypothèse que la réponse est fondamentalement contrôlée par un seul mode de vibration et que la forme de ce mode demeure constante durant le séisme. [43] [44]

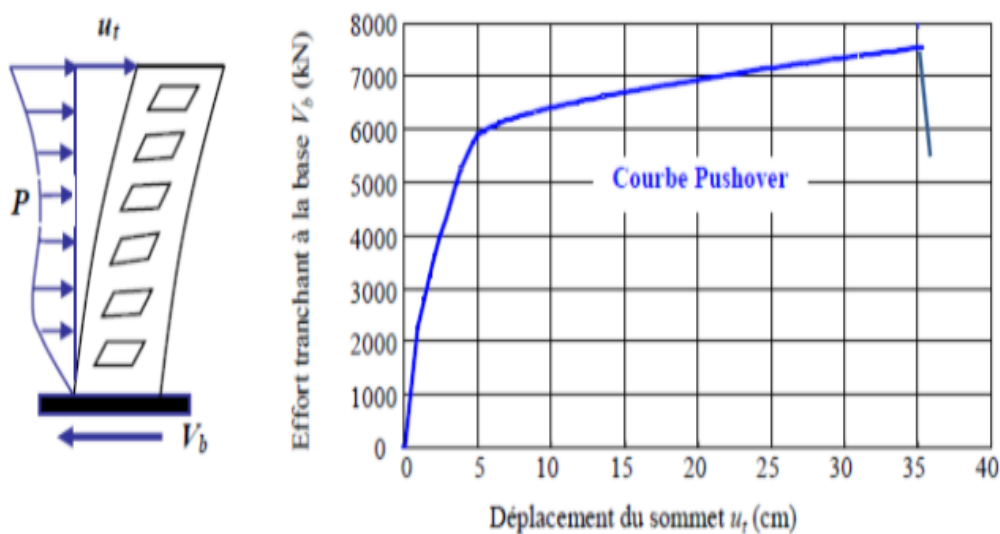


Figure IV.10: Courbe de capacité d'une structure ( $V_{base}$ - $D_{sommet}$ )

Le principe de la méthode push over consiste à superposer une courbe représentant la capacité résistante d'une structure issue d'une analyse non linéaire en poussée progressive (push over) avec une courbe représentative de la sollicitation apportée par le séisme (spectre de réponse). [42]

L'intersection de ces deux courbes évaluées à partir des considérations qui vont suivre représente un point de performance permettant d'évaluer le déplacement maximal que la structure subira et subséquentement son degré de pénétration dans le domaine plastique. [45]

Deux approches principales sont proposées, l'une utilisant l'amortissement, comme dans l'ATC 40, l'autre la ductilité, comme dans l'Eurocode 8. [46]

## Chapitre IV Risque sismique et méthodes d'évaluation de la vulnérabilité

---

L'Eurocode 8 permet de trouver un point de performance sur la base de la règle des déplacements égaux, le spectre inélastique est obtenu en réduisant le spectre élastique par un facteur  $R$  qui dépend de la ductilité de la structure ( $\mu$ ), tandis que les normes américaines prévoient des itérations avec plusieurs spectres représentant différents coefficients d'amortissement visqueux. [46]

Dans les deux cas, le point de performance obtenu devrait correspondre avec le déplacement maximal qu'on obtiendrait par la méthode non linéaire dynamique temporel. [47]



### V-1-Méthode empirique

Les investigations ont été menées dans les établissements concernés selon le canevas et les critères suivants :

Indice de vulnérabilité V :  $\begin{cases} 0: & \text{Dommage nul (préservation de la structure)} \\ I: & \text{Intermédiaire (réparation, renforcement, entretien,...)} \\ 1: & \text{majeur (démolition de la structure)} \end{cases}$

$$V = V_I + V_S + V_U$$



Critères	Etablissement 1 : le nouveau lycée	
Implantation : $V_I = 0.025$	Topographie : pente normal (0)	Sol : moyen (0.025)
Structure : $V_S = 0.25$	Période de construction : Apres 2003 (0)	Matériaux constitutifs : B.A (0)
	Configuration : En plan : irrégulière (0.07)  En élévation : régulière (0)	Contreventement par voile : non (0)
	Hauteur : $\leq R+3$ (0.02)	Voile périphérique : non (0.05)
	Joint : de dilatation (0.01)	Etude génie civil et suivi CTC (0.1)
Utilisation : $V_U = 0.05$	Effectif : surcharge (0.05)	Entretien : bon (0)

**Tableau V.1 : Résultats 1**

Critères	Etablissement 2 : CEM	
Implantation : $V_I = 0.5$	Topographie : pente normal (0)	Sol : mauvais (0.5)
Structure : $V_S = 0.18$	Période de construction : Apres 2003 (0)	Matériaux constitutifs : B.A (0)
	Configuration : En plan : régulière (0)  En élévation : régulière (0)	Contreventement par voile : non (0)
	Hauteur : $\leq R+3$ (0.02)	Voile périphérique : non (0.05)
	Joint : de dilatation (0.01)	Etude génie civil et suivi CTC (0.1)
Utilisation : $V_U = 0.075$	Effectif : surcharge (0.05)	Entretien : moyen (0.025)

**Tableau V.2 : Résultats 2**

Ces résultats peuvent être résumés ainsi :

Etablissement	Indice total V	Recommandation
Nouveau lycée	0.275	Etat moyen : nécessite entretien
CEM	0.755	Mauvais état : nécessite suivi

Tableau V.3 : interprétation des résultats

**V-2-Méthode analytique**

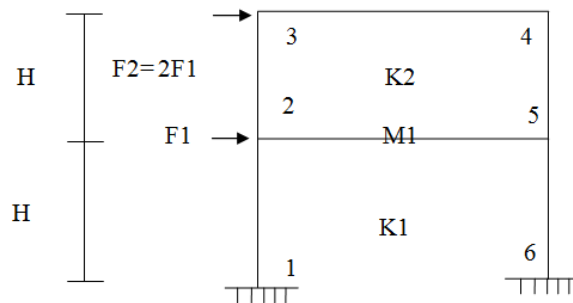
**V-2-1-Exemple d'application de l'analyse de vulnérabilité d'une structure par la méthode de calcul dite Push-over :**

Soit la structure suivante constituée d'un portique métallique à 2 étages soumis à un chargement triangulaire ( $F_2 = 2F_1$ ) que l'on fait varier jusqu'à la rupture complète de la structure et en suivant l'évolution de l'apparition des rotules plastiques au niveau des sections potentiellement critiques: c'est le principe de la méthode Push-over (poussée progressive).

$H = 3m, L = 4m, E = 2(10)^5 \text{ MPa}$  et  $\sigma_c = 240 \text{ MPa}$

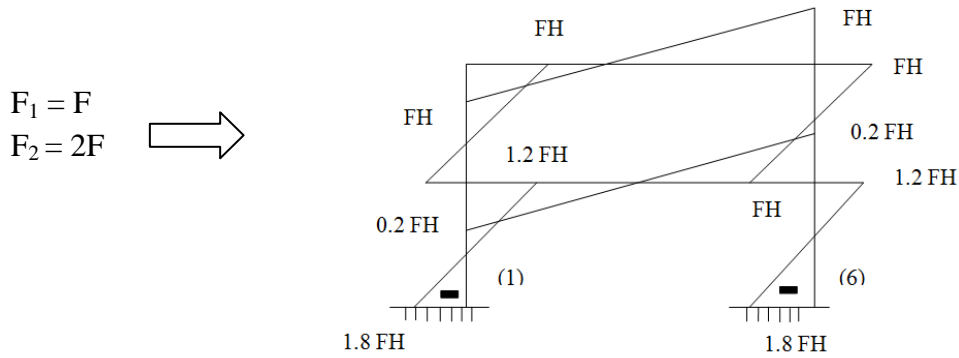
Poteau ( $40 \times 40 \text{ cm}^2$ )  $\implies I_{\text{poteau}} = 21,33 \cdot (10)^4 \text{ m}^4$

Poutre ( $40.30 \text{ cm}^2$ )  $\implies I_{\text{poutre}} = 16 \cdot (10)^4 \text{ m}^4$



$$\begin{aligned}
 & \left. \begin{array}{l} \text{Poteau} \\ \text{Poutre} \end{array} \right\} \begin{cases} M_p(\text{pot}) = \frac{3\sigma_e I_{\text{poteau}}}{h_{\text{poteau}}} = 3839.4 \text{ KN.m, } (M_p = \text{moment plastique}) \\ M_{em}(\text{pot}) = \frac{M_{p2}}{1.5} = 2559.6 \text{ KN.m, } (M_{em} = \text{moment élastique max}) \\ \\ M_p(\text{pout}) = \frac{3\sigma_e I_{\text{pout}}}{h_{\text{pout}}} = 2880 \text{ KN.m} \\ M_{em}(\text{pout}) = \frac{M_{p1}}{1.5} = 1920 \text{ KN.m} \end{cases}
 \end{aligned}$$

a- Diagramme des moments (méthode approchée) :

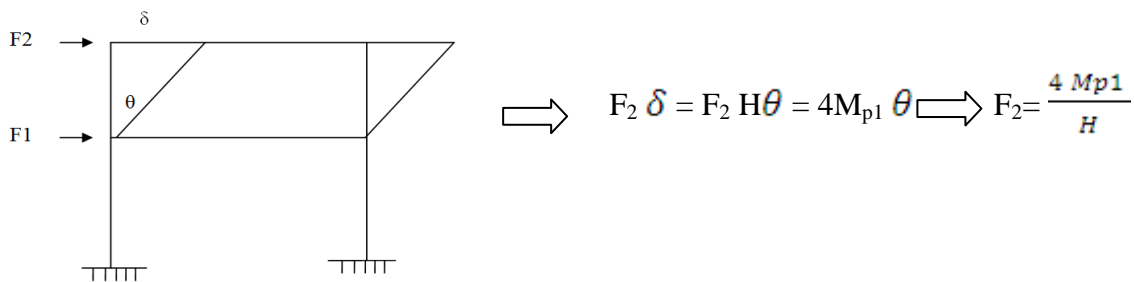


b- Mécanisme de ruine :

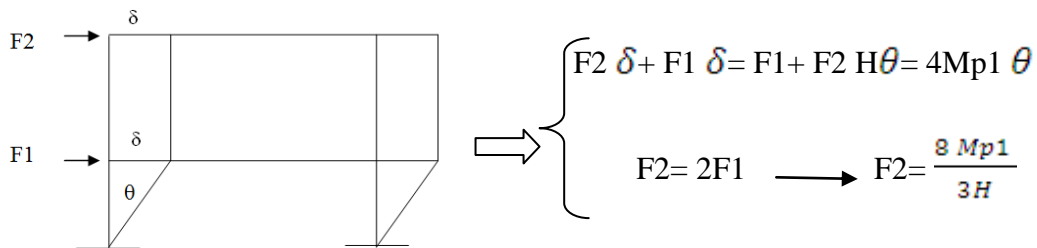
Le nombre de mécanismes indépendants :  $m = n - h = 6 - 3 = 3$

$w_e = w_i \implies M_{p2} = 1.3 M_{p1}$  (principe poteau fort ; poutre faible).

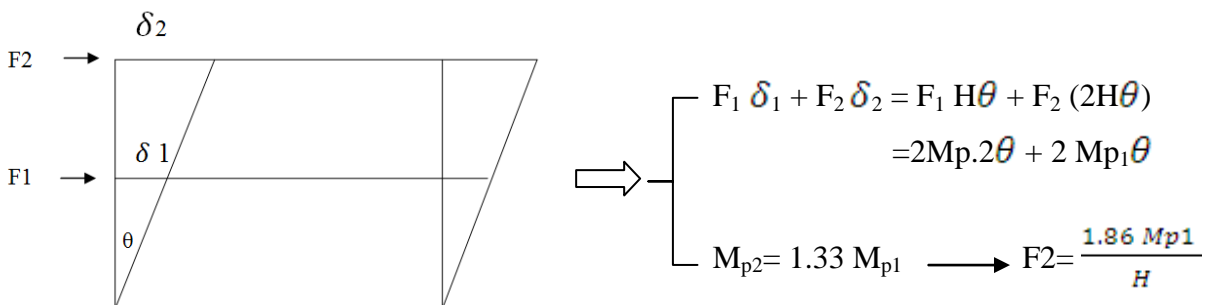
\* Mécanisme a



\* Mécanisme b



\* Mécanisme c



$F_2(c) < F_2(b) < F_2(a)$ . Donc : le mécanisme (c) est le mécanisme de ruine .

La charge de ruine dans ce cas est:  $F_2 = \frac{1.86 Mp_1}{H} = 1790 \text{ kN}$

\* *Phase élastique* ( $M_{max} \leq M_{em}$ )

$$M_{p1} = 2880 \text{ kN.m} \quad \longrightarrow \quad M_{em1} = \frac{Mp_1}{1.5} = 1920 \text{ kN.m}$$

$$M_{p2} = 3839.4 \text{ kN.m} \quad \longrightarrow \quad M_{em2} = 2559 \text{ kNm.}$$

Le moment max se trouve au niveau du pied de poteau (sections 1 et 6):  $M_{max} = 1.8 F.H$

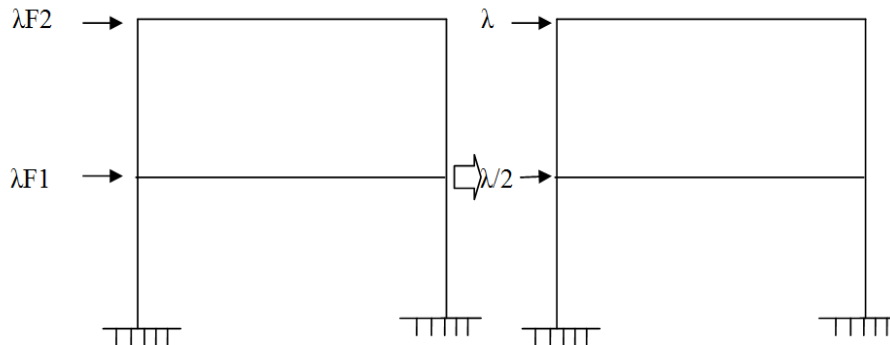
-Le comportement est élastique tant que  $M_{max} \leq M_{em2}$

$$1.8 F.H \leq 1920 \text{ kN.m} \quad F \leq \frac{2559}{1.8 (3)} \approx 473.8 \text{ kNm}$$

$$F_2 = 2F \quad \Longrightarrow \quad F \leq 948 \text{ KN}$$

$$F_2 \text{ est normalisée à } 1 \quad \Longrightarrow \quad F_1 = \frac{1}{2} = 0.5$$

-Pour décrire l'accroissement de  $F_2$  (et  $F_1$ ), on utilise l'incrément  $\lambda$ , ( $\lambda \geq 1$ )



Donc :  $1 \leq \lambda \leq 948 \text{ kN}$ .

$$\text{Tel que : } V_b = \lambda + \lambda/2 = 3/2 \lambda \quad \longrightarrow \quad 3/2 \leq V_b \leq 1421.7 \text{ kN}$$

$$\{X\} = [f]\{F\}, \text{ avec: } \begin{cases} \{X\}: \text{vecteur déplacement} \\ [f]: \text{matrice de flexibilité} \\ \{F\}: \text{vecteur force} \end{cases}$$

$$\text{Donc, } \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_2} \\ \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} F_1 \\ F_2 \end{Bmatrix}$$

En utilisant l'incrément  $\lambda$  et sachant que  $F_2 = 1$

$$\begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_1} \\ \frac{1}{k_1} & \frac{1}{k_1} + \frac{1}{k_2} \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} \lambda/2 \\ \lambda \end{Bmatrix}$$

-Comme on s'intéresse à  $X_2$  (déplacement du 2<sup>ème</sup> étage) :

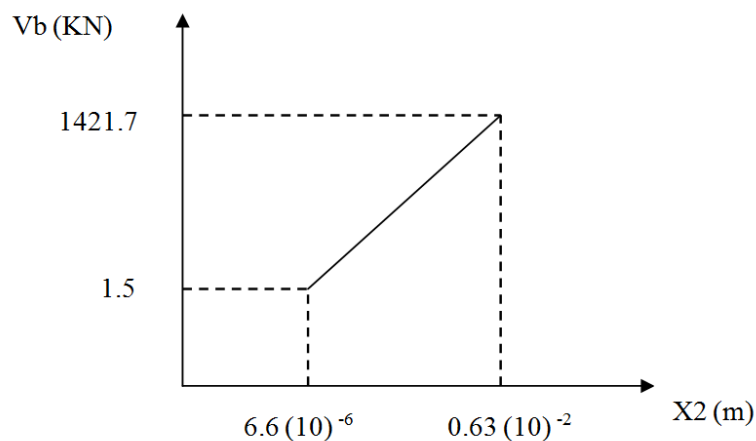
$$\begin{aligned} \text{On a : } X_2 &= \frac{\lambda}{2K_1} + \lambda \left( \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} \right) \\ &= \frac{\lambda}{2K_1} + \lambda \frac{K_1 + K_2}{K_1 \cdot K_2} \\ &= \frac{\lambda}{K_1} \left( \frac{1}{2} + \frac{K_1 + K_2}{K_2} \right) \end{aligned}$$

$$\text{Comme } K_1 = K_2 = \frac{2(12)EI(POT)}{H^3} = 3792 (10)^2 \text{ kN/m}$$

$$\text{Donc } X_2 = 2.5 \frac{\lambda}{K}$$

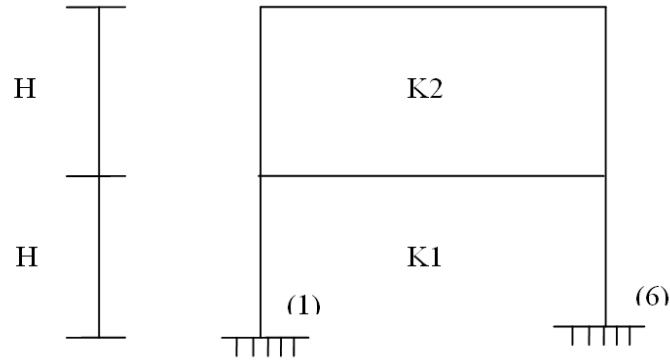
$$X_2 \text{ (m)} = 6.6 (10)^{-6} \lambda$$

$$\text{Finalement : } \begin{cases} \lambda : 1 \longrightarrow 948 \text{ kN} \\ V_b : 3/2 \longrightarrow 1422 \text{ kN} \\ X_2 : 6.6 (10)^{-6} \longrightarrow 2.6 (10)^{-4} \text{ m} \end{cases}$$



\* *Phase élasto-plastique :*

- 1) Apparition des premières rotules plastiques en 1 et 6 (moment max) :



$$K_1 = \frac{2(3)EI(\text{pot})}{H^3}$$

$$K_2 = \frac{2(12)EI(\text{POT})}{H^3} = 3792(10)^2 \text{ kN/m}$$

$$K_1 = \frac{K_2}{4} \text{ et : } K_2 = 4 K_1 \longrightarrow K_1 + K_2 = \frac{5}{4} K_2$$

Par application du principe : poteau fort –poutre faible énoncé par le code (RPA), on considère que la 2<sup>ème</sup> rotule va apparaître au niveau des poutres du 2<sup>ème</sup> étage.

$$\text{Donc : } \frac{M_{em}(\text{pot})}{1.8 H} \leq F \leq \frac{M_{em}(\text{pout})}{H}$$

$$473.8 \text{ kN} \leq F \leq 640 \text{ kN} \text{ Donc : } 948 \text{ kN} \leq F_2 \leq 1280 \text{ kN}$$

$$\text{C à d : } 948 \leq \lambda \leq 1280 \text{ Donc : } 1422 \text{ kN} \leq V_b \leq 1920 \text{ kN}$$

$$\hat{X}_2 = \frac{\lambda}{K_1} \left( \frac{1}{2} + \frac{K_1 + K_2}{K_2} \right)$$

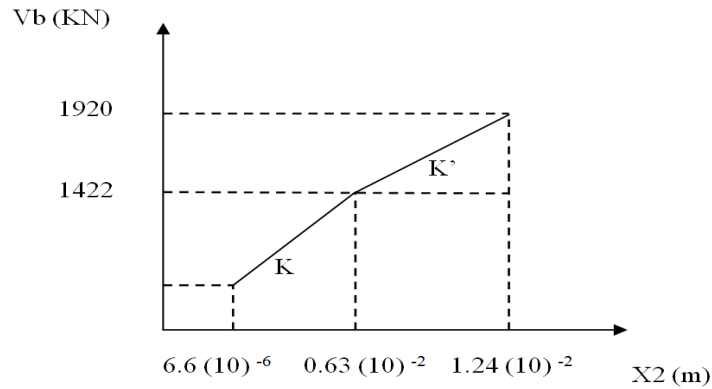
$$\hat{X}_2 = \frac{7\lambda'}{K_2} = 1.84(10)^{-5} \lambda' \longrightarrow X_2(\text{m}) = 2.46(10)^{-5} \lambda$$

$$\lambda: 948 \longrightarrow 1280$$

$$\lambda' 2 : 0 \longrightarrow 332.$$

Donc :

$$\left\{ \begin{array}{l} \hat{X}_2 = 2.46(10)^{-5} \lambda' \longrightarrow \hat{X}_2 = 611(10)^{-5} \text{ m} \\ X_2 = \hat{X}_2 + 0.63(10)^{-2} = 1.24(10)^{-2} \text{ m} \end{array} \right.$$



2) 2<sup>ème</sup> rotule en 3 et 4:

$$F \geq \frac{M_{em} (pout)}{H}$$

$$F_2 \geq \frac{2M_{em} (pout)}{H} = 1280 \text{ kN}$$

Donc :  $F_2 \leq F_{ruine} = 1790 \text{ kN}$

$1280 \text{ kN} \leq F_2 \leq 1790 \text{ kN}$

$1280 \leq \lambda \leq 1790$  Donc :  $1920 \text{ kN} \leq V_b \leq 2685 \text{ kN}$

$$K = K_1 = K_2 = \frac{2.3.EI (pot)}{H^3} = 948 (10)^2 \text{ kN/m}$$

$$X''_2 = 2.5 \frac{\lambda''}{K} = 2.26 (10)^{-4} \lambda''$$

Finalemment :  $\lambda : 1280 \longrightarrow 1792$

$\lambda'' : 0 \longrightarrow 512$

$X''_2 : 0 \longrightarrow 1.33 (10)^{-2} \text{ m}$

Donc  $X_2 = 1.24 (10)^{-2} + 1.33 (10)^{-4}$

$$X_2 = 2.57 (10)^{-2} \text{ m}$$

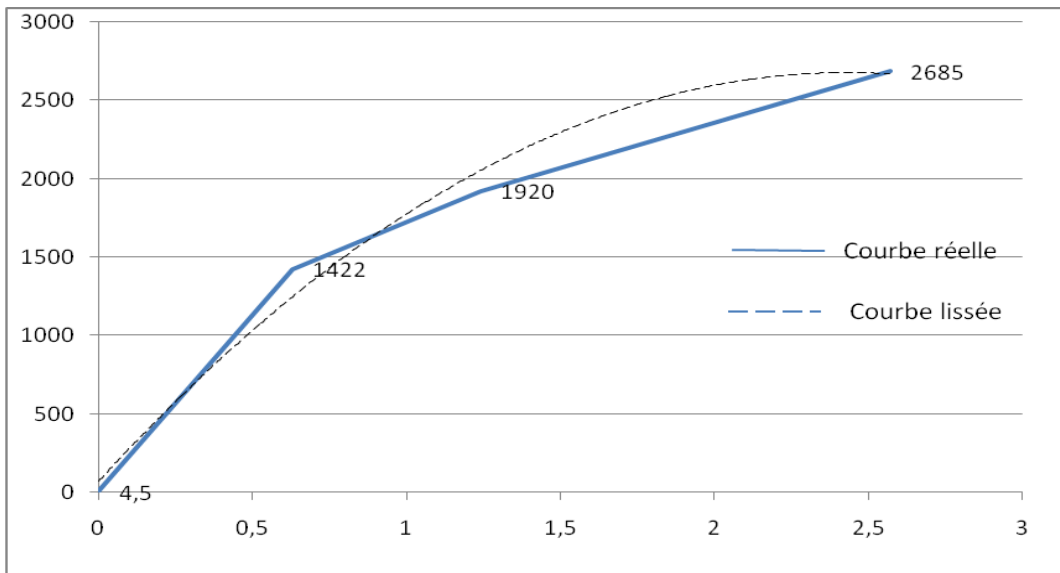
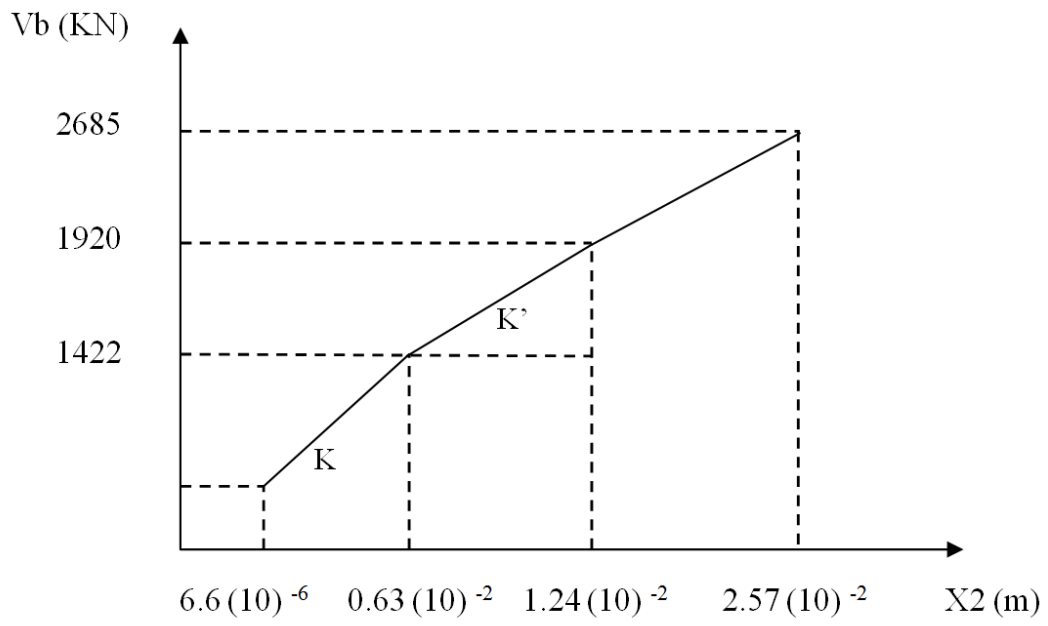


Figure V.1 : Courbe Push-over

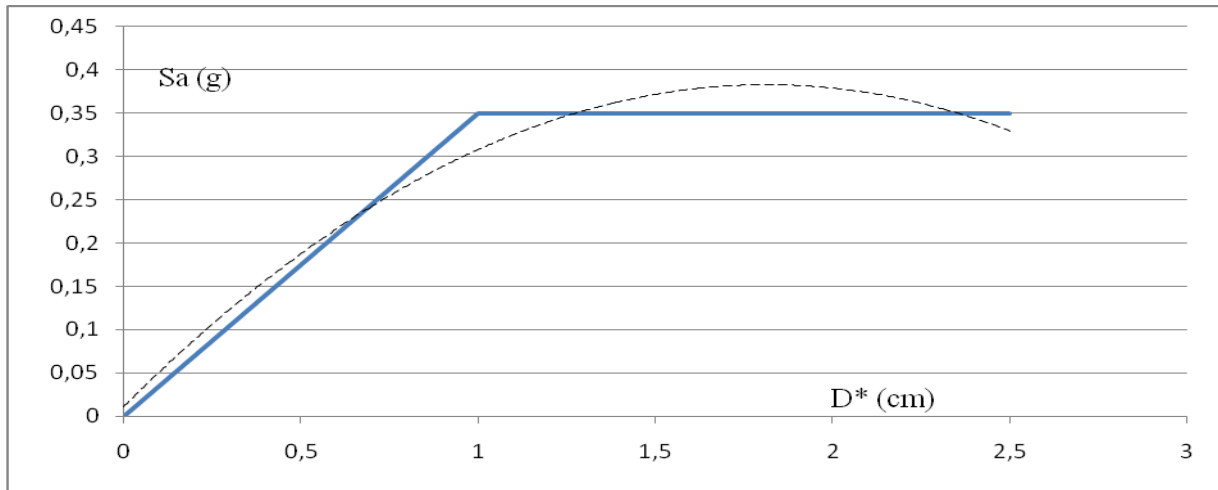


Figure V.2: Courbe Push-over idéalisée

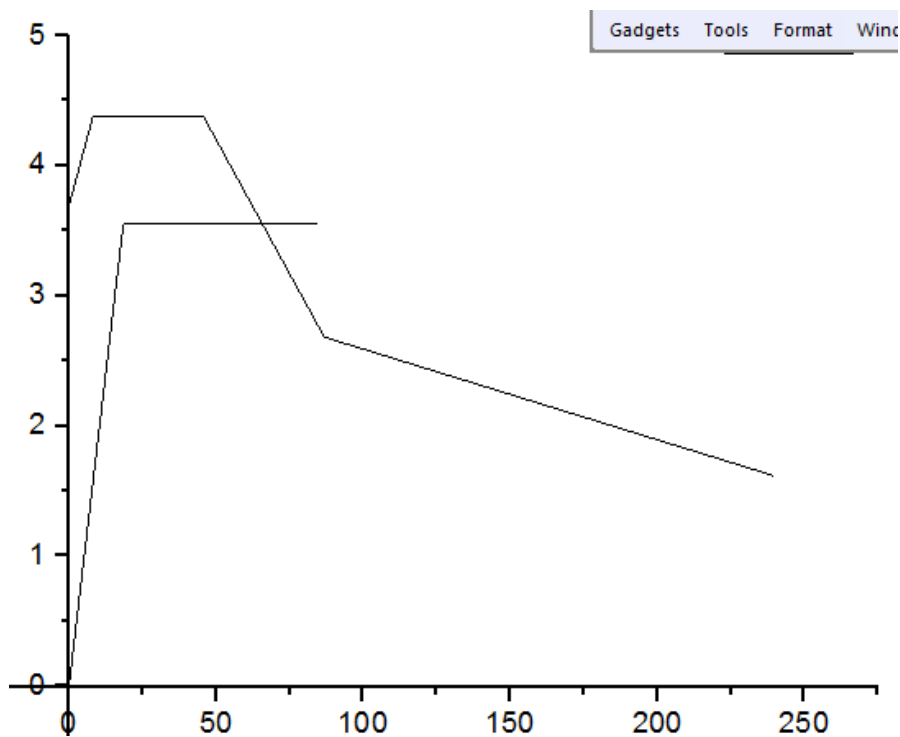


Figure V.3 : Point de performance = point d'intersection des 2 courbes

**V-2-2-Remarques :**

- 1) Le passage de la courbe brute à la courbe lissée se fait à l'aide d'une courbe d'interpolation.
- 2) La construction de la courbe idéalisée se fait selon les hypothèses suivantes:

- a. Phase post- élastique : ligne parallèle à  $X_2$
- b. l'intersection de la courbe originale avec la courbe idéalisée correspond à une force = 60 force de la force élastique limite
- c. Les surfaces sous les deux courbes sont égales (application du critère de l'égalité des énergies)

3) La conversion du système à plusieurs DDL en un système équivalent à 1DDL se fait à l'aide :

$$m^* = \sum_{i=1}^n m_i \Phi_i \quad \text{où } \Phi_n = 1 \quad \text{et } \Gamma = \frac{m^*}{\sum_{i=1}^n m_i \Phi_i^2}$$

$$S_e = \frac{F_b}{\Gamma m^*} = \frac{F_b}{\bar{M}} \quad \text{et } d^* = \frac{d_n}{\Gamma}$$

$\Phi = \Gamma \Phi^*$ ,  $\Phi$  et  $\Phi^*$  représentent les valeurs correspondant respectivement, au système à un DDL et à celui à plusieurs DDL.

Dans notre cas,  $m^* = m_1 \cdot \Phi_1 + m_2 \cdot \Phi_2 = 40 (0.5) + 40 \cdot (0.1) = 60 \text{ t}$  et  $\Gamma = 1.2$

**V-3- Proposition d'une nouvelle formule pour l'évaluation du risque sismique qui tienne compte beaucoup plus du côté humain :**

La formule disponible la plus utilisée est la suivante :

$$\text{Risque sismique} = \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Coût}$$

Nous proposons la formule suivante dans laquelle nous remplaçons le facteur « Coût » par un facteur « Importance » qui est fonction de l'impact sécuritaire **Is** affecté d'un coefficient de 70 % et de l'impact économique **Ie** affecté de 30%, l'impact sécuritaire étant lui-même fonction de deux paramètres: l'encombrement **E** (Mosquée, Hôpital, Ecole) à 50% et la présence de danger potentiel **DP** (barrage, entrepôt de matières dangereuses) à 50% également.

La nouvelle formule est donc la suivante :

$$\begin{aligned} \text{Risque sismique} &= \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times \text{Importance} \\ &= \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times (0.7 \mathbf{Is} + 0.3 \mathbf{Ie}) \\ &= \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times [0.7(0.5 \mathbf{E} + 0.5 \mathbf{DP}) + 0.3 \mathbf{Ie}] \\ &= \text{Aléa} \times \text{Vulnérabilité} \times [0.35(\mathbf{E} + \mathbf{DP}) + 0.3 \mathbf{Ie}] \end{aligned}$$



## Conclusion et Perspective

---

Les résultats de cette étude me permettent de tirer les conclusions suivantes:

- ✓ Etant donné que plus de 90% des pertes humaines et économiques provoquées par les séismes sont dues à l'effondrement des constructions et que la plupart du parc immobilier Algérien a été construit avant l'application du nouveau règlement parasismique en vigueur (RPA 2003), il est nécessaire de se préoccuper des structures existantes afin de les prémunir contre le risque sismique. Cela implique la connaissance de leur état actuel pour évaluer leur susceptibilité à la destruction. C'est le sujet même de l'analyse de vulnérabilité.
- ✓ Les résultats de cette analyse intéressent tout aussi bien l'utilisateur particulier que les compagnies d'assurances immobilières ou les institutions étatiques.
- ✓ L'analyse de vulnérabilité qui a toute cette importance n'est malheureusement pas à l'ordre du jour dans notre pays qui est pourtant bien concerné par le danger sismique.
- ✓ La méthode empirique, même si elle est à caractère qualitatif, peut donner une idée claire sur la situation sécuritaire d'une localité vis-à-vis du danger sismique.
- ✓ Cette méthode nécessite un travail d'équipe dans le cadre d'un programme national, régional ou local pour éviter les entraves de la bureaucratie ou des mauvaises idées.
- ✓ la méthode d'analyse par calcul, bien que plus précise car elle quantifie le comportement des structures en terme de dommage, n'est applicable qu'à titre individuel.
- ✓ La définition actuelle du risque sismique donne plus d'importance à l'aspect économique (pertes d'argent) au détriment de l'aspect humain (pertes en vies). Nous avons proposé une définition plus "humanitaire".

En perspective de ce travail , on pourrait envisager le projet suivant:

- ✓ Initier un travail d'équipe afin d'étendre l'analyse à l'échelle d'une ville ou tout au moins d'un quartier.

### Recommandations:

- ✓ Intégrer l'enseignement de l'analyse de vulnérabilité, sous ses deux aspects, dans le cursus universitaire des étudiants de Master structures.
- ✓ Alerter l'opinion publique en général et la communauté scientifique en particulier sur l'importance d'une telle analyse afin qu'elle fasse l'objet d'une loi qui la rende obligatoire et la protège.
- ✓ Penser à établir une échelle de dommages à l'instar de l'échelle Européenne (EMS 98) qui soit une référence pour les chercheurs, les ingénieurs et les constructeurs.

## Bibliographie

---

- [1] François Michel, Roches et paysages, reflets de l'histoire de la Terre, Paris, Berlin, Orléans, BRGM éditions, 2005, (ISBN 978-2-7011-4081-0), p.74
- [2] Göran Ekström, Meredith Nettles et Victor C. Tsai, Seasonality and Increasing Frequency of Greenland Glacial Earthquakes ; Science 2006-03-24 ; pp 1756-1758 .
- [3] Documents pédagogiques de l'EOST ; les catégories de séismes
- [4] Les Séismes. Planète Terre, Université Laval, Québec .
- [5] Bombs may have caused quake [archive], 6 mars 2002.
- [6] Documents pédagogiques de l'EOST ; les ondes sismiques .
- [7] Documents pédagogiques de l'EOST; l'Intensité d'un séisme
- [8] Pascal Bernard (IPGP), Qu'est-ce qui fait trembler la terre?, EDP Sciences, 2003 (page 265)
- [9] Documents pédagogiques de l'EOST ; les ondes sismiques
- [10] Richter C. F. (1935). An instrumental earthquake magnitude scale, Bulletin of the Seismological Society of America, 25, pages 1—32
- [11] Milan Zacek , construire parasismique , pages 22—31
- [12] Pierino Lestuzzi et Marc Badaux , Génie parasismique conception et dimensionnement des bâtiments , page 54—77
- [13] L.ZEGHICHI,A.MERZOUGUI et B.MEZGHICHI , Lecture dans le règlement parasismique algérien , juin 2005 , pages 67-69 .
- [14] A.BOURGUERBA ,Evolution de la réglementation parasismique au Maghreb , 2011
- [15] James Mitchell, la terre , 1978.
- [16] Module d'éducation à l'environnement, Revue du ministère de la formation et l'enseignement professionnel. 2003
- [17] Victor Davidovici, Learning from earth quakes – Génie parasismique.
- [18] Règles parasismiques Algériennes (RPA 99/v2003).
- [19] Tzenov et Bonne ville. Calcul des structures parasismiques. 1985.
- [20] Filiatrault, A. (1996). Éléments de génie parasismique et de calcul dynamique des structures. Montréal, Québec: Éditions de l'École Polytechnique de Montréal.
- [21] Pellissier, V. et M. Badoux (2003). Vulnérabilité et risque sismique de la ville d'Aigle - 2ème partie : estimation du risque sismique. Lausanne, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Faculté environnement naturel architectural et construit: 41.

## Bibliographie

---

- [23] Karine LEFEBVRE , CARACTÉRISATION STRUCTURALE ET ÉVALUATION DE LA VULNÉRABILITÉ SISMIQUE DES BÂTIMENTS HISTORIQUES EN MAÇONNERIE DU VIEUX-MONTRÉAL ,
- [24] A.K Yelles-Chaouches , Le risque sismique en Algérie
- [25] Lila SACI , ETUDE DE L 'EVOLUTION DES PARAMETRES DYNAMIQUES DES SOLS A PARTIR D'ESSAIS GEOPHYSIQUE , mémoire de magister, Mouloud mammerie de TIZI-ouzou .
- [26] M. HEMSAS. Modélisation par macro-éléments du comportement nonlinéaire des ouvrages à voiles porteurs en béton armé sous action sismique. Thèse de Doctorat, L'Université de Bordeaux 1, France (2010).
- [27] Lang, K. (2002). Seismic vulnerability of existing buildings. Institute of Structural Engineering. Zurich, Swiss Federal Institute of Technology Zurich (ÉPFZ): 189.
- [28] Mohammad SARANIK , Conception parasismique á base robuste de bâtiment d'assemblage boulonnés , thèse de doctorat , Ecole Centrale de Lyon, 2011.
- [29] ATC-13. Earthquake damage evaluation data for california. Report no. ATC-13, Applied Technology Council, 1985.
- [30] M. Shinozuka, J. Lee, M.Q. Feng, and T. Naganuma. Statistical analysis of fragility curves. J. Engrg. Mech. ASCE, 126(12), 1224 – 1231 (2000).
- [31] FEMA. Hazus earthquake loss estimation methodology. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C., 1999.
- [32] RISK-UE. An advanced approach to earthquake risk scenarios with applications to different european towns. P4: Vulnerability of current buildings. European Project, 2003.
- [33] P. Guéguen, C. Michel, and L. LeCorre. A simplified approach for vulnerability assessment in moderate-to-low seismic hazard regions: application to grenoble (france). Bulletin of Earthquake Engineering, 4(3), 467 – 490 (2007).
- [34] L.Ibarra. Global Collapse of Frame Structures under Seismic Excitations, PhD Thesis. Thèse de Doctorat, Stanford University, CA. (2003).
- [35] S.-H. Jeong and A.S. Elnashai. Fragility analysis using a new 3-d damage index. Ancer Annual Meeting, Honolulu, Hawaii, July 28-30 (2004).

## Bibliographie

---

- [36] M. Sinozuka, M. Q. Feng, H. K. Kim, and S. H. Kim. Nonlinear static procedure for fragility curve development. *Journal of Engineering Mechanics*, 126(12), 1287 – 1295 (2000).
- [37] Bruce R. and Ellingwood. Earthquake risk assessment of building structures. *Reliability Engineering and System Safety* 74(3), 251 – 262 (2001).
- [38] K. Kinali and B.R. Ellingwood. Seismic fragility assessment of steel frames for consequence-based engineering : A case study for Memphis, TN. *Engineering Structures*, 29(6), 1115 – 1127 (2007).
- [39] Djebbar Nabil, 2006, Contribution à l'étude de la performance parasismique des éléments linéaires en béton, thèse de doctorat en mécanique des structures, Université de Constantine, Algérie.
- [40] Anil K. Chopra, Rakesh K. Goel, 2001, A Modal Pushover Analysis Procedure To Estimate Seismic Demands For Buildings: Theory And Preliminary Evaluation, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Los Angeles.
- [41] M. Iqbal Shuharwardy, 1999, Performance Based Design Modeling for Pushover Analysis Use of the Pushover Curve, Computers and Structures, University of Berkeley, California.
- [42] Y. Menasri, M.S. Nouaouria, M. Guenfoud, 2010, Evaluation De La Vulnérabilité Sismique A L'échelle D'une Structure En Béton Armé Par L'analyse Statique Non Linéaire, Symposium International Sur La Construction En Zone Sismique, Université Hassiba Benbouali De Chlef (Algérie), 26 – 27 Octobre 2010.
- [43] Ima M., Benjamin L., Irma J.H., Hartanto W, 2007, Performance Of Modal Pushover Analysis On A First Mode Dominant Moment Resisting Frame, Université de Pelita Harapan, INDONESIA - September 26-27th, 2007.
- [44] Mehdi Poursha, Faramarz Khoshnoudian, AbdoReza S. Moghadam, 2008, Assessment of conventional nonlinear static procedures with FEMA load distributions and modal pushover analysis for high-rise buildings, *International Journal of Civil Engineering*. Vol. 6, No. 2, June 2008.

## Bibliographie

---

[45] Sermin Oğuz, 2005, Evaluation Of Pushover Analysis Procedures For Frame Structures , Phd Thesis, Natural And Applied Sciences Of The Middle East Technical University, Turkey.

[46] Pierre Mouroux, Caterina Negulescu, 2007, Comparaison pratique entre les méthodes en déplacement de l'ATC 40 (en amortissement) et de l'Eurocode 8 (en ductilité), 7ème Colloque National AFPS 2007 – Ecole Centrale Paris.

[47] M.BELKHEIR Mohammed Aghiles , Influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des bâtiments , mémoire de magister , Université de Mouloud mammerie de TIZI-ouzou

## Notations

V : action sismique où l'effort tranchant à la base.  
A : coefficient d'accélération de zone.  
D : facteur d'amplification dynamique.  
R : coefficient de comportement global de la structure.  
q : facteur de qualité.  
 $\omega$  : charge permanente totale et fraction des autres charges à considérer.  
E : Module de young  
 $\nu$  : coefficient de poisson  
 $\lambda$  : l'increment

RPA : Règlement parasismique algérien .  
EC8 : Eurocode 8  
le Craag : Le Centre de recherches en astronomie, astrophysique et géophysique  
CPS : conception parasismique  
EMS-98 : Échelle Macrocosmique Européen .