



Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf - M'sila

Faculté de Technologie

Département de GENIE CIVIL

FILIERE : Génie Civil

SPECIALITE : Géotechnique



MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER

Par : Abd Elkabir Radhia

THEME

**Etude de l'interaction dynamique sol-structure
(application cas d'une Minaret sous séisme en 3D)**

Soutenu devant le jury composé de :

Dr. SEDDIKI Ahmed	Université de M'Sila	Président
Dr. MEKKI Lakhdar	Université de M'Sila	Examineur
Pr. KHEMISSA Mohamed	Université de M'Sila	Encadreur
Dr. TALLAH Naoui	Université de M'Sila	Co-Encadreur

Promotion : 2020 / 2021

Remerciements

Je ne remercie jamais assez Dieu, le tout puissant de nous avoir permis de mener à bien ce modeste travail.

En premier lieu, nous remercions Mr. KHEMISSA ^{Med}, professeur à l'université de M'sila et Dr. TALLAH NAOUI qui ont bien voulu proposer le thème de master, pour son aide précieux, sa disponibilité durant toute la durée de notre projet.

Je remercie également les membres de jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant de juger notre travail.

A tous nos enseignants à toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail, je dirai merci.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mon cher père et ma chère mère qui m'ont toujours soutenu durant toutes les périodes de ma vie, que dieu le tout puissant les protègent et les gardent.

Toute ma famille, tous mes amis de promotion de master 2 classe de géotechnique 2020/2021 j'ai passé avec vous des bons moments inoubliables merci.

*Mes encadreurs Mrs : KHEMISSA MOHAMED et TALLAH
NAOUI.*

Tous les enseignants de faculté de technologie.

Toute la promotion 2021.

Tous ceux qui m'aiment et que j'aime.

Sommaire

Remercîment

Introduction générale	1-2
<i>Chapitre I : Caractéristique des mouvements sismiques</i>	3
I.1. Introduction :	4
I.2. Définition un séisme :	4
I.3. Les cause des séismes :	4
I.4. Distribution géographique des séismes :	5
I.5 Caractéristiques d'un séisme :	5
I.6 Les différents types des failles :	6
I.7 Définition du risque sismique et de la vulnérabilité :	9
I.8 Action sismique :	9
I.9 Ondes sismiques :	10
I.10 Représentation spectrale du mouvement sismique:	12
I.11. Caractérisation des accélérogrammes :	12
I.12. Localisation d'un séisme :	13
I.13 Paramètres caractérisant le mouvement sismique :	14
I.14 Spectre de réponse :	15
I.15. Spectre de Réponse élastique :	15
I.16 Mesure de l'importance d'un séisme :	16
I.17. le risque sismique en Algérie	17
I.18. Caractéristiques de la sismicité algérienne	18
I.19. Zones sismiques en Algérie	21
I.20. Le risque sismique et l'omniprésence de l'aléa sismique :	22
. I.21. Degré d'aléa sismique des territoires de l'Algérie :	23
. I.22. La vulnérabilité des territoires du Nord :	24
. I.22. Réglementations parasismiques :	25
I.23 Conclusion	27
<i>Chapitre II : Conception des bâtiments dans les zones sismiques</i>	29
II.1. INTRODUCTION:	30
II.2. La construction parasismique des ouvrages :	30
II.3. historique de construction parasismique:	30

II.4. Concept général :	31
II.5. Notion de construction parasismique:	32
II.6. Les séismes et la réponse des constructions :	33
II.7. Objectif global :	35
II.8. Conception architectural tenant compte du mouvement sismique :	36
II.9. Respect des normes parasismiques :	36
II.10. Qualité d'exécution :	37
II.11. Entretien :	37
II.12. Les principes généraux de la conception parasismique des bâtiments :	37
II.13.CONCLUSIONS :	44
<i>Chapitre III: Simulation numérique de l'interaction dynamique sol-structure</i>	<i>45</i>
III.1. Introduction:	46
III.2. Présentation du logiciel SAP2000:	47
III.3. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE:	51
III.4. Séisme:	54
III.5. Interprétation des résultant	62
III.6. Calcul de la fleche:	70
Conclusion générale	74-75
<i>Références bibliographiques</i>	<i>76-78</i>

Listes Des Figures

le nombre	TITRE	PAGE
	Chapitre I	
1	Figure I.1 Carte de distribution géographique des séismes.	5
2	Figure I.2 Épicentre et foyer d'un séisme, l'importance des dommages diminue avec La distance à l'épicentre.	6
3	Figure I.3: faille normale.	7
4	Figure I.4: faille inverses.	8
5	Figure I.5: faille décrochements.	8
6	Figure I.6: Représentation schématique des ondes P.	10
7	Figure I.7: Représentation schématique des ondes S.	11
8	Figure I.8: Représentation schématique des ondes L .	11
9	Figure I.9: Représentation schématique des ondes R.	12
10	Figure I.10 : Sismomètres d'enregistrements dans les plans, horizontal et vertical.	13
11	Figure I.11 : Exemple de sismogramme enregistré.	14
12	Figure I.1 2: Sismicité du nord Algérien.	18
13	Figure I.13: Carte sismotectonique de l'Algérie du Nord.	19
14	Figure I.14: zonage sismique du territoire national.	22
15	Figure I.15: Niveaux D'aléa Sismique En Algérie	24
	Chapitre II	
1	Figure.II1 :schéma gèneral de fonctionnement en (boite) pour la reprise des action horizontales de sèisme ou de vent.	32
2	Figure II2 : Réponse des constructions aux actions horizontales et verticales des tremblements de terre.	34
3	Figure II3: Oscillations de torsion.	34
4	Figure.II4 :Comportement d'ossatures de même période T soumises à poussée progressive jusqu'au déplacement de projetSDe(T): a) projet à réponse purement élastique DCL,b) projet modérément dissipatif DCM et c) projet très dissipatif DCH.	35
5	Figure II5 : Formes favorables : plans simples à 2 axes de symétrie.	38
6	Figure II6 : Vues en plan de bâtiments. A gauche : symétriques et compacts en plan. A droite: effets néfastes de l'asymétrie ou du caractère non compact.	39
7	Figure II7 : Influence de la forme du bâtiment sur les effets dus à la torsion : concentration de contraintes dans les angles rentrants (en haut) ; rotation permanente (en bas).	39
8	Figure II 8 : Régularité en élévation.	40
9	Figure II9. :régularité en élévation. A droite: niveau rez flexible ou "mou "(anglais : softà t).	40
10	Figure II10 :Bâtiments avec niveaux transparents.	41
11	Figure II 11: Fractionnement des bâtiments par des joints sismiques ou partition	42

en sous structurent.

ChpitreIII :

1	Figure III.1: Présentation du logiciel SAP2000	47
2	Figure. III 2 : Vue en plan du Minaret	53
3	Figure. III 3:Fonction spectrale S_a/g .	56
4	Figure. III 4: Accélérogramme EO Boumerdès 2003.	56
5	Figure. III 5: Accélérogramme V Boumerdès 2003.	57
6	Figure III.6: Accélérogramme NS Boumerdès 2003.	57
7	Figure. III 7: Model semelles isolées encastées	58
8	Figure III.8: Model radier encasté ressort	58
9	Figure III.9: Model semelles isolées ressorts.	59
10	Figure III.10: Model radier ressorts	59
11	Figure. III 11: Model Massif seul.	61
12	Figure III.12: Model semelles fondé sur massif.	62
13	Figure. III 13: Model radier isolées fondées sur massif .	62
14	Figure. III 14: Effort Axial semelles isolées Encastées	64
15	Figure. III 15 : Effort Axial semelles Spextre RPA 2003. isolé fondée sur massif Spextre RPA 2003	64
16	Figure. III 16: Effort Tranchant semelles isolées fondées radier sur massife Spextre de réponse RPA2003	66
17	Figure. III 17: EfforTranchant ressort Spextre de réponse RPA2003	66
18	Figure. III 18: Moment semelles fondé sur	68
19	Figure. III 19: Moment radier ressert Spextre de massif Spextre de réponse RPA2003. réponse RPA2003	68
20	Figure. III 20: La flèche U_x spectre de réponse	70
21	Figure. III 21: La flèche U_x Accélérogramme NS.	71
22	Figure. III 22: La flèche U_x Accélérogramme EO.	71
23	Figure. III 23 :La flèche U_x Accélérogramme V	72

Listes Des Tableaux

NB	Titre	Page
Chapitre01		
1	Tableau 1 .1: caractéristiques des différentes catégories de site (RPA99 version 2003)	26
2	Tableau 1-2: les périodes caractéristiques (RPA99 version 2003)	26
3	Tableau 1.3 : Valeurs du coefficient d'accélération de zone selon (RPA99 version 2003)	27
Chapitre02		
1	Tableau.1 : principes de dimensionnement classes de ductilité des structures et limites supérieures des valeurs de référence des coefficients de comportement.	36
Chapitre03		
1	Tableau .1 :Données sismiques.	55
2	Tableau.2: Combinaison d'action.	58
3	Tableau.3: Raideurs (coefficients de rigidité des ressorts : modèle de Kausel).	63
4	Tableau.4: Effort Normal N(kN) spectre de réponse.	64
5	Tableau.5 Effort Normal N Max accélélogramme EO.	64
6	Effort Normal N Max accélélogramme NS.	65
7	Tableau.7 Effort Normal N Max accélélogramme NS.	65
8	Tableau.8 Effort Normal N Max accélélogramme V.	66
9	Tableau.9: Effort Tranchant T spectre de réponse.	67
10	Tableau.10: Effort Tranchant T accélélogramme EO.	67
11	Tableau.11: Effort Tranchant T accélélogramme NS.	67
12	Tableau.12: Effort Tranchant T accélélogrammeV .	67
13	Tableau.13 : Moment M spectre de réponse.	68
14	Tableau.14 : Moment M Max Accélérogramme EO.	69
15	Tableau.15: Moment M Max Accélérogramme NS.	69
16	Tableau.16: Moment M Max Accélérogramme V.	70

ملخص

يعتمد سلوك هياكل الهندسة المدنية إلى حد كبير على سلوك واجهات بنية التربة.

الموضوع الذي تم تناوله في هذه الرسالة هو استمرار لدراسة أجريت في نفس الإطار في الخطة ، أي في D 2 ، والتي تتناول التفاعل بين الهياكل الداعمة للتربة ، والأساسات السطحية والبنية الفوقية في الموقف. لدراسة تأثير التفاعل الديناميكي بين التربة والبنية على سلوك الهياكل، لقد اخترنا حالة بسيطة لهيكل مئذنة لمسجد ارتفاعه = 18.40 مترًا والبعد في مخطط 3.50×3.50 مترًا مربعًا ، نظام البنية مستقر ذاتيًا ومراعاة ل ISS لقد اخترنا 7 نماذج لنظام التأسيس ونظام الهيكل مستقر ذاتيًا، ومراعاة بنية التربة ل SS انختار سبعة نماذج من نظام الأساس.

تم النمذجة باستخدام برنامج Sap2000 V21 ، في هذا الإصدار يمكننا أن نأخذ في الاعتبار تفاعل بين البنية والتربة (ISS) ، نظرًا لوجود إمكانية نمذجة التربة حيث يوجد الهيكل ، يتم إجراء النمذجة في D3.

تم المقارنة على مستوى الضغوط والقوة الطبيعية N وقوة القص T واللحظة M وعلى مستوى السهم أو الإزاحة الأفقية والعقد لكل طابق حسب ارتفاع المبنى

يمكننا أن نستنتج في النهاية -على الرغم من أن العمل الذي درسناه بسيط- ولكن حجم القيم يوضح أن إهمال ظاهرة تفاعل بين البنية و التربة خارج تصميم ودراسة الأعمال سيكون له انعكاسات سلبية على الاستقرار والجانب الاقتصادي للعمل.

Résumé

Le comportement des ouvrages en génie civil dépend en grande partie de celui des interfaces sol-structure.

Le sujet traité dans ce mémoire est la suite d'une étude faite dans le même cadre dans le plan c'est à dire en 2D, qui traite l'interaction entre le sol support des ouvrages, les fondations superficielles et la superstructure en situation de sollicitation sismique

Pour étudier l'effet de l'interaction dynamique sol-structure sur le comportement des structures.

On a choisi un cas simple d'une structure d'un Minaret d'une mosquée de hauteur $H=18.40\text{m}$ et de dimension en plan $3.50 \times 3.50 \text{ m}^2$, le système de structure est auto stable et pour tenir compte de ISS on choisit sept modèles du système de fondations.

On fait la modélisation avec le logiciel Sap2000 V21, dans cette version on peut tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS), car il y a la possibilité de modéliser le sol où il est implanté l'ouvrage, la modélisation se fait en 3D.

La comparaison est faite au niveau des sollicitations, l'effort normale N , l'effort tranchant T , et le moment M et au niveau de la flèche ou déplacement horizontal des nœuds de chaque étage en fonction de la hauteur de l'immeuble

On peut conclure à la fin malgré que l'ouvrage que nous avons étudié est simple mais la grandeur des valeurs montre que la négligence du phénomène de l'interaction sol-structure l'hors du conception et l'étude des ouvrages aura des répercussions négatives sur la stabilité et l'aspect économique de l'ouvrage.

Abstract

The behavior of civil engineering structures largely depends on that of soil-structure interfaces.

The subject dealt with in this dissertation is the continuation of a study carried out in the same framework in the plan, i.e. in 2D, which deals with the interaction between the soil supporting structures, the surface foundations and the superstructure in situation. seismic stress

In order To study the effect of soil-structure dynamic interaction on the behavior of structures, We have chosen a simple case of a structure of a mosque Minaret of a height of 18.40m ($H = 18.40\text{m}$) and a base surface of $3.50 \times 3.50 \text{ m}^2$ ($S = 3.50 \times 3.50 \text{ m}^2$). the structure system is self-stable and in order to consider soil-structure interaction (ISS), we choose seven models of the foundation system. Modeling is done using the Sap2000 V21 software. In this version, we can model soil-structure interaction (ISS), because there is the possibility of modeling the soil where the structure is located. the modeling is done in 3D. The comparison is done in function of the stresses, the normal force N , the cutting force T , and the moment M and considering the horizontal displacement of the nodes of every floor according to the height of the building.

Finally, We found that, despite the simple work we studied, the resulting values shows that the neglect of the phenomenon soil-structure interaction phenomenon outside the design and study of the works will have negative effects on the stability and the economic aspect of the work.

Introduction générale

Introduction générale

Le phénomène d'interaction dynamique du sol et de la structure est un problème complexe, car il correspond aux perturbations du mouvement accidentel sous l'influence du mouvement approprié de la structure, car l'interaction entre le sol et la structure n'est pas évidente pour l'existence des effets mutuels sur le comportement du sol et de la structure.

Comme elle est basée sur les caractéristiques de la structure et le mouvement du sol, l'interaction de la structure du sol peut affecter la taille des forces induites sur la structure à étudier, car il a toujours été constaté que la réponse sismique de la structure est liée à la forme sous laquelle les mouvements sismiques sont transmis au sol à travers ses fondations au système de la structure de fondation et à partir de là la nécessité d'étudier la réponse sismique de la structure en n'étant pas considérée comme isolée mais comme faisant partie intégrante d'un l'ensemble qui comprend le sol et la structure adjacente rend nécessaire les analyses d'interaction sol-structure.

dans cette étude on a essayé de visualiser l'effet de cette interaction sur le comportement dynamique des structures, par la modélisation d'une structure simple en portique auto-stable d'un Minaret de hauteur 18.4 m et de largeur 3.5 m, pour le torseur de chargement sismique on choisit dans un première lieu une zone de faible sismicité (Z1) ou on utilise le spectre de réponse 'RPA version 2003, dans un deuxième lieu on choisit Accélérogrammes mesurés en 2003 sur le site de Keddara à Boumerdès (directions :EO/Est-Ouest, NS/Nord-Sud, V-verticale)

Le sol de fondation est un sol meuble de type S3, la fondation est choisie selon deux modes : sans tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS) et avec interaction sol-structure

Dans l'analyse on va faire la comparaison des résultats des différents cas , en utilisant le logiciel SAP2000 V21 , au niveau l'effort normale, l'effort tranchant, le moment et la flèche et les déplacements pour chaque nœud suivant la hauteur et on va prendre comme modèle de référence le modèle semelles encastrées.

Le mémoire , est composée de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, nous utilisons des informations sur les caractéristiques, les types et les dangers du mouvement sismique.

Au deuxième semestre, nous présentons la conception des bâtiments dans les régions sismiques et leurs types.

Dans le troisième chapitre, on présente les résultats des calculs et l'analyse de ces résultats, a partir de ces résultats on peut conclure qu' afin de accroître la stabilité des ouvrages tout en optimisant le coût de construction il faut passer par une prise en compte de l'interaction dynamique qui se développe, en cas de séisme, entre les ouvrages, les sols et les fondations.

Chapitre I

Caractéristique des mouvements sismiques

I.1. Introduction :

Les séismes sont les risques naturels majeurs les plus meurtriers dans le monde, généralement associés à des dégâts considérables. Ils correspondent à une rupture superficielle ou profonde des roches résistantes. Au moment de la rupture, l'énergie libérée va se dissiper d'une part sous forme de chaleur et d'autre part, sous forme d'ondes qui se propagent à l'intérieur de la terre, se traduisant en surface par des vibrations du sol.

Il est malheureusement, certain, que les séismes continueront à surprendre l'homme. La seule chose que nous puissions prédire avec certitude, c'est que plus nous éloignons du dernier tremblement de terre, plus nous sommes proches du suivant. Faute de pouvoir, et pour long temps encore sans doute-prévoir ou empêcher les séismes, nous devons s'efforcer d'en limiter les dégâts. Cette démarche commence par la connaissance détaillée de l'action sismique à savoir : la naissance du séisme, la formation et la propagation des ondes, la représentativité des accélélogramme et des spectres associés, etc. L'aboutissement de toutes ces connaissances nous amènerons certainement à une construction parasismique.

Le séisme ou tremblement de terre constitue un phénomène géologique qui de tout temps a terrorisé les populations qui vivent dans certaines zones du globe, c'est le risque naturel majeur le plus meurtrier qui cause le plus de dégâts. De 1994

à 2004, les séismes ont fait plus de 80 000 victimes dans le monde.

I.2. Définition un séisme :

Un Séisme est un tremblement de terre engendré par la rupture d'une faille en profondeur (entre 0-600 Km) à cause des contraintes sur les plaques tectoniques qui glissent .Cette rupture engendre une forte libération d'énergie au niveau d'un point appelé foyer d'où se propagent des ondes mécaniques appelées ondes sismiques. [1]

I.3. Les cause des séismes :

A partir, des lois de comportement classiques, on sait que lorsqu'un matériau rigide subit des contraintes de cisaillement, il commence d'abord a déformer de manière élastique, puis lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, il passe à la rupture, en libérant de façon instantanée toute l'énergie qui a accumulé durant la déformation élastique. Ceci peut se passer dans la lithosphère (écorce terrestre) qui est soumise a des contraintes causées le plus souvent par le mouvement des plaques tectoniques : choc inter -plaque ou « craquements » intra-plaque.

Sous ces conditions, lorsqu'en certains endroits de la lithosphère, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des ruptures d'équilibres sous la contrainte de l'ébranlement.

La libération brutale de l'énergie potentielle accumulée dans les roches de l'écorce sera dégagée le long des failles donnant lieu ainsi à des séismes plus ou moins destructeurs.

A cause des forces de friction entre les parois d'une faille, les déplacements le long de cette faille ne se font pas de manière continue et uniforme, mais par coups successifs dégageant à chaque fois un séisme [2].

I.4. Distribution géographique des séismes :

Si l'on observe une carte de distribution géographique des séismes (voir figure I.1), on remarque que cette distribution des séismes n'est pas hasardeuse mais elle suit une certaine logique. La majorité des séismes se produisent dans deux régions particulières du globe. [3]

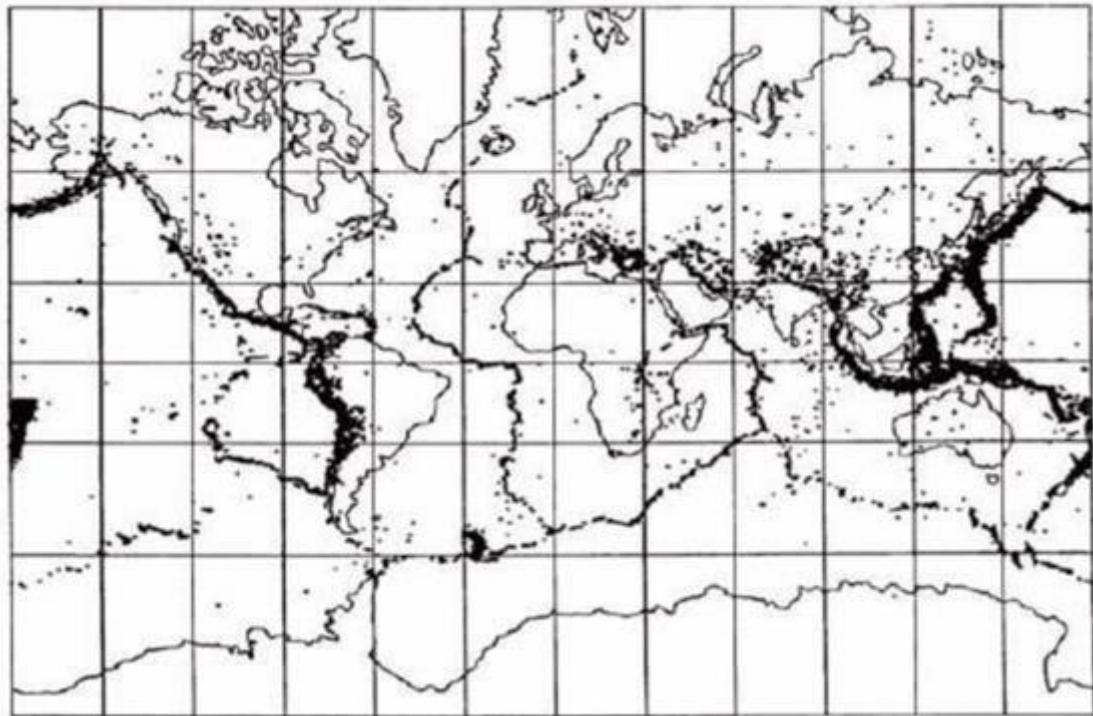


Figure I.1 Carte de distribution géographique des séismes.

I.5 Caractéristiques d'un séisme :

Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre, il est caractérisé (voir figure I.2) par :

- **Foyer (hypocentre) :**

Région de la faille où se produit la rupture et d'où partent les ondes sismiques.

On distingue trois classes de séismes selon la profondeur de leur foyer :

- Les séismes superficiels : moins de 60 km de profondeur.
- les séismes intermédiaires : entre 60 et 300 km de profondeur
- les séismes profonds : supérieurs à 300 km de profondeur
- au delà de 700 km de profondeur, on considère qu'il n'y a plus de foyer sismique.

- **Epicentre:**

Point de la surface terrestre, à la verticale du foyer, et où l'intensité du séisme est la plus importante



Figure I.2 Épicentre et foyer d'un séisme, l'importance des dommages diminue avec la distance à l'épicentre.

I.6 Les différents types des failles :

Les failles sont des fractures de l'écorce terrestre le long desquelles il y a eu un déplacement appréciable. S'il n'y a pas de déplacement on parle de diaclase.

Les failles peuvent avoir des dimensions très diverses, elles peuvent être petites comme celles qui se trouvent dans les talus des routes ou très grandes comme la Faille de Saint André en Californie, ayant un déplacement de centaines de kilomètres et formée en réalité par de nombreuses failles interconnectées entre elles.

Les mouvements soudains le long des failles occasionnent la plupart des grands tremblements de terre qui ont lieu sur la Terre. Actuellement il y a beaucoup de failles qui sont inactives. [4]

a) Failles normales :

Ce sont des failles ayant un déplacement vertical, elles ont lieu lorsque le bloc du plafond est déplacé vers le bas par rapport au bloc de mur. Les plans de faille ont d'habitude environ 60° de pendage bien qu'ils puissent être tout à fait verticaux ou plus horizontaux.

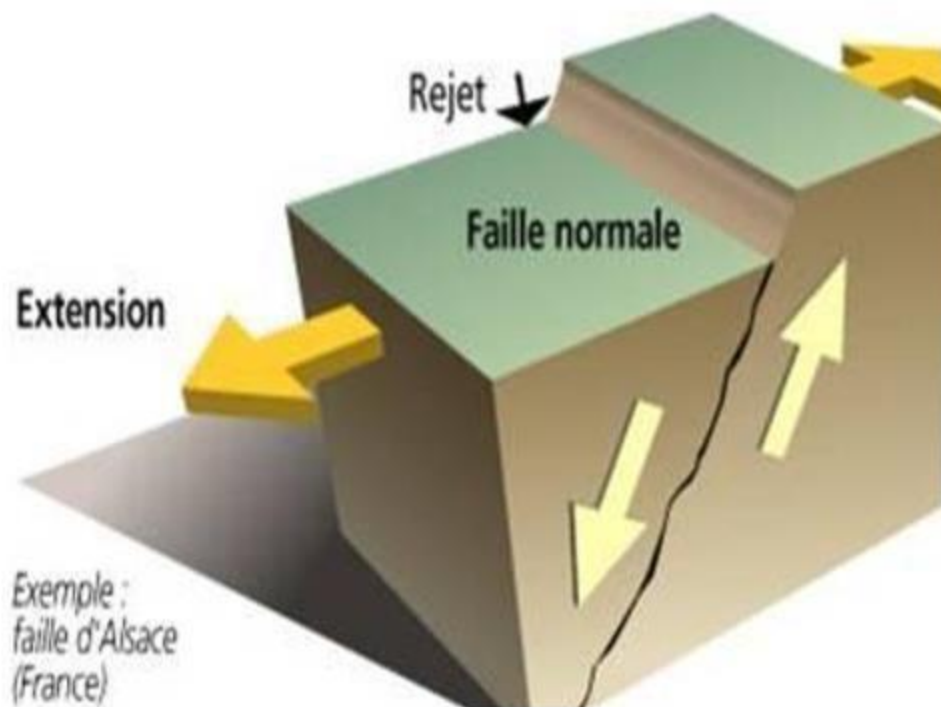


Figure I.3: faille normale.

b) Failles inverses ou chevauchements :

Ce sont des failles ayant un déplacement vertical où le bloc du plafond est déplacé vers le haut par rapport au bloc de mur. Les failles inverses ont des pendages supérieurs à 45° et les chevauchements pendages inférieurs à 45° .

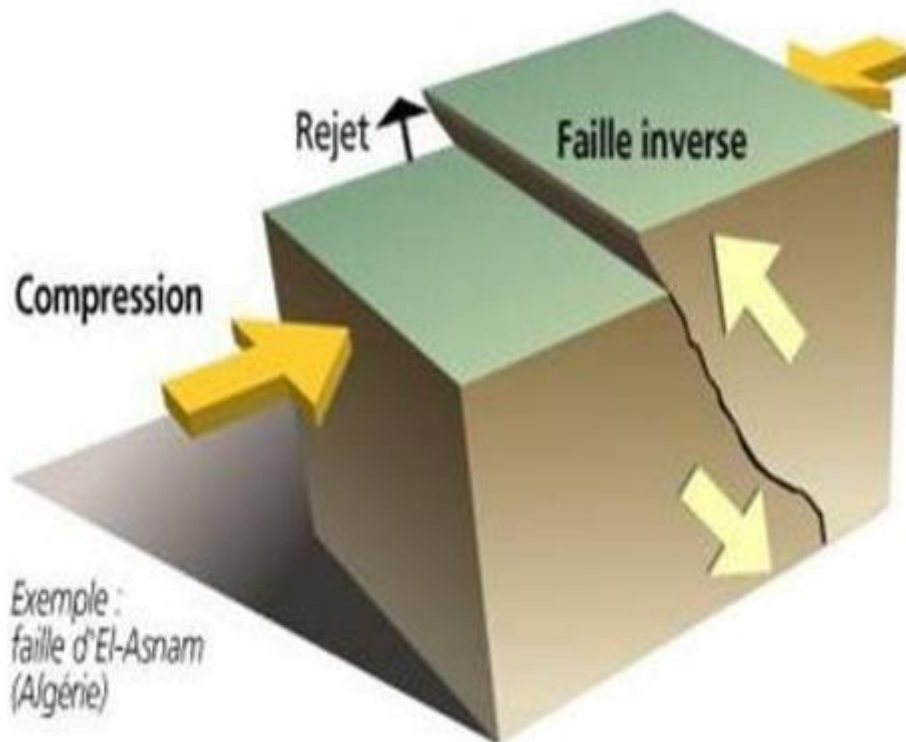


Figure I.4: faille inverses.

c) Failles décrochements ou transformâtes :

Ce sont des failles ayant un déplacement horizontal et une longueur très importante. On les trouve en coupant la lithosphère océanique autour des dorsales.

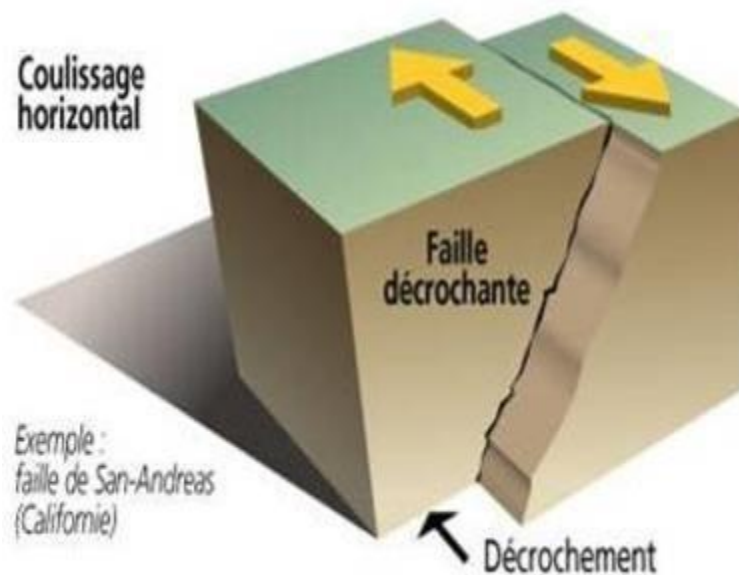


Figure I.5: faille décrochements.

I.7 Définition du risque sismique et de la vulnérabilité :

Le risque naturel correspond à la conjonction d'un aléa naturel et de la vulnérabilité d'enjeux exposés. Ainsi nous définissons l'aléa comme suit: L'aléa est une estimation de la probabilité qu'un événement naturel survienne dans une région donnée et dans un intervalle de temps donné. L'aléa sismique est donc la probabilité, pour un site d'être exposé à une secousse tellurique de caractéristiques données au cours d'une période de temps donnée. L'évaluation de l'aléa sismique intègre la magnitude, l'intensité et la période de retour des séismes. Pour la quantification de la vulnérabilité deux approches ont été considérées : humaine ou sociale et économique.

La première approche de la vulnérabilité, que nous qualifions d'ordre social, privilégie les facteurs sociaux, démographiques et culturels.

La seconde se base sur l'estimation globale des pertes économiques occasionnées par une catastrophe naturelle. Elle repose sur le calcul du montant des enjeux et est fréquemment exprimée en unité monétaire. Dans cette approche, plus la valeur des biens exposés est importante plus la vulnérabilité sera grande. On entend par Risque sismique le degré de perte, de destruction ou des dégâts occasionnés par un séisme sur une période de référence (en général un an) sur une région donnée. Les pertes se réfèrent aux vies humaines et aux biens exposés. Dans le cas d'un danger sismique naturel, la valeur exposée au risque est avant tout celle du bâtiment, de leurs occupants, de leurs contenus ainsi que de leurs coûts.

Finalement, le risque peut être exprimé comme étant le produit de l'aléa sismique (probabilité d'occurrence) et de la vulnérabilité (degré d'endommagement). [5]

I.8 Action sismique :

Le mouvement sismique (ou action sismique) peut se décomposer en la somme d'une composante horizontale (suivant deux directions principales H_x et H_y) et d'une composante verticale V_z . Il est utile de savoir qu'à l'aplomb de l'épicentre, la composante verticale est égale à la composante horizontale. Plus nous nous éloignons de cet épicentre, plus la composante verticale est moins importante par rapport à la composante horizontale. L'importance du mouvement vertical est souvent négligeable, car moins dommageable que le mouvement horizontal du fait que cette action s'atténue tout en s'éloignant de l'épicentre et surtout en raison que les constructions ont été conçues essentiellement pour reprendre l'action de la pesanteur avec une marge de sécurité assez importante ce qui n'est pas le cas pour la composante horizontale. Alors la composante horizontale sera préférée pour dimensionner les structures à la résistance aux efforts horizontaux. [6]

I.9 Ondes sismiques :

Générées par la rupture sur la faille, des vibrations, ou ondes sismiques, se propagent dans toutes les directions, plusieurs types d'ondes, aux effets différents sur les sols et les structures sont produits par les séismes, la connaissance des caractéristiques des différents types d'ondes (et de leurs conditions de propagation) permet de prévoir leur action sur les bâtiments en fonction du site géologique où se situe chaque construction.

On distingue deux grands types d'ondes émises par un séisme : Les ondes de fond, celles qui se propagent à l'intérieur de la terre et qui comprennent les ondes S et les ondes P, et les ondes de surface, celles qui ne se propagent qu'en surface et qui comprennent les ondes de Love et de Rayleigh. [7]

I.9.1. Ondes P (primaires):

Sont des ondes de compression assimilables aux ondes sonores et qui se propagent dans tous les états de la matière, les particules se déplacent selon un mouvement avant-arrière dans la direction de la propagation de l'onde.

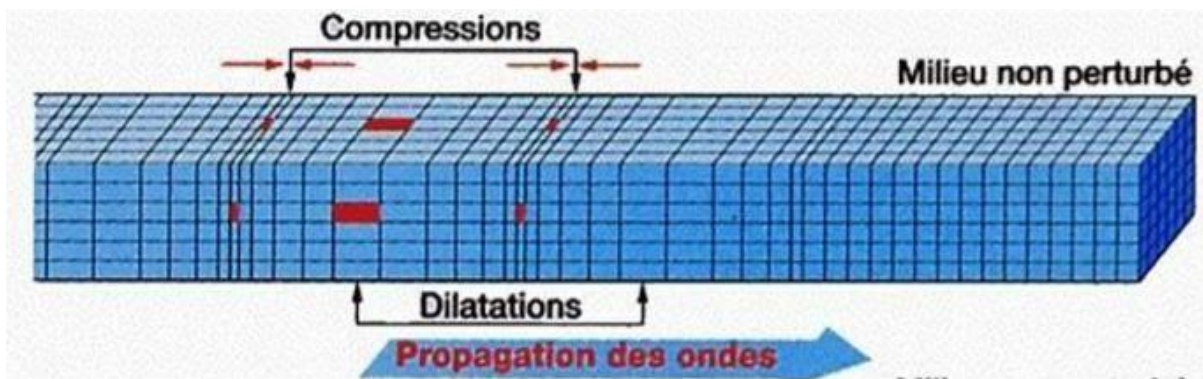


Figure I.6 : Représentation schématique des ondes P.

I.9 .2. Ondes S (secondaires):

Sont des ondes de cisaillement qui ne se propagent que dans les solides, les particules oscillent dans un plan vertical, à angle droit par rapport à la direction de propagation de l'onde.

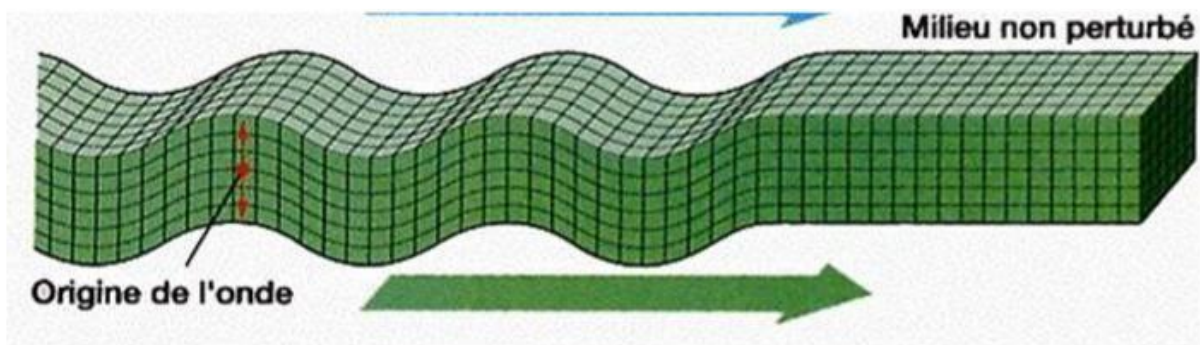


Figure I.7: Représentation schématique des ondes S.

I.9.3. Ondes de Love ou ondes L:

Sont des ondes de cisaillement, comme les ondes S, mais qui oscillent dans un plan horizontal. Elles impriment au sol un mouvement de vibration latéral.

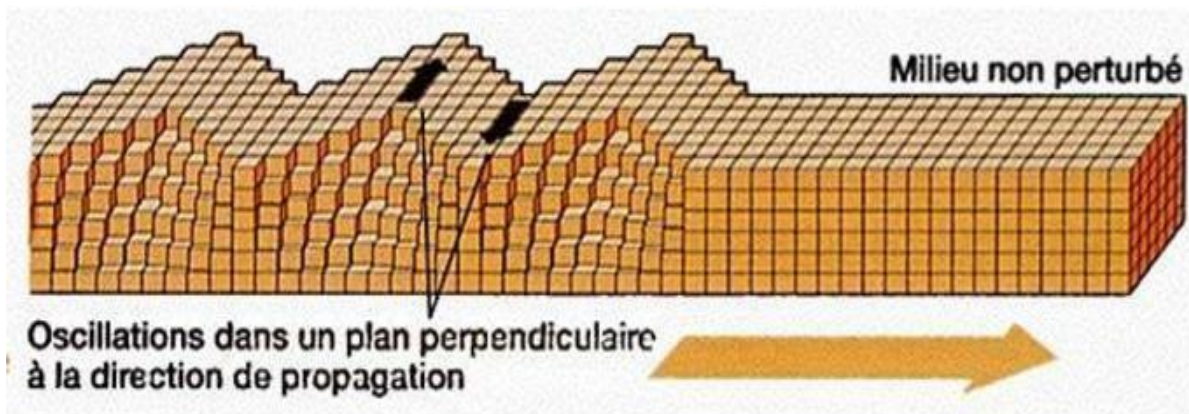


Figure I.8: Représentation schématique des ondes L .

I.9.4. Ondes de Rayleigh ou ondes R:

Sont assimilables à une vague, les particules du sol se déplacent selon une ellipse, créant une véritable vague qui affecte le sol lors des grands tremblements de terre.

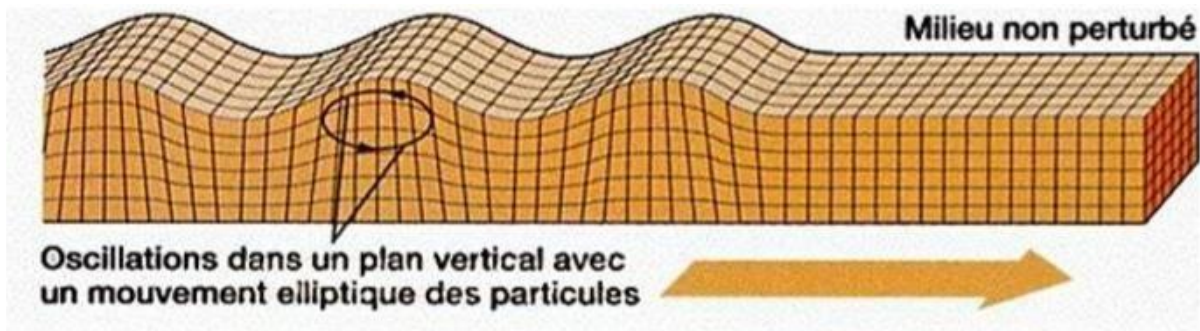


Figure I.9: Représentation schématique des ondes R.

I.10 Représentation spectrale du mouvement sismique:

L'action sismique est injectée à la structure sous forme d'un spectre de réponse. Dépendant du type et de l'importance de la structure, l'action sismique peut être définie comme étant:

- Un système de forces latérales équivalentes
- Un spectre de réponse
- Un spectre de puissance
- Un accélérogramme

Ce dernier est couramment utilisé lors de l'analyse temporelle car la réponse de la structure à un séisme donné nécessite des moyens de calcul puissants. La notion la plus répandue pour représenter un séisme est le spectre de réponse d'oscillateurs linéaires qui est fonction de la période naturelle, il dérive de l'analyse de plusieurs systèmes à un seul degré de liberté. Le spectre de réponse en accélération, en vitesse ou en déplacement met en évidence le contenu fréquentiel du mouvement, il fournit la réponse maximale d'un oscillateur linéaire élastique soumis à un séisme.

Ce spectre se trouve réduit par un facteur dit de comportement caractérisant l'incursion de la structure dans le domaine post-élastique.

I.11. Caractérisation des accélérogrammes :

L'intégrale de Duhamel permet le calcul de la réponse dynamique de l'oscillateur simple quelle que soit la sollicitation. Accélérogramme définit la description temporelle d'une sollicitation dynamique, $\gamma(t)$, d'un séisme par exemple. Différents paramètres peuvent caractériser des accélérogrammes pour un site donné :

L'accélération maximale du sol ou amplitude maximale du mouvement du sol,

- ✓ Le contenu fréquentiel du séisme représenté par son spectre de réponse

- ✓ la durée de l'accélérogramme
- ✓ Le nombre de cycles forts
- ✓ L'intensité

Pour obtenir les spectres de réponse élastique, plusieurs accélérogrammes, représentatifs des séismes probables d'une région, sont appliqués à des oscillateurs simples présentant des périodes propres diverses, la résolution de l'intégrale de Duhamel permet de définir, pour chaque période propre, le maximum de l'accélération, ou de la vitesse ou encore du déplacement de la masse. La courbe enveloppe de ces maxima constitue un spectre de réponse élastique. [8]

I.12. Localisation d'un séisme :

Le séisme se manifeste à la surface du sol par une série de vibrations. Elles peuvent être enregistrées au moyen d'un appareil appelé sismomètre (figure I.9). Celui-ci restitue une « image » du séisme en terme d'amplitude de la vibration, appelé le sismogramme (figure I.10). Les ondes P se propagent plus rapidement que les ondes S, c'est cette propriété qui permet de localiser un séisme. Pour un même séisme, les différents sismogrammes obtenus, au niveau de toutes les stations sismologiques, permettent de localiser l'épicentre du séisme,

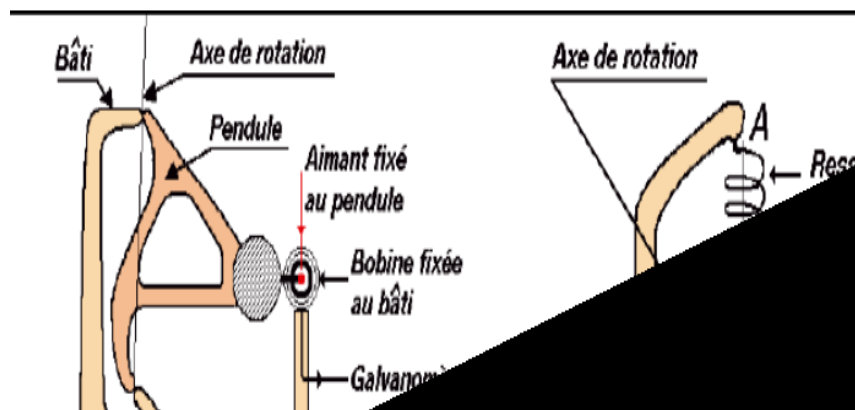


Figure I.10 : Sismomètres d'enregistrements dans les plans, horizontal et vertical.

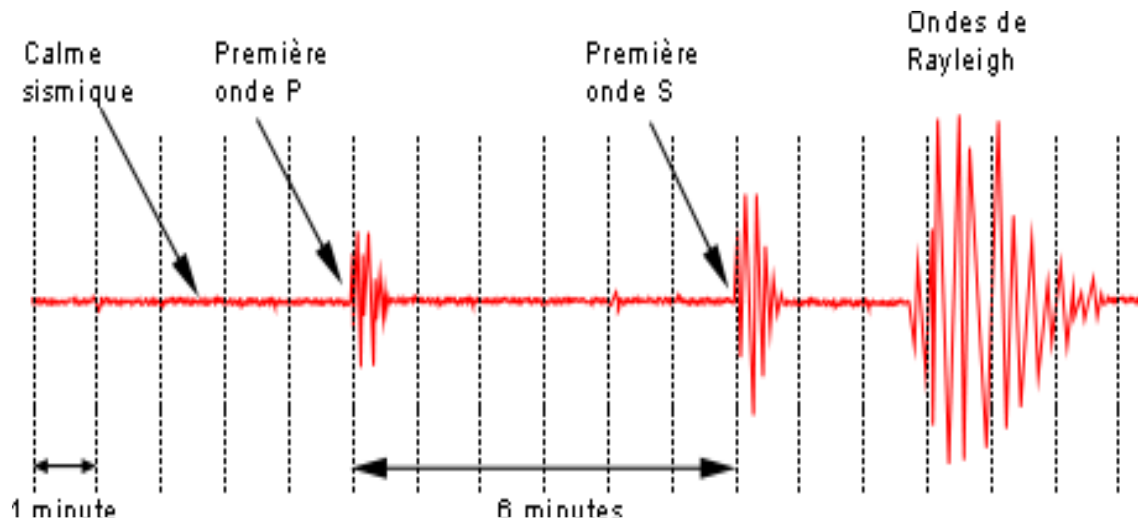


Figure I.11 : Exemple de sismogramme enregistré.

I.13 Paramètres caractérisant le mouvement sismique :

I.13.1 Accélération maximale :

Un paramètre important pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est l'accélération maximale (**ag**) du sol ou accélération de pointe, PGA (Peak Ground Acceleration) en anglais. Son ordre de grandeur est de 0.4 g à 0.6g en zone très sismique (Japon, Turquie) et de 0 à 0,1g en zone faiblement sismique.

L'amplitude de l'accélération maximale du sol permet de se faire une idée de la résultante de force F appliquée à la construction, si la construction est indéformable elle bouge comme le sol. Les valeurs de l'accélération sont déterminées sur la base de la transformation suivante : [10]

Où ah

$$\log ah = 0.26 * IMSK + 0.19$$

accélération horizontale maximale en cm/s^2 .

I.13.2 Déplacement maximal :

Un autre paramètre utile pour l'évaluation des effets des séismes à un endroit donné est le déplacement maximal d_g du sol, qui donne une idée de l'ordre de grandeur du déplacement relatif du

centre de gravité de la structure par rapport à la base de la structure : quelques cm en zone faiblement sismique, jusqu'à un mètre en zone très sismique.

I.13.3 Durée du tremblement :

La durée de tremblement de terre est un paramètre significatif dans les processus de fissurations et dégradations progressives des éléments d'une construction. Elle est liée à la magnitude du séisme. Cette durée est au maximum de l'ordre de 60 secondes en zone très sismique, mais n'est que de quelques secondes en zone peu sismique.

I.14 Spectre de réponse :

En sismologie, la caractérisation des tremblements de terre s'effectue de diverses manières, la Magnitude (échelle de Richter) et l'intensité dont nous avons parlé précédemment. Pour les ingénieurs, les paramètres les plus utiles sont soit les lois de déplacements du sol $d_g(t)$ et des accélérations $a_g(t)$, soit des données plus globales, appelées spectres de réponse, établies à partir de ces accélérogrammes.

Le spectre de réponse permet de caractériser une excitation. Il consiste en la détermination de la réponse maximale (déplacement, vitesse ou accélération) d'une série d'oscillateurs de différentes fréquences propres, soumis à cette même excitation. Le spectre de réponse résultant permet alors l'évaluation de la réponse de n'importe quel système linéaire, à partir de sa fréquence propre. L'utilisation principale est donc l'évaluation de la réponse maximale des bâtiments lors de tremblements de terre, en supposant que la réponse est dominée par un mode unique, ce qui est vrai dans la majorité des cas où le mode fondamental de la structure est prédominant.

Sous l'action sismique, la structure effectue une série d'oscillations forcées suivant des lois complexes puis des oscillations libres qui s'amortissent plus ou moins rapidement. L'étude d'une structure peut se ramener à celle de l'oscillateur simple parce que le calcul sur une structure à "n" degrés de liberté se ramène à l'étude de "n" oscillateurs simples chacun caractérisés par une période propre et un coefficient d'amortissement. On effectue alors le cumul des réponses pour obtenir la réponse de la structure.

I.15.Spectre de Réponse élastique :

Une structure soumise à un séisme, reçoit de celui-ci par l'intermédiaire du sol et de ses fondations, une rafale serrée d'accélération alternées de composantes horizontales et verticales, d'intensité très variable dans le temps. On ne gardera que l'action horizontale du séisme qui est en général largement prédominante. Toute structure présentant une certaine souplesse admet une amplification des déplacements par rapport à ceux du sol.

I.16 Mesure de l'importance d'un séisme :

Les paramètres utilisés pour classer un séisme concernent l'énergie émise comportent la magnitude et l'intensité d'un séisme qui constituent deux principales échelles actuellement existantes pour les séismes

. I.16.1 Magnitude :

La Magnitude d'un séisme (M) est une fonction logarithmique (donc pas une échelle à degrés) représentative de la quantité d'énergie rayonnée par la source sous forme d'ondes élastiques.

Types de magnitude :

Il existe plusieurs méthodes d'évaluation de la magnitude :

- **Magnitude locale (ML) (définie par Richter en 1935)**

On l'utilise pour des séismes proches dits séismes locaux. Elle est définie à partir de l'amplitude maximale des ondes P, et moyennée sur plusieurs stations en tenant compte des corrections locales.

- **Magnitude des ondes de surface (MS) (ondes Rayleigh)**

Elle est utilisée pour les séismes lointains, dits télé séismes, dont la profondeur est inférieure à 80 km. Elle se calcule à partir de l'amplitude des ondes de surface.

- **Magnitude de volume (m_b) (séismes profonds, ondes P)**

Cette magnitude est utilisée pour les séismes profonds, car ceux-ci génèrent difficilement des ondes de surface. Elle est calculée à partir de l'amplitude de l'onde P qui arrive au début du sismogramme.

- **Magnitude de durée (MD) (séismes faibles et proches)**

On l'utilise pour des séismes proches. Elle est définie à partir de la durée du signal.

- **Magnitude de moment (M_w) (ou de Kanamori)**

En conclusion, la magnitude est un paramètre qui caractérise d'une manière intrinsèque l'importance d'un séisme. C'est le nombre que l'on déduit des enregistrements des sismographes et qui permet de caractériser l'énergie émise par un séisme sous forme d'ondes sismiques

. La magnitude peut prendre des valeurs quelconques. Toutefois, il ne faut pas croire que la mesure de la force d'un séisme à l'aide de la magnitude est en relation directe avec l'importance des dégâts car la magnitude dépend de la quantité d'énergie rayonnée et la distance au foyer, de la nature géologique des terrains traversés et de la profondeur du séisme. [9]

I.16.2 Intensité (I)

C'est la mesure des effets et dommages du séisme en un lieu donné. Pour un séisme de magnitude donnée, elle est maximale à l'aplomb de la faille (intensité épacentrale) et décroît avec la distance (sauf effets de site, sur terrain sédimentaire par exemple). Elle est d'autant plus importante que le foyer est plus superficiel [2].

Cette catégorie de mesure, dite aussi intensité macrosismique, est représentée par une échelle de valeurs avec des limites inférieures et supérieures et caractérise les effets macrosismiques des séismes, c'est à dire observables par l'homme (dommages aux bâtis, témoignages sur les effets ressentis, effets sur l'environnement.) sur un site donné [11].

I.17.le risque sismique en Algérie

L'Algérie du Nord est frappée régulièrement par des séismes parfois importants mais souvent modérés ou faibles. Les séismes modérés ou forts génèrent bien souvent des catastrophes difficiles à surmonter car notre pays, à l'instar de beaucoup d'autres, reste encore mal préparé pour affronter de tels cataclysmes.

S'il est vrai qu'avant la catastrophe d'El Asnam (10 octobre 1980, M=7.3), peu de choses était connues de la sismicité algérienne, les leçons données par ce séisme furent multiples et eurent un impact important. Ce séisme a permis de démontrer scientifiquement que de violents séismes pouvaient se produire en Algérie du Nord, que cette région subissait le rapprochement de la plaque européenne, qu'il fallait renforcer la surveillance sismique du territoire, se munir de normes de construction parasismiques, et se doter à tout prix se doter d'un plan de prévention du risque.

Aujourd'hui, l'installation d'un réseau de surveillance sismique nationale ainsi que tous les travaux scientifiques qui sont réalisés ou qui sont actuellement en cours, alors que beaucoup d'efforts restent à

faire, permettent quand même de répondre à plusieurs des interrogations posées. Ces réponses sont d'une extrême importance pour l'aménagement du territoire et pour la réduction du risque sismique dans notre pays, si on fait bon usage des connaissances et moyens disponible.

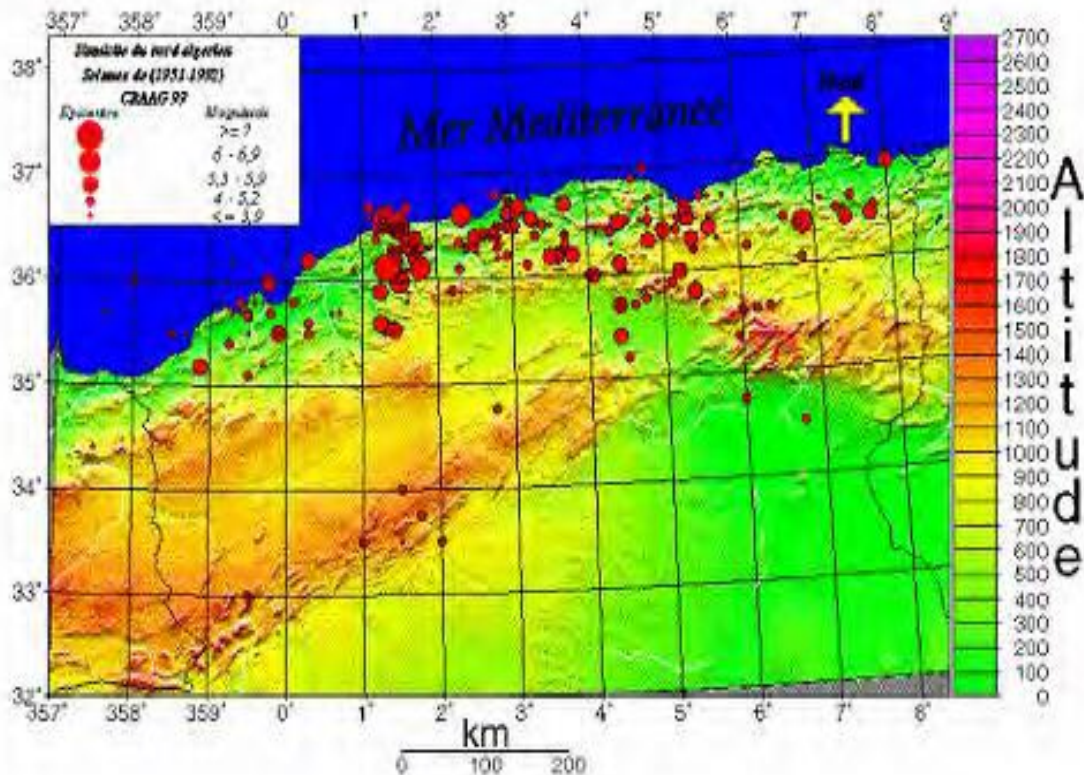


Figure I.12 : Sismicité du nord Algérien.

I.18. Caractéristiques de la sismicité algérienne :

De par les informations fournies par la sismicité historique et par les études de sismotectonique, de sismologie, de paléosismologie, d'aléa sismique, nous possédons aujourd'hui des indications importantes sur l'activité sismique en Algérie du Nord.

L'Algérie se trouve sur la plaque africaine laquelle est en collision avec la plaque eurasiennne (voir la tectonique des plaques, Annexe 1, le séisme). les deux plaques étant limitées par une longue zone sismique qui s'étant des Açoces à la Turquie en passant par Gibraltar, le Maghreb , l'Italie , la Yougoslavie , la Grèce ...(CRAAG)

Le mouvement de la confrontation entre la plaque eurasiennne et la plaque africaine a donné naissance à de gigantesques fracturations sous formes de failles géologiques dont la conséquence la naissance du relief important de l'Algérie du nord. Les vitesses de rapprochement entre la plaque africaine et eurasiennne varient de **0.5 à 1 cm/an** en méditerranée occidentale, à **2.5 cm/an** en

méditerranée orientale . Ces vitesses sont déduites des vecteurs déplacements obtenus à partir de l'expansion océanique dans l'atlantique.

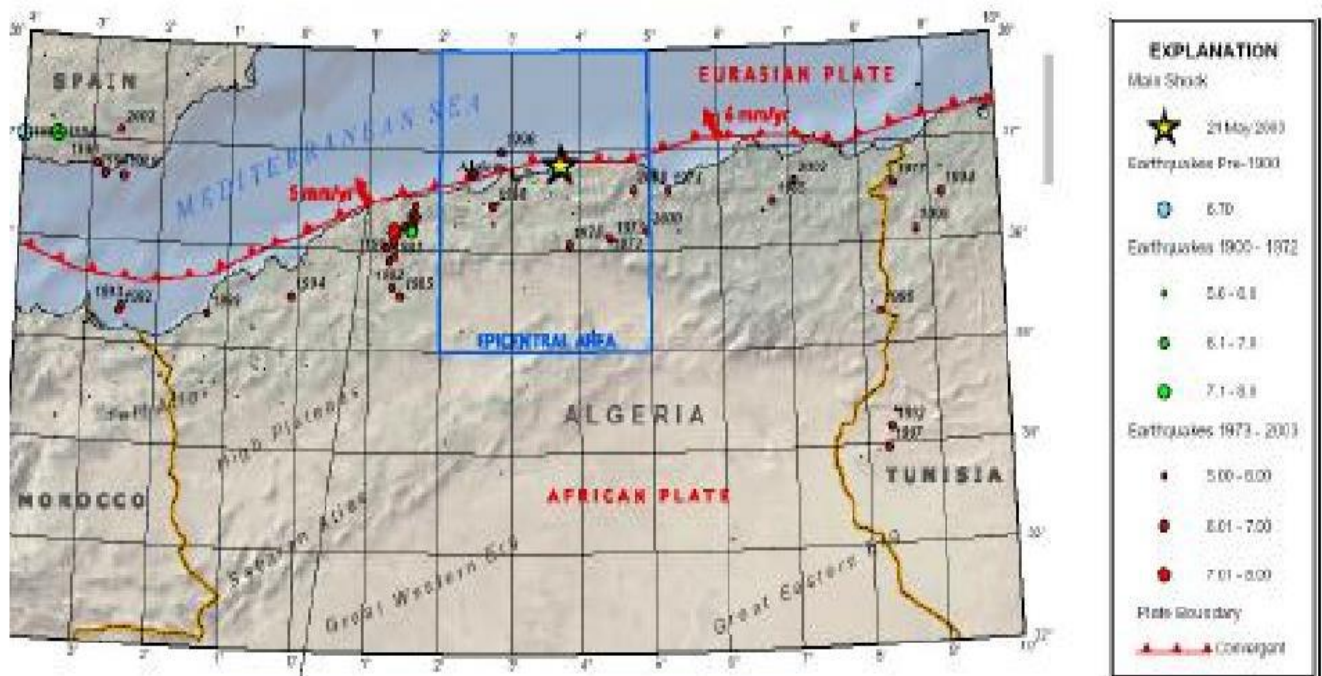


Figure I.13: Carte sismotectonique de l'Algérie du Nord.

Les principales structures compressives récentes dans la chaîne tellienne sont :

- Le pli-faille d'el Asnam
- Le pli-faille de Bou Kadir
- Le pli-faille de Dahra
- Le pli-faille de Ténès-Abou el -Hassan
- Le pli-faille de Sahel D'Alger
- Le pli-faille de Murdjadjo.

Les séismes qui se produisent en Algérie s'expliquent par une accumulation des contraintes autour des failles actives qui au-delà d'un seuil relâche l'énergie emmagasinée sous forme d'ondes sismiques. C'est donc ces ondes que les personnes ressentent, lorsque le séisme qui se produit est important (CRAAG 2006)¹⁵. Les failles actives de l'Atlas tellien sont : la faille D'el Asnam, la faille du Dahra, la faille de Ténès Abou el –Hassan (Ouled Abdallah), la faille du Sahel d'Alger, la faille

Murdjadjo, la faille de Chott El hammam et la Faille de Kherrata. Les autres régions sismoactives d'Algérie sont : la région de Mascara, la région de l'Atlas de Blida-Médéa, la région de Jijel, la région de Guelma et la région de Constantine .

Nous pouvons ainsi dire que cette activité se concentre essentiellement dans la région Nord du pays, quoique de façon très épisodique, quelques micro secousses sont enregistrées dans la partie saharienne. Dans la région Nord, la région tellienne est la plus active. Le zonage effectué indique que les régions d'El Asnam, Oran et Alger sont les régions les plus menacées puisque dans ces zones, les séismes les plus importants se sont produits.

L'analyse de la carte de sismicité de la région maghrébine montre que la sismicité est localisée principalement dans les zones côtières, en mer d'Alboran au Nord d'Oran et sur l'ensemble de la marge méditerranéenne. Cette sismicité est liée aux mouvements tectoniques complexes de convergence de la plaque africaine au Sud et de la plaque européenne au Nord. Elle est essentiellement marquée par des séismes superficiels (*voir annexe 1 , le séisme, classification des séismes*) -profondeur inférieure à 20 km- qui causent des dégâts considérables dans les zones épacentrales.

Jusqu'au 21 mai 2003, cette activité était localisée dans les régions de l'Ouest algérien, d'Ech Cheliff et de la Mitidja à l'Ouest d'Alger. La région de l'Est algérois, reconnue sismotectoniquement active depuis 1988 (M.H.A.T 2004) 17 a été sérieusement affectée le 21 mai 2003 par un tremblement de terre de Magnitude $M_I = 6,8$ causant d'importants dégâts humains et matériels.

Les autres régions du pays sont caractérisées par une sismicité diffuse localisée dans les zones tectoniques et bassins quaternaires des régions des Babors, du Hodna et du Constantinois.

Une importante activité sismique se trouve localisée dans les zones côtières et en mer Méditerranée. Dans cette région de la Méditerranée occidentale, le contact entre les plaques africaine et eurasiennne, a souvent été simplifié et souvent associé à la direction linéaire Est-Ouest que décrit la sismicité depuis l'arc de Gibraltar à l'Ouest jusqu'à l'arc Calabro-sicilien à l'Est. Cependant, *«ce contact est beaucoup plus complexe et correspond à une juxtaposition de blocs continentaux et océaniques, plus ou moins mobiles et déformables»* (BADDARI.K ; DJEDDI.M 2002) 18. Cette situation est marquée par la confrontation des deux domaines stables et rigides formés par les plates-formes européenne et africaine. L'étude des séismes récents a permis de préciser considérablement les caractéristiques des séismes qui se produisent en Algérie. C'est ainsi, que nous pouvons affirmer que les séismes qui se produisent dans notre région sont en général faibles à modérés atteignant parfois la magnitude 6.0(P.C.A 2007)19.

Dans certains cas, ils peuvent être violents comme ce fut le cas à El Asnam ; ce séisme est d'ailleurs considéré comme le plus important qu'ait connu la Méditerranée Occidentale. Toutefois, les séismes algériens sont d'autre part superficiels (P.C.A 2007)²⁰ ne dépassant pas en profondeur les 15 km, ce qui les rend plus perceptibles par la population et donc plus dangereux.

Tous les séismes récents ont souvent mis en relief des structures actives non connues précédemment, indiquant la complexité de l'identification des structures actives profondes. Il est donc important de noter que des efforts importants doivent être réalisés pour localiser de nouvelles structures actives[12].

I.19. Zones sismiques en Algérie

Le zonage sismique du territoire algérien montre que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléas sismique le plus élevé. Le territoire national est divisé en cinq (5) zones de sismicité croissante, définies :

- Zone 0 : sismicité négligeable**
- Zone I : sismicité faible**
- Zone IIa et IIb : sismicité**
- Zone III : sismicité élevée** [12] .

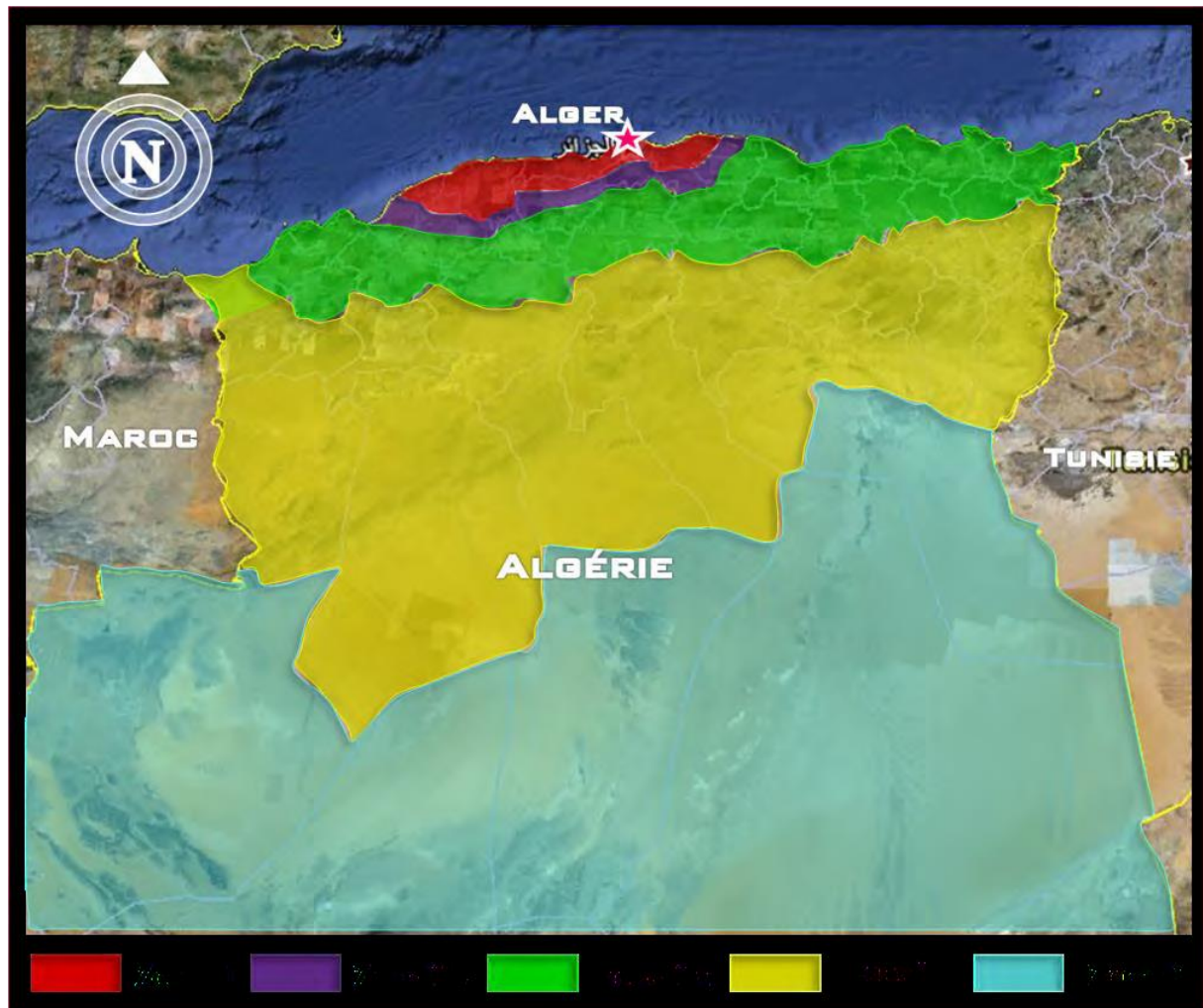


Figure I.14: zonage sismique du territoire national.

I.20. Le risque sismique et l'omniprésence de l'aléa sismique :

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 trentaine de micro secousses en général non ressenties par la population. Tous les deux mois environ se produit un séisme de magnitude supérieur à 3.521 sur l'échelle de Richter . On remarque également que l'activité sismique du dernier siècle est plus intense dans la région Ouest du pays que dans les régions Centre ou Est. Mais cela est juste des statistiques puisque les secousses frappent soudainement et souvent à des endroits non encore supposés.

Du point de vue géodynamique et grâce aux concepts 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 africaine et eurasiatique.

Cette confrontation, qui est d'environ 0,4 à 0,6 mm/ an , entraîne la déformation des bordures septentrionale et méridionale des deux plaques majeures suscitées, conduisant à la formation des chaînes de montagnes atlasique et alpine.

Cette déformation génère de nombreuses failles actives qui jalonnent les régions atlasiques du pays. Le jeu de ces failles provoque donc les séismes qui se produisent lorsque le seuil de rupture de ces failles est atteint.

. I.21. Degré d'aléa sismique des territoires de l'Algérie :

Dépassement de 10% de l'accélération du sol pour une période de 50 ans qui correspond à une période de retour de 475 années(CGS)²⁴. Cette carte est le résultat de données récentes obtenues à partir des accélérations de sols. Elle montre que les régions d'El Asnam et Alger restent les plus exposées. Le séisme du 21 Mai 2003 a montré des accélérations de 0.6 g qu'il s'agit d'introduire aujourd'hui dans cette carte.

Ce constat ne doit pas occulter le fait que beaucoup de zones restent encore inexplorées du point de vue sismique. L'on s'aperçoit aujourd'hui que les séismes les plus importants se sont produits dans des zones dont le potentiel sismique a été souvent sous-évalué comme ce fut le cas du séisme de **Boumerdès 2003** « classée zone II auparavant ».

Ainsi, un inventaire complet des failles actives et sismogènes, accompagné d'une réévaluation du potentiel sismique par des études de paléosismologie doit être envisagée dans le futur, modifiant les cartes déjà établies.

On peut finalement affirmer que pour le futur, il faudra considérer trois zones :

- La région Tellienne est la plus exposée (Zone III) ;
- La région des Hauts Plateaux et la région de l'Atlas Saharien sont également sujettes à une faible sismicité (Zone II) ;
- La région saharienne présente une faible sismicité (avec une probabilité négligeable d'occurrence d'un séisme destructeur sur quelques siècles). [12].

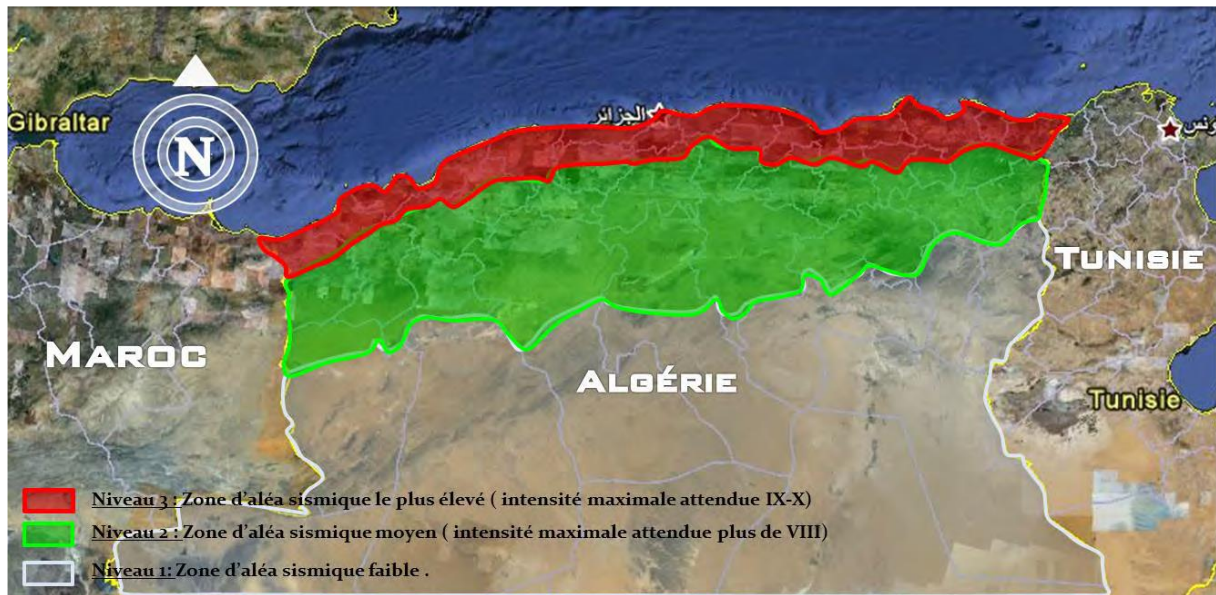


Figure I.15: Niveaux d'aléa sismique en Algérie

. I.22. La vulnérabilité des territoires du Nord :

Le zonage sismique du territoire algérien montre comme vu auparavant, que la bande tellienne notamment dans sa frange littorale est soumise au degré d'aléa alors que les Hauts Plateaux et le Sud sont positionnés respectivement en niveau 2 et 1.

Comme l'occupation de notre territoire est très déséquilibrée, la vulnérabilité de la frange tellienne par rapport aux effets des risques majeurs et notamment sismique, est évidemment accrue pour les zones fortement urbanisées où se concentrent également les complexes industriels, des infrastructures et équipements structurants, les activités de commandement économique (tertiaire supérieur).

C'est à partir de la conjugaison du niveau d'exposition à l'aléa sismique et de la concentration démographique et économique ainsi exposée à l'aléa qu'a été élaborée la carte relative au niveau de vulnérabilité des différents ensembles de notre territoire par rapport aux effets des événements sismiques.

Cette carte individualise ainsi, les grandes concentrations humaines et économiques de la zone tellienne liées au plus haut niveau de vulnérabilité et, quelques ensembles des Hauts Plateaux, où l'occurrence d'événements sismiques associée à des concentrations urbaines crée un second niveau de vulnérabilité.

La situation extrême en termes de vulnérabilité est évidemment offerte par **l'aire métropolitaine d'Alger**, qui outre sa charge démographique particulière (plus de 12% de la population algérienne) (RGPH 2008)²⁵ concentre un potentiel économique et infrastructurel considérable, ainsi que tous les centres de pouvoir et de commandement du pays .

. I.23. Réglementations parasismiques :

L'étude de l'effet des séismes sur le comportement des terrains, ont pris une place croissante dans les travaux de recherche en mécanique des sols à partir du milieu des années 60. L'étendue des dégâts occasionnés la même année en 1964 par deux tremblements de terre au Japon à Niigata et en Alaska a été un élément initiateur prépondérant. Depuis lors, les connaissances acquises ont été considérables, et ils demeurent de nombreuses incertitudes ou les méthodes d'analyse restent largement imparfaites. L'ingénieur peut actuellement intégrer bon nombre de résultats de ces recherches en vue d'améliorer la sécurité des constructions en zone sismique. Le contenu d'un texte réglementaire est toujours le reflet des connaissances au moment de sa rédaction. On va présenter les différentes dispositions intéressant le sol introduit dans la réglementation parasismiques, algérienne RPA93.

. I.23.1 Réglementation parasismique algérienne RPA99 (version 2003):

La réglementation parasismique algérienne en vigueur (RPA99 version 2003) repose sur plusieurs éléments :

- découpage du territoire en plusieurs zones d'activité sismique, à l'intérieur des quelles est définie une accélération sismique.
- Prise en compte de la géologie des formations qui subissent l'accélération sismique
- Caractérisation du degré de risque acceptable par type d'ouvrages.
- Calculs basés sur l'approche pseudo-statique qui constitue un modèle acceptable pour les besoins de la pratique

I.23.2. Classification des sites et leurs caractéristiques :

Les sites sont classés en quatre catégories en fonction des propriétés mécaniques des sols qui les constituent. Les différentes catégories des sites sont les suivantes :

- S1 : site rocheux, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement 800m/s .
- S2 : site ferme, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement 400m/s à partir de 10m de profondeur.

- S3 : site meuble, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement 200m/s à partir de 10m de profondeur.
- S4 : site très meuble, caractérisé par une vitesse d'onde de cisaillement 200m/s dans les 20 premiers mètres. [13] .

Les caractéristiques de chaque catégorie de site et les périodes caractéristiques T1 et T2 sont données dans les tableaux 1.1 et tableau 1.2 :

Site	Description	Vitesse VS (m /s)	E (MPa)
S1	Rocheux (ou autre formation géologique)	≥ 800	2800
S2	Ferme (dépôts de sables et de graviers très denses et/ou d'argile surconsolidée sur 10 à 20 m d'épaisseur)	≥ 400	830
S3	Meuble (dépôts épais de sables et graviers moyennement denses ou d'argile moyennement raide)	≥ 200	300
S4	Très meuble (dépôts de sables lâches avec ou sans présence de couche d'argile mole)	≥ 100	127

Tableau 1 .1: caractéristiques des différentes catégories de site (RPA99 version 2003)

site	S1	S2	S3	S4
T1 (sec)	0.15	0.15	0.15	0.15
T2 (sec)	0.30	0.40	0.50	0.60

Tableau 1-2: les périodes caractéristiques (RPA99 version 2003)

I.23.3. Coefficients sismiques pseudo statique de calcul :

Le RPA99 (version 2003) définit les coefficients pseudo-statiques horizontaux k_H et vertical k_V à prendre en compte dans un calcul de stabilité sismique des pentes comme suite :

$$K_H = 0.5 A \text{ (\%g)} \text{ (1.3)}$$

$$K_V = \pm 0,3 k_H \text{ (1.4)}$$

Ces fractions représentent les forces horizontales contenues dans les plans verticaux de plus grande pente et dirigées vers l'aval et les forces verticales ascendantes ou descendantes.

Le coefficient A, appelé coefficient d'accélération de zone, est fonction de la zone sismique et du groupe d'ouvrages considérés. Ce coefficient est défini dans le tableau 1.2 ci-après. 1.3. [13].

Groupe	ZONE			
	I	IIa	IIb	III
1 A	0,15	0,25	0,30	0,40
1 B	0,12	0,20	0,25	0,30
2	0,10	0,15	0,20	0,25
3	0,07	0,10	0,14	0,18

Tableau 1.3 : Valeurs du coefficient d'accélération de zone selon (RPA99 version 2003)

I.24 Conclusion

En conclusion on peut dire que le tremblement de terre autant que phénomène naturel indépendant dans très peu de cas présente une menace à l'homme, il devient un phénomène hasardeux (primairement) quand il est considéré en relation avec les structures. Par conséquent, les tremblements de terre sont d'intérêt spécial pour l'ingénieur de structure travaillant dans des zones sismiques.

La résolution des problèmes de la construction des ouvrages qui pourraient résister, dans une certaine marge admissible de sécurité à des secousses sismiques probables, ne peut se faire sans une bonne connaissance des caractéristiques du mouvement sismique.

L'évaluation des caractéristiques du mouvement sismique sur un site est la première des étapes conduisant au dimensionnement parasismique des ouvrages. Elle fait intervenir en étroite relation de nombreuses disciplines : géologie, histoire, sismologie géotechnique, statistique...etc.

Chapitre II

Conception des bâtiments dans les zones sismiques

II.1. INTRODUCTION:

Pour la sécurité parasismique de nouveaux bâtiments, les principes déterminants à suivre pour la conception et la réalisation de la structure porteuse et des éléments de construction non porteurs (cloisons intermédiaires, éléments de façade, etc.) pour la sécurité en cas de séisme (comportement à la rupture) et la vulnérabilité sismique (endommagement) sont exposés.

Des calculs et un dimensionnement aussi élaborés soient-ils, ne peuvent pas compenser les erreurs ou les défauts “parasismiques” de conception et d’exécution de la structure porteuse et des éléments non-porteurs.

Une conception et une exécution parasismique appropriées n’entraînent en général pas ou peu de surcoût pour les nouvelles constructions. Ceci reste valable même lors de l’application de méthodes modernes de calculs et de dimensionnement, en particulier le dimensionnement en capacité orienté en déformation. Il est indispensable de respecter les principes de base pour la conception et la réalisation exposés ci-après, cependant cela n’est pas suffisant. Des calculs et un dimensionnement approprié sont également indispensables. Alors que l’architecte et l’ingénieur civil participent tous deux à l’élaboration du projet ainsi qu’à certains aspects de la construction, les quelques principes de base de calculs et de dimensionnement qui suivent s’adressent essentiellement à l’ingénieur civil. Le respect de ces principes par l’ingénieur civil sera le plus souvent largement compensé par une économie des coûts de construction.

II.2. La construction parasismique des ouvrages :

Construction parasismique est plus que nécessaire dans certaines zones de la planète.

La construction parasismique ne se limite pas à l’édification de bâtiments dépourvus de charme. De fait, nombreuses sont les constructions modernes qui sont, sur le plan architectural, de très belles oeuvres et respectent les règles de construction parasismique.

Le génie parasismique étudie les moyens à mettre en oeuvre pour construire des bâtiments résistant aux séismes et s’intéresse aussi à la rénovation et au confortement des constructions plus anciennes.

II.3. historique de construction parasismique:

Des modes de construction parasismique, plus ou moins intuitifs ou issus des leçons tirées des tremblements de terre du passé existent depuis au moins 2000 ans. Ils ont permis à de nombreuses églises, temples, mosquées, pagodes et de nombreux châteaux de résister à des tremblements de terre parfois importants..

La première réglementation parasismique européenne est née à Naples grâce à la volonté des Bourbons après le terrible séisme arrivé en 1783 dans la Calabre du sud¹⁶ Contrairement à d’autres catastrophes naturelles comme les avalanches ou les inondations,

les séismes tuent presque exclusivement par les chutes d'objets et l'effondrement des bâtiments. Comprendre le comportement des ouvrages pendant une secousse et apprendre à construire des édifices qui ne s'effondrent pas est donc un moyen efficace de se prémunir des effets des séismes.

C'est l'objet du génie parasismique. Un bâtiment construit suivant des règles parasismiques doit pouvoir se déformer, voire s'endommager, sans s'effondrer. En d'autres termes, le génie parasismique consiste à concevoir des structures capables d'absorber et de dissiper l'énergie mécanique transmise par le séisme. Bien avant l'apparition du génie parasismique moderne, plusieurs grandes civilisations ont su construire des monuments qui ont résisté au temps et aux séismes. Le site andin de Machu- Pichu est ainsi un remarquable exemple d'architecture parasismique. Tout comme le Palais Impérial de Tokyo et ses murailles, composées de blocs de pierre pesant plusieurs tonnes, qui résistent admirablement aux fréquentes secousses qui les agitent.

Habitué aux cataclysmes sismiques, les architectes japonais sont depuis longtemps des experts de l'art de vivre avec les tremblements de terre. Les bâtiments japonais traditionnels, notamment les fameuses pagodes bouddhiques, respectaient déjà les principales règles de construction parasismique. Frêles mais résistantes, ces constructions utilisaient des structures en bois encastées, qui offraient un parfait équilibre entre légèreté et solidité.

Le risque nouveau que fait courir l'urbanisation et la multiplication des bâtiments en béton dans des zones sismiques, a, depuis les années 60, entraîné un essor de la recherche et une amélioration sensible des techniques du génie parasismique.[14]

II.4. Concept général :

II.4.1 Concept général de stabilité des bâtiments sous action sismique :

Tous les bâtiments constituent des «boites », dont le fonctionnement général est schématisé à la Figure 1 et dont la stabilité implique le respect des 3 conditions suivantes:

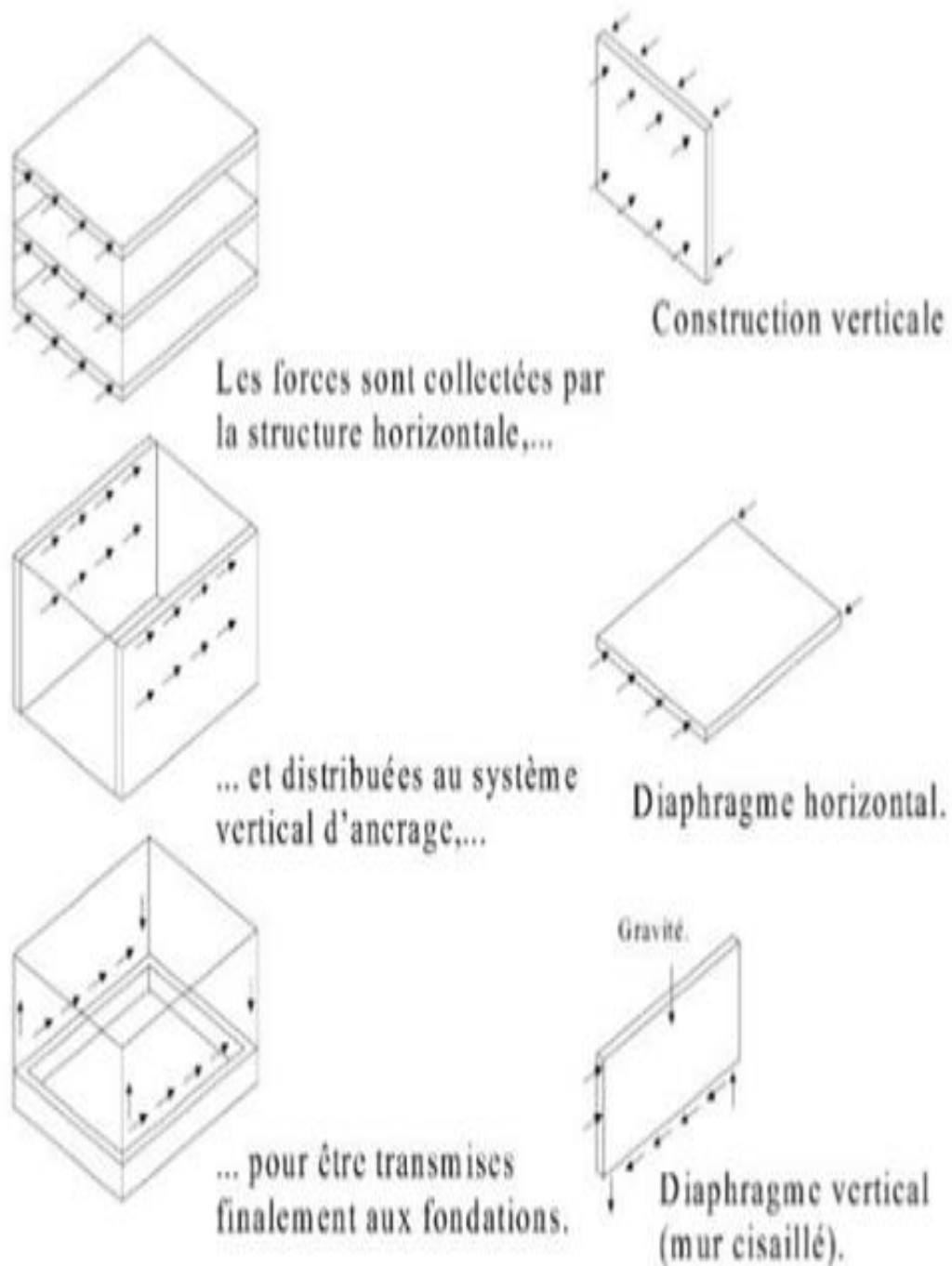
Une résistance adéquate des plans constituant la boite:

a contreventements verticaux: murs, triangulations, portiques

b contreventements ou diaphragmes horizontaux ou sub-horizontaux : planchers, toitures, poutres «au vent », etc...

Un choix convenable de ces plans, tel que la géométrie globale de la boite reste inchangée lors des mouvements sismiques : limitation des mouvements hors plan, gauchissement,... ; ceci demande:

- A : un nombre convenable de plans de contreventement verticaux et horizontaux.
- B:une bonne disposition relative de ces plans.
- C:Des liaisons adéquates entre ces plans .



FigureII.1 :schéma gènèral de fonctionnement en (boite) pour la reprise des action horizontales de sèisme ou de vent.

II.5. Notion de construction parasismique:

La nécessité d'avoir des règles parasismiques simples, faciles à utiliser, ainsi qu'un compromis entre un niveau de protection parasismique acceptable et son coût, a été évoquée plus haut. Dans le but d'apprécier le degré de prise en compte par les règles de l'agression sismique

et du comportement réel des structures, quelques démarches réglementaires sont commentées dans ce qui suit..[15]

- **Une conception parasismique permet :**
 - ✓ De minimiser les effets des charges sismiques
 - ✓ D'assurer la résistance
 - ✓ D'abaisser le cout de la protection parasismique.
- **Les bases d'une conception parasismique:**
 - ✓ Prendre en considération l'implantation de l'ouvrage
 - ✓ Intégrer une architecture favorable à la résistance aux séismes,
 - ✓ respectant les dispositions parasismiques des normes
 - ✓ Anticiper les effets destructeurs
 - ✓ Assurer la reprise des efforts. .[16]

II.6. Les séismes et la réponse des constructions :

Les séismes se manifestent à la surface du sol par un mouvement de va-et-vient (Ondes de Love). Le mouvement est caractérisé par le déplacement et l'accélération du sol.

Les constructions sont liées au sol au moins par les fondations, éventuellement par leurs parties enterrées (sous-sol). Les éléments de construction solidaires du sol suivent ces déplacements; du fait de leur masse, par inertie les parties présentes en élévation ne suivent pas instantanément le mouvement et il s'ensuit une déformation de la structure

Pour bien comprendre les effets d'un tremblement de terre sur les constructions nous allons analyser, à partir d'exemples simples, la façon dont réagissent les structures aux oscillations sismiques et les situations à risque qui leurs sont liées.

(La figure2) indique schématiquement comment réagit une construction (composée ici de 2 planchers) aux oscillations verticales (ondes de Rayleigh), aux oscillations horizontales (ondes de Love) qui sont les plus destructrices.

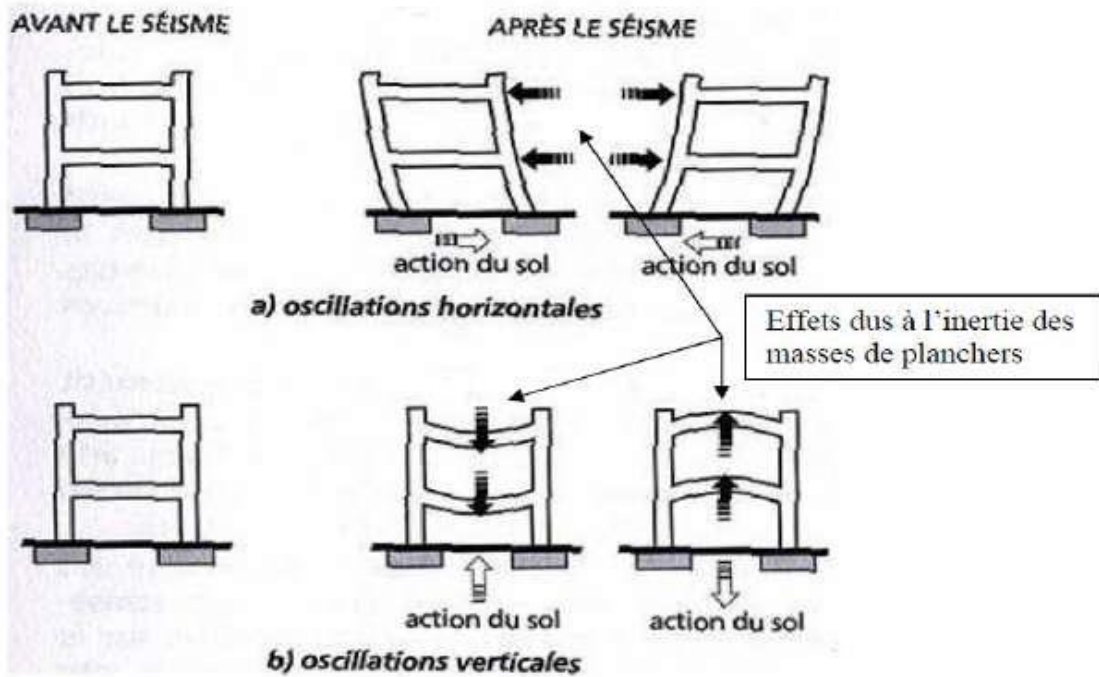


Figure. II2 : Réponse des constructions aux actions horizontales et verticales des tremblements de terre.

Les oscillations de torsion sont dues à la « mauvaise » conception des constructions, car le sol ne tourbillonne pas. Lors des séismes, les parties plus déformables des ouvrages vrillent autour des parties plus rigides. Ce phénomène est expliqué plus loin. Les bâtiments supportent très mal les oscillations de torsion. Il s'agit d'un des phénomènes les plus destructeurs.. [17]

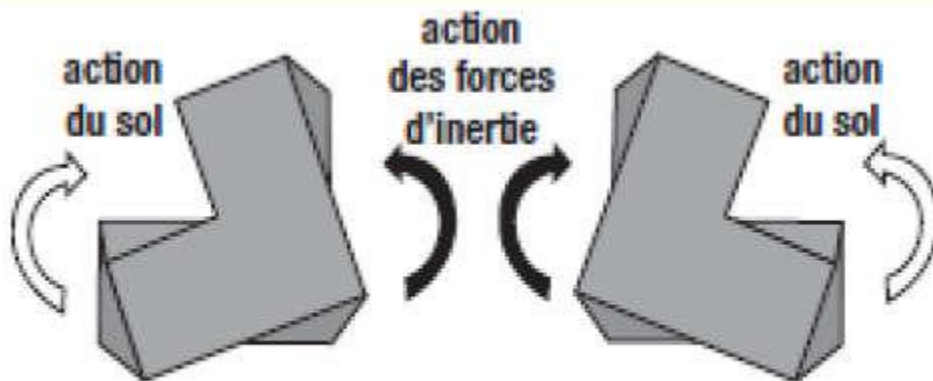


Figure. II3: Oscillations de torsion.

II.7. Objectif global :

est de définir une structure capable de subir, sans s'effondrer, les déformations engendrées par l'action sismique. Cet objectif peut être atteint avec succès par des projets d'ossatures de divers types et de divers degrés de capacité de dissipation d'énergie par déformations plastiques –Figure4-en particulier: -des ossatures où les déformations sont essentiellement élastiques -des ossatures qui forment une seule zone plastique significative, généralement en base. Exemple : structure à noyau en béton armé -des ossatures où sont formées de nombreuses zones dissipatives.

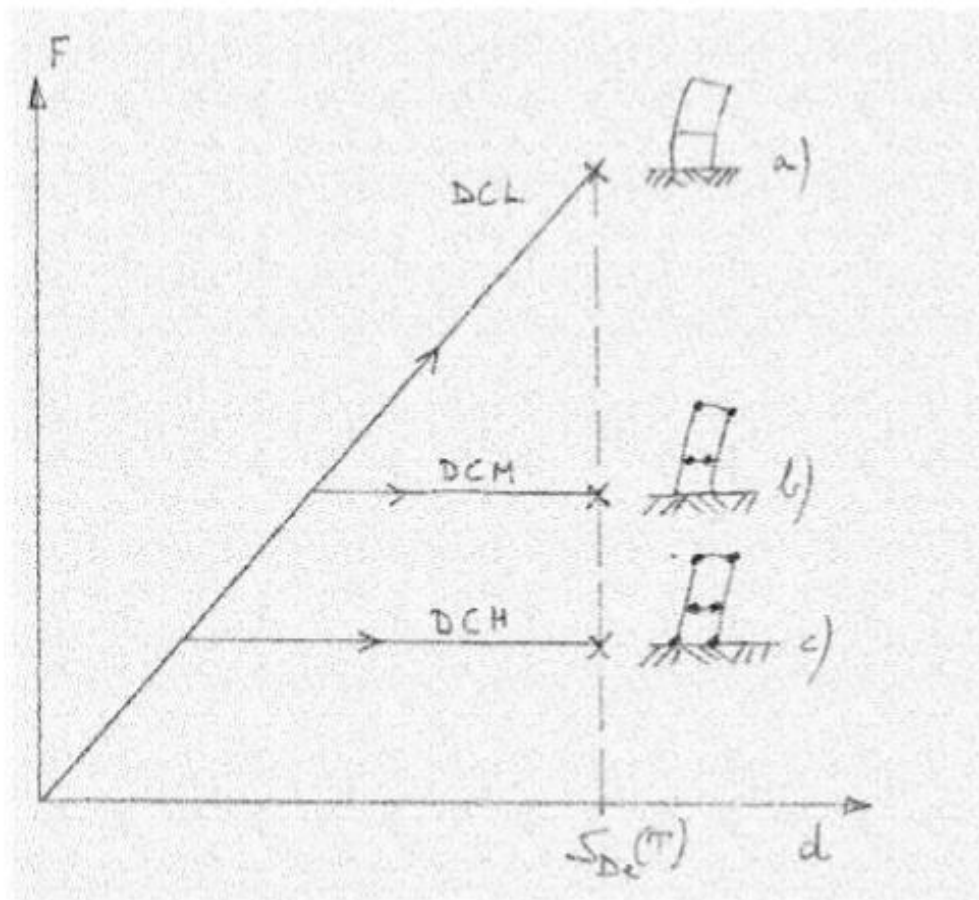


Figure.II4 : Comportement d'ossatures de même période T soumises à poussée progressive jusqu'au déplacement de projet $SDe(T)$: a) projet à réponse purement élastique DCL, b) projet modérément dissipatif DCM et c) projet très dissipatif DCH.

Ces 3 niveaux possibles de dissipativité des projets sont distingués dans l’Eurocode 8 par :

- des Classes de Ductilité de 3 niveaux, distinguées par les symboles DCL, DCM et DCH et par les valeurs du coefficient de comportement q associé à ces classes (Tableaux 1).
- des exigences de dimensionnement associées au niveau visé de ductilité locale et globale, On discute l’intérêt des options de projet DCL, DCM ou DCH.

Principe de dimensionnement	Classe de ductilité de la structure	Intervalle des valeurs de référence du coefficient de comportement q
Comportement de structure faiblement dissipatif.	DCL (limitée)	$q \leq 1.5 - 2$
Comportement de structure dissipatif.	DCM (moyenne)	$q \leq 4$ également limité par type d’ossature.
	DCH (haute)	Uniquement limité par type d’ossature.

Tableau.1 : principes de dimensionnement classes de ductilité des structures et limites supérieures des valeurs de référence des coefficients de comportement.

II.8. Conception architectural tenant compte du mouvement sismique :

Les tremblements de terre peuvent soumettre les bâtiments à des efforts énormes et provoquer leur ruine, ainsi que la mise en danger des habitants. Or le maître d’ouvrage doit la sécurité aux occupants de l’habitation qu’il a fait construire. Le but de la réglementation (voir encadré) est d’assurer la protection des vies humaines en cas de séisme, de limiter les dommages aux bâtiments et de garder à la résistance aux séismes. .[18]

II.9. Respect des normes parasismiques :

Qu’une société prenne ou non des mesures contre les risques sismiques dépend finalement de la manière dont elle appréhende ces risques. A propos du discours y relatif en Suisse, vous dites, Monsieur Bachmann, que l’on a «oublié» les tremblements de terre. Les normes

parasismiques modernes ne sont en vigueur que depuis 1989. Les normes parasismiques sont un peu plus récentes qu’en Italie, par exemple.

La norme parasismique impose le respect de dispositions constructives spécifiques.

Nous avons vu que dans le cas des constructions en béton armé, il s'agit essentiellement d'assurer le confinement des zones de structure les plus sollicitées, appelées zones critiques, différentes selon le type de structure. Il apparaît ainsi que la résistance aux séismes est davantage une question de système porteur (architecture, dispositions constructives, dimensionnement) que du matériau.. [19]

II.10. Qualité d'exécution :

La **qualité de l'exécution et le contrôle sur chantier** (par exemple, de la qualité des matériaux utilisés ou de la bonne réalisation des chaînages) sont deux notions essentielles lors des travaux.

Les **constructeurs** doivent respecter les plans des concepteurs, et pour cela être formés à la construction parasismique. Pour davantage de sérénité et de sécurité, une mission peut être confiée à un **contrôleur technique** qui veillera tout au long de la phase travaux à la bonne exécution des plans.

.[20]

II.11. Entretien :

Par entretien on entend le gros entretien et le renouvellement, soit toutes les mesures qui servent à maintenir en bon état la route et ses installations techniques en tant qu'ouvrage construit. Les travaux d'adaptation ou de modernisation d'équipements existants nécessités pour répondre aux exigences d'un droit nouveau appartiennent à la rubrique entretien. .[20]

II.12. Les principes généraux de la conception parasismique des bâtiments :

Le respect des principes de conception parasismique a pour résultat principal de minimiser le supplément de prix nécessaire pour passer d'une structure ordinaire à une structure parasismique. Les principes s'appliquent à la structure résistante du bâtiment, pas à ce qui en fait l'apparence. Les silhouettes esquissées dans les points suivants expriment les principes à respecter. La liberté de l'architecte reste évidemment grande.

II.12.1.Simplicité :

Le comportement d'une structure simple est plus facile à comprendre et à calculer que le comportement d'une structure complexe. Le risque d'omettre un phénomène particulier, comme une interaction entre parties de raideurs différentes ou un cumul d'effets différents entre ces parties, est faible. De plus, cette simplicité de l'ensemble concourt à la simplicité des détails.. [21]

II.1.22. Continuité :

Toute discontinuité dans une structure conduit à une concentration de déformations engendrant facilement des dégâts locaux qui amorcent des dégâts plus globaux.

Ce principe se traduit dans les détails de structure. Ainsi il convient d'éviter l'absence de liaison positive : des éléments porteurs de plancher simplement posés ne sont tenus en place que par le frottement et peuvent se désolidariser des appuis. Ce principe se traduit aussi dans la surveillance de chantier : bétonnage des joints d'assemblage, mise en place des armatures, l'exécution des reprises en béton armé, qualité des matériaux. Le principe de continuité a un impact sur le dessin d'ensemble des structures, défini dans les principes suivants.

II.12.3. Régularité en plan :

Le mouvement sismique horizontal est un phénomène bidirectionnel. La structure du bâtiment doit être capable de résister à des actions horizontales suivant toutes les directions et les éléments structuraux doivent des caractéristiques de résistance et de rigidité similaires dans les deux directions principales, ce qui se traduit par le choix de formes symétriques.

La forme idéale n'est pas seulement symétrique suivant deux axes, mais se rapproche de l'axisymétrie car des dégâts importants ont souvent été observés à la jonction des pans dans des structures composées de plusieurs pans perpendiculaires.

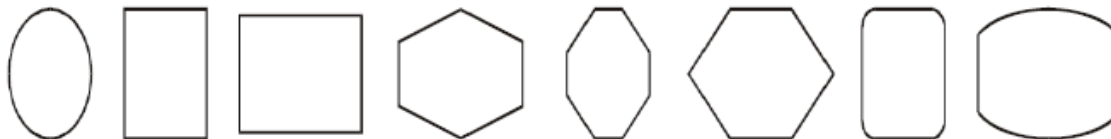


Figure II5 : Formes favorables : plans simples à 2 axes de symétrie.

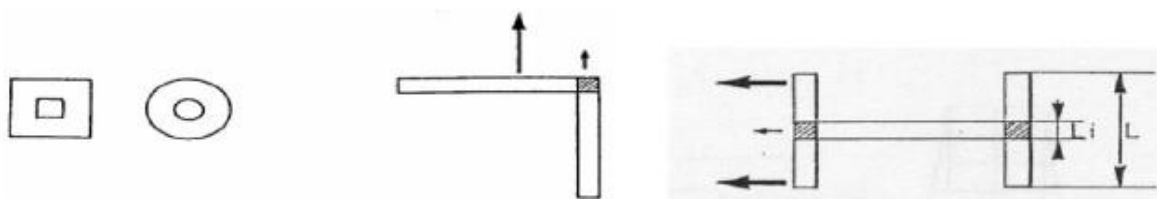


Figure .II6 : Vues en plan de bâtiments. A gauche : symétriques et compacts en plan. A droite: effets néfastes de l'asymétrie ou du caractère non compact.

Des considérations purement flexionnelles expliquent ce phénomène : les raideurs flexionnelles suivant les directions principales sont très différentes dans un bâtiment rectangulaire. Il en résulte des périodes propres différentes de 2 ailes perpendiculaires soumises à une action sismique d'orientation donnée, d'où une réponse (fonction du temps) différente et une concentration de problèmes à la

jonction des ailes perpendiculaires. Ce fait était particulièrement remarquable à Bucarest après le séisme de 1977 où tous les immeubles

formant coin de rue étaient effondrés ou nettement plus dégradés que les autres. Cette observation s'applique aussi aux bâtiments en H, pourtant deux fois symétriques . [21]

Ce qui est vrai pour la flexion d'ensemble l'est aussi pour la torsion: les éléments reprenant la torsion doivent être distribués assez symétriquement. Le non-respect de ce principe peut conduire à une déformation permanente gauchie de la structure.

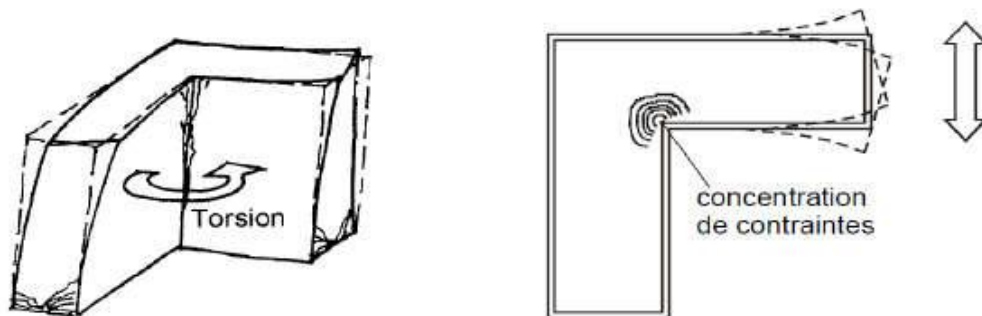


Figure II7 : Influence de la forme du bâtiment sur les effets dus à la torsion : concentration de contraintes dans les angles rentrants (en haut) ; rotation permanente (en bas).

II.12.4. Surveillance du chantier:

Il s'agit d'un aspect particulièrement important pour garantir la qualité réelle du travail effectué, en particulier: -le positionnement des éléments préfabriqués en béton -le bétonnage de leurs joints d'assemblage -la mise en place correcte des armatures, l'exécution soignée des reprises, en béton armé-la qualité des matériaux mis en œuvre.

II.12.5.Symétrie et régularité en élévation :

Dans la vue en élévation, les principes de simplicité et de continuité se traduisent par un aspect régulier de la structure primaire, sans variation brutale de raideur. De telles variations entraînent des sollicitations locales élevées. [22]

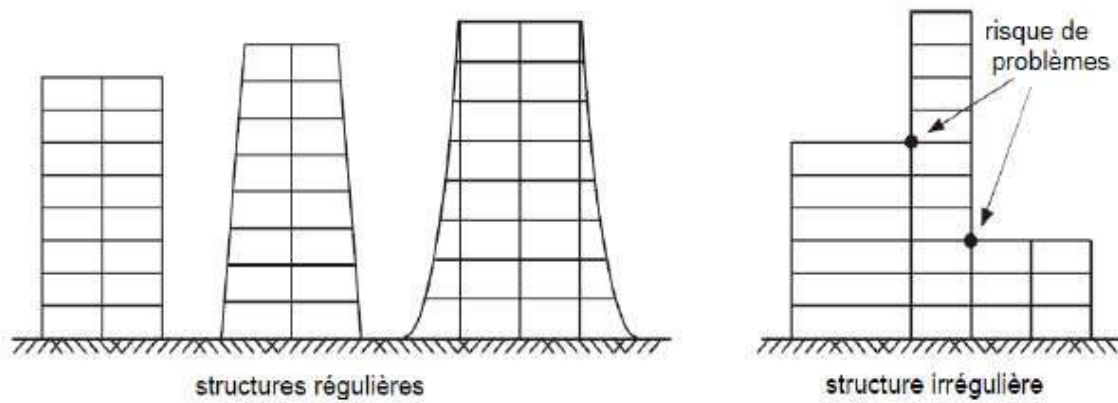


Figure.II8 :Régularité en élévation.

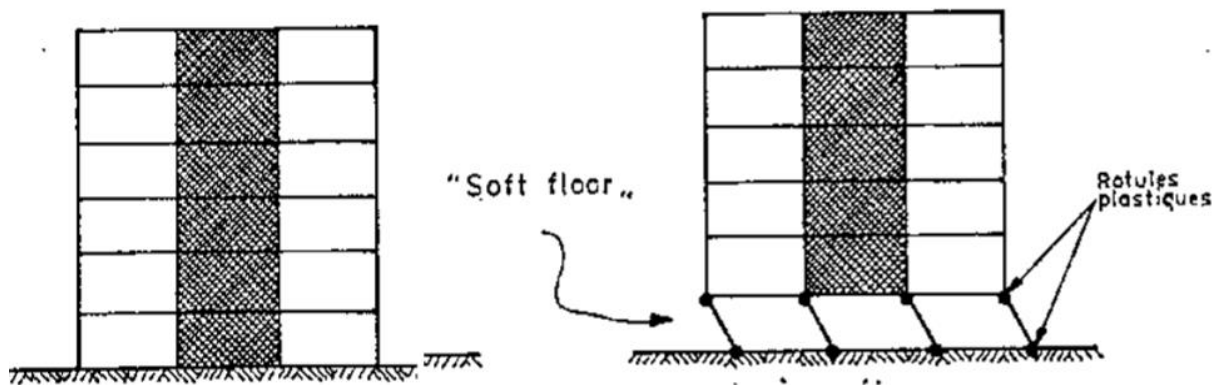


Figure.II9. : régularité en élévation. A droite: niveau rez flexible ou “mou “(anglais : softà t).

Le principe de distribution continue et uniforme des éléments résistants de la structure primaire demande d’assurer une continuité des colonnes et des murs structurels, sous peine de créer la situation d’ « étage mou »

Les niveaux transparents sont très courants dans les bâtiments parce qu'on laisse le rez de chaussée ouvert en raison de l'usage: commerces, bureaux, réception dans les hôtels, parkings. Les niveaux transparents sont fortement déconseillés dans les zones sismiques car ils peuvent constituer des niveaux flexibles, dans lesquels se concentrent toutes les déformations de la structure.

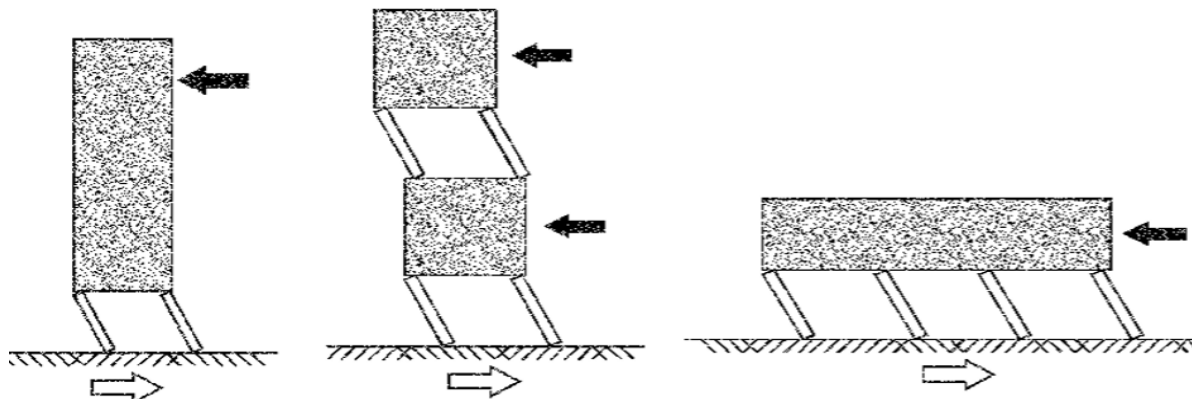


Figure II.10 : Bâtiments avec niveaux transparents.

II.12.6. Distribution rationnelle des masses :

Les constructions légères sont plus favorables que les structures lourdes, parce que les charges sismiques sont proportionnelles à la masse et à l'accélération ($F=ma$). Lorsque c'est possible, il convient d'éviter de concentrer les poids morts de service dans des zones de la structure où leur mise en mouvement va entraîner la naissance de forces considérables, de flexion ou de torsion.

Pour les problèmes de flexion, la hauteur d'un bâtiment n'est pas un facteur défavorable en soi. Par contre, pour un bâtiment de hauteur donnée, on devrait rechercher la position la plus basse possible du centre de gravité, par la présence d'étages enterrés, par des étages inférieurs en structure lourde et en plaçant les équipements les plus lourds aux niveaux les plus bas. Pour les problèmes de torsion, les charges lourdes devraient être placées près du centre de torsion du bâtiment. [23]

II.12.7. Homogénéité partition en sous-structures :

Lorsque pour une raison quelconque (usage, esthétique), les principes de régularité en plan et de symétrie ne peuvent être respectés, on peut penser à effectuer une partition du bâtiment en plusieurs « blocs » ou sous structures ; celles-ci sont séparées pour leur comportement structural, mais jointives pour leur utilisation.

La difficulté de cette solution consiste en la réalisation de joints corrects entre les sous structures. Ces joints doivent être suffisamment larges pour éviter le martèlement entre sous structures lors d'un tremblement de terre, car ces sous structures n'oscillent pas nécessairement à la même fréquence et il faut cumuler leurs déplacements maxima possibles pour définir l'intervalle minimum qui doit les

séparer. Cette solution doit en outre être complétée par des passerelles souples entre les différentes unités ainsi réalisées. Cette solution peut être réalisée sans dédoublement des poteaux de la structure, si les déplacements aux joints sont faibles (zone peu sismique, bâtiments peu élevés). Sinon, le dédoublement s'impose). On notera que les mêmes considérations s'appliquent aux joints de dilatation des bâtiments.

On note qu'il n'est pas opportun de remplir les joints sismiques de grande dimension, tels des murs mitoyens, par un matériau même peu résistant (polystyrène ou autre), car une petite contrainte appliquée à une très grande surface peut correspondre à une force résistante élevée empêchant le fonctionnement du joint. Dans ce cas, on se contente de masquer le joint par un élément flexible, pour des raisons esthétiques.). Si le joint interrompt des éléments porteurs principaux de faible dimension (poutre), la contrainte qui peut se développer dans un matériau interface est assez élevée pour écraser celui-ci. [24]

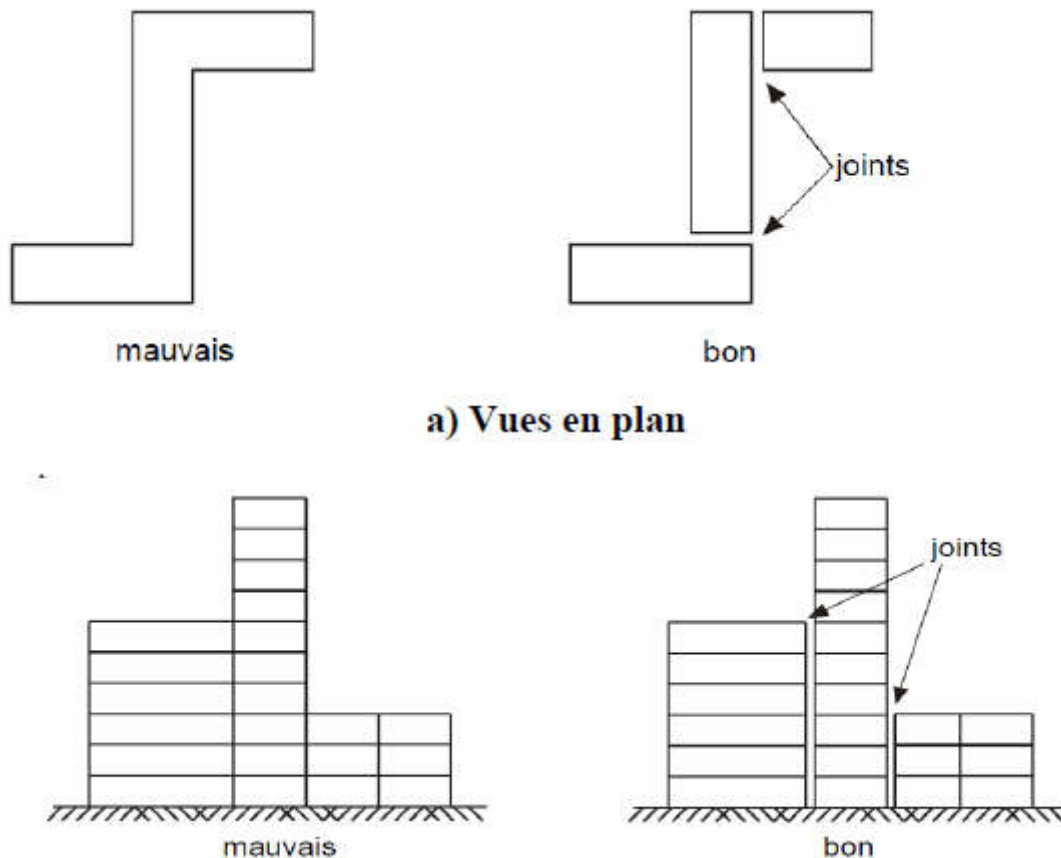


Figure II11: Fractionnement des bâtiments par des joints sismiques ou partition en sous structurent.

II.12.8.Des éléments structuraux verticaux surdimensionnés :

La ruine des éléments structuraux verticaux d'un bâtiment a un impact nécessairement catastrophique, car elle entraîne la chute d'un étage, qui entraîne à son tour souvent l'effondrement total de la structure.

Il est donc fondamental pour la sécurité d'éviter à tout prix la ruine des éléments structuraux verticaux. Ceux-ci sont hélas potentiellement le siège de plusieurs modes de ruine sans guère de ductilité

- flambement
- écrasement (peu ductile en béton armé)
- cisaillement alterné (fragile en béton armé, ductile en acier)

De plus, si les éléments structuraux verticaux sont le siège de flexions M combinées à de la traction ou de la compression N , leur moment de flexion résistant:

- peut perdre tout caractère de moment «plastique» ductile, en particulier en béton armé car

La capacité de raccourcissement de ce matériau dans le domaine plastique est très faible et sa ruine en compression fragile.

- peut être fortement réduit par rapport à une situation de pure flexion.

Dans les poteaux également, la zone de noeud est soumise à fort cisaillement du fait des moments de flexion de signe opposé qui se développent dans les poutres. La ruine par cisaillement de la zone de noeud n'est en aucun cas ductile dans les constructions en béton armé. Par contre, le cisaillement plastique de la zone de noeud d'un poteau en acier est extrêmement ductile et acceptée dans des proportions limitées. [25]

II.13.CONCLUSIONS :

Pour la conception parasismique de bâtiments, il est très important que l'ingénieur civil et l'architecte travaillent en étroite collaboration dès le début du projet. Ainsi, des surcoûts notables et des adaptations après coup, de toute manière insuffisantes, peuvent souvent être évités. Des principes de base importants et simples doivent être pris en considération dès la conception des structures porteuses et lors du choix des éléments non-porteurs (cloisons intermédiaires, façades). Pour les calculs et le dimensionnement, l'ingénieur civil doit adopter des méthodes modernes, par exemple le dimensionnement en capacité orienté en déformation. En observant ces règles, la sécurité parasismique des bâtiments des régions à sismicité modérée sera réalisée en général sans surcoûts importants.

Chapitre III:

**Simulation numérique de l'interaction dynamique
sol-structure**

III.1. Introduction:

Pour étudier l'effet de l'interaction dynamique sol structure sur le comportement des structures.

On a choisi un cas simple d'une structure d'un Minaret d'une mosquée de hauteur $H=18.40\text{m}$ et de dimension en plan $3.50 \times 3.50 \text{ m}^2$, le système de structure est auto stable et pour tenir compte de ISS on choisit sept modèles du système de fondations.

On fait la modélisation avec le logiciel Sap2000 V21, dans cette version on peut tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS), car il y a la possibilité de modéliser le sol où il est implanté l'ouvrage, la modélisation se fait en 3D .

La modélisation de la structure avec le logiciel Sap2000 se fait selon deux cas , le premier cas on ne tient pas compte de l'interaction sol-structure (ISS), dans ce cas il y a quatre modèles : semelles encastées, semelles avec ressorts, radier avec ressort, radier encasté ,dans le deuxième cas et pour tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS) on va modéliser le sol dans le même modèle avec la structure, dans ce cas on va choisir trois modèles :semelles dans un massif de sol, radier dans un massif de sol, et sol sans structure, et dans tous les cas la structure est implanté à la surface du sol sans ancrage.

Pour modéliser l'effet dynamique on utilise le spectre de réponse pour une zone de faible sismicité la zone 1 et pour le sol on choisit un sol meuble (S3), et on pour étudier un cas d'un séisme real on utilise l'histogramme du séisme de Boumerdes 2003, selon le règlement parasismique Algérien RPA.

Dans l'analyse on va faire la comparaison des résultats des différents cas au niveau l'effort normale, l'effort tranchant, le moment et la flèche pour chaque nœud suivant la hauteur et on va prendre comme modèle de référence le modèle semelles encastées.

III.2. Présentation du logiciel SAP2000:



Figure. III 1: Présentation du logiciel SAP2000.

2.1. Introduction au SAP2000:

SAP2000 est un logiciel de génie civil polyvalent idéal pour l'analyse et la conception des ingénieurs travaillant sur des installations de transport, industrielles, publiques, sportives et autres. Les systèmes basés et avancés, allant de la 2D à la 3D, de la géométrie simple au complexe, peuvent être modélisés, analysés, conçus et optimisés à l'aide d'un environnement de modélisation basé sur des objets pratiques et intuitif qui simplifie et rationalise le processus d'ingénierie.

SAP2000 est basé sur des objets, ce qui signifie que les modèles sont associés à des membres qui représentent la réalité physique. Une poutre avec plusieurs membres encadrant dans elle est créée en tant qu'objet unique, tout comme elle existe dans le monde réel, et le maillage nécessaire pour garantir que la connexion existe avec les autres membres est géré en interne par le programme. Les résultats d'analyse et de conception sont rapportés pour l'objet global, et non pour chaque sous-élément qui le compose, fournissant des informations qui sont à la fois plus faciles à interpréter et plus cohérentes avec la structure physique.

Les modèles de modélisation intégrés, les affectations de chargement basées sur le code, les options d'analyse avancées, les procédures d'optimisation de la conception et les rapports de sortie personnalisables se coordonnent tous sur une plate-forme puissante pour rendre SAP 2000 particulièrement utile pour les professionnels. Il s'est avéré être le programme structurel général le plus intégré, le plus productif et le plus pratique. Nous pouvons désormais réduire la puissance de SAP2000 pour toutes nos tâches d'analyse et de conception, y compris les petits problèmes quotidiens.

2.2. Quelques particularités de Sap2000:

- **Modèles:**

SAP2000 propose une large sélection de modèles pour démarrer rapidement un nouveau modèle. SAP2000 inclut des modèles paramétriques pour les types de structures suivants: poutres simples, fermes 3D, cadres 3D, cuves de stockage, escaliers, structures de barrage et tuyaux.

- **Systèmes de grilles:**

Les grilles peuvent être définies comme cartésiennes ou cylindriques dans SAP2000. Il n'y a pas de limite au nombre de systèmes de grille dans le modèle et ils peuvent être tournés dans n'importe quelle direction ou placés à n'importe quelle origine dans le modèle.

- **Plans et élévations:**

Les vues en plan et en élévation sont automatiquement générées à chaque ligne de quadrillage pour permettre une navigation rapide dans le modèle. Les utilisateurs peuvent créer leurs propres sections d'élévation à l'aide des fonctions d'élévation développées.

- **Édition interactive de la base de données:**

La modification interactive de la base de données permet aux utilisateurs de modifier les données du modèle dans une vue de table, ce qui simplifie la tâche de modification du modèle. Les tableaux sont facilement exportables et importables depuis Microsoft Excel et Microsoft Access.

- **Outils de maillage:**

Les ingénieurs disposent de nombreuses options en matière de génération de maillage dans SAP2000. Sélectionnez simplement l'objet de zone, puis sélectionnez les règles à utiliser par le générateur de maillage automatique.

- **Composants structurels:**

- ✓ Joints : SAP2000 crée automatiquement des joints aux intersections d'objets structuraux ou aux articulations internes lors de la mise en maille d'objets structuraux. Les coordonnées conjointes et l'information peuvent être affichées à l'écran dans la fenêtre du modèle ou au format tabulaire.
- ✓ Cadres: L'élément de cadre utilise une formulation générale, tridimensionnelle, de colonne de poutre qui inclut les effets de la flexion biaxiale, de la torsion, de la déformation axiale et des déformations de cisaillement biaxiale - SAP2000 une bibliothèque intégrée de propriétés standard de béton, d'acier et de section composite de Sections de Norme internationale.
- ✓ Câbles: Le câble est un élément hautement non linéaire utilisé pour modéliser le comportement caténaire de câbles minces sous leur propre poids. La résistance à la tension et la non-linéarité de grande déviation sont intrinsèquement incluses dans la formulation.

Il y a plus de composants comme les tendons, les coques, les solides, les liens, les charnières et les ressorts.

- **7. Chargement:**

- ✓ Chargement automatique basé sur le code SAP2000 générera et appliquera automatiquement des charges sismiques et de vent basées sur divers codes nationaux et internationaux. SAP2000 dispose également d'un générateur de charge mobile sophistiqué qui permet aux utilisateurs d'appliquer des voies de charges mobiles sur les éléments de châssis et de coque.

- ✓ Charges cycliques: La fonction de chargement cycliques génère automatiquement une charge sur la structure résultant des cycles, du courant, de la flottabilité et du vent. Un chargement linéaire statique en plusieurs étapes peut être généré pour simuler le mouvement de la baisse à travers la structure. En outre, un chargement dynamique (historique) peut également être généré pour inclure des effets d'inertie lorsque la vague se déplace dans la structure.

- ✓ Charges utilisateur: définissez des charges spécifiques pour modéliser un large éventail de conditions de chargement avec les options de chargement utilisateur intégrées à SAP2000.

- **Analyse:**

- ✓ Statique: SAP2000 peut effectuer à la fois une analyse statique linéaire et une analyse statique en plusieurs étapes.

- ✓ Dynamique: l'analyse dynamique SAP2000 permet le calcul des modes de vibration à l'aide de Ritz ou Eigen, l'analyse du spectre de réponse et l'analyse de l'historique des temps pour le comportement linéaire et non linéaire.

- ✓ Flambement: Les modes de flambement linéaire (bifurcation) d'une structure peuvent être trouvés sous n'importe quel ensemble de charges.

- ✓ P-Delta: l'analyse P-Delta capture l'effet de ramollissement de la compression et l'effet de rigidification de la tension.

- ✓ Pushover: les fonctionnalités d'analyse Pushover dans SAP2000 incluent la mise en œuvre de FEMA 356 et l'option charnière et charnière fibre basée sur la contrainte-déformation.

- **Combinaisons de charge:**

SAP2000 permet un nombre illimité de cas de charge et de combinaisons. Les types de combinaisons de charges comprennent: les combinaisons linéaires additives, d'enveloppe (min / max), d'ajout absolu, SRSS et de plage - Les composants de combinaison peuvent inclure d'autres combinaisons.

- **Modèle Active:**

pour les structures de petite à moyenne taille, l'analyse peut être effectuée à la volée lorsque vous construisez et modifiez le modèle. Pour chaque modification que vous apportez à la géométrie, aux propriétés ou au chargement, la structure répond instantanément avec la

nouvelle forme déformée, le diagramme des moments ou tout autre tracé des résultats. C'est comme travailler avec un modèle vivant, et c'est un outil très puissant pour la conception conceptuelle et pour tester les scénarios de simulation.

- **Conception:**

a) Châssis en acier: La conception du châssis en acier entièrement intégrée comprend l'optimisation de la taille des membres et la mise en œuvre des codes de conception. SAP2000 permet aux utilisateurs américains d'afficher de manière interactive les résultats de conception sur n'importe quel membre de l'ossature, de modifier les paramètres ou les propriétés de section et d'afficher les résultats des membres mis à jour.

Cadre en béton: La conception de cadre en béton entièrement intégrée dans SAP2000 comprend: la zone requise de calculs d'acier, les listes automatiques pour le dimensionnement des nouveaux membres, la mise en œuvre de codes de conception, la conception et la révision interactives et des capacités complètes d'écrasement.

Il a également un cadre en aluminium et une option de conception formée à froid. Affichage aryle à 12 sorties

- ✓ Géométrie déformée: les utilisateurs peuvent afficher une géométrie déformée basée sur une ou une combinaison de charge, ainsi que des animations de modes.
- ✓ Diagrammes de force: les diagrammes de cisaillement et de moment affichent les forces de cisaillement internes, les moments et les déplacements à tous les emplacements le long de la longueur d'un élément de cadre pour tout cas de charge ou combinaison de charges. SAP2000 offre la possibilité de faire défiler le bout de la longueur pour afficher les valeurs ou de faire défiler directement jusqu'à l'emplacement de la valeur maximale.
- ✓ Diagrammes de travail virtuels: dans SAP2000, les diagrammes de travail virtuels peuvent être utilisés pour déterminer les éléments à rigidifier pour obtenir le contrôle le plus efficace des déplacements latéraux d'une structure.
- **Tabular Output:**
SAP2000 a la capacité d'afficher des tableaux pour toutes les données d'entrée, les résultats d'analyse et les résultats de conception - Les tableaux prennent en charge le tri, le couper, le copier et le coller pour une utilisation dans les programmes. Imprimez ou enregistrez des données tabulaires dans Access, Excel, Word, HTML ou TEXT.
- **Aninvtioms vidéo:**
SAP2000 a la capacité de générer des vidéos (fichiers lavo pour afficher visuellement un ensemble de résultats d'analyse qui varient sur une période de temps donnée, comme dans une analyse de l'historique des dents.

- **Load Optimizer:**
L'optimiseur de charge est un outil dans SAP2000 pour calculer l'application de charge optimale pour obtenir la réponse structurelle souhaitée. Les charges peuvent être appliquées linéairement, non linéairement, ou dans les buts et les limites peuvent les déplacements, les forces, les moments et plus
- **Rapports:**
Des rapports imprimés pré-formatés sont disponibles en appuyant simplement sur un bouton. Ces rapports comprennent tous les.
- **Section Designer :**
Section Designer est un utilitaire intégré à SAP2000 - Il permet aux utilisateurs de créer des sections spécialisées de toute forme et matériau arbitraires, y compris la disposition des armatures. Toutes les propriétés des sections, les diagrammes d'interaction biaxiale et les diagrammes de courbure de moment sont automatiquement calculés.
- **Import et export:**
SAP2000 prend en charge de nombreuses normes de l'industrie pour l'importation et l'exportation de données. Autodesk Revit Structure, Tekla Structures, AutoCAD CAXF / DWG), CIS / 2, IFC, IGES et SDNF sont tous pris en charge. SAP2000 prend également en charge l'exportation d'un modèle vers une base de données Microsoft Access. Si les utilisateurs utilisent d'autres packages d'analyse, SAP2000 peut importer des tuiles depuis FrameWorks Plus, STAAD et STRUDL.

III.3. DESCRIPTION DE L'OUVRAGE:

Le présent projet consiste à étudier la Minaret d'une mosquée. Voir(Figure 3.1)

La mosquée est implantée dans une zone de faible sismicité.

Les dimensions en plan sont :

- ❖ Bloc N°01 [R+0] ----- 31.50 x 3.00 . La hauteur est de 3.70 m.
- ❖ Bloc N°02 [R+1] ----- 31.50 x 31.50 séparé par un joint chaque. La hauteur est de 6.90 m.
- ❖ Les murs extérieurs seront en double parois 15/5/10= 30 cm d'épaisseur.
- ❖ Les cloisons seront en maçonnerie de parpaing dont l'épaisseur varie de 10 cm au 15 cm.
- ❖ Un Minaret de [R+7] ----- 3.50 x 3.50 La hauteur est de 18.40 m.
- ❖ Les murs extérieurs seront en double parois 15/5/10= 30 cm d'épaisseur.
- ❖ Les cloisons seront en maçonnerie de parpaing dont l'épaisseur varie de 10 cm au 15 cm.

3.1. CHARGES**3.1.1. Charges permanentes et exploitations:**

Le calcul des charges permanentes et charges d'exploitation est conforme au DTR BC2-2.

➤ Charge permanente G:

- Terrasse : $G=7.0 \text{ kN/m}^2$
- Etage : $G=5.58 \text{ kN/m}^2$
- Acrotère : $G=1.75 \text{ kN /ml}$
- Palier d'escalier : $G=5.35 \text{ kN /m}^2$
- Volée (paillasse) : $G=9.18 \text{ kN/m}^2$

➤ Surcharges d'exploitation :

- Terrasse inaccessible $Q=1.0 \text{ kN/m}^2$
- Etage courant $Q=2.5 \text{ kN/m}^2$.
- Acrotère : $Q=1.0 \text{ kN/ m.}$
- Palier d'escalier $Q=2.5 \text{ kN/ m}^2$.
- Volée (paillasse) : $Q=2.5 \text{ kN/m}^2$

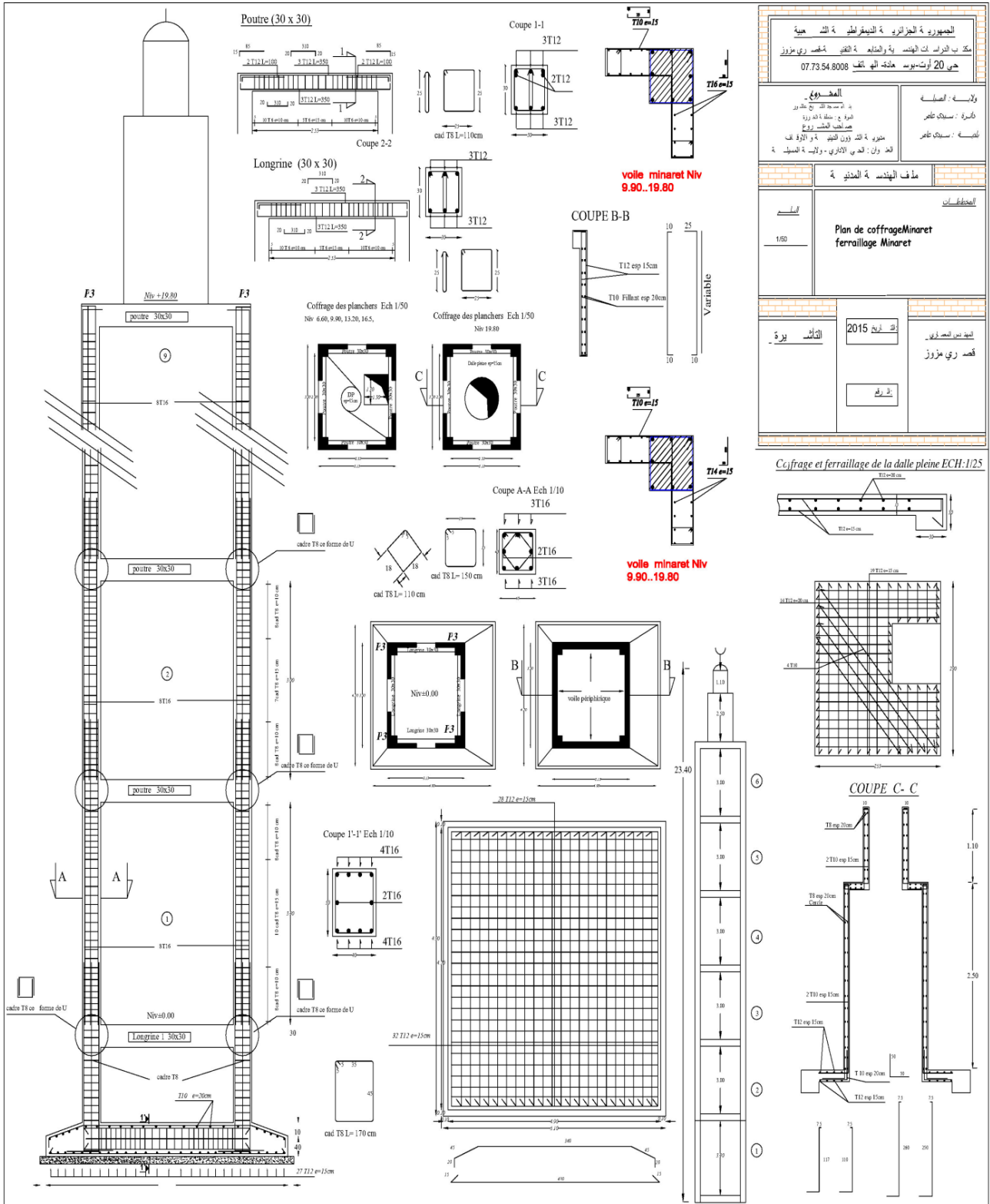


Figure III.2 : Vue en plan du Minaret.

III.4. Séisme:

➤ **Classification** : La mosquée est implantée à une zone de faible séismicité.

4.1. Zone I :

4.1.1. Ouvrages selon leur importance: L'ouvrage est destiné à recevoir un nombre important de personnes en même temps. L'ouvrage est donc classé dans le Groupe 1B.

4.1.2. Selon le rapport géotechnique relatif à notre ouvrage, on est en présence d'un sol meuble de catégorie S3.

4.1.3. Ouvrages selon leur configuration:

- système de contreventement : catégorie de structure.
- type de contreventement.

Portiques auto stables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide : C'est une ossature constituée uniquement de portiques capables de reprendre la totalité des sollicitations dues aux charges verticales et horizontales.

La structure de l'ouvrage est classée selon sa configuration en plan et en élévation. Le bâtiment à une configuration symétrique vis à vis les deux directions orthogonales aussi bien pour la distribution des rigidités que pour celles des masses.

4.1.4. Méthode de calcul : -dynamique:

- Méthode dynamique modale spectrale : La méthode d'analyse modale spectrale peut être utilisée dans tous les cas, et en particulier, dans le cas où la méthode statique équivalente n'est pas permise.

4.1.5. Action de calcul : Dynamique :

- **Spectre de réponse de calcul** : Le RPA99/version 2003 impose un spectre de réponse de calcul défini par la fonction suivante :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1,25 A \left(1 + \frac{T}{T_1} \cdot \left(2,5 \cdot \eta \cdot \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2,5 \eta \cdot (1,25 \cdot A) \cdot \frac{Q}{R} & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2,5 \cdot \eta \cdot (1,25 \cdot A) \cdot \frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{T_2}{T} \right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 0.3s \\ 2,5 \eta \cdot (1,25 \cdot A) \cdot \frac{Q}{R} \cdot \left(\frac{T_2}{3} \right)^{2/3} \cdot \left(\frac{3}{T} \right)^{5/3} & T \geq 0.3s \end{cases}$$

Avec :

g : accélération de la pesanteur.

A : coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement (quand l'amortissement est différent de 5%).

$$\eta = \sqrt{7 / (2 + \xi)} \geq 0.7$$

R: coefficient de comportement de la structure. Il est fonction du système de contreventement.

T₁, T₂ : périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.

Q : facteur de qualité.

Les données sismiques pour tous les calculs sont récapitulées dans le tableau 3.1, et la fonction du spectre de réponse est illustrée dans la Figure 3.2.

Tableau .1 :Données sismiques.

RPA 99 version 2003				
Cas :	A	B	C	D
Lieu (exemples) :	Sidi Ameer	Msila	Beni Amrane,	Boumerdès
Zone sismique :	I	Ila	Ilb	III
Coeff. d'accélération A	0.10	0.15	0.20	0.25
Site :	S3 (C)			
Facteur de qualité :	1			
Groupe d'usage :	2 (II)			
Matériau constitutif :	Portiques : Béton armé (léger)			
Système de contreventement :	Port. autostab. avec rempl. maçon. rigide (R=3.5)			
Facteur de qualité :	1.00			
S1 (A) - site rocheux (Vs>800 m/s)				
S2 (B) - site ferme (400 m/s <Vs < 800 m/s)				
S3 (C) - site meuble (200 m/s < Vs < 400 m/s)				
S4 (D) - site très meuble (Vs < 200 m/s)				
Groupe d'usage (Importance class)				
1A (IV)	Ouvrages d'importance vitale			
1B (III)	Ouvrages de grande importance			
2 (II)	Ouvrages courants ou d'importance moyenne			
3 (I)	Ouvrages de faible importance			

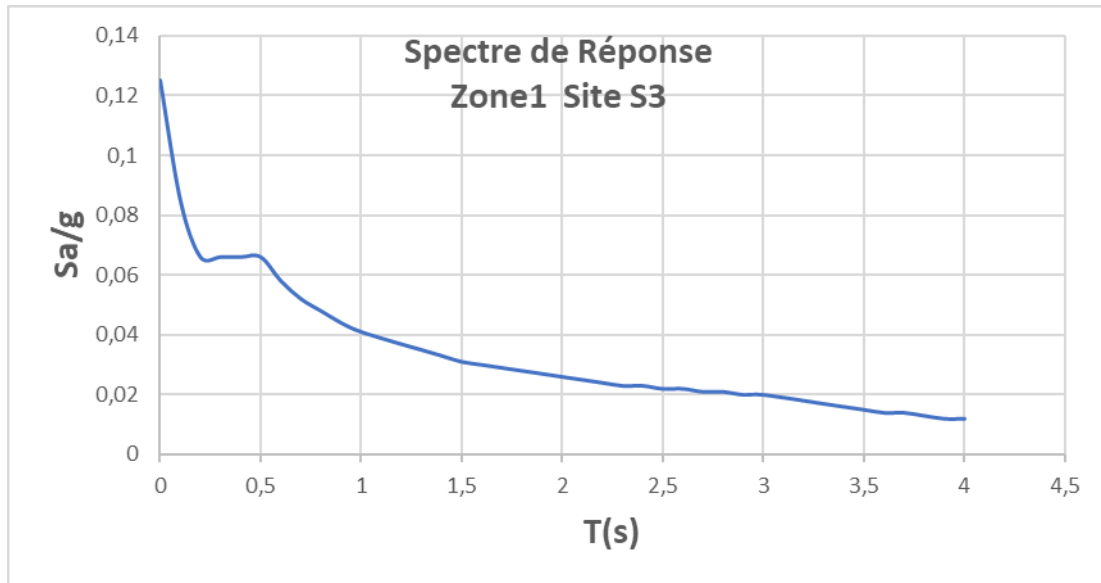


Figure III.3:Fonction spectrale S_a/g .

- **Accélérogrammes** : On utilise Accélérogrammes mesurés en 2003 sur le site de Keddara à Boumerdès (directions : EO/Est-Ouest, NS/Nord-Sud, V-verticale) voir figures 3.3..3.5

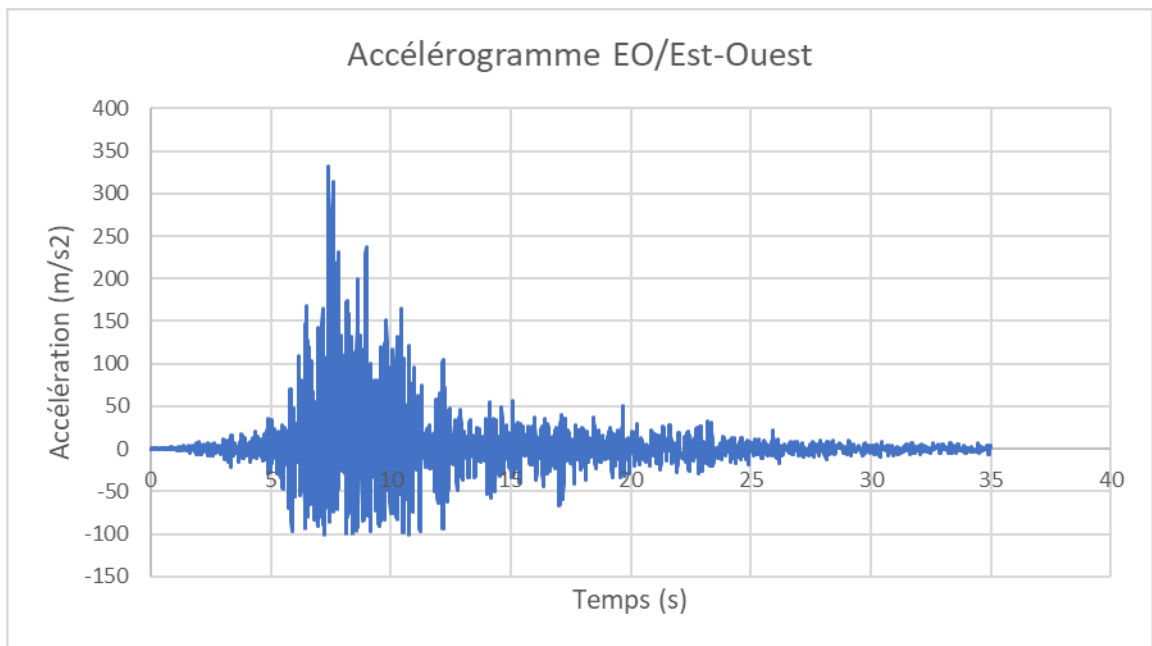


Figure. III 4: Accélérogramme EO Boumerdès 2003.

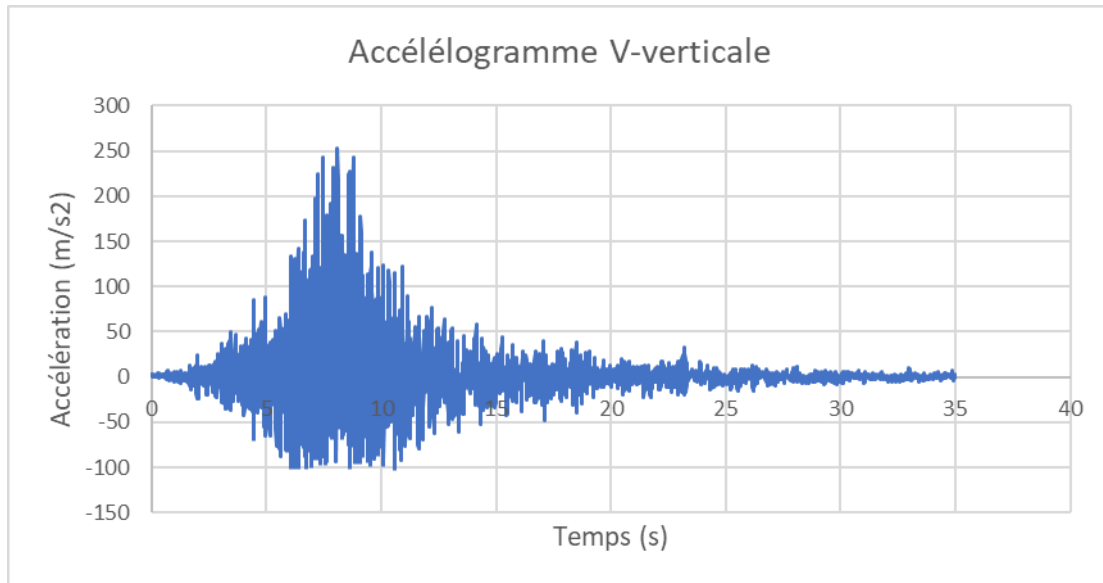


Figure. III 5: Accélérogramme V Boumerdès 2003.

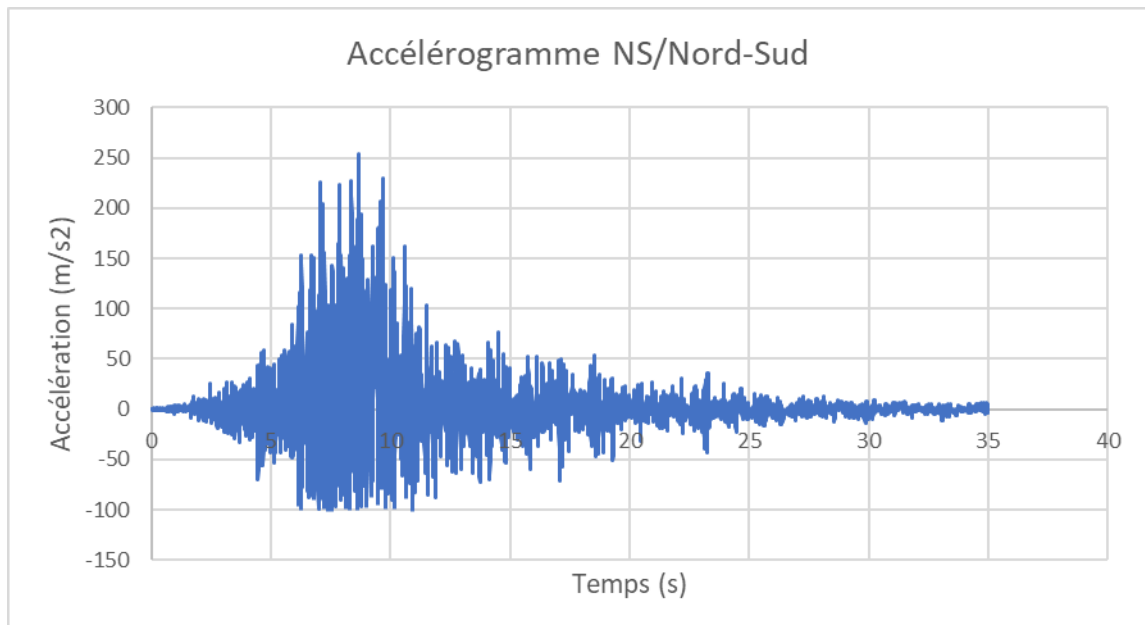


Figure III.6: Accélérogramme NS Boumerdès 2003.

4.1.6. Nombre de mode à considérer:

Le nombre de modes de vibration (K) à retenir dans chacune des deux directions d'excitation

doit être tel que : $K \geq 3\sqrt{N}$

N : nombre de niveaux au-dessus du sol

Rq : La somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit égale à 90% au moins de la masse totale de la structure, cette condition donne : **N= 8 modes** pour le minaret (H=18.40m)

Tableau.2: Combinaison d'action.

	G	Q	E
Ultime	1.35	1.5	0
Service	1	1	0
Séisme	0	0	1

4.1.7 Modèles fondation encastrée (Pas d'ISS):

Dans ce cas on va présenter deux modèles : le premier modèle la structure est encastrée par des semelles isolées à la base et les mouvements sont bloqués dans toutes les directions et on va prendre ce modèle comme modèle de référence, voir Figure 3.6, dans le deuxième modèle la structure est encastrée par un radier général, (voir Figure 3.7), dans ce cas la fondation et l'ouvrage sont solidaire au sol, aucune interaction de l'ouvrage avec le sol ou les fondations n'est introduite.

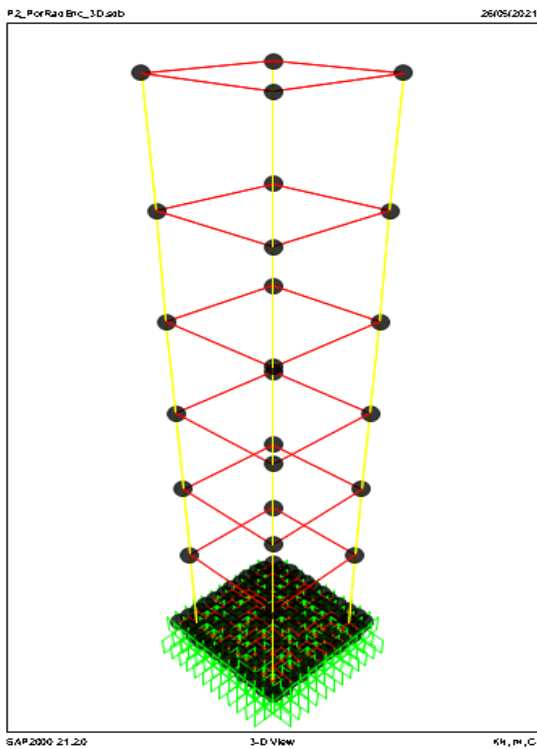


Figure. III 7: Model semelles isolées encastrées

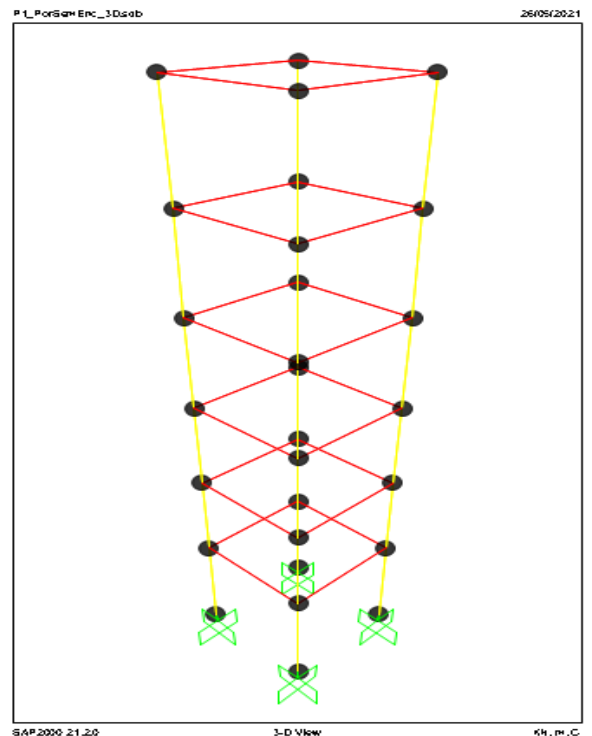


Figure . III 8: Model radier encastré ressort

4.1.7. Ressorts (ISS - modèle élastique de Winkler):

Pour tenir compte de l'ISS on va modéliser le sol par des ressorts élastiques, on a dans ce cas deux modèles : modèle avec semelles isolées (voir Figure 3.8) et modèle avec un radier général (voir Figure 3.9) et pour déterminer les coefficients des rigidités des ressort on va appliquer le modèle de Winkler selon le tableau.3.

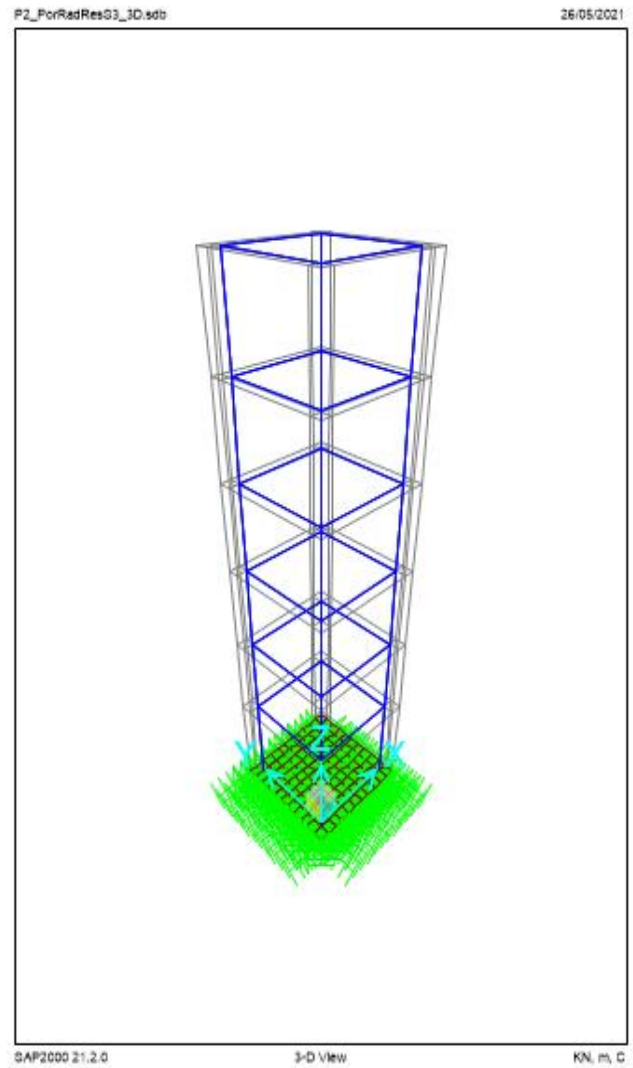
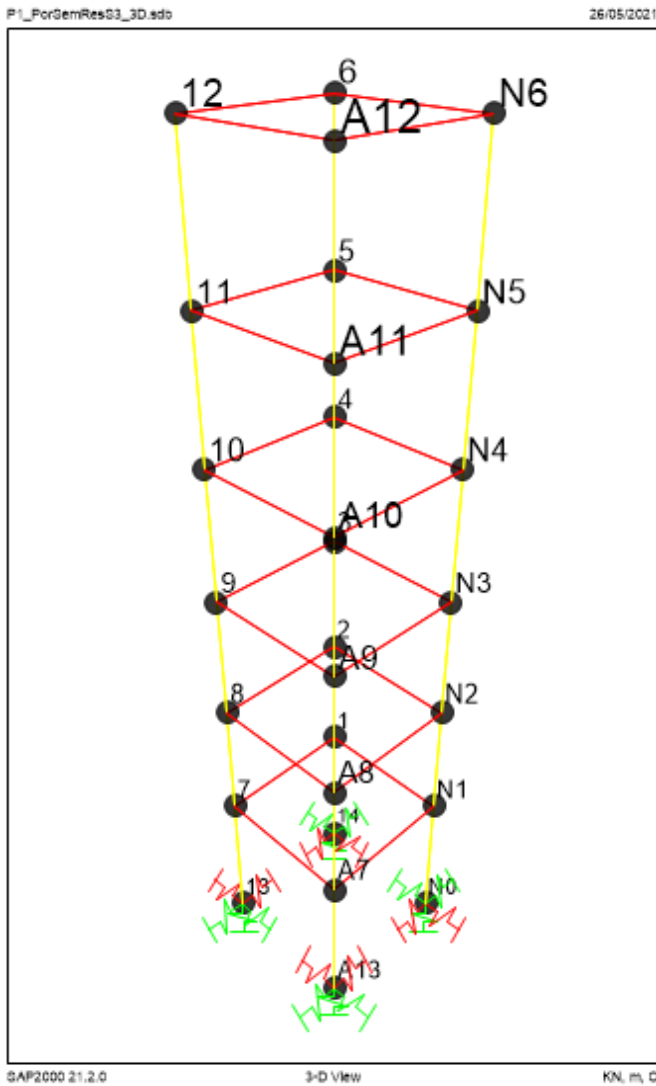


Figure. III 9: Model semelles isolées ressorts.

Figure. III 10: Model radier ressorts.

4.1.8. Massif de sol (ISS- modèle de propagation des ondes élastiques):

Dans ce cas on va essayer de représenter un cas real avec la modélisation du massif de sol dans le même modèle avec la structure, on a choisi pour ce cas trois modèles : real Massif seul (champ libre:

A	B	C	D	E	F
Site	S1 rocheux	S2 ferme	S3 meuble	S4 très meuble	RPA99 version 2003
$\rho=$	2.10	1.80	1.60	1.50	Density
$\nu=$	0.25	0.30	0.35	0.40	Poisson's ratio
V_s (m/s)=	1 000.00	500.00	250.00	150.00	Shear velocity
G (kPa)=	2 100 000	450 000	100 000	33 750	Shear Modulus
E (kPa)=	5 250 000	1 170 000	270 000	94 500	Young's Modulus
Semelle rectangulaire de largeur B et de longueur L ($L \geq B$)					
B (m)=	1.00				
L (m)=	1.00				
$K_v=$	6 384 000	1 465 714	350 769	128 250	kN/m
$K_{hx}=$	5 424 000	1 196 471	273 939	95 344	kN/m
$K_{hy}=$	5 472 000	1 207 059	276 364	96 188	kN/m
$K_{\theta x}=$	1 260 000	289 286	69 231	25 313	kN-m
$K_{\theta y}=$	1 306 667	300 000	71 795	26 250	kN-m
Radier rectangulaire de largeur B et de longueur L ($L \geq B$)					
B (m)=	1.00				
L (m)=	4.30				
$K_v=$	3 516 034	807 253	193 189	70 635	kN/m/m
$K_{hx}=$	14 083 588	3 106 674	711 292	247 563	kN/m
$K_{hy}=$	12 959 097	2 858 624	654 500	227 797	kN/m

Tableau.3: Raideurs (coefficients de rigidité des ressorts : modèle de Kausel).

pas de structure), (voir Figure 3.10) un portique avec semelles isolées fondé sur massif (voir Figure 3.11) et un portique sur radier général fondé sur massif (voir Figure 3.12), et dans tous les cas le sol est un sol meuble de type (S3).

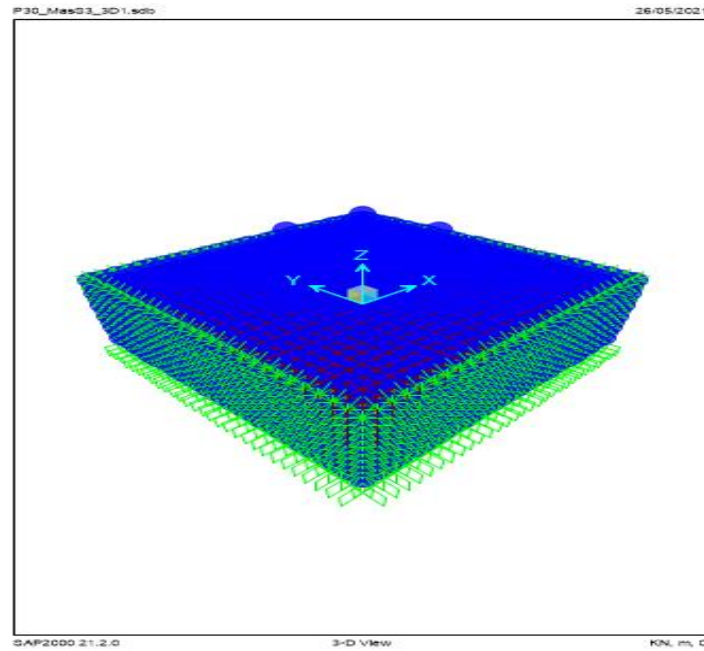


Figure. III 11: Model Massif seul.

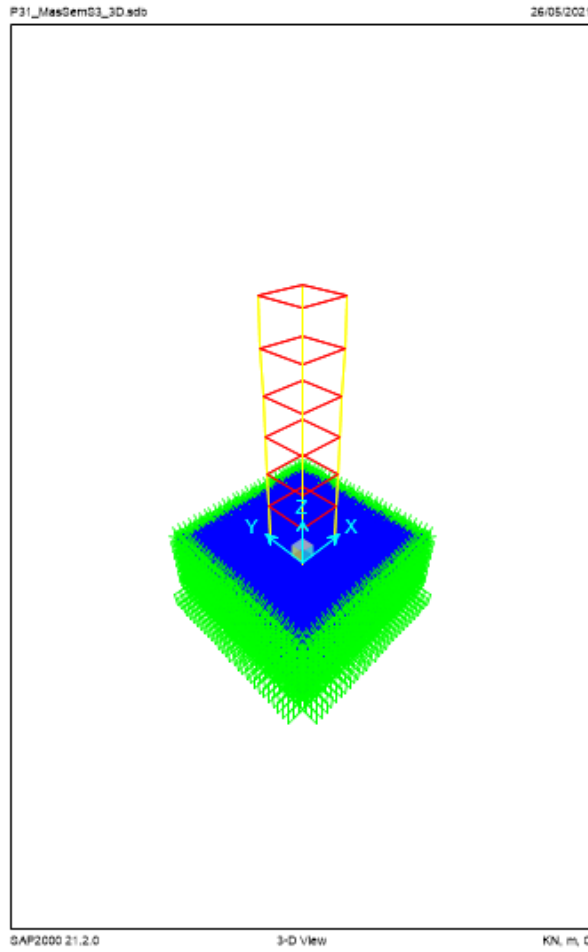


Figure. III 12: Model semelles fondé sur massif.

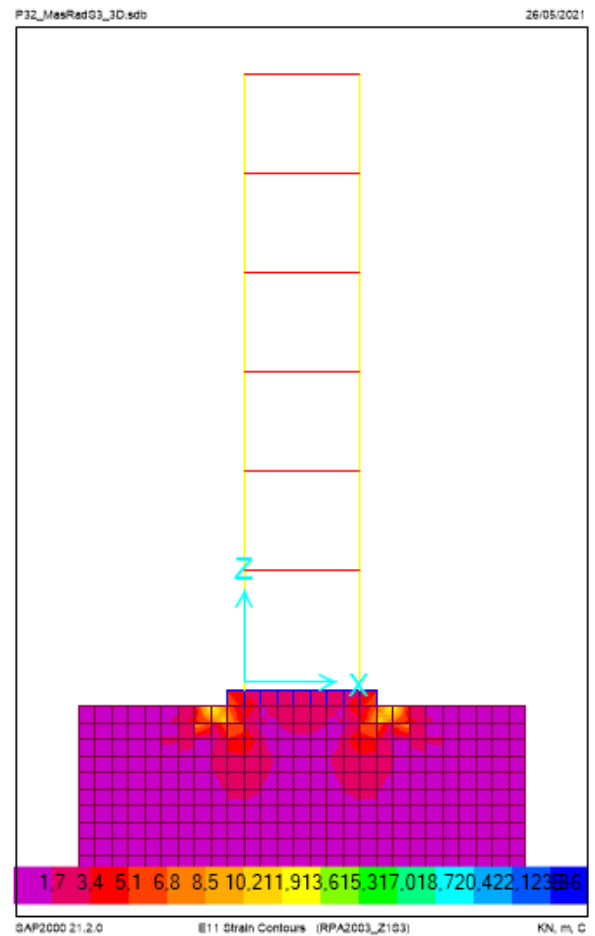


Figure. III 13: Model radier isolées fondées sur massif .

III.5. Interprétation des résultant

Pour interpréter les résultats on a fait la comparaison sur la base des diagrammes suivants :

- Effort normal N, moment fléchissant M et effort tranchant T déterminés aux différents étages.
- Flèche (inclinaison du portique) déterminée dans les nœuds au niveau de chaque étage.

On va admettre comme modèle de référence le modèle avec semelles encastées, et la comparaison sera faite au niveau des nœuds en fonction de la hauteur de l'immeuble, et puisque la structure est symétrique donc on va prendre seulement un seul côté de la structure.

5.1. Comparaison de l'effort normal N

Après avoir obtenu les résultats du tableau 4 on trouve dans le cas du spectre de réponse que la distribution de l'effort normal par rapport aux différents niveaux est la même pour tous les modèles, mais de point de vue valeur on remarque que les valeurs pour les modèles Sem_Ress et Mod_Réf les valeurs maximums sont plus de N=154 kN et pour les autres modèles les valeurs maximums varient entre N=40kN et N=60 kN.

Tableau.4: Effort Normal N(kN) spectre de réponse.

RPA2003_Z1S3	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	40,26	68,11	64,69	58,58	107,71	154,65
	3,40	40,26	68,11	64,69	58,58	107,71	154,65
	6,40	26,30	44,60	42,60	36,88	83,08	121,98
	9,40	15,75	44,60	27,52	19,44	58,58	86,62
	12,40	15,75	28,63	27,52	19,44	36,88	54,61
	15,40	7,97	16,80	16,27	7,27	19,44	28,78
	18,40	2,89	16,80	8,11	7,27	7,27	10,76

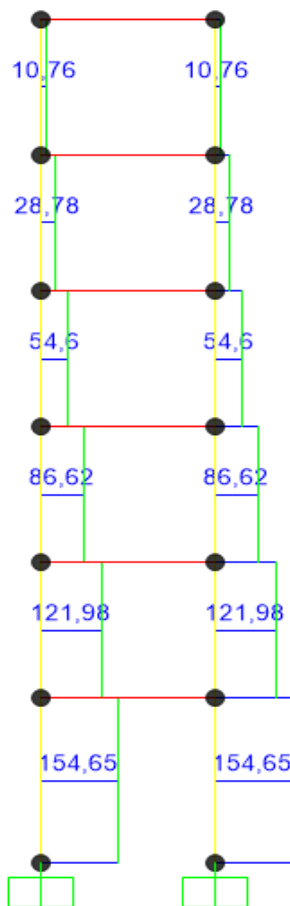


Figure. III 14: Effort Axial semelles isolées Encastrées Spextre RPA 2003.

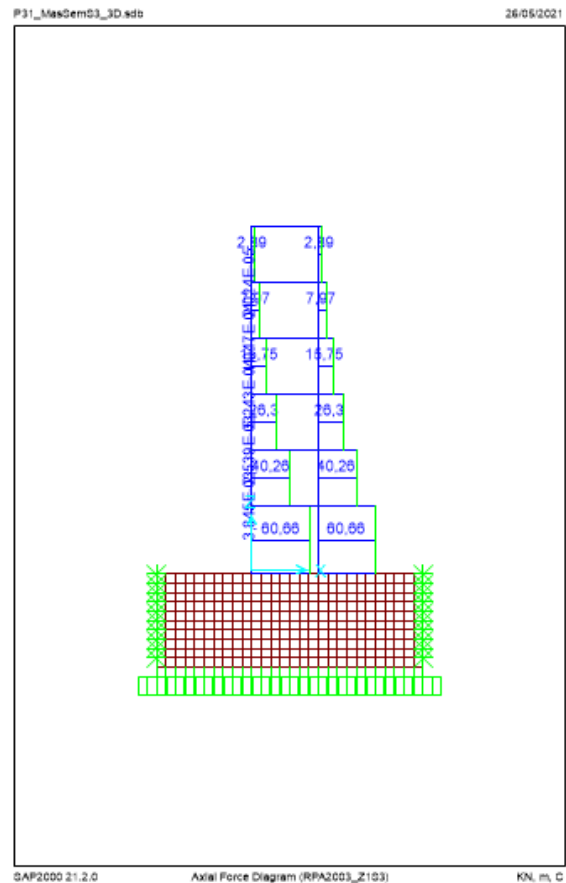


Figure. III 15 : Effort Axial semelles isolé fondée sur massif Spextre RPA 2003

D'après la Tableau.5, pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes EO on remarque que l'effort normal est presque le même pour les modèles (Sem_Massif et Rad_Massif et Rad_Ress) et correspond aux valeurs minimal, sauf pour le modèle Sem_Ress et le modèle Mod_Réf et Rad_Enct ou la valeur maximum se trouve au niveau du 1^{er} étage et 2^{ème} étage, concernant les valeurs, on trouve plus de N=294 kN pour le modèle Sem_Ress et pour les autres modèles varient entre N=00 kN et N=133 kN.

Tableau.5 Effort Narmal N Max accélélogramme EO.

A_BoumerdesE_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	1,07	0,00	0,02	133,45	213,53	294,47
	3,40	1,07	0,00	0,02	133,45	213,53	294,47
	6,40	0,85	0,00	0,02	89,90	175,93	251,02
	9,40	0,63	0,00	0,01	49,86	133,45	195,28
	12,40	0,63	0,00	0,01	49,86	89,90	133,77
	15,40	0,40	0,00	0,01	19,15	49,86	77,43
	18,40	0,16	0,00	0,01	19,15	19,15	33,22

D'après la Tableau.6, pour le cas du Accélérogramme Boumerdes NS on remarque que l'effort normal est différence d'un modèle à l'autre et on remarque des résultats faibles dans presque tous les modèles sauf pour les modèles **Sem_Ress N=160 kN et Rad_Enct N=97 kN** se trouve au niveau du 1^{er} étage. et pour les autres modèles varient entre N=0 et N=1kN .

Tableau.6 Effort Normal N Max accélérogramme NS.

A_Boumerdes N_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	1,08	0,00	0,01	97,05	160,43	0,00
	3,40	1,08	0,00	0,01	97,05	160,43	0,00
	6,40	0,86	0,00	0,01	65,56	129,43	0,00
	9,40	0,63	0,00	0,01	36,80	97,05	0,00
	12,40	0,63	0,00	0,01	36,80	65,56	0,00
	15,40	0,40	0,00	0,00	14,28	36,80	0,00
	18,40	0,17	0,00	0,00	14,28	14,28	0,00

D'après la Tableau.7, pour le cas du Accélérogramme Boumerdes V on remarque que l'effort normal est presque le même pour les trois modèles (Sem_Massif et Rad_Massif et Rad_Ress) ou la valeur maximum se trouve à la base, par rapport aux valeurs on trouve la valeur la plus élevée de N=282 kN pour le modèle Mod_Réf et pour les autres modèles varient entre N=0 et N=62 kN dans le cas du modèle Mod_Réf.

Tableau.7 Effort Normal N Max accélérogramme V.

A_BoumerdesV_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	62,15	56,29	51,16	0,00	0,00	282,22
	3,40	62,15	56,29	51,16	0,00	0,00	282,22
	6,40	49,40	41,32	37,83	0,00	0,00	228,72
	9,40	36,30	29,22	26,92	0,00	0,00	196,49
	12,40	36,30	29,22	26,92	0,00	0,00	153,73
	15,40	22,96	18,43	17,09	0,00	0,00	96,76
	18,40	9,47	9,56	8,92	0,00	0,00	39,91

5.2.Comparaison de l'effort tranchant T

On remarque d'après la Tableau.8 dans le cas du spectre de réponse que la distribution de l'effort tranchant par rapport aux différents niveaux est la même pour tous les modèles, mais de point de vue

valeur on remarque que les valeurs pour les modèles Sem_Ress(18 KN) et Mod_Réf (19KN) sont élevés par rapport aux autres modèles,

Tableau.8: Effort Tranchant T spectre de réponse.

RPA 2003_Z1S3	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	5,52	7,02	6,58	15,00	18,49	19,18
	3,40	5,52	7,02	6,58	15,00	18,49	19,18
	6,40	4,74	6,29	5,93	12,41	17,07	17,95
	9,40	3,79	5,34	5,06	9,16	15,00	15,88
	12,40	3,79	5,34	5,06	9,16	15,00	13,13
	15,40	2,64	4,16	3,98	4,86	12,41	9,67
	18,40	1,23	2,80	2,71	4,86	9,16	5,16

D'après la Tableau.9, pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes EO on remarque que l'effort tranchant est presque le même pour les modèles Sem_Massif , Rad_Ress et Rad_Massif ou la valeur maximum se trouve au premier niveau, pour les autres modèles la valeur maximum se trouve à la base, concernant les valeurs, on trouve plus de T=35 kN pour les modèles Mod_Réf et Sem_Ress et pour les autres modèles varient entre T=5 kN et T=29 K

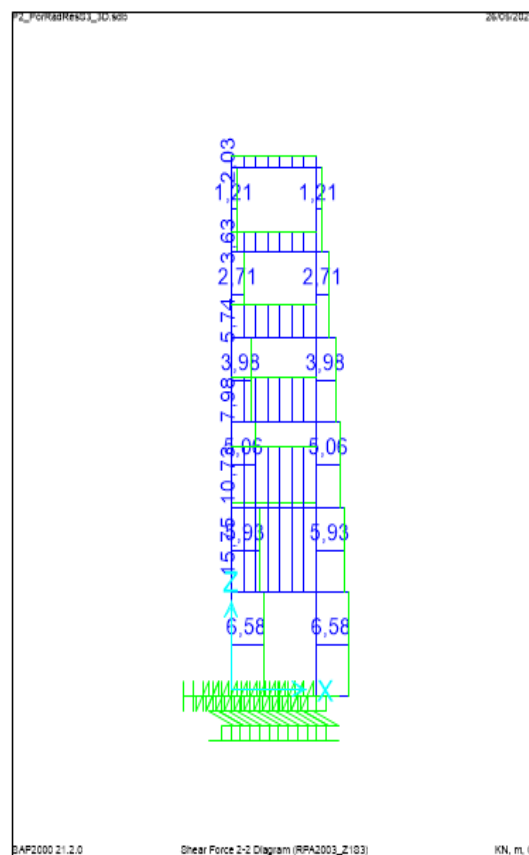
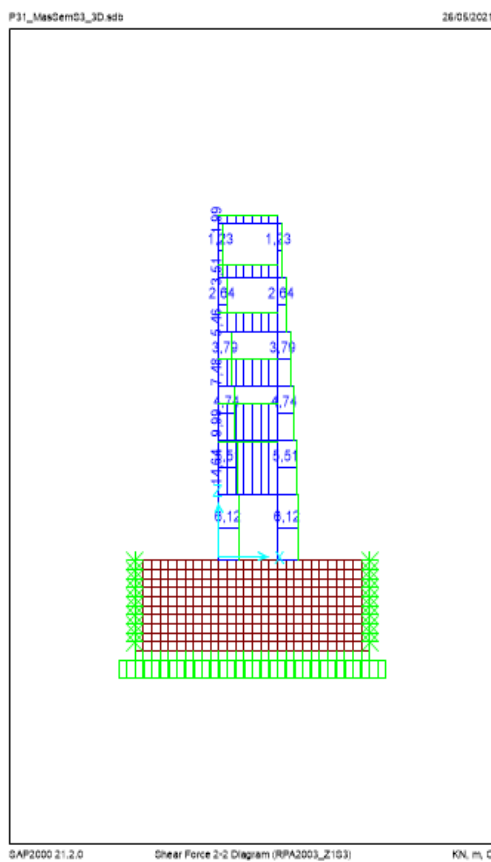


Figure. III 16: Effort Tranchant semelles isolées fondées sur massifs Spextre de réponse RPA2003

Figure III 17: EffortTranchant radier ressort Spextre de réponse RPA2003

Tableau.9: Effort Tranchant T accélélogramme EO.

A_BoumerdesE_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	5,46	8,28	8,64	29,07	33,94	35,27
	3,40	5,46	8,28	8,64	29,07	33,94	27,79
	6,40	5,49	6,91	5,93	22,96	32,74	24,54
	9,40	6,64	7,49	6,55	21,59	29,07	22,20
	12,40	6,64	7,49	6,55	21,59	29,07	15,65
	15,40	8,29	6,88	6,10	21,59	22,96	11,50
	18,40	5,61	4,99	6,19	13,80	21,59	11,50

D'après la Tableau.10, pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes NS on remarque que l'effort tranchant varie d'un modèle à l'autre , la valeur maximum se trouve au 1^{ème} niveau , concernant les valeurs, on trouve les même valeurs pour les deux modèles Mod_Réf et Sem_Ress plus de T=30 kN, pour les autres modèles varient entre T=3 kN et T=18 kN.

Tableau.10: Effort Tranchant T accélélogramme NS.

A_BoumerdesN_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	3,26	6,32	4,99	18,86	28,58	32,26
	3,40	3,26	6,32	4,99	18,86	28,58	21,29
	6,40	3,31	5,24	3,38	15,51	23,60	19,37
	9,40	4,59	3,88	3,40	14,72	18,86	17,62
	12,40	4,59	3,88	3,40	14,72	18,86	12,57
	15,40	5,10	4,14	4,43	9,82	15,51	11,39
	18,40	3,16	4,47	4,60	9,82	14,72	11,39

D'après la Tableau.11, pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes V on remarque que l'effort tranchant est presque le même pour tous les modèles ou la valeur maximum se trouve au les modèles Rad_Massf et Rad_Res , pour les autres modèles les valeurs sont quasi nulles, on trouve T=11 kN pour le modèle Rad_Massf pour les autres modèles varient entre T=0 kN et T=8.7 kN.

Tableau.11: Effort Tranchant T accélélogrammeV .

A_BoumerdesV_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massf	Rad_Res	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	0,02	11,39	8,79	0,00	0,00	0,00
	3,40	0,02	11,39	8,79	0,00	0,00	0,00
	6,40	0,00	10,13	7,42	0,00	0,00	0,00
	9,40	0,00	8,20	5,77	0,00	0,00	0,00
	12,40	0,00	8,20	5,77	0,00	0,00	0,00
	15,40	0,00	7,17	5,13	0,00	0,00	0,00
	18,40	0,00	4,77	3,39	0,00	0,00	0,00

5.3. Comparaison du moment

On remarque d'après la Tableau.12 dans le cas du spectre de réponse que la distribution de la courbe du moment M par rapport aux différents niveaux varie d'un modèle à l'autre, ou que la valeur maximum se trouve à la base, sauf pour les modèles **Rad_Massif** et **Rad_Ress** ou le moment est nulle à la base, et le moment maximum se trouve au premier niveau, mais concernant les valeurs on remarque que les valeurs à la base, le maximum est pour le modèle Mod_Réf ou M= 57 kN-m et au premier niveau on trouve le maximum pour le modèle Sem_Ress ou le moment M=48 kN-m.

Tableau.12 : Moment M spectre de réponse.

RPA 2003_Z1S3	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	3,64	0,00	0,00	19,92	48,10	57,31
	3,40	13,20	25,61	24,03	25,78	19,63	29,59
	6,40	2,86	5,75	5,38	5,90	3,54	21,72
	9,40	3,75	5,02	4,86	8,79	19,92	15,50
	12,40	7,83	11,13	10,48	19,48	25,78	9,35
	15,40	2,17	2,65	2,48	5,40	5,90	3,29
	18,40	0,55	1,95	1,95	12,49	8,79	13,17

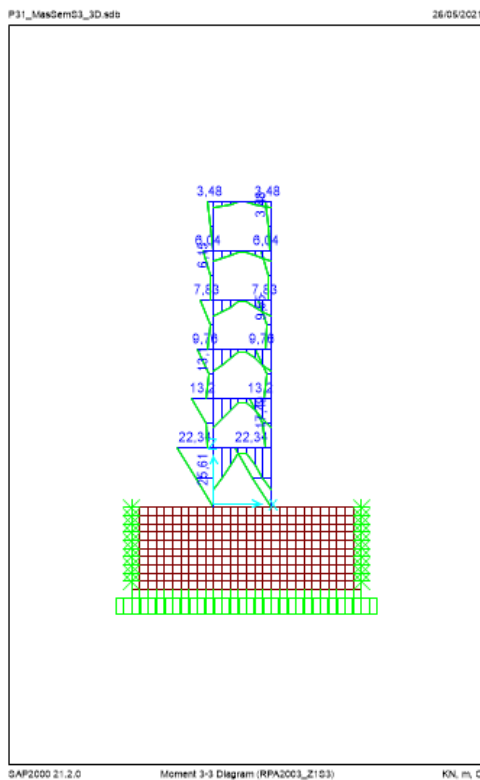


Figure. III 18: Moment semelles fondé sur de massif Spextre de réponse RPA2003.

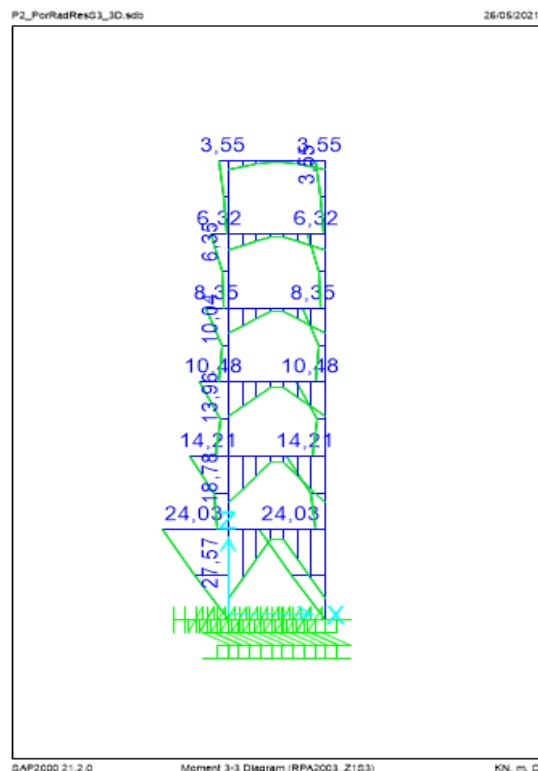


Figure. III 19: Moment radier ressort Spextre réponse RPA2003

D'après la Tableau.13 on remarque dans le cas du Accélérogramme Boumèrdes EO que la distribution de la du moment M par rapport aux différents niveaux varie d'un modèle à l'autre, ou la valeur maximum se trouve à la base, sauf pour les modèles **Rad _massif et Rad _Ress** ou le moment est nulle à la base, et le moment maximum se trouve au premier niveau, mais concernant les valeurs on remarque que les valeurs à la base, le maximum est pour le modèle Mod_Réf ou M= 100 kN-m et au premier niveau on trouve le maximum pour le modèle Sem_Ress ou le moment M=88 kN-m.

Tableau.13 : Moment M Max Accélérogramme EO.

A_BoumerdesE_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	7,25	0,00	0,00	36,40	88,21	100,19
	3,40	27,76	23,27	29,45	47,33	45,13	42,07
	6,40	12,23	8,67	11,33	13,65	10,11	37,98
	9,40	15,85	9,82	11,00	24,54	36,40	26,61
	12,40	15,05	9,09	9,42	45,07	47,33	20,84
	15,40	3,96	3,03	4,64	12,48	13,65	13,51
	18,40	5,38	6,53	9,06	32,70	24,54	28,34

D'après la Tableau.14 on remarque dans le cas du Accélérogramme Boumèrdes NS que la distribution du moment M par rapport aux différents niveaux, varie d'un modèle à l'autre ou la valeur maximum se trouve à la base, sauf pour les modèles **Rad _massif et Rad_Ress** ou le moment est nulle à la base, et le moment maximum se trouve au premier niveau, mais concernant les valeurs on remarque que les valeurs à la base, le maximum est pour le modèle Mod_Réf ou M= 87 kN-m et au premier niveau on trouve le maximum pour le modèle Sem_Ress ou le moment M=71 kN-m.

Tableau.14: Moment M Max Accélérogramme NS.

A_BoumerdesN_MAX	Hauteur (m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Res	Rad_Ent	Sem_Res	Mod_Rf
	0,00	4,54	0,00	0,00	29,32	71,31	87,17
	3,40	15,69	26,71	22,94	47,06	35,76	32,75
	6,40	6,26	7,43	6,20	15,21	8,91	31,65
	9,40	8,12	6,38	6,02	19,48	29,32	21,42
	12,40	12,80	11,54	11,46	32,11	47,06	20,91
	15,40	3,53	2,76	2,43	8,89	15,21	16,98
	18,40	3,10	5,72	5,77	24,38	19,48	34,14

D'après la Tableau.15, pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes V on remarque que la distribution du moment M est presque le même pour tous les modèles, Presque toutes les valeurs sont nulles pour, concernant les valeurs, on trouve M=0.05 kN-m pour le modèle **Sem_Massif** .C'est la valeur maximale au niveau de base.

Tableau.15: Moment M Max Accélérogramme V.

A_BoumerdesV_MAX	Hauteur(m)	Sem_Massif	Rad_Massif	Rad_Ress	Rad_Enct	Sem_Ress	Mod_Réf
	0,00	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	3,40	0,01	27,91	23,61	0,00	0,00	0,00
	6,40	0,00	7,24	7,06	0,00	0,00	0,00
	9,40	0,00	10,65	7,82	0,00	0,00	0,00
	12,40	0,00	11,73	10,11	0,00	0,00	0,00
	15,40	0,00	4,01	3,24	0,00	0,00	0,00
	18,40	0,00	3,37	2,62	0,00	0,00	0,00

III.6. Calcul de la fleche:

Le déplacement horizontal à chaque niveau k de la structure est calculé comme suit :

$$\delta_k = R\delta_{ek} \quad (\text{RPA 99V 2003 art 4.4.3})$$

δ_{ek} : déplacement du aux forces sismique F_i (y compris l'effet de torsion)

R : coefficient de comportement

Pour la flèche ou bien déplacement horizontal du dernier niveau, on remarque, pour le cas du spectre de réponse que sa valeur varie entre $\delta_k = 8,4$ cm pour le modèle Sem_Ress et $\delta_k = 2,7$ cm pour le modèle Rad_Enct, pour le modèle de référence on trouve $\delta_k = 7,35$ on remarque du'à la base $\delta_k=0$ pour tous les modèles.

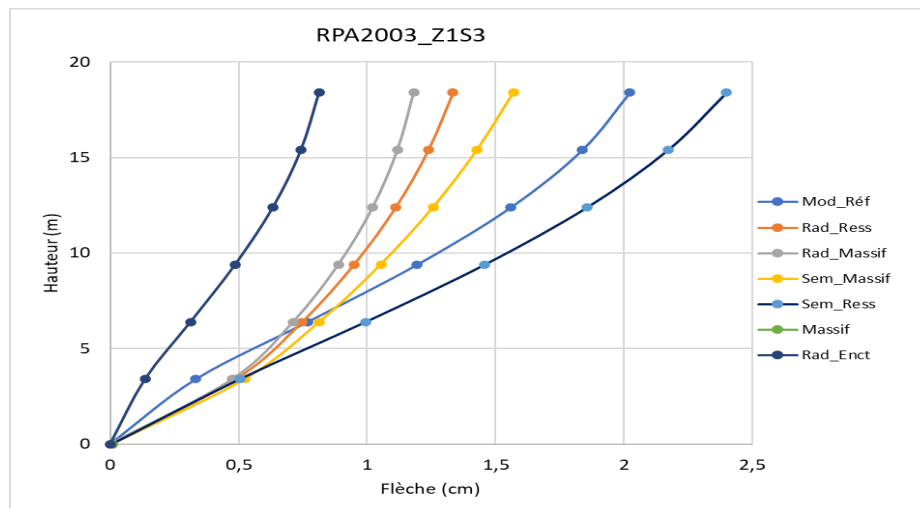


Figure III.20: La flèche Ux spectre de réponse

Pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes NS que valeur de la flèche au dernier niveau varie entre $\delta k = 3.15$ cm pour le modèle Rad_Ress et $\delta k = 9.8$ cm pour le modèle Sem_Ress, pour le modèle de référence on trouve $\delta k = 7$ cm, on remarque à la base $\delta k = 0$ cm pour tous les modèles.

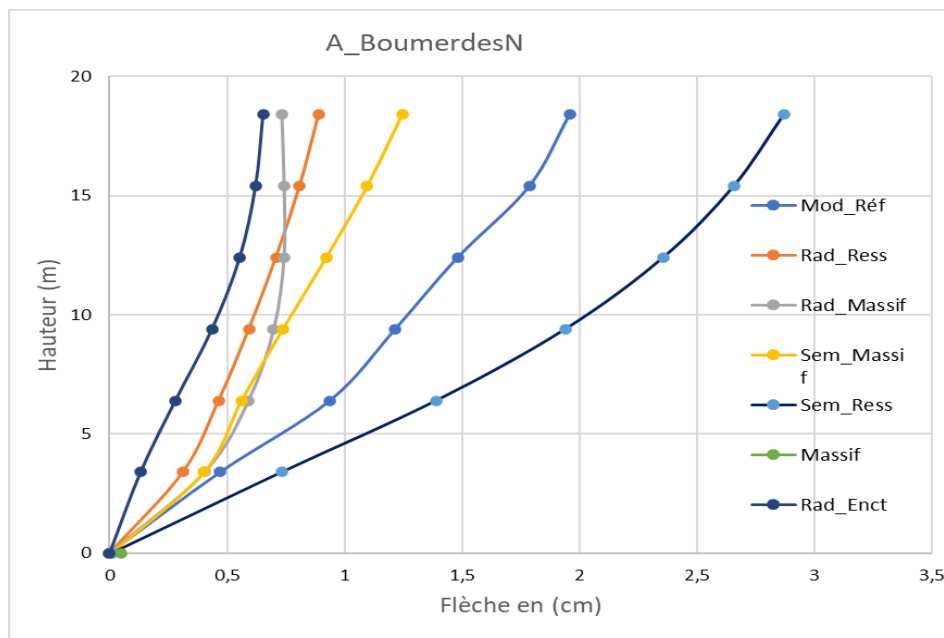


Figure. III 21: La flèche Ux Accélérogramme NS.

Concernant la flèche ou bien déplacement horizontal du dernier niveau, on remarque pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes EO que sa valeur varie entre $\delta k = 4.9$ cm pour le modèle Rad_Ress et $\delta k = 16.8$ cm pour le modèle Sem_Ress, pour le modèle de référence on trouve $\delta k = 11.9$ cm, on remarque à la base $\delta k = 0$ cm pour tous les modèles sauf pour le modèle de référence $\delta k = 0.5$ cm

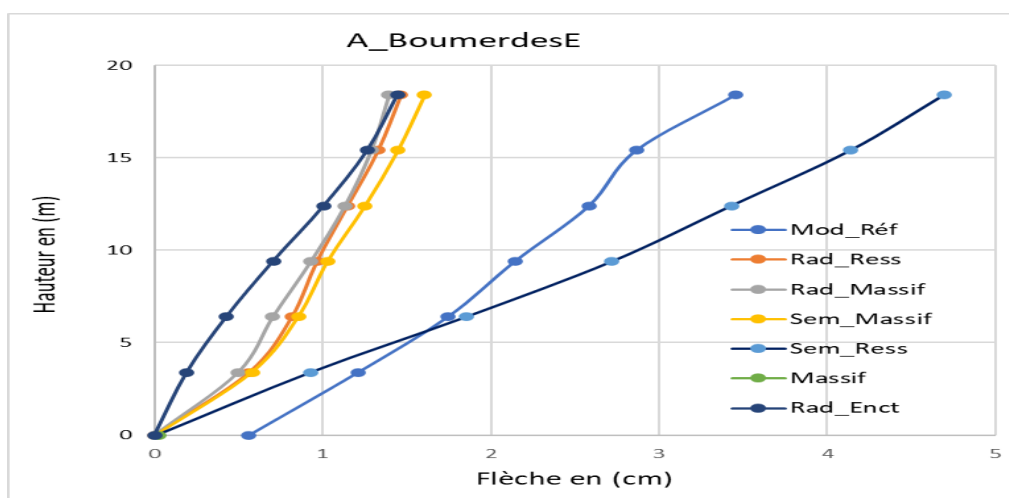


Figure. III 22: La flèche Ux Accélérogramme EO.

D'après la Figure.23, pour le cas du Accélérogramme Boumerdes V on les valeurs sont nulles pour tous les modèles sauf pour les modèles Rad_Enct ou on trouve que $\delta k = 2.1$ cm pour le modèle Rad_Ress on trouve $\delta k = 4.9$ cm pour le modèle Rad_Massif ou on trouve que $\delta k = 6.2$ cm on remarque à la base $\delta k = 0$ cm pour tous les modèles.

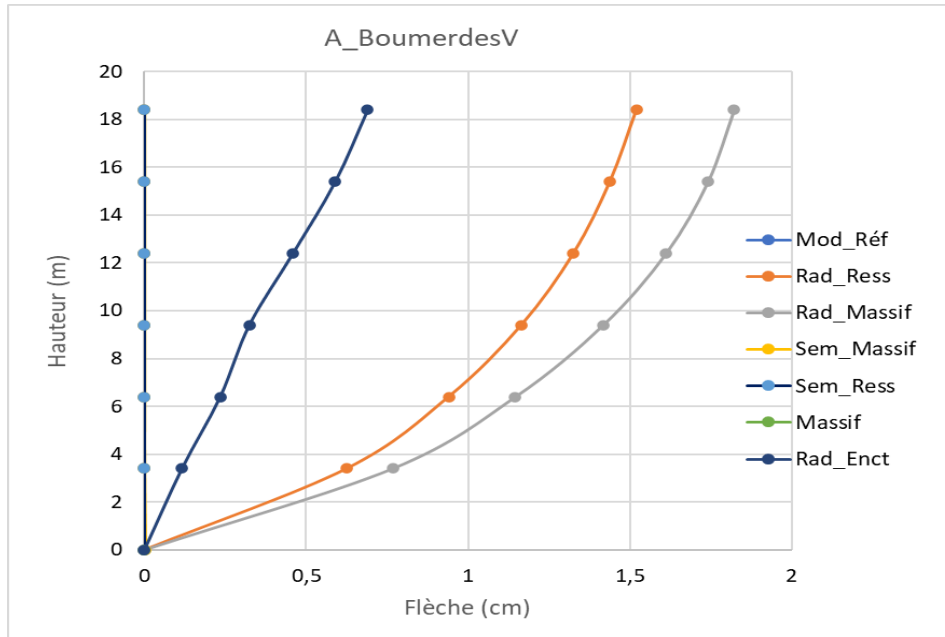


Figure. III 23 :La flèche Ux Accélérogramme V

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude on a essayé de visualiser l'effet de l'interaction sur le comportement dynamique des structures ; on a choisi de modéliser une structure simple en portique auto-stable d'un Minaret de forme carré en 3D, de hauteur 18.4 m et de largeur et longueur 3.5 m, pour le torseur de chargement sismique on choisit dans un première lieu une zone de faible sismicité (Z_1) ou on utilise le spectre de réponse de l'RPA version 2003, dans un deuxième lieu on choisit Accélérogrammes mesurés en 2003 sur le site de Keddara à Boumerdès (directions :EO/Est-Ouest, NS/Nord-Sud, V-verticale) .

Le sol de fondation est un sol meuble de type S3, la fondation est choisie selon deux modes : sans tenir compte de l'interaction sol-structure (ISS) et avec interaction sol-structure.

L'ouvrage est destiné à recevoir un nombre important de personnes en même temps. L'ouvrage est donc classé dans le Groupe 1B.

La comparaison des résultats de modélisation dynamique de la structure avec le logiciel Sap2000, est faite au niveau des sollicitations, l'effort normale N, l'effort tranchant T, et le moment M et au niveau de la flèche ou déplacement horizontal des nœuds de chaque étage en fonction de la hauteur de l'immeuble.

Pour l'effort normal N on remarque que l'allure de l'effort est presque le même pour tous les modèles et pour tous les cas de charge sismique, ou la valeur maximum se trouve à la base, concernant les valeurs, on trouve pour le cas du Accélérogramme Boumerdès V, que $N=0\%$ pour le modèle Sem_Ress par rapport au modèle Mod_Réf, et $N=22\%$ pour le modèle Sem_Massif, cet écart du résultats montre l'importance de l'effet de l'interaction sol-structure sur le comportement dynamique des structures.

Pour l'effort tranchant T on remarque que l'allure de l'effort normal est presque le même pour tous les modèles et pour tous les cas de charge sismique, ou la valeur maximum se trouve soit à la base de la structure, soit dans le premier niveau, concernant les valeurs on trouve pour le cas du Accélérogramme Boumerdès EO, que $N=94\%$ au sommet pour le modèle Sem_Ress par rapport au modèle Mod_Réf, et $N=16\%$ pour le modèle Sem_Massif.

Concernant le moment M on remarque qu'il y a deux type d'allure de la distribution de la courbe du moment M par rapport aux différents niveaux, pour les modèles Rad_Enct et Sem_Ress la valeur maximum se trouve au premier niveau, et le moment à la nase est nulle , pour les autres modèles le

moment maximum est au niveau de la base de la structure, concernant les valeurs on trouve pour le cas du Accélérogramme Boumèrdes EO, que $M=88.21\%$ au sommet pour le modèle Sem_Ress par rapport au modèle Mod_Réf, et $M= 7.23 \%$ au sommet pour le modèle Sem_Massif, donc l'effet de l'interaction sol-structure sur le comportement dynamique de la structure est très clair, et par la suite il aura sa répercussion sur la stabilité et l'aspect économique de l'ouvrage.

Pour la flèche au bien le déplacement horizontal des nœuds au niveau des étages on remarque la différence de valeurs entre les modèles et pour tous les cas de charges, sauf dans le cas de Accélérogramme Boumèrdes V où tous les déplacements sont nulles, seulement pour le modèle Rad_Encst où $\delta_k = 2.1$ cm. Concernant la variation de la courbe de la flèche en fonction de la hauteur, on remarque que la différence peut atteindre, $\Delta\delta_k = 4.9 - 0 = 4.9$ cm entre le modèle Rad_Ress et le modèle de référence Mod_Ref, dans le cas de charge sismique par Accélérogramme Boumèrdes EO pour le modèle Rad_Ress et $\delta_k=16.8$ cm

On peut conclure à la fin malgré que l'ouvrage que nous avons étudié est simple mais la grandeur des valeurs montre que la négligence du phénomène de l'interaction sol-structure l'hors du conception et l'étude des ouvrages aura des répercussions négatives sur la stabilité et l'aspect économique de l'ouvrage.

Donc afin d'accroître la stabilité des ouvrages tout en optimisant le coût de construction il faut passer par une prise en compte de l'interaction dynamique qui se développe, en cas de séisme, entre les ouvrages, les sols et les fondations.

Références bibliographiques

- [1] A.J.Kappos *Dynamic loading and design of structures*. Edition Sponpress 2002A.J.Kappos
- [2] Andre Plumier, Herve Degee.«Conception parasismique dans le contexte de l'eurocode8» Université De Liège. Edition 2011.
- [3]Albane Rambaud, Sandrine Marnac.«Construire en zone sismique-conception et bonnes pratiques». Centre d'études techniques de l'équipement (cete) du sud ouest / dalet de Toulouse. 27 Novembre 2012
- [4] BELMOUDEN Y *Analyse spectrale non itérative des oscillateurs simples sous l'action des tremblements de terre*, Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, section Sciences de la Terre, 2004, n°26, 1-10
- [5] BETBEDER M-J, DOURY J-L, *Constructions parasismiques, Techniques de l'Ingénieur, traité Construction*.
- [6] CHEBANCE M., *Les méthodologies d'évaluation de l'aléa sismique, période 1995-2001*, Ecole Nationale Supérieure Des Sciences de l'Information et des Bibliothèques Université Claude Bernard Lyon 1, Rapport de Recherche Bibliographique, 2001
- [7] Gilles.André, *cartographie du risque naturel dans le monde. Etude comparative entre une approche d'ordre social et une approche d'ordre économique*. European journal of geography, September 2004.
- [8] H. Modaressi, *Fiches pédagogiques d'aide à la formation pratique du risque sismique et de la tectonique active BRGM/RP-55230-FR (Décembre 20006)*
- [9] K.Baddari, M.Djeddi, *les séismes et leurs prévisions*. Office des Publications Universitaires
- [10] Khemissa M, Safer S, Aidjouli S (2015) *Roughness's shapes comparative analysis of some reinforced earth elements under monotonous loading*. Alexandria Eng J 54(3):577–582
- [11] Khemissa M, Tallah, N, Djaâfar, B, (2018), *Chapter: Sand-Steel Interface Behavior Under Cyclic Loading*.
- [12] Philippe François.«L'architecture parasismique». *Construction moderne / N ° 1 3 2*

[13] Plumier André, Camelbeeck Thierry et BARSZEZ Anne-Marie. «Le risque sismique et sa prévention en région wallonne».05 janvier 2010.

[14] Thanh Kien Vu, *Incidence de la torsion sur la résistance sismique des bâtiments courants avec diaphragmes horizontaux rigides. Application aux structures en bois*, 2012.