

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

UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL
N° :



FILIERE : Génie Civil
OPTION : STRUCTURE

Mémoire présenté pour l'obtention Du diplôme de Master Académique
Par :

BELACEL MOHAMED LAMINE

HERIZI MESSAOUD KAMEL

INTITULE

Construction de Spectres sismiques
De calcul à partir d'accélérogrammes réels
(cas de l'Algérie)

Encadre par le professeur : Boulaouad Abderachid



Remerciement

*Tout d'abord, Nous tenons à remercions Dieu qui nous a permis d'achever ce projet de fin d'études et d'avoir cette formation. Mes parents pour m'avoir toujours poussé dans mes études, de m'avoir transmis les bonnes valeurs Merci, « **Mr. Boulaouad Abderachid** » qui ont encadré ce travail, pour leur disponibilité, ainsi que pour leurs soutiens tout au long de réalisation de ce projet, sans oublier leur gentillesse. Nous remercions également tous les membres de jury d'avoir accepté de jugé, mes enseignants (es) du département de génie civil et les responsables du laboratoire. Toutes personne qui nous a aidés de près ou de lion pour terminer notre travail. Et tous mes enseignants du département de génie civil.*

Résumé

Le déplacement, la vitesse et l'accélération de la structure sont souvent exprimés sous forme de "spectres de réponse". Ce concept est à la base du "spectre de calcul" largement utilisé en génie parasismique. Le Règlement Parasismique Algérien (RPA) recommande un spectre unique pour l'ensemble du territoire. Ce spectre qui est en révision permanente, présente encore certaines anomalies. Notre travail consiste à construire des spectres de calcul spécifiques aux trois zones sensibles d'Algérie, à partir d'accélérogrammes réels enregistrés dans ces zones. Nous estimons que ces spectres sont plus simples et plus réalistes.

Abstract

Displacement, velocity and acceleration of the structure are often expressed as "response spectra". This concept is the basis of the "design spectrum" widely used in earthquake engineering. The Algerian Seismic Regulation (RPA) recommends a single spectrum for the whole territory. This spectrum, which is under permanent revision, still presents certain anomalies. Our work consists in building calculation spectra specific to the three sensitive areas of Algeria, from real accelerograms recorded in these areas. We find these spectra to be simpler and more realistic.

ملخص

غالبًا ما يتم التعبير عن إزاحة الهيكل وسرعته وتسارعه في شكل "أطياف الاستجابة". هذا المفهوم هو أساس بطيف (RPA) "طيف الحساب" المستخدم على نطاق واسع في هندسة الزلازل. توصي لائحة الزلازل الجزائرية واحد لكامل الإقليم. هذا الطيف الذي يخضع لمراجعة دائمة، لا يزال يحتوي على بعض النقائص. يتمثل عملنا في رسم أطياف حسابية خاصة بالمناطق الثلاث الحساسة في الجزائر، انطلاقًا من مخططات التسارع الأرضي الحقيقي المسجلة في هذه المناطق. نعتبر أن هذه الأطياف أبسط وأكثر واقعية.

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1: Réplique du sismoscope de Zhang Heng.

Figure I.2: Carte de sismicité mondiale, Robert Mallet, 1858.

Figure I.3: Carte de la sismicité mondiale depuis 1973

Figure I.4 : les caractéristiques du séisme

Figure I.5: Le sismographe

Figure 1.6 : Un sismogramme du séisme de 2003 en Boumerdes

Figure I.7 : l'Energie du séisme par rapport sa magnitude

Chapitre II

Figure II.1 : modalisation d'oscillateur harmonique simple

Figure II.2 : les facteurs d'amplification dynamique moyen D

Chapitre III

FigureIII.1 : l'accélérogrammes du Msila

FigureIII.2 : l'accélérogrammes du Alger

FigureIII.3 : l'accélérogrammes du Tizi Ouzou

FigureIII.4 : les spectre moyenne de la zone III

FigureIII.5 : le spectre proposé

FigureIII.6 : le spectre proposé

FigureIII.7 : le spectre proposé

FigureIII.8 : le spectre de IRPA

FigureIII.9 : le spectre de proposé de la zone IIa inélastique

FigureIII.10 : le spectre de proposé de la zone IIb inélastique

FigureIII.11 : le spectre de proposé de la zone III inélastique

FigureIII.14 : la comparaison de spectre proposé avec les spectres mondial

Liste des tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Coefficient d'accélération de zone A

Tableau II.2 : valeurs du coefficient de comportement R

Tableau II.3 : Coefficient Q

Tableau II.4 : les valeurs Des piérides

Chapitre III

Tableau III.1 : la comparaison les valeurs finales de spectre proposé

Liste des symboles et abréviations utilisées

A : coefficient d'accélération de zone

C : amortissement

De : la déformation de fin de phase élastique

Du : déformation de ruine

Ec: Energie cinétique

Ed : Energie de déformation élastique

F(t) : chargement dynamique

F : l'effort tranchant

f : La fréquence propre de la structure

Fd : la force d'amortissement

FE : force élastique maximale à l'instant tE

Fi : la force d'inertie

Fmax : force élastique maximale

I F.), I : force horizontale maximale

Fs : la force de rappel

Fu: la résistance finale

Fy : force élastique limite

Fy : force horizontale

g : l'accélération de gravité

K : rigidité

Ki : la rigidité initiale

Ky : la rigidité post-élastique

OC et OD : le déplacement élastique et déplacement total

ξ : le coefficient d'amortissement

Q : facteur de qualité

Sommaire

Remerciement
Liste des figures
Liste des tableaux
Résumé
Introduction générale

Table des matières

CHAPITRE I.....	11
Préscientifique :	12
Introduction :	13
Scientifique :	13
Sismotectonique :	14
Risque, aléa et vulnérabilité sismique : notion de chaîne de risque sismique	16
La sismologie :	17
Définition :	17
Le séisme :	17
Le sismographe :	19
Intensité et données :	20
Sismogrammes, échelle de Richter et magnitude :	20
Énergie, moment, magnitude	22
Remarque.....	23
CHAPITRE II.....	25
Généralité :	26
Spectre de réponse :	26
1. Méthodes utilisables.....	27
1.2. Conditions d'application de la méthode statique équivalente	27
1.3. Méthodes dynamiques	28
2.1. Définition :	28
2.2. Méthode de construction du spectre de réponse de calcul :	29

Sommaire

2.3. Méthode statique équivalente	30
2.3.1. Principe	30
2.3.2. Modélisation	31
2.3.3. Calcul de la force sismique totale (VOIR MODIFICATIFS ET COMPLEMENTS AUX RPA 99).....	31
2.2.4. Méthode du spectre de réponse :	31
3.1. Principe :	32
3.2. Modélisation :	32
3.3. Spectre de réponse de calcul :	33
1. Conditions minimales sur les files de contreventement	37
2. Redondance en plan	37
3. Régularité en plan	37
4. Régularité en élévation.....	38
5. Contrôle de la qualité des matériaux.....	38
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	38
3.4. Nombre de modes à considérer :	39
3.5. Combinaison des réponses modales :	40
3.6. Résultante des forces sismiques de calcul :	40
3.7. Effets de la torsion accidentelle :	41
4. prescriptions communes aux méthodes « statique » et « dynamique ».....	41
4.1. Stabilité au renversement :	41
4.2. Composante verticale de l'action sismique :	41
4.3. Calcul des déplacements :	42
5. Le spectre propose :	42
CHAPITRE III.....	43
Le spectre élastique :	46
Le spectre inélastique :	51

Sommaire

La comparaison :.....	55
Conclusion.....	61
Reference:	62

Introduction général

Introduction

Dans les pays soumis à de forts mouvements, comme l'Algérie, des travaux de recherche sont menés en permanence afin d'améliorer les codes sismiques par des études théoriques ou des observations faites sur des constructions après des événements sismiques importants. Dans ce cadre, le code de conception sismique algérien (RPA) a fait l'objet de révisions continues depuis son élaboration en 1981, aboutissant à la dernière version dénommée « RPA 2003 ».

Parmi les outils de conception importants utilisés en ingénierie des structures, le déplacement et l'accélération de la structure présentent un grand intérêt. Ces deux grandeurs, en plus de la vitesse, sont souvent exprimées sous forme de "spectre de réponse". Le concept de "spectre de réponse" est à la base à la fois de la méthode classique basée sur les forces et de la nouvelle conception en Performance. La première méthode utilise un "spectre de conception sismique" tandis que la deuxième conception utilise des "spectres de demande" sismiques généralement dérivés de spectres élastiques calculés.

Ce travail vise essentiellement à donner des suggestions susceptibles d'améliorer le spectre RPA qui est en révision permanente et souffre de nombreuses carences comme cela a été montré par certains chercheurs et confirmé par les derniers événements, notamment le tragique séisme de Boumerdes (Mai 2003).

Notre étude s'est focalisée sur le spectre de calcul du Règlement Parasismique Algérien (RPA) qui recommande un spectre unique pour l'ensemble du territoire. La tendance et l'idéal est de doter chaque région de son propre spectre.

Dans cette perspective, nous avons essayé de construire des spectres de calcul spécifiques aux trois zones sensibles d'Algérie, à partir d'accélérogrammes réels enregistrés dans ces zones. Nous estimons que ces spectres sont plus simples et plus réalistes.

Objectif

Cette étude dans ce mémoire vise à atteindre l'objectif principal suivant :

L'influence de spectre algériens de demande sismique à partir d'accélérogrammes réels et ça nécessite à la conception dans chaque zone sismique.

Structure du mémoire :

Notre mémoire est structuré en une introduction générale, trois Chapitres :

1^{ere} chapitre : Notions de sismologie ;

2^{eme} chapitre : Notions de spectre de réponse ;

3^{eme} chapitre : Applications et résultats.

CHAPITRE I

NOTIONS DE SISMOLOGIE

Préscientifique :

Les tremblements de terre ont longtemps été considérés comme des messages divins.

Pour les Chinois, c'était un signe que le Ciel (les dieux) désavouait la légitimité de l'empereur. En raison de la signification politique qu'accordaient les Chinois aux séismes et à leur fréquence importante dans la région, très tôt, ils notèrent consciencieusement les différents tremblements de terre. L'un des premiers à être noté est celui de -780 et le pire en perte de vies humaines est celui de 1556 dans la province de Shaanxi qui fit plus de 830 000 victimes.

Les Chinois n'ont établi aucune théorie scientifique sur l'origine naturelle des séismes, mais c'est l'un d'entre eux, l'inventeur Zhang Heng, qui créa le premier pseudo-sismographe en 132. Né dans une région de forte sismicité, Zhang Heng met au point un sismoscope utilisant le principe du pendule.

Pour les anciens Grecs, Poséidon était le responsable de tels événements. Pourtant, cela n'empêchera pas des Grecs comme Thalès (VI^e siècle av. J.-C.) et surtout Aristote (IV^e siècle av. J.-C.), de penser que les séismes ont une origine naturelle. Selon Thalès, ce sont des éruptions d'eau chaude qui sont la cause des tremblements de terre. Selon lui, les surfaces émergées flottent sur l'eau, et des éruptions d'eau chaude assez violentes peuvent faire bouger la terre. Pour sa part, Aristote établit sa théorie pneumatique dans laquelle le pneuma (souffle) serait la cause des séismes. Le pneuma est produit par la chaleur de la terre (dont l'origine est le feu intérieur) ou par les rayons du Soleil. Lorsque le pneuma est dirigé vers l'extérieur, il forme les vents. Mais lorsqu'il s'enfonce dans la terre et s'accumule, il produit des tremblements de terre. Grâce au rayonnement des œuvres d'Aristote dans les sciences du Moyen Âge, cette théorie restera une des principales pendant plusieurs siècles.

En Europe, à la Renaissance, l'origine naturelle est de plus en plus envisagée, plusieurs théories apparaissent. On peut citer celle de Pierre Gassendi qui, vers 1650, pensait que c'étaient des poches de gaz qui explosaient, ou celle de l'Abbé Pierre Bertholon de Saint-Lazare, qui, en 1779, y voyait un effet de l'électricité, qui lorsqu'elle s'accumulait dans le sol, provoquait un tonnerre souterrain. Ami de Benjamin Franklin et ayant travaillé sur l'électricité, il présenta un système utilisant des paratonnerres enfoncés dans la terre pour prévenir les séismes en empêchant les coups de tonnerre.



FigureI.1 : Réplique du sismoscope de Zhang Heng.

Introduction :

La chaleur dégagée par la Terre lors de sa formation et de son développement s'est globalement dissipée, notamment sous forme de convection mantellique. Ces mouvements internes de matière sont provoqués par le mouvement de grandes plaques lithosphériques d'environ 100 kilomètres d'épaisseur. Ces plaques se déplacent à la surface à une vitesse de quelques centimètres par an. Leur mouvement constant crée des limites. La croûte, la partie supérieure de la plaque, se déforme doucement jusqu'à la rupture. Il éclate alors le long d'une ou plusieurs failles, produisant un orgasme plus ou moins violent. Il s'agit d'un tremblement de terre ou d'un tremblement de terre. Les tremblements de terre ne sont pas distribués au hasard. Ils se concentrent principalement sur les marges du conseil d'administration.

Scientifique :

L'ampleur du tremblement de terre de Lisbonne de 1755 (magnitude estimée entre 8,6 et 9) suscite l'une des premières études scientifiques sur le sujet. La sismologie expérimentale est inventée par un ingénieur irlandais Robert Mallet qui, entre 1830 et 1850, étudie, grâce à des cuves à mercure, la propagation des ondes provoquées par des explosions artificielles. Il évalue l'intensité des séismes, dresse, en 1857, la première carte (encore valable aujourd'hui) de la sismicité des régions méditerranéennes et en 1858 la

première carte de sismicité mondiale. Cela n'empêche pas les Japonais de donner encore à cette époque une étiologie mythique aux séismes : le séisme de 1855 au Japon inspire le mythe du Namazu, poisson-chat géant vivant dans la vase des profondeurs de la terre et responsable de ce séisme.

Le 17 avril 1889, l'astronome allemand Ernst von Rebeur-Paschwitz (de) observe une déviation sur les pendules horizontaux des deux stations allemandes de l'Observatoire de Potsdam et de Wilhelmshaven. Apprenant le 13 juin 1889, dans la revue Nature, qu'un séisme est survenu à Tokyo, il fait le rapprochement entre le signal des pendules et l'arrivée des ondes sismiques de ce tremblement de terre, et en déduit une vitesse des ondes sismiques supérieure à 7 km/s[7]. C'est le premier enregistrement d'un télé-séisme (onde sismique à grande distance) et le début de la sismologie moderne.

Ce n'est qu'au début du XXe siècle que l'étude approfondie des séismes commence véritablement, avec le recensement à l'échelle de la planète des tremblements de terre par Alexis Perrey et Fernand de Montessus de Ballore entre autres ou encore l'identification des différentes ondes sismiques par Richard Dixon Oldham.

La sismologie est une science ancienne du point de vue de l'observation, mais les bases scientifiques de l'étude des séismes ne furent posées que de façon très récente.



Figure I.2: Carte de sismicité mondiale, Robert Mallet, 1858.

Sismotectonique :

La sismotectonique est la branche de la géologie et de la géophysique qui étudie les structures et les mouvements tectoniques grâce aux séismes, ainsi que les rapports entre les séismes et la tectonique. En effet, la distribution spatiale des tremblements de terre (sismicité) n'est pas aléatoire. En regardant la

sismicité à l'échelle planétaire, la majeure partie des séismes se situe aux frontières des plaques tectoniques. La variation de la profondeur des hypocentres souligne la présence des zones de subduction.

Cette simple analyse à l'échelle du globe peut être effectuée à toutes les échelles. À l'aide de différentes stations sismiques réparties autour d'un séisme, il est possible de retrouver les paramètres physiques d'un séisme, comme les coordonnées du séisme, sa profondeur (souvent difficile à déterminer), et le mécanisme au foyer du séisme ; ainsi on détermine le type de faille mise en jeu. À partir de la simple analyse de sismogrammes ayant enregistré une secousse, il subsiste toujours un doute sur l'orientation de la faille principale, la distinction entre le plan de faille et le plan nodal (plan théorique orienté perpendiculairement au plan de faille) ne pouvant être obtenu que par la connaissance géologique et/ou l'étude des répliques du séisme principal. Les mécanismes au foyer (paramètres géométriques de la rupture) sont liés à l'orientation et aux variations du champ de contrainte dans la croûte.

La localisation précise des séismes nécessite une connaissance assez détaillée des variations de la vitesse des ondes sismiques dans le sous-sol. Ces vitesses sont directement liées aux propriétés élastiques et physiques du milieu. En général, les variations de vitesse dans la Terre sont fonction de la profondeur. Ceci est la raison pour laquelle, en première analyse, le milieu dans lequel se propagent les ondes (milieu de propagation) est souvent assimilé à un milieu stratifié horizontal (empilement de couches horizontales, le terme technique est milieu monodimensionnel). Mais la prise en compte de milieux complexes tridimensionnels est aujourd'hui pratique courante. Ainsi la détermination du milieu de propagation et la localisation des séismes sont obtenues conjointement par des techniques de tomographie dite passive (les sources sont naturelles).

Un séisme est toujours le témoignage de la présence d'une faille (si on exclut certaines sources très particulières). Mais une faille ne produit pas toujours des séismes. On parlera alors de faille inactive si celle-ci ne cause aucune déformation. En revanche une faille, ou un segment de faille, peut être active mais ne générer aucun séisme (ou bien une sismicité diffuse de très faible magnitude). La faille est alors dite asismique. Le mouvement sur la faille se fait alors très lentement (quelques millimètres par an). Le terme technique est « creeping » (mot anglais signifiant littéralement « rampement »). Cette déformation ne peut être mise en évidence que par des données géodésiques (par exemple des mesures GPS ou des images InSAR). Ce même type de données a permis de détecter récemment des glissements sur des failles ayant des durées très longues (plusieurs semaines à plusieurs mois). Ces événements sont appelés séismes lents.

La relation entre activité sismique et faille est importante pour la prévision sismique. Dans une vision simplifiée, la déformation due à la tectonique augmente les contraintes sur la faille. Arrivé à un certain seuil, une rupture se déclenche et la faille génère un séisme relâchant les contraintes accumulées. La faille est alors prête pour un nouveau cycle d'accumulation. Ainsi, sur un système de faille où la charge en

contrainte est homogène, la faille ou le segment de faille n'ayant pas subi de forts tremblements de terre depuis longtemps devient un bon candidat pour le prochain séisme. Ce candidat est appelé « gap » sismique. Cette simplification n'est pas souvent vérifiée car le champ de contrainte n'est pas homogène et la géométrie des failles est complexe.

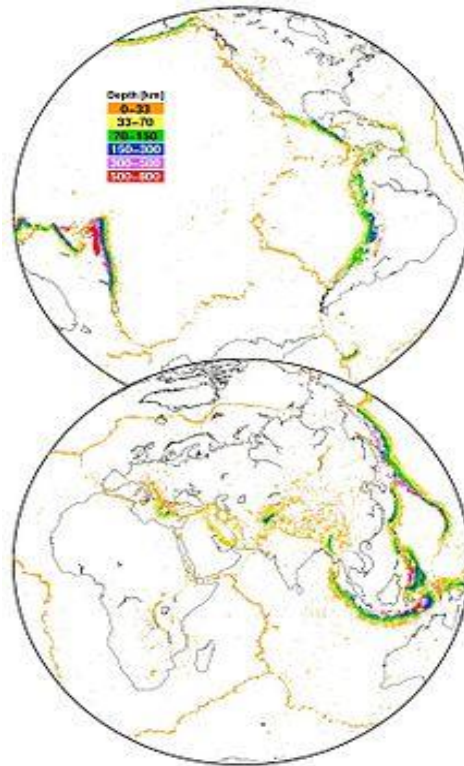


Figure I.3: Carte de la sismicité mondiale depuis 1973

Risque, aléa et vulnérabilité sismique : notion de chaîne de risque sismique

L'évaluation de l'activité sismique d'une zone est fonction de la vitesse de déformation, du potentiel sismogène des failles et de la période de retour des séismes de forte magnitude. La chaîne de risque sismique R est la combinaison de l'aléa sismique [14] A en un point donné et la vulnérabilité V des enjeux.

$$\{R\} = \{A\} \setminus \{V\}$$

L'analyse de l'aléa sismique étudie l'occurrence des tremblements de terre et les mouvements forts du sol qui en découlent. On distingue en général deux approches distinctes : l'analyse probabiliste de l'aléa sismique (en anglais PSHA pour Probabilistic Seismic Hazard Analysis) et l'approche déterministe. Ces deux approches sont complémentaires et sont souvent utilisées ensemble.

L'approche déterministe permet de faire des études de scénario quand la plupart des paramètres du problème sont fixés. En pratique, elle permet de répondre à des demandes du type : « Quelles seraient les

accélération du sol attendues à Aix-en-Provence dans le cas d'un séisme de magnitude 6 sur la faille de la chaîne de la Trévaresse ? ». La réponse à cette question se base souvent sur les connaissances acquises grâce à la sismicité historique. Si le scénario est inédit et n'a pas de réponse dans les bases de données, alors une simulation numérique du problème est requise.

L'approche probabiliste fait intervenir la notion de temps et d'occurrence. Elle nécessite la connaissance de la variation du taux de sismicité sur le territoire. La demande typique est la suivante : « Quelles sont les chances de dépasser une accélération du sol de 2 m s^{-2} à Aix-en-Provence dans les 50 prochaines années ? ». Cette approche permet aussi de réaliser une carte de l'aléa sismique quand la question est légèrement modifiée : « Quelle est l'accélération du sol en ce point ayant 10 % de chance d'être dépassé dans les 50 prochaines années ? ».

Il est nécessaire de faire la distinction entre l'aléa sismique et le risque sismique. En effet le risque sismique est l'impact de l'aléa sismique sur l'activité humaine en général. Ainsi on parle d'un aléa sismique élevé pour une région ayant une activité sismique importante. Mais à un aléa sismique élevé ne correspond pas forcément un risque sismique élevé si la région est déserte et ne comporte pas de construction. En revanche même une zone ayant une sismicité modérée peut être considérée à haut risque du fait de densité de la population, de l'importance du construit ou bien de la présence d'édifices sensibles (centrales nucléaires, usines chimiques, dépôts de carburants, ...). L'évaluation modélisée et mathématisée du risque sismique ne doit pas faire oublier la notion différente de risque perçue par l'homme qui prend en compte les facteurs de sens général du rapport au risque, de l'évaluation locale des dommages et des solutions de prévention et du niveau de maturité collective.

La sismologie :

Définition :

Aujourd'hui, la sismologie est une science en évolution rapide qui tente de contrer cette menace et d'utiliser les informations fournies par les tremblements de terre pour mieux comprendre l'intérieur de la Terre. Aux endroits qualifiés d'hypocentres, l'éclatement de la roche génère des ondes sismiques.

Le séisme :

Les tremblements de terre ou séismes sont le résultat de la libération d'énergie

accumulée par le déplacement et le frottement des différentes plaques de la croûte terrestre (phénomène qui se maintient au nom de la tectonique des plaques). La plupart d'entre eux sont imperceptibles pour l'homme. Le noyau d'un tremblement de terre est appelé l'hypocentre. On le trouve entre la surface et à des profondeurs allant jusqu'à 700 kilomètres. On parle souvent de l'épicentre d'un tremblement de terre, qui est le point de la surface de la Terre perpendiculaire à l'épicentre.

Les séismes génèrent des ondes sismiques se propageant dans toute la terre. Le passage des ondes à travers le sol provoque des vibrations pouvant être ressenties à la surface.

Le séisme est caractérisé par :

Magnitude : elle traduit l'énergie libérée par le séisme. Elle s'obtient par la mesure de l'amplitude des ondes enregistrées par un sismomètre ;

Intensité : elle mesure les effets et dommages du séisme en un lieu donné.

C'est une évaluation statistique sur une échelle descriptive de la manière dont le séisme se traduit en surface. Pour ne pas la confondre avec la magnitude, elle est toujours notée en chiffres romains ;

Foyer : point origine de la rupture sur le plan de faille d'où partent les ondes sismiques ;

Épicentre : point situé à la surface terrestre, à la verticale du foyer.



Figure I.4: les caractéristiques du séisme

Le sismographe :

Un appareil qui enregistre et mesure les tremblements de terre. Lors d'un tremblement de terre, les vibrations causées par la rupture de la croûte terrestre se propagent à partir du point de rupture. Les appareils qui enregistrent et mesurent les tremblements de terre sont appelés sismographes.

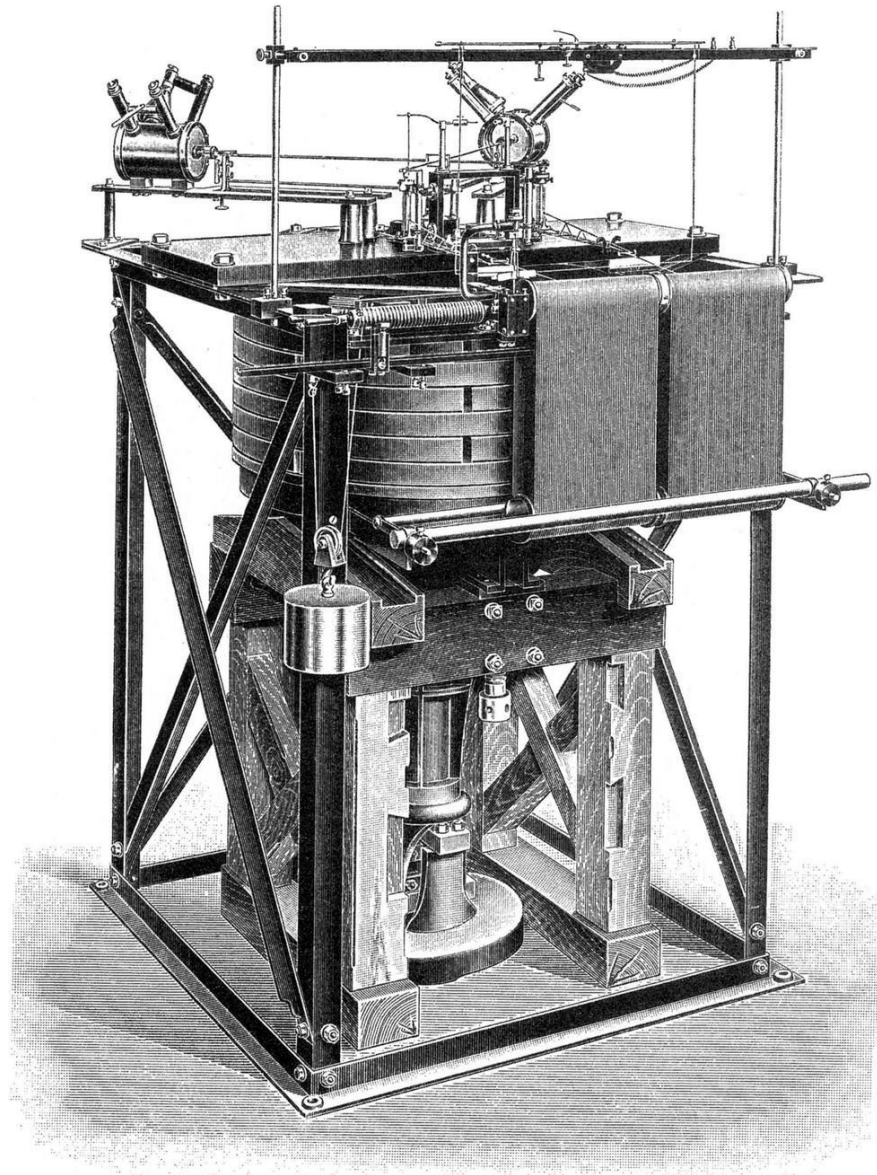


Figure I.5: Le sismographe

Intensité et données :

Lorsqu'un séisme frappe une zone habitée, il est comparé aux précédents sur la base du nombre de morts, du coût économique de la reconstruction, de la difficulté d'accès (destruction des infrastructures de transport), du nombre de personnes à reloger... La comparaison des séismes en fonction des dégâts occasionnés établit une échelle des intensités (type échelle de Mercalli ou échelle MSK avec des intensités allant de I à XII). Une telle échelle, idéale pour les impacts sur l'activité humaine, a de nombreuses limitations pour l'étude scientifique des séismes : seuls les séismes impactant des zones habitées sont pris en compte ; l'intensité dépend du type d'habitation (normes parasismiques, nombre d'étages des constructions, ...) mais aussi de facteurs géologiques locaux (nature du substratum, ...). Cependant, cette échelle d'intensité reste la seule échelle de comparaison disponible pour les séismes historiques "anciens", c'est-à-dire antérieurs à la mise en place des réseaux sismiques (voir, par exemple, le séisme de Lambesc de 1909). En l'absence d'autres données, les cartes d'intensités iso-sismiques permettent aussi de déterminer la direction des failles ayant joué, ce qui complète par exemple un mécanisme au foyer donnant deux plans potentiels (voir, par exemple, le séisme de L'Aquila de 2009).

Dans les cas favorables, des données de terrain permettent d'estimer la "puissance" du séisme : connaissance du type de roche ayant "rompu", de la taille du plan de faille et du déplacement maximal le long de ce plan (observation de failles en surface). Là aussi, des limitations existent. Seuls sont concernés les séismes terrestres affectant des zones d'accès facile et ayant laissé des traces importantes et observables.

Sismogrammes, échelle de Richter et magnitude :

Aujourd'hui, tout séisme est observé par un réseau mondial de sismomètres (plusieurs réseaux nationaux et régionaux échangeant leurs informations). Pour chaque séisme on peut donc avoir des sismogrammes classiques, c'est-à-dire montrant la succession ondes P puis ondes S et enfin ondes de surface avec des amplitudes ni trop élevées (trop près de l'épicentre), ni trop faibles (trop loin de l'épicentre).

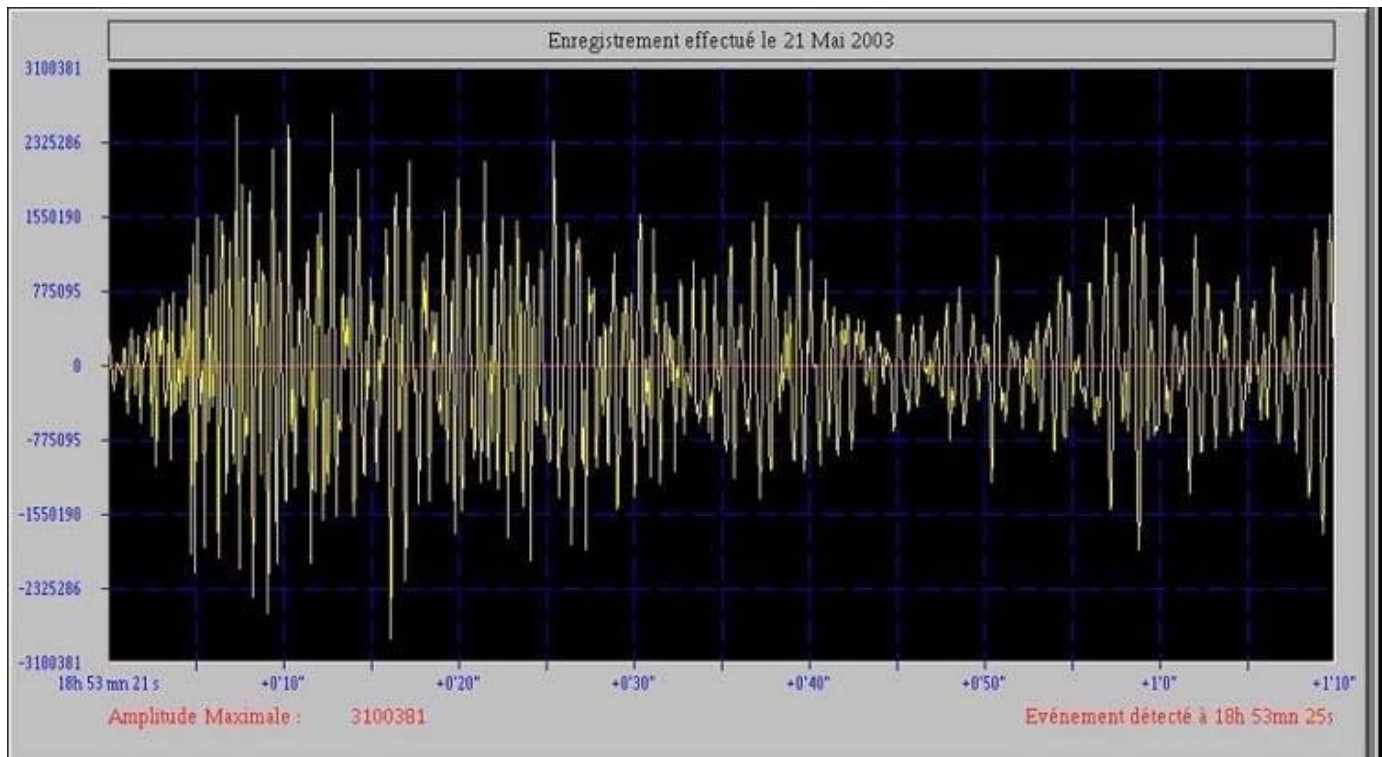


Figure 1.6 : Un sismogramme du séisme de 2003 en Boumerdes

Sur la base d'un sismogramme (ou de la combinaison de sismogrammes, ou du sismogramme reconstruit dans la direction du rai sismique), on peut, par exemple, estimer la distance épacentrale et mesurer l'amplitude maximale des ondes de surface. À l'aide d'un abaque ou d'une formule empirique, on peut exprimer ces données extraites en une magnitude qui permettra de comparer les différents séismes. Quelques minutes après un séisme majeur, les observatoires sismologiques sont en mesure de donner une magnitude (ou une fourchette de magnitude), avant d'avoir la moindre idée de ce qui s'est passé sur le terrain. Connaître le plus tôt possible l'énergie d'un séisme est capital, par exemple, si l'on veut évacuer préventivement des zones susceptibles d'être affectées par un tsunami.

La comparaison des séismes nécessite, pour utiliser la même magnitude dans un réseau sismique, une calibration des sismomètres afin de prendre en compte les différents types de matériel et les effets géologiques locaux des stations sismiques. Plusieurs échelles de magnitude ont été développées. Selon les échelles, on prend en compte l'amplitude maximale des ondes des surface, ou celle des ondes S voire des ondes P, ou bien non pas une valeur maximale mais une valeur intégrée sur 1 à 20 secondes. L'atténuation différentielle des ondes en fonction de la distance à l'épicentre, la saturation possible des sismomètres pour les séismes puissants (dépendant aussi du type d'onde mesuré), la faible résolution pour les séismes lointains, expliquent que les différentes échelles développées sont adaptées à des gammes de puissances sismiques différentes et complémentaires : pour une puissance donnée, l'échelle la plus adéquate est celle qui a la

meilleure sensibilité. Par exemple, l'échelle historique de Richter et Gutenberg (Richter 1935 puis Richter et Gutenberg en 1936 puis 1956) est bien adaptée aux séismes de magnitude 2 à 6.

Le développement des sismomètres, qui mesurent aussi désormais des accélérations en plus des déplacements, a abouti à de nouveaux modes de calculs, à des calibrations avec les anciens sismomètres et à la définition de nouvelles échelles (surtout pour les forts séismes). Les formules de calcul de magnitudes utilisées ont été déterminées de façon à ce que les échelles soient complémentaires et que les magnitudes données soient comparables si on utilise deux échelles a priori adaptées à la détermination de la puissance d'un séisme. Par exemple, la formule de calcul de Kanamori (1977) (magnitude de moment) est telle qu'un séisme de magnitude 5 correspond exactement à un séisme de magnitude 5 sur l'échelle de Richter.

Ainsi, quel que soit le mode précis de calcul de la puissance d'un séisme, on peut parler de « magnitude sur l'échelle de Richter ». Dans les faits, ce sera une magnitude de Richter au sens strict ou bien une magnitude rapportée à une échelle de Richter "élargie". La précision d'une magnitude est de l'ordre de 0,25 degré de magnitude. Souvent, une première estimation est ensuite affinée au fur et à mesure de l'accumulation des données des différents réseaux sismiques.

Toutes les échelles sont logarithmiques. Ainsi, un séisme de magnitude 5 est "beaucoup plus puissant" qu'un séisme de magnitude 4, et non pas "25% plus puissant" ce qui serait le cas d'une échelle linéaire. Nous reviendrons sur ce point plus loin.

Énergie, moment, magnitude

D'un point de vue physique, un séisme est aussi l'expression de la dispersion d'énergie via des ondes sismiques. Un séisme peut aussi être vu comme le résultat de l'application d'un **moment sismique** dont seule une partie, l'**énergie sismique**, est dispersée sous forme d'ondes sismiques ; le reste de l'énergie provoquant des fractures, des déplacements et de la chaleur par friction.

Le moment sismique (en N.m) est défini comme le produit $M_0 = \mu \cdot S \cdot d$; avec " μ " la rigidité de la roche (en N.m⁻²), " S " la surface du plan de faille ayant rompu (en m²) et " d " le déplacement le long de ce plan (en m). D'où une estimation possible via les données de terrain mais aussi par traitement des données de sismogrammes. Remarquons que l'usage utilise le N.m pour l'expression d'un moment qui est un travail et donc une énergie (1 N.m = 1 J).

Énergie sismique et moment peuvent être déterminés selon les sismomètres disponibles. Richter avait aussi proposé une estimation de l'énergie sismique à partir de la magnitude, à partir d'une relation empirique.

Magnitude (M), énergie sismique (Es) et moment sismique (M₀) sont donc reliés par des équations.

Les équations données ci-dessous, diffèrent parfois des formules que l'on peut trouver en faisant un peu de bibliographie (ou en furetant sur la toile), et cela pour deux raisons principales :

L'énergie et moment sont exprimés dans la suite en J ou N.m (unités équivalentes du système international) alors qu'on trouve des formules utilisant des ergs ou dyn.cm

Les équations données sont cohérentes entre elles : à partir de 2 équations on retrouve la troisième, ce qui n'est pas le cas dans certaines publications qui reportent 3 formules "historiques" qui ont évolué et ne sont plus cohérentes (par exemple ce n'est pas la formule "historique" de Richter qui est ici présentée pour la relation énergie - moment).

Magnitude - moment sismique :

$$M = 2/3 \cdot \log_{10}(M_0) - 6$$

Cette expression de la magnitude dite de moment (et notée M_w) est telle qu'un séisme de magnitude 5 sur l'échelle de Richter a aussi une magnitude égale à 5 sur cette échelle (de Kanamori) adaptée aux forts séismes.

Magnitude - énergie sismique :

$$M = 2/3 \cdot \log_{10}(E_s) - 2,88$$

$$\log_{10}(E_s) = 3/2 \cdot M + 4,32$$

Cette magnitude est dite magnitude d'énergie

Énergie sismique - moment sismique :

$$\log_{10}(E_s) = \log_{10}(M_0) - 4,68$$

Soit :

$$E_s = M_0 \cdot 10^{-4,68} \approx 2 \cdot 10^{-5} \cdot M_0$$

Cette expression, dérivée d'estimations empiriques et restant pour partie empirique, considère que l'énergie sismique ne représente qu'une fraction (1/50.000) du moment sismique, énergie totale libérée par le séisme.

Remarque

Contrairement à ce qui est souvent mentionné dans les médias (martelant que la magnitude varie entre 0 et 9), la magnitude possible pour un séisme ne possède en théorie aucune limite. Elle peut être infiniment négative ou positive (l'énergie et le moment sismique pouvant varier entre zéro et l'infini). Dans la pratique, la plus grande magnitude M_w jamais mesurée est de 9,5 (séisme du Chili en 1960).

De plus grandes magnitudes sont sans doute possibles, mais la taille d'une faille étant nécessairement finie, il en sera de même de la magnitude maximale. La plus petite magnitude possible n'a sans doute jamais été mesurée, et fait toujours l'objet de débats acharnés dans la communauté scientifique. En effet, les

sismographes actuels ne sont sans doute pas encore assez sensibles pour enregistrer systématiquement des signaux d'énergie aussi faible. Disons simplement qu'il est courant d'enregistrer dans les mines des séismes de magnitude négative, descendant parfois jusqu'à -3 ou même moins. La figure ci-dessous illustre la relation entre énergie et magnitude Mw, en la comparant à d'autres phénomènes naturels ou industriels.

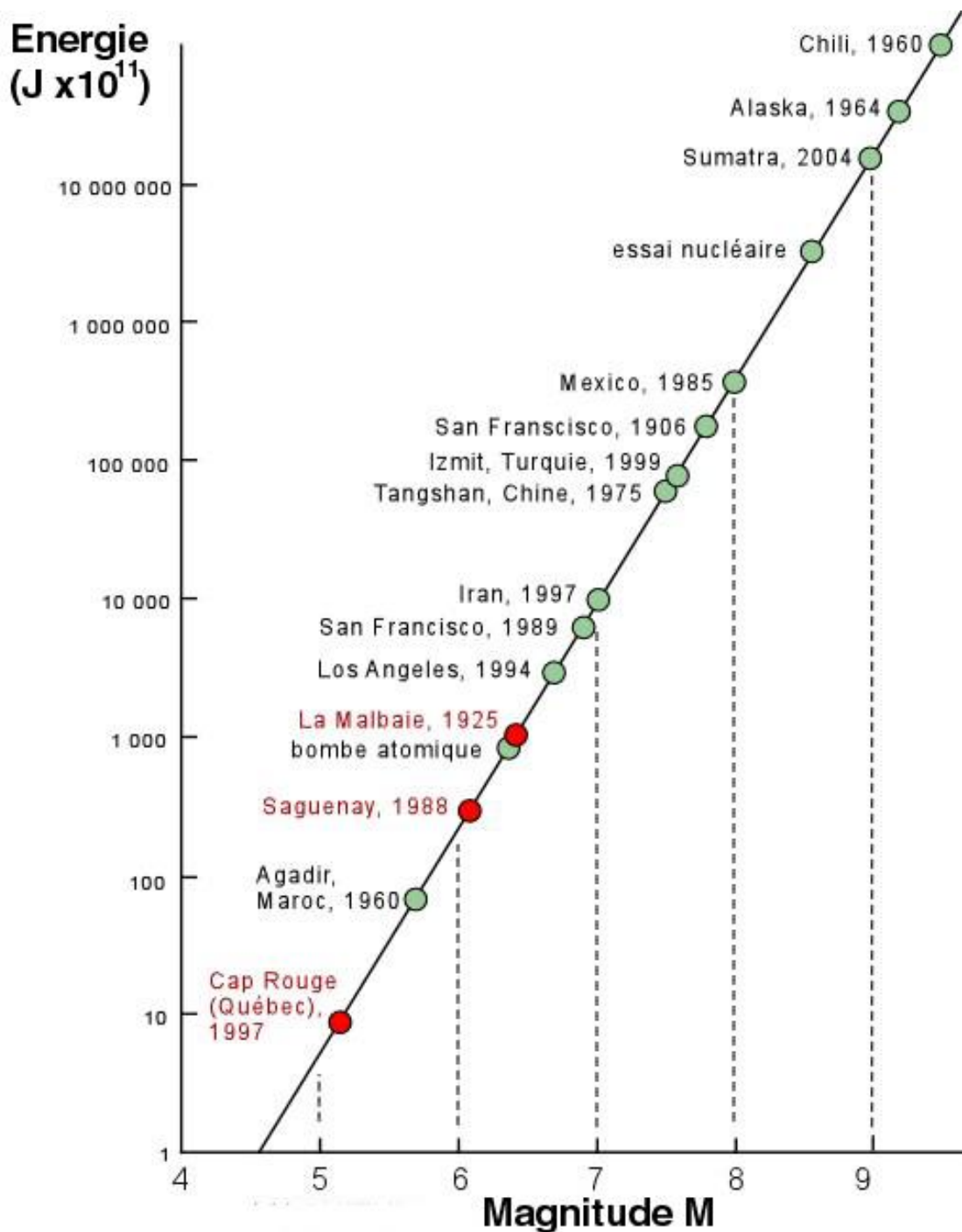


Figure 1.7 : l'Énergie du séisme par rapport sa magnitude

CHAPITRE II

NOTIONS DE SPECTRE DE RÉPONSE

Généralité :

D'une manière générale, la vibration du sol induite par le tremblement de terre est représentée par des mouvements sismiques contre lesquels il convient de se prémunir. Ils dépendent à la fois de la région et du site (plaine, vallée, colline, etc.) où l'on se trouve. La réglementation en vigueur définit les mouvements sismiques en fonction du zonage sismique nationale Toutefois le Plan de Prévention des Risques (PPR) peut proposer des niveaux de protection différents de ces niveaux forfaitaires. Ces niveaux font suite à une étude technique appelée « microzonage sismique » menée à l'échelle communale et peuvent être considérés comme mieux adaptés au contexte sismique local. Cette évaluation de l'aléa local ou « microzonage sismique » se substitue aux mouvements sismiques définis par la réglementation nationale (spectre de réponse).

Spectre de réponse :

Les mouvements sismiques sont caractérisés par un spectre de réponse élastique (par la réglementation ou dans le cadre du microzonage), ancré à période nulle ($T=0$) à une accélération de calage (notée a_g dans les normes EC8 et sur le graphique ci-après) dépendant de la catégorie d'importance de l'ouvrage et du type de sol (zones). Le spectre de réponse est une courbe représentant l'accélération maximale induite par les vibrations sismiques en fonction de la période propre d'un oscillateur harmonique simple (pendule, ressort,...) et de son amortissement critique. Le spectre de réponse propre est un outil utilisé par les concepteurs d'ouvrage (bâtiments, ouvrage d'art...). La période propre : Pour un pendule de masse m , par exemple, lorsque celui-ci est écarté de sa position d'équilibre au repos puis relâché, la période propre correspond à la durée séparant deux passages consécutifs par le même point, dans le même sens. La période propre d'un oscillateur harmonique correspond à la durée d'une oscillation libre.

Spectre de réponse : Courbes permettant d'évaluer la réponse d'un bâtiment à un séisme passé ou futur

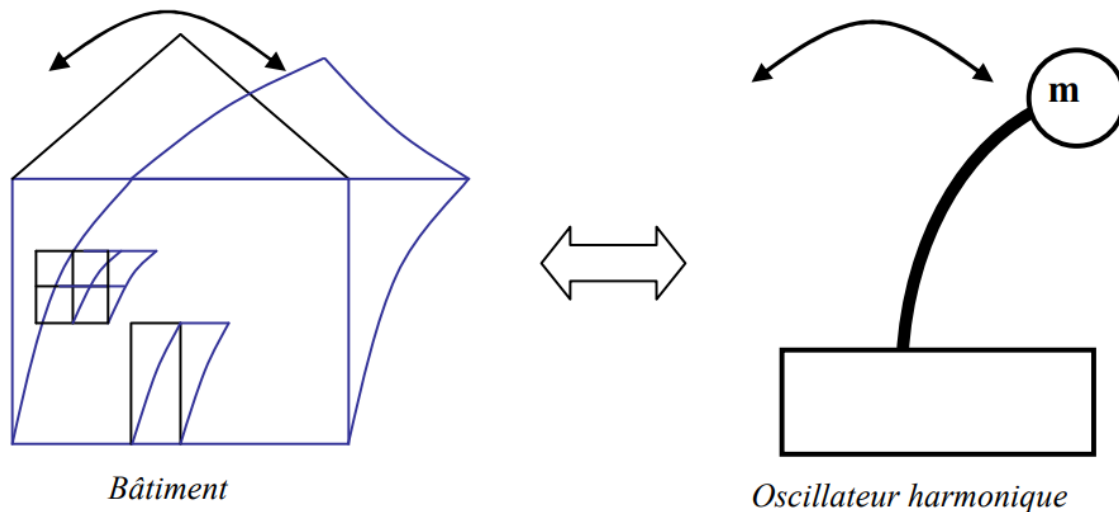


Figure II.1 : modalisation d'oscillateur harmonique simple

L'intérêt principal du spectre de réponse vient de ce qu'en première approximation, un bâtiment ou un ouvrage peut être assimilé à un oscillateur simple (pendule, ressort,...) : la seule connaissance de sa période propre T (liée au type de structure, à la taille et aux propriétés du matériau constitutif) et de son amortissement (lié au matériau et aux dispositions constructives) permet d'estimer l'accélération, la vitesse et le déplacement maximaux subis par l'ouvrage, et, par conséquent, les forces et contraintes à l'intérieur de la structure.

. CHOIX DE LA METHODE DE CALCUL

1. Méthodes utilisables

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

- par la méthode statique équivalente
- par la méthode d'analyse modale spectrale
- par la méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes

1.2. Conditions d'application de la méthode statique équivalente

La méthode statique équivalente peut être utilisée dans les conditions suivantes :

a) Le bâtiment ou bloc étudié, satisfaisait aux conditions de régularité en plan et en élévation prescrites au chapitre III, paragraphe 3.5 avec une hauteur au plus égale à 65m en zones I et II et à 30m en zones III

b) Le bâtiment ou bloc étudié présente une configuration irrégulière tout en respectant, autres

Les conditions de hauteur énoncées en a), les conditions complémentaires suivantes :

Zone I :

- Tous groupes

Zone II :

- Groupe d'usage 3
- Groupe d'usage 2, si la hauteur est inférieure ou égale à 7 niveaux ou 23m.
- Groupe d'usage 1B, si la hauteur est inférieure ou égale à 5 niveaux ou 17m.
- Groupe d'usage 1A, si la hauteur est inférieure ou égale à 3 niveaux ou 10m.

Zone III :

- Groupes d'usage 3 et 2, si hauteur est inférieure ou égale à 5 niveaux ou 17m.
- Groupe d'usage 1B, si la hauteur est inférieure ou égale à 3 niveaux ou 10m.
- Groupe d'usage 1A, si la hauteur est inférieure ou égale à 2 niveaux ou 08m.

1.3. Méthodes dynamiques

a) 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.

b) La méthode d'analyse dynamique par accélérogrammes peut être utilisée au cas par cas par un personnel qualifié, ayant justifié auparavant les choix des séismes de calcul et des lois de comportement utilisées ainsi que la méthode d'interprétation des résultats et les critères de sécurité à satisfaire.

2.1. Définition :

On peut définir brièvement un spectre de réponse comme un tracé de la réponse maximale en termes de déplacement ou de vitesse ou d'accélération à une charge spécifiée

(accélération du sol par exemple) pour un ensemble de systèmes à un seul degré de liberté, avec la période ou fréquence propre en abscisse et la réponse maximale en ordonnée.

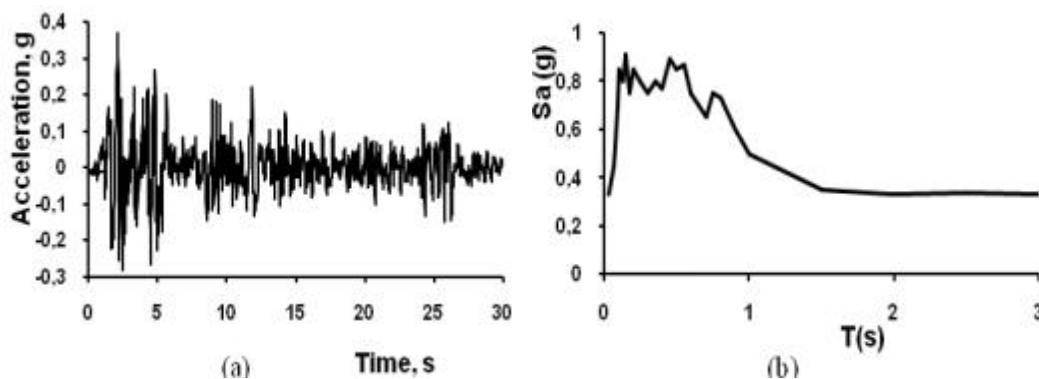
2.2. Méthode de construction du spectre de réponse de calcul :

Les spectres de réponse sont préparés en calculant la réponse à une excitation sismique des oscillateurs simples (systèmes à un degré de liberté) avec différentes quantités d'amortissement à l'aide d'une équation différentielle telle que l'équation suivante:

$$\ddot{X} + 2.\xi.\omega.\dot{X} + \omega^2 X = -\ddot{X}_s(t)$$

où: ξ , ω , \dot{X} et \ddot{X} sont respectivement le taux d'amortissement, la vitesse angulaire, la vitesse et l'accélération du système. $\ddot{X}_s(t)$ est l'accélération du sol introduite sous forme numérique.

Habituellement, les composantes nord-sud, est-ouest et verticale de cette accélération sont mesurées. L'intégration numérique utilisant l'intégrale de Duhamel est appliquée pour calculer la réponse du système et le processus se poursuit jusqu'à ce que l'enregistrement du tremblement de terre soit terminé. La plus grande valeur est enregistrée et devient la réponse du système à cette excitation. Changer les paramètres du système pour changer la période naturelle, le processus est répété jusqu'à ce que toutes les périodes d'intérêt aient été couvertes et les résultats tracés (Figure 1b). Les pics et les creux aigus d'un tel tracé sont adoucis en répétant le processus pour de nombreux tremblements de terre, de sorte que le "spectre de réponse de conception" intègre les spectres de plusieurs tremblements de terre et représente un spectre de réponse "moyen" qui est lissé et standardisé pour plus de commodité (Paz et Leigh 2004). Ce type de spectre ne couvre que le domaine élastique et est, par conséquent, appelé "spectre de réponse élastique".



(a) Composante Nord-Sud (b) Spectre élastique correspondant pour $\xi = 5\%$

Néanmoins, pour certains événements extrêmes tels que les séismes à fort mouvement, il est nécessaire de concevoir des structures capables de supporter des efforts au-delà de la limite élastique et la génération de spectres de réponse inélastique devient nécessaire. Cette opération peut être réalisée par deux méthodes principales :

- Le calcul des déplacements inélastiques par intégration de l'équation non linéaire du mouvement à l'aide d'une méthode numérique telle que la méthode d'accélération linéaire "pas à pas". Un facteur de ductilité spécifié est également supposé. Ensuite, comme pour le spectre de réponse élastique, les valeurs maximales sont tracées en fonction de la période (ou fréquence) pour donner le spectre inélastique. La séquence d'étapes résumant cette procédure est donnée par (Paz et Leigh 2004).

- La dérivation du spectre de réponse inélastique à partir du spectre élastique en déplaçant ce dernier vers le bas d'une quantité liée à la ductilité et souvent appelée facteur de comportement (ou de réduction). Les valeurs maximales de l'accélération, du déplacement et de la vitesse du système sont connues, respectivement, comme l'accélération spectrale (S_a), le déplacement spectral (S_d) et la vitesse spectrale (S_v) qui sont simplement liées les unes aux autres.

Remarque :

Dans cette étude, nous avons utilisé cette dernière méthode qui est plus simple et donne des résultats satisfaisants.

2.3. Méthode statique équivalente

2.3.1. Principe

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

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

Il faut souligner toutefois que les forces et les déformations obtenues pour l'élément à

partir des méthodes d'analyse statiques pour les charges de conception recommandées sont inférieures aux forces et aux déformations qui seraient observées sur la structure sous les effets d'un séisme majeur pour lequel les charges ont été spécifiées. Ce dépassement des forces est équilibré par le comportement ductile qui est fourni par les détails de construction de l'élément.

C'est pourquoi l'utilisation de cette méthode ne peut être dissociée de l'application rigoureuse des dispositions constructives garantissant à la structure :

- Une ductilité suffisante
- La capacité de dissiper l'énergie vibratoire transmise à la structure par des Secousses sismiques majeures

2.3.2. Modélisation

a) Le modèle du bâtiment à utiliser dans chacune des deux directions de calcul est plan avec les masses concentrées au centre de gravité des planchers et un seul degré de liberté en translation horizontale par niveau sous réserve que les systèmes de contreventement dans les deux (2) directions puissent être découplés

b) La rigidité latérale des éléments porteurs du système de contreventement est calculée à partir de sections non fissurées pour les structures en béton armé ou en maçonnerie.

c) Seul le mode fondamental de vibration de la structure est à considérer dans le calcul de la force sismique totale

2.3.3. Calcul de la force sismique totale (VOIR MODIFICATIFS ET COMPLEMENTS AUX RPA 99)

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

$$V = \frac{A.D.Q}{R} W$$

2.2.4. Méthode du spectre de réponse :

Dans le cas le plus simple, le comportement d'un bâtiment sous sollicitation sismique est assimilable à celui d'un oscillateur harmonique caractérisé par sa masse m , sa constante de raideur ou rigidité k et une constante d'amortissement visqueux c .

3.1. Principe :

Par cette méthode, il est recherché pour chaque mode de vibration, le maximum des effets engendrés dans la structure par les forces sismiques représentées par un spectre de réponse de calcul. Ces effets sont par la suite combinés pour obtenir la réponse de la structure.

3.2. Modélisation :

a) Pour les structures régulières en plan comportant des planchers rigides, l'analyse est faite séparément dans chacune des deux directions principales du bâtiment. Celui-ci est alors représenté dans chacune des deux directions de calcul par un modèle plan, encastré à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers avec un seul DDL en translation horizontale.

b) Pour les structures irrégulières en plan, sujettes à la torsion et comportant des planchers rigides, elles sont représentées par un modèle tridimensionnel, encastré à la base et où les masses sont concentrées au niveau des centres de gravité des planchers avec trois (03) DDL (2 translations horizontales et une rotation d'axe vertical).

c) Pour les structures régulières ou non comportant des planchers flexibles, elles sont représentées par des modèles tridimensionnels encastrés à la base et à plusieurs DDL par plancher.

d) La déformabilité du sol de fondation doit être prise en compte dans le modèle toutes les fois où la réponse de la structure en dépend de façon significative.

e) Le modèle de bâtiment à utiliser doit représenter au mieux les distributions des

rigidités et des masses de façon à prendre en compte tous les modes de déformation significatifs dans le calcul des forces d'inertie sismiques (ex : contribution des zones nodales et des éléments non structuraux à la rigidité du bâtiment).

f) Dans le cas des bâtiments en béton armé ou en maçonnerie la rigidité des éléments porteurs doit être calculée en considérant les sections non fissurées. Si les déplacements sont critiques particulièrement dans le cas de structures associées à des valeurs élevées du coefficient de comportement, une estimation plus précise de la rigidité devient nécessaire par la prise en compte de sections fissurées.

3.3. Spectre de réponse de calcul :

L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 1.25A(1 + \frac{T}{T_1}(2.5\eta\frac{Q}{R} - 1)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{Q}{R}\right)\left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(1.25A)\left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3}\left(\frac{3}{T}\right)^{5/3}\left(\frac{Q}{R}\right) & T \geq 3s \end{cases}$$

Coefficient A :

Groupe	Zone		
	I	II	III
1A	0,12	0,25	0,35
1B	0,10	0,20	0,30
2	0,08	0,15	0,25
3	0,05	0,10	0,15

Tableau II.1 : Coefficient d'accélération de zone A.

D : facteur d'amplification dynamique moyen, fonction de la catégorie de site, du facteur de correction d'amortissement (η) et de la période fondamentale de la structure (T).

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

T_2 : période caractéristique, associée à la catégorie du site et donnée par tableau

Le facteur D est par ailleurs donné sous forme graphique à la figure 4.1 pour un amortissement $\xi = 5\%$

H : Facteur de correction d'amortissement donné par la formule :

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

Où ξ (%) est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau Constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Quant $\xi = 5\%$ on a $\eta = 1$

Où x (%) est le pourcentage d'amortissement critique fonction du matériau Constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Quant $x = 5\%$ on a $h = 1$

Valeurs de x (%) :

	Portiques		Voiles ou murs
Remplissage	B Armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
Léger	6	4	10
Dense	7	5	

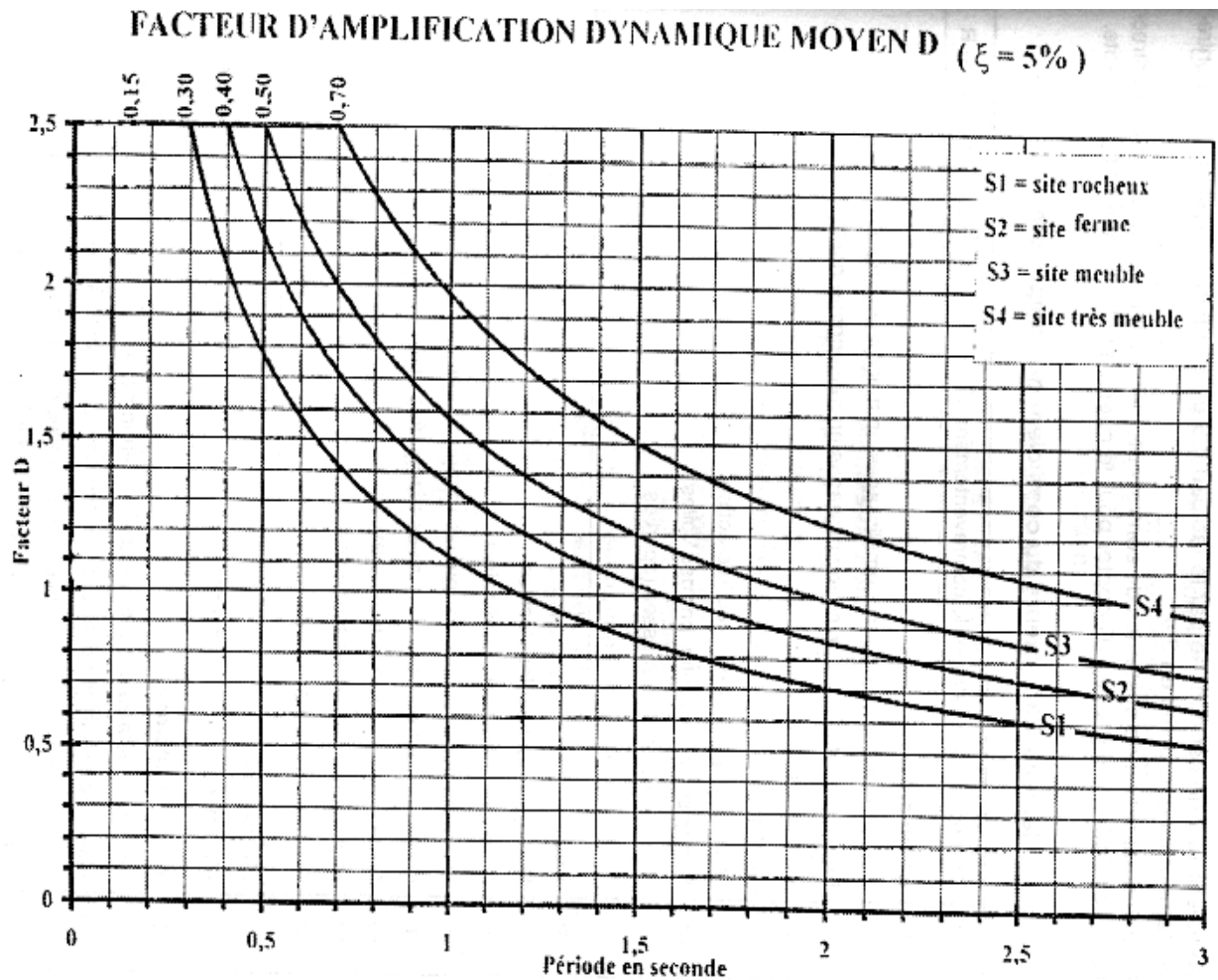


Figure II.2 : les facteurs d'amplification dynamique moyen D

R : coefficient de comportement global de la structure

Sa valeur unique est donnée par le tableau en fonction du système de contreventement tel que défini

En cas d'utilisation de systèmes de contreventement différents dans les deux directions considérées il y a lieu d'adopter pour le coefficient R la valeur la plus petite.

Cat	Description du système de contreventement	Valeur de R
<u>A</u>	<u>Béton armé</u>	
1a	Portiques autos tables sans remplissages en maçonnerie rigide	5
1b	Portiques autos tables avec remplissages en maçonnerie rigide	3,5
2	Voiles porteurs	3,5
3	Noyau	3,5
4a	Mixte portiques/voiles avec interaction	5
4b	Portiques contreventés par des voiles	4
5	Console verticale à masses réparties	2
6	Pendule inverse	2
<u>B</u>	<u>Acier</u>	
7	Portiques autostables ductiles	6
8	Portiques autostables ordinaires	4
9a	Ossature contreventée par palées triangulées en X	4
9b	Ossature contreventée par palées triangulées en V	3
10a	Mixte portiques/palées triangulées en X	5
10b	Mixte portiques/palées triangulées en V	4
11	Portiques en console verticale	2
<u>C</u>	<u>Maçonnerie</u>	
12	Maçonnerie porteuse chaînée	2,5
<u>D</u>	<u>Autres systèmes</u>	
13	Ossature métallique contreventée par diaphragme	2
14	Ossature métallique contreventée par noyau en béton armé	3
15	Ossature métallique contreventée par voiles en béton armé	3,5
16	Ossature métallique avec contreventement mixte comportant un noyau en béton armé et palées ou portiques métalliques en façades	4
17	Systèmes comportant des transparences (étages souples)	2

Tableau II.2 : valeurs du coefficient de comportement R

Q : facteur de qualité

Le facteur de qualité de la structure est fonction de :

- la redondance et de la géométrie des éléments qui la constituent
- la régularité en plan et en élévation
- la qualité du contrôle de la construction

La valeur de Q est déterminée par la formule :
$$Q = 1 + \sum_1^5 P_q$$

P_q : est la pénalité à retenir selon que le critère de qualité q " est satisfait ou non".

Sa valeur est donnée au tableau 4.4

Les critères de qualité "q" à vérifier sont :

1. Conditions minimales sur les files de contreventement

- *système de portiques* : chaque file de portique doit comporter à tous les niveaux, au moins trois (03) travées dont le rapport des portées n'excède pas 1,5. Les travées de portique peuvent être constituées de voiles de contreventement.
- *système de voiles* : chaque file de voiles doit comporter à tous les niveaux, au moins un (01) trumeau ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 0,67 ou bien deux (02) trumeaux ayant un rapport "hauteur d'étage sur largeur" inférieur ou égal à 1,0. Ces trumeaux doivent s'élever sur toute la hauteur de l'étage et ne doivent avoir aucune ouverture ou perforation qui puisse réduire de manière significative leur résistance ou leur rigidité...

2. Redondance en plan

Chaque étage devra avoir, en plan, au moins quatre (04) files de portiques et/ou de voiles dans la direction des forces latérales appliquées.

Ces files de contreventement devront être disposées symétriquement autant que possible avec un rapport entre valeurs maximale et minimale d'espacement ne dépassant pas 1,5.

3. Régularité en plan

La structure est classée régulière en plan.

4. Régularité en élévation

La structure est classée régulière en élévation.

5. Contrôle de la qualité des matériaux

Des essais systématiques sur les matériaux mis en œuvre doivent être réalisés par l'entreprise.

6. Contrôle de la qualité de l'exécution

Il est prévu contractuellement une mission de suivi des travaux sur chantier. Cette mission doit comprendre notamment une supervision des essais effectués sur les matériaux.

Critère « q »	P_q	
	Observé	N/observé
1. Conditions minimales sur les files de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. Régularité en plan	0	0,05
4. Régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle de la qualité des matériaux	0	0,05
6. Contrôle de la qualité de l'exécution	0	0,10

Tableau II.3 : Coefficient Q

T_1, T_2 : Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site.

Valeurs de T_1 et T_2

Site	S1	S2	S3	S4
T1 (sec)	0,15	0,15	0,15	0,15
T2 (sec)	0,30	0,40	0,50	0,70

Tableau II.4 : les valeurs Des piérides

Dans la détermination de la valeur de Q, il y a lieu de tenir compte que les irrégularités en plan et en élévation ont déjà été prises en charge par le modèle. Par ailleurs, en cas d'analyse tridimensionnelle il y a lieu de prendre comme valeur de Q la plus pénalisante, des valeurs calculées suivant les deux directions orthogonales de référence

L'action sismique doit être appliquée dans toutes les directions jugées déterminantes pour le calcul des forces sismiques ainsi que les directions qui leur sont perpendiculaires, compte tenu de la configuration en plan de la structure. Pour les structures ayant leurs éléments de contreventement distribués le long de deux directions orthogonales, ces deux directions sont à retenir comme directions d'excitation.

3.4. Nombre de modes à considérer :

- a) Pour les structures représentées par des modèles plans dans deux directions orthogonales, le nombre de modes de vibration à retenir dans chacune des deux directions d'excitation doit être tel que :
- la somme des masses modales effectives pour les modes retenus soit égale à 90 % au moins de la masse totale de la structure.
 - ou que tous les modes ayant une masse modale effective supérieure à 5% de la masse totale de la structure soient retenus pour la détermination de la réponse totale de la structure.

Le minimum de modes à retenir est de trois (03) dans chaque direction considérée.

- b) Dans le cas où les conditions décrites ci-dessus ne peuvent pas être satisfaites à cause de l'influence importante des modes de torsion, le nombre minimal de modes (K) à retenir doit être tel que :

$$K \geq 3 \sqrt{N} \quad \text{et} \quad T_K \leq 0.20 \text{ sec}$$

Où : N est le nombre de niveaux au-dessus du sol et T_K la période du mode K.

3.5. Combinaison des réponses modales :

- a) Les réponses de deux modes de vibration i et j de périodes T_i , T_j et d'amortissement ξ_i , ξ_j sont considérées comme indépendantes si le rapport $r = T_i / T_j$ ($T_i \leq T_j$) vérifie :

$$r \leq 10 / (10 + \sqrt{\xi_i \xi_j})$$

- b) Dans le cas où toutes les réponses modales retenues sont indépendantes les unes des autres, la réponse totale est donnée par

$$E = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^k E_i^2}$$

E : effet de l'action sismique considéré

E_i : valeur modale de E selon le mode « i »

K : nombre de modes retenus

- c) Dans le cas où deux réponses modales ne sont pas indépendantes ; E_1 et E_2 par exemple, la réponse totale est donnée par :

$$\sqrt{(|E_1| + |E_2|) + \sum_{i=3}^K E_i^2}$$

3.6. Résultante des forces sismiques de calcul :

La résultante des forces sismiques à la base V_t obtenue par combinaison des valeurs modales ne doit pas être inférieure à 80 % de la résultante des forces sismiques déterminée par la méthode statique équivalente V pour une valeur de la période fondamentale donnée par la formule empirique appropriée.

Si $V_t < 0.80 V$, il faudra augmenter tous les paramètres de la réponse (forces, déplacements, moments, ...) dans le rapport $0.8 V/V_t$.

3.7. Effets de la torsion accidentelle :

Quand il est procédé à une analyse par modèles plans dans les deux directions orthogonales

Les effets de la torsion accidentelle d'axe vertical sont à prendre en compte tel que décrit au paragraphe.

Dans le cas où il est procédé à une analyse tridimensionnelle, en plus de l'excentricité théorique calculée, une excentricité accidentelle (additionnelle) égale à $\pm 0.05 L$, (L étant la dimension du plancher perpendiculaire à la direction de l'action sismique) doit être appliquée au niveau du plancher considéré et suivant chaque direction

4. prescriptions communes aux méthodes « statique » et « dynamique »

4.1. Stabilité au renversement :

Le moment de renversement qui peut être causé par l'action sismique doit être calculé par rapport au niveau de contact sol-fondation.

Le moment stabilisant sera calculé en prenant en compte le poids total équivalent au poids de la construction, au poids des fondations et éventuellement au poids du remblai.

4.2. Composante verticale de l'action sismique :

Les effets de la composante verticale de l'action sismique doivent être pris en compte dans le calcul des porte-à-faux de plus de 1,50m de long et ceci, en zone sismique III

A cet effet, outre la force descendante adéquate, une force sismique minimum ascendant net $F_v = 0.5 A w_p$

Doit être prise en considération

W_p : poids propre de l'élément en porte à faux

A coefficient sismique de zone

4.3. Calcul des déplacements :

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

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

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

R : coefficient de comportement

le déplacement relatif au niveau "k" par rapport au niveau "k-1" est égal à :

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

5. Le spectre propose :

Et pour notre calcul on adopte

Pour tous les types de sol on a :

$$\alpha \approx \tan \alpha = (\text{l'opposé} - \text{adjacent}) / (T_1 - 0) = 1/0.15 = \alpha$$

$$C = \text{CONSTANT}$$

$$\frac{sae}{g} = \begin{cases} \alpha T + C & 0 \leq T \leq 0.15s \\ C + 1 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ (C + 1) \frac{T_2}{T} & T \geq T_2 \end{cases}$$

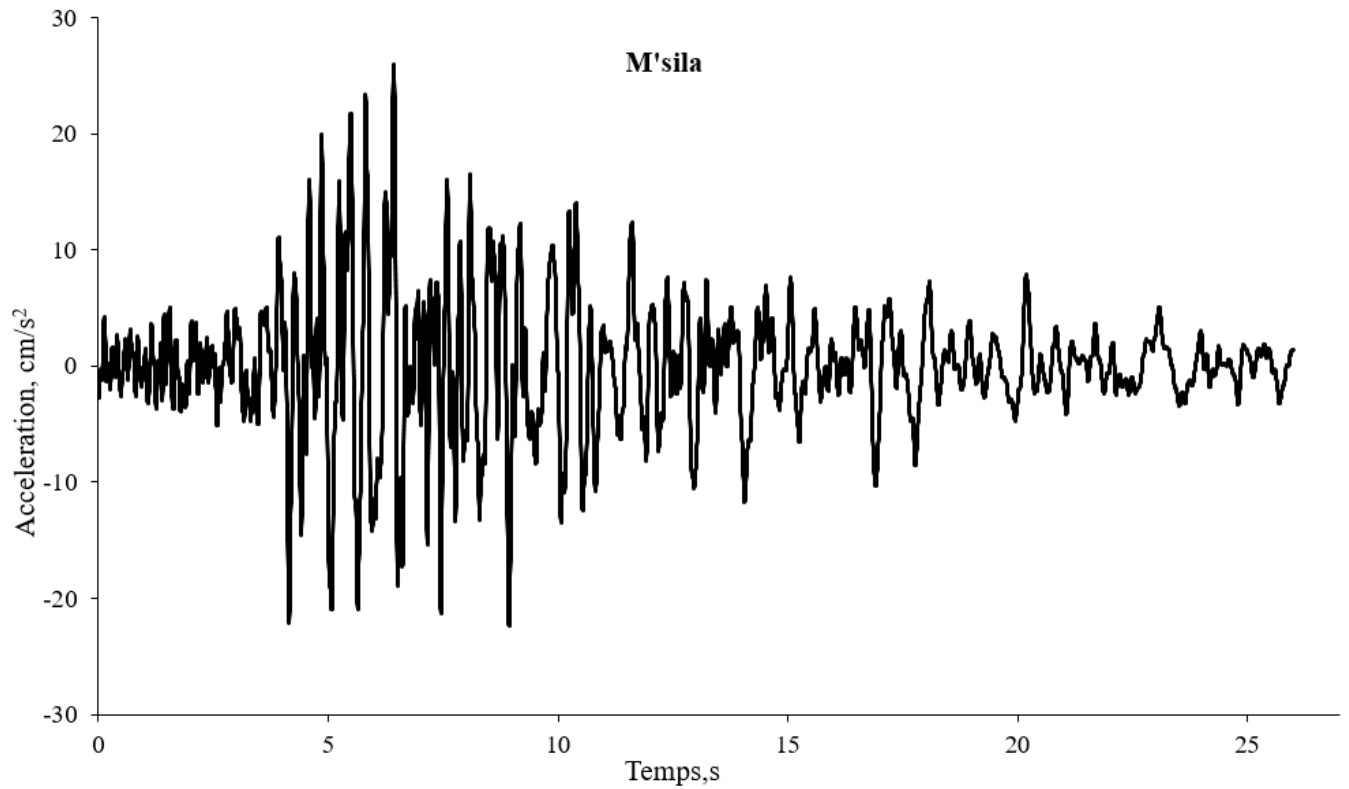
α et C sont des constantes que vous devez déterminer à partir du graphe.

CHAPITRE III

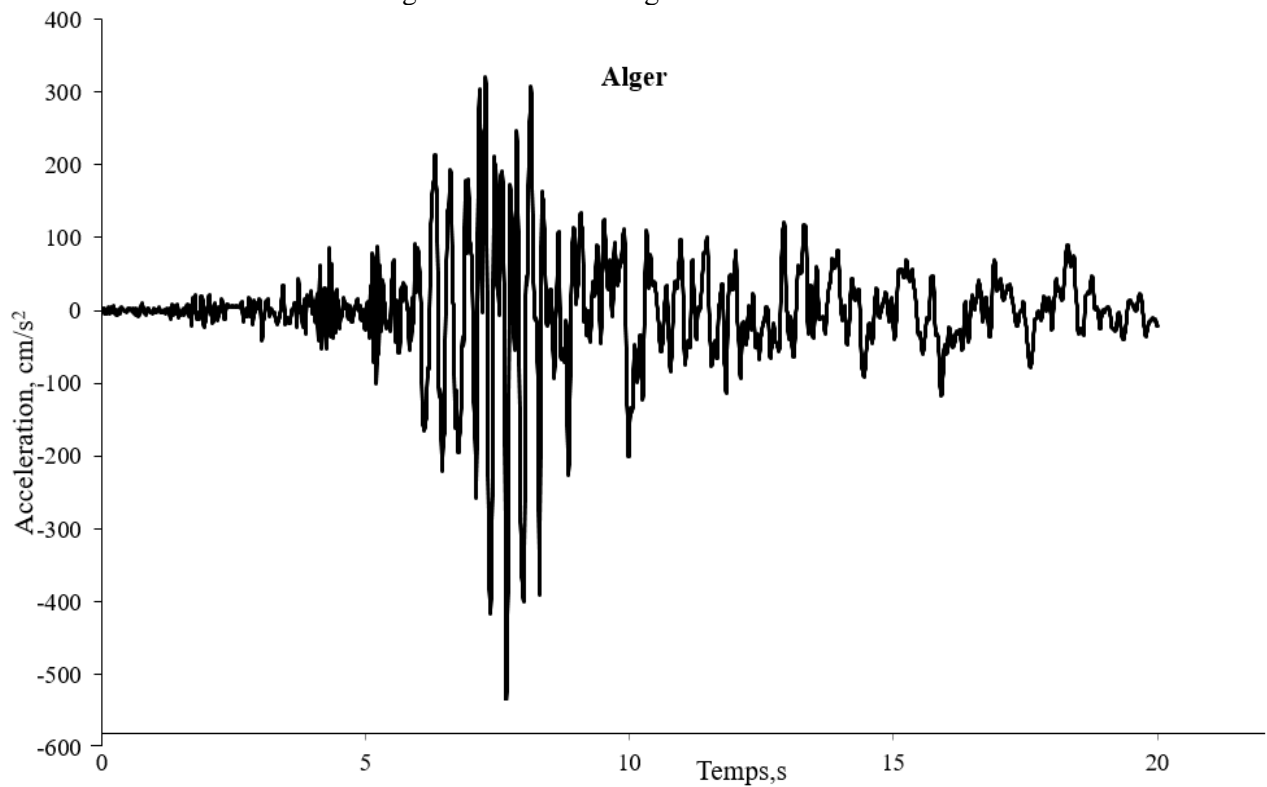
**APPLICATIONS
ET RÉSULTATS**

Intro :

Tous les calculs sont base sur des enregistrements réels des séisme dans les défirent zone sismique algérienne.



FigureIII.1 : l'accélérogrammes du Msila



FigureIII.2 : l'accélérogrammes du Alger

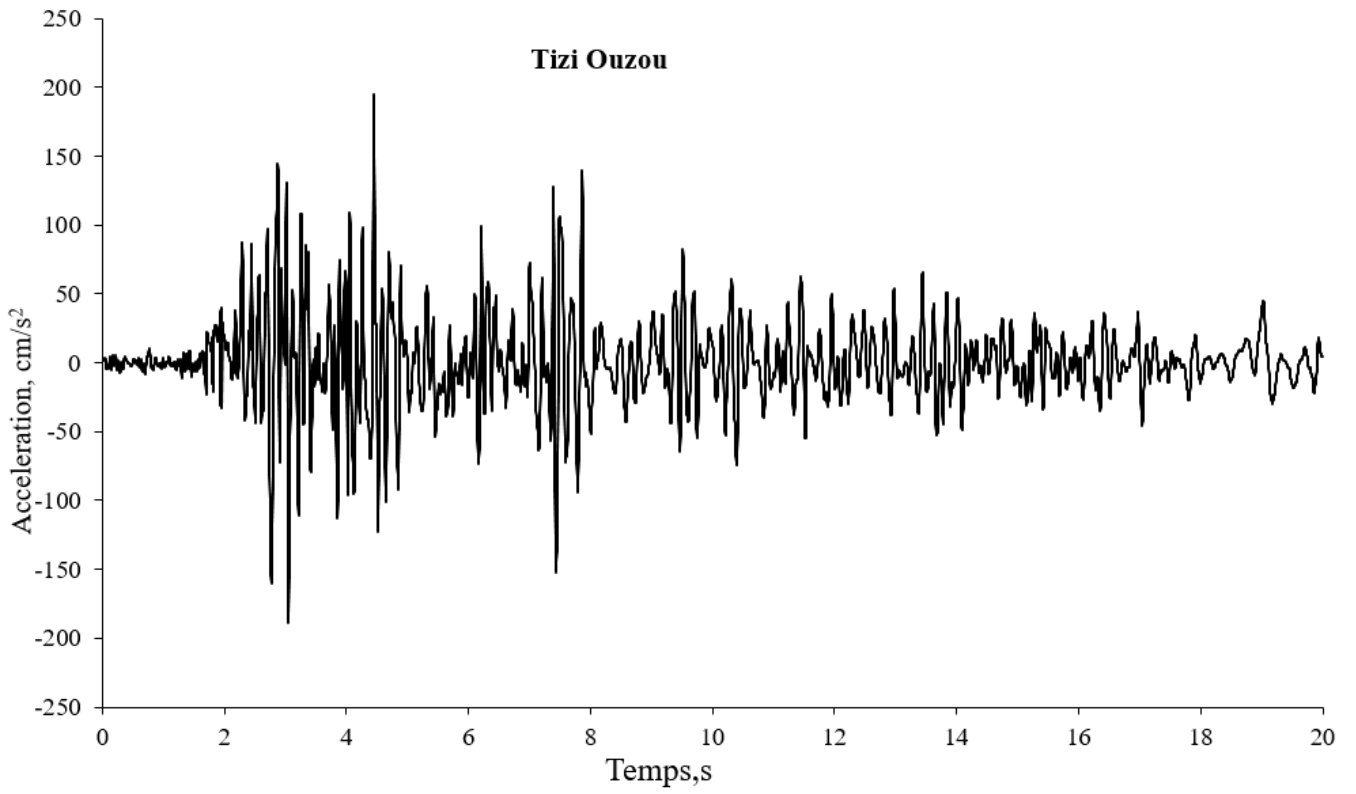


Figure III.3 : l'accélérogrammes du Tizi Ouzou

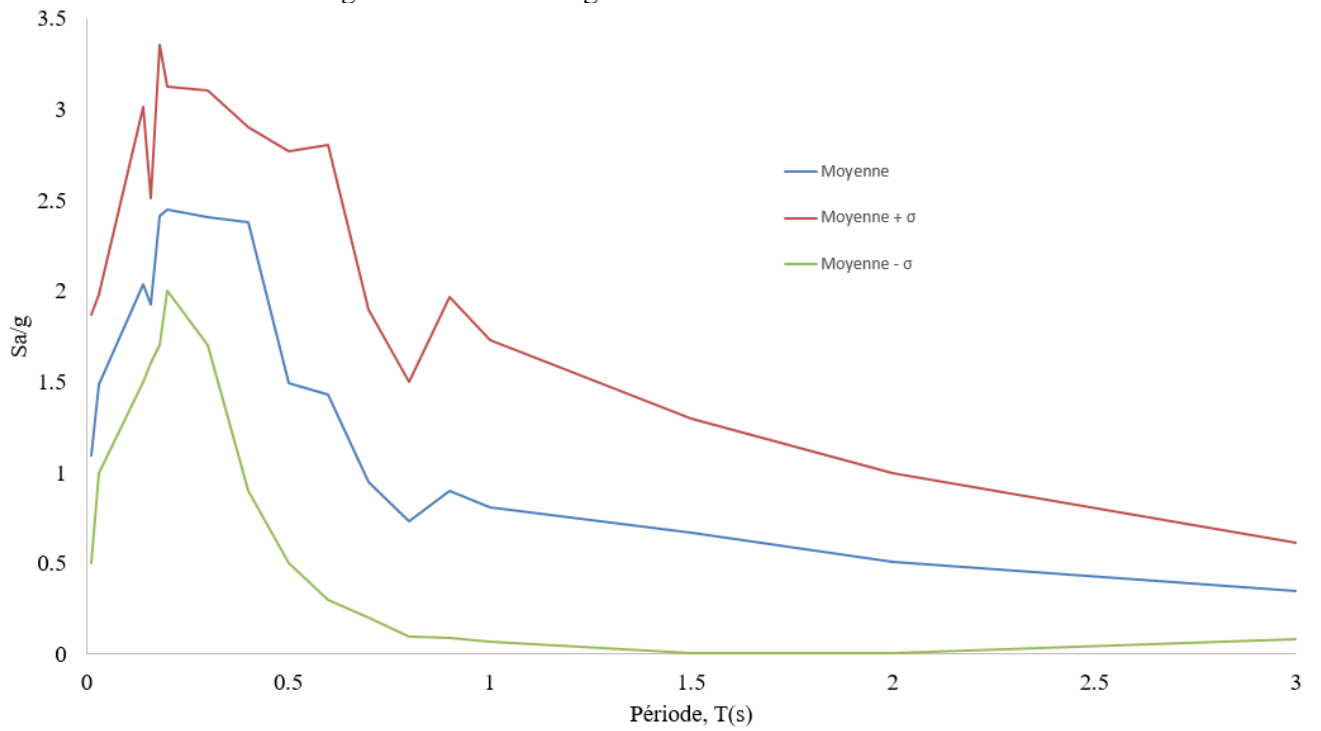


Figure III.4 : les spectre moyenne de la zone III

Le spectre élastique :

Pour la zone sismique IIa :

On a :

Pour tous les types de sol on a :

$$\alpha \approx \text{tg}\alpha = (1.3-0.6) / (T_1-0) = 0.7/0.15 = 70/15$$

$$C = 0.6 \Rightarrow C+0.7 = 1.3$$

$$\frac{Sae}{g} = \begin{cases} \alpha T + C & 0 \leq T \leq 0.15s \\ C + 0.7 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ (C + 0.7) \frac{T_2}{T} & T \geq T_2 \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.3 s) :

La pente $\alpha = 70/15$ et $C+1 = 1.3$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{70}{15}T + 0.6 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 1.3 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.39}{T} & T \geq 0.3s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.4 s) :

La pente $\alpha = 70/15$ et $C+1 = 1.3$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{70}{15}T + 0.6 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 1.3 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.52}{T} & T \geq 0.4s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.5 s) :

La pente $\alpha = 70/15$ et $C+1 = 1.3$

$$\text{Donc } \frac{S_{ae}}{g} = \begin{cases} \frac{70}{15}T + 0.6 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 1.3 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.65}{T} & T \geq 0.5s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.7 s) :

La pente $\alpha = 70/15$ et $C+1 = 1.3$

$$\text{Donc } \frac{S_{ae}}{g} = \begin{cases} \frac{70}{15}T + 0.6 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 1.3 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.91}{T} & T \geq 0.7s \end{cases}$$

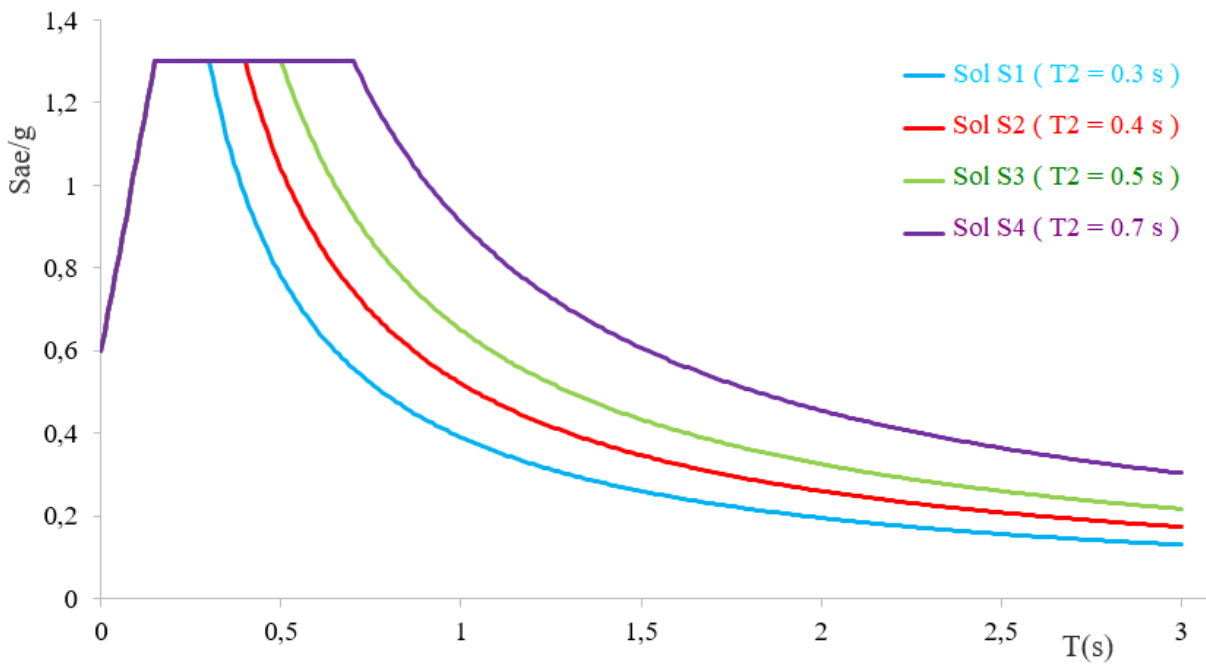


Figure III.5 : le spectre proposé

Pour la zone sismique IIb :

On a :

Pour tous les types de sol on a :

$$\alpha \approx \frac{2-1}{(T1-0)} = 1/0.15 = 100/15$$

$$C = 1 \Rightarrow C+1 = 2$$

$$\frac{Sae}{g} = \begin{cases} \alpha T + C & 0 \leq T \leq 0.15s \\ C + 1 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ (C + 1) \frac{T_2}{T} & T \geq T_2 \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.3 s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et $C+1 = 2$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.6}{T} & T \geq 0.3s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.4 s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et $C+1 = 2$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.8}{T} & T \geq 0.4s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.5 s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et $C+1 = 2$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{1}{T} & T \geq 0.5s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.7 s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et $C = 2$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{1.4}{T} & T \geq 0.7s \end{cases}$$

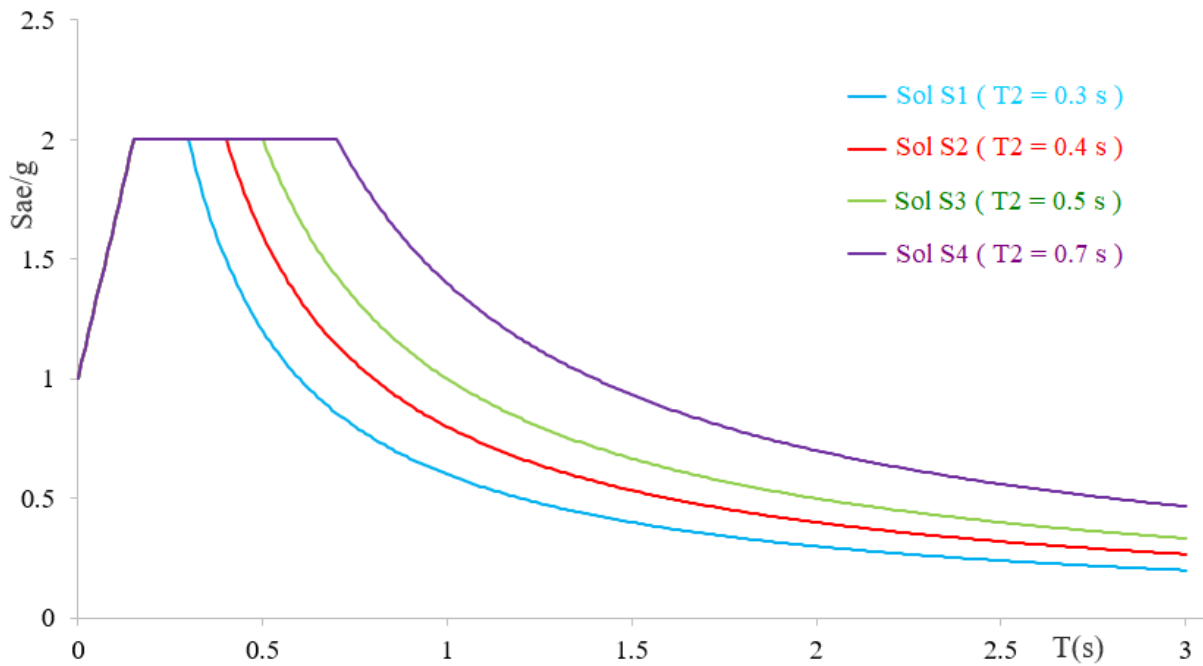


Figure III.6 : le spectre proposé

Pour la zone sismique III :

On a :

Pour tous les types de sol on a :

$$\alpha \approx \operatorname{tg} \alpha = (2.5 - 1.5) / (T_1 - 0) = 1 / 0.15 = 100 / 15$$

$$C = 1.5 \Rightarrow C + 1 = 2.5$$

$$\frac{Sae}{g} = \begin{cases} \alpha T + C & 0 \leq T \leq 0.15s \\ C + 1 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ (C + 1) \frac{T_2}{T} & T \geq T_2 \end{cases}$$

Pour ($T_2 = 0.3$ s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et $C + 1 = 2.5$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15} T + 1.5 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2.5 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{0.75}{T} & T \geq 0.3s \end{cases}$$

Pour ($T_2 = 0.4$ s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et $C + 1 = 2.5$

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1.5 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2.5 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{1}{T} & T \geq 0.4s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.5 s) :

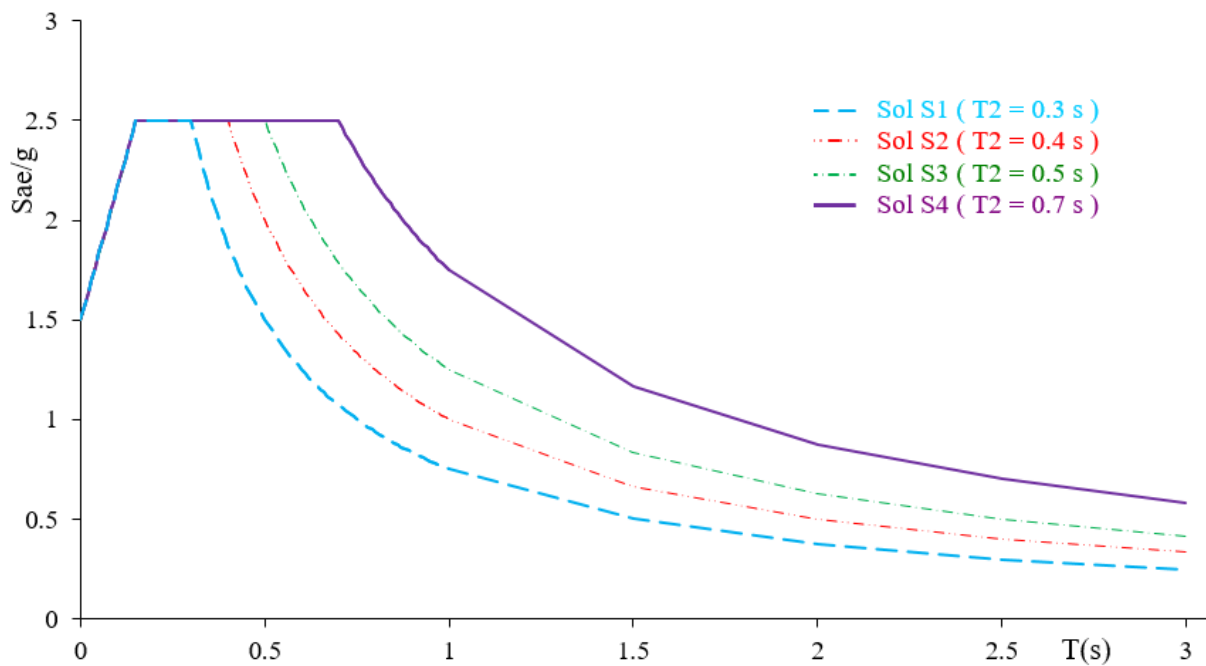
La pente $\alpha = 100 / 15$ et C+1 = 2.5

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1.5 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2.5 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{1.25}{T} & T \geq 0.5s \end{cases}$$

Pour (T2 = 0.7 s) :

La pente $\alpha = 100 / 15$ et C+1 = 2.5

$$\text{Donc } \frac{Sae}{g} = \begin{cases} \frac{100}{15}T + 1.5 & 0 \leq T \leq 0.15s \\ 2.5 & 0.15s \leq T \leq T_2 \\ \frac{1.75}{T} & T \geq 0.7s \end{cases}$$



FigureIII.7 : le spectre proposé

Le spectre inélastique :

$$\frac{S_a}{g} = C_i \cdot \frac{S_{ae}}{g}$$

Avec

$$C_i = \frac{\eta \cdot Q}{R}$$

Donc pour

- **La zone IIa :**

Type de contreventement : Portiques autostables en béton armé avec remplissage en maçonnerie rigide

$$C_i = \frac{\eta \cdot Q}{R}$$

$$C_i = 0.9 \cdot 1.1 / 3.5 = 9.9 / 35$$

Donc

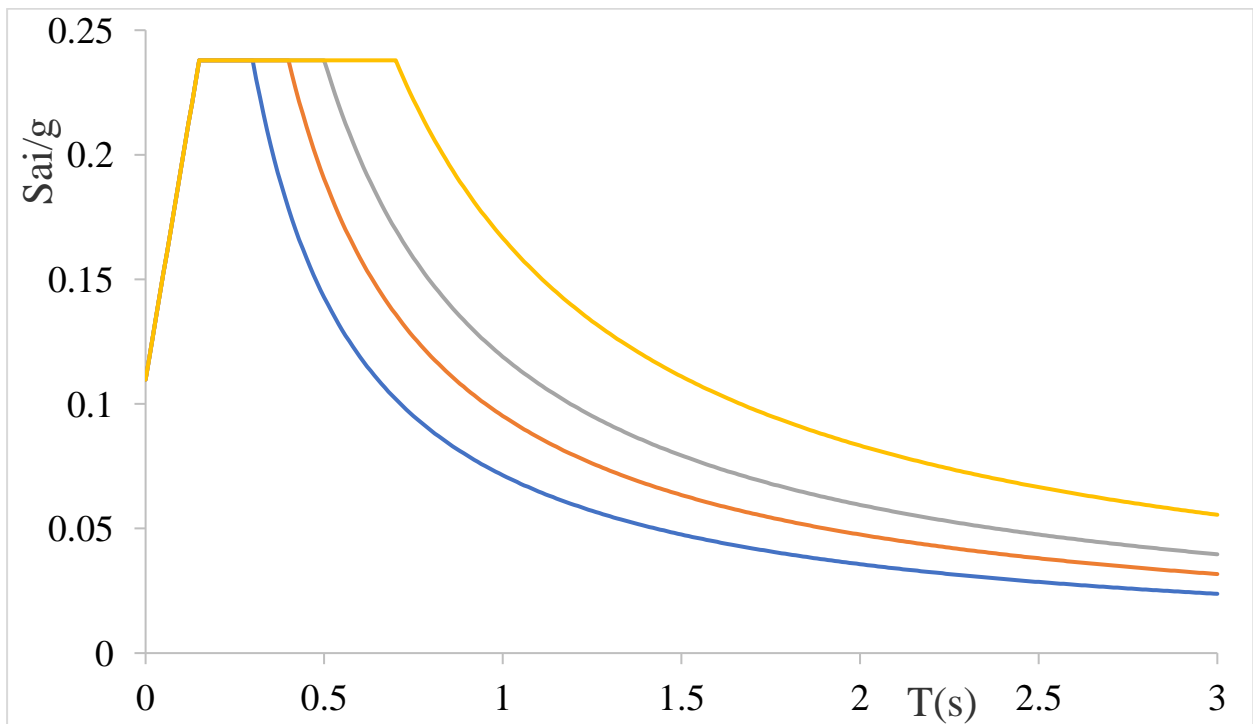
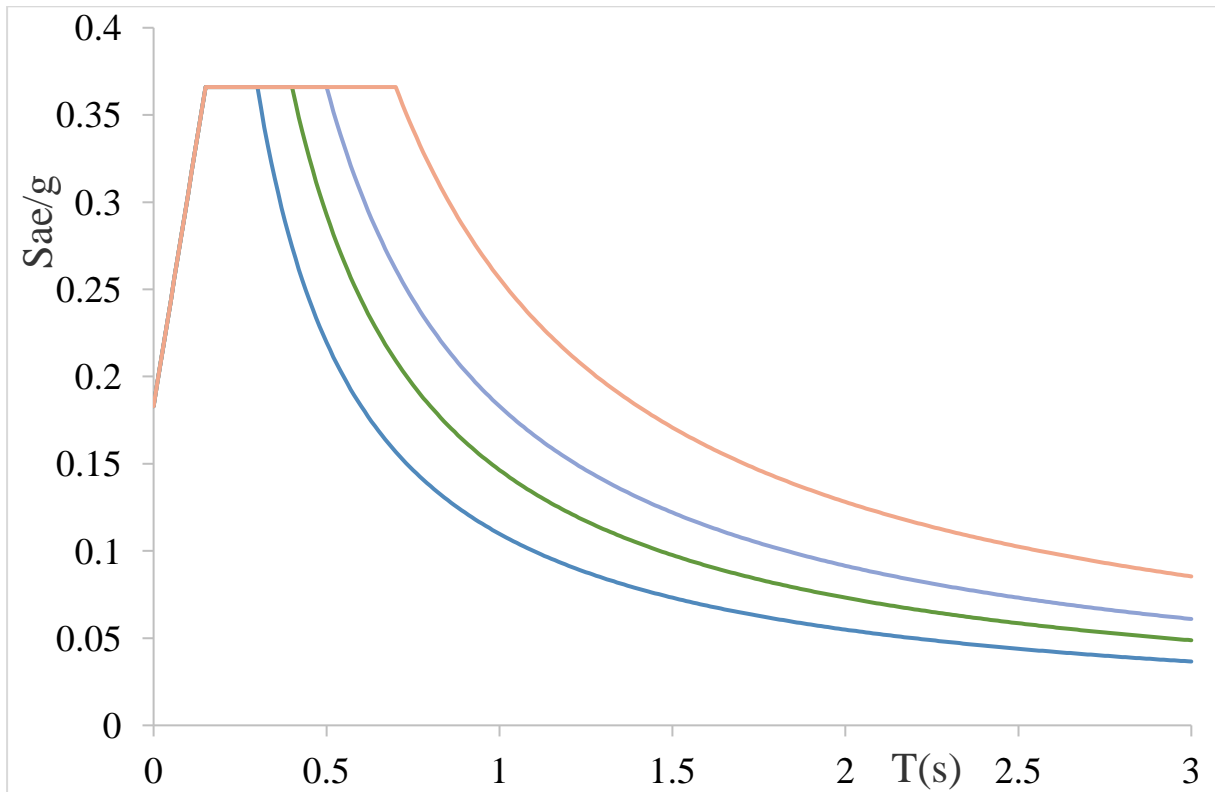


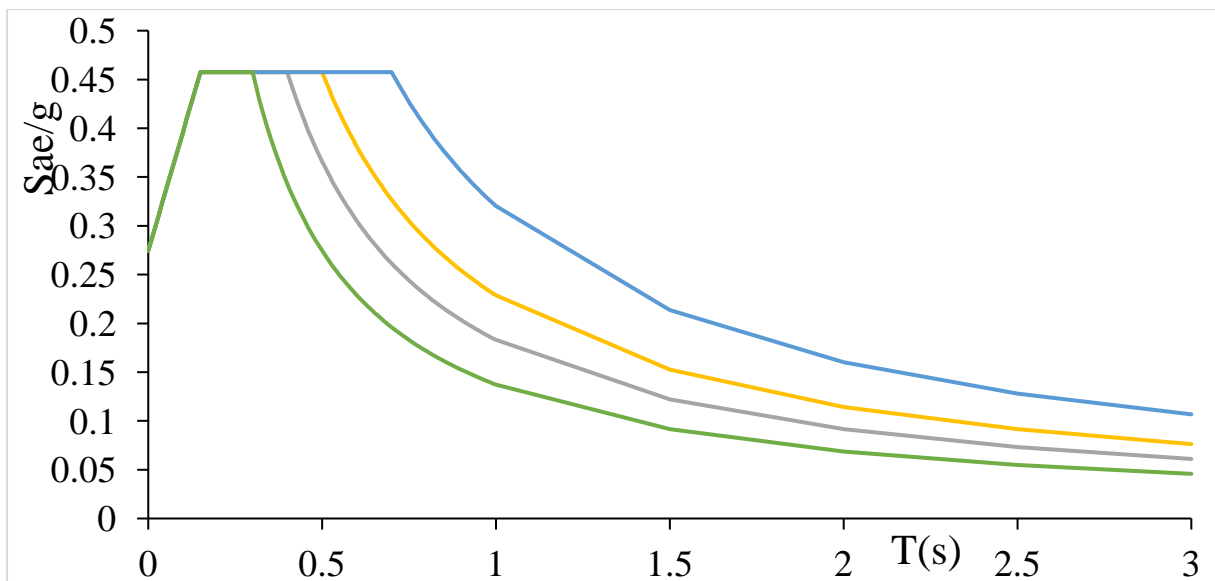
Figure III.9 : le spectre de proposé de la zone IIa inélastique

- **La zone IIb :**



FigureIII.10 : le spectre de proposé de la zone IIb inélastique

- **La zone III :**



FigureIII.11 : le spectre de proposé de la zone III inélastique

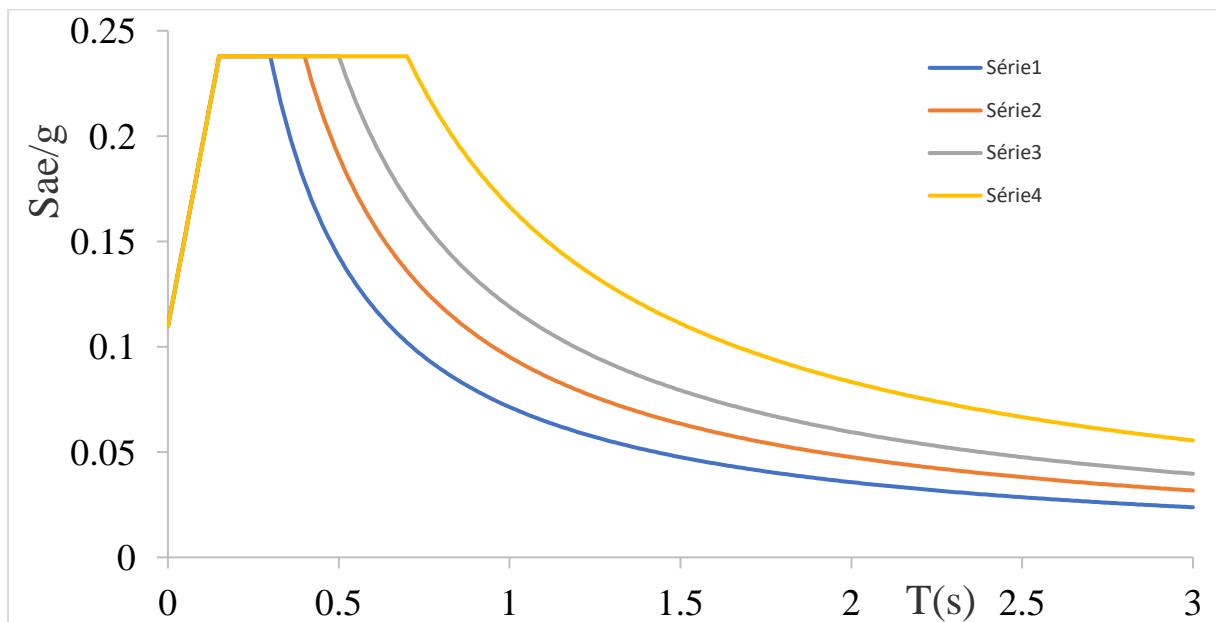
Type de contreventement : Système de contreventement mixte assuré par des voiles et des portiques avec justification d'interaction portiques -voiles

$$C_i = \frac{\eta \cdot Q}{R}$$

$$C_i = 0.83 \cdot 1.1/5 = 0.183$$

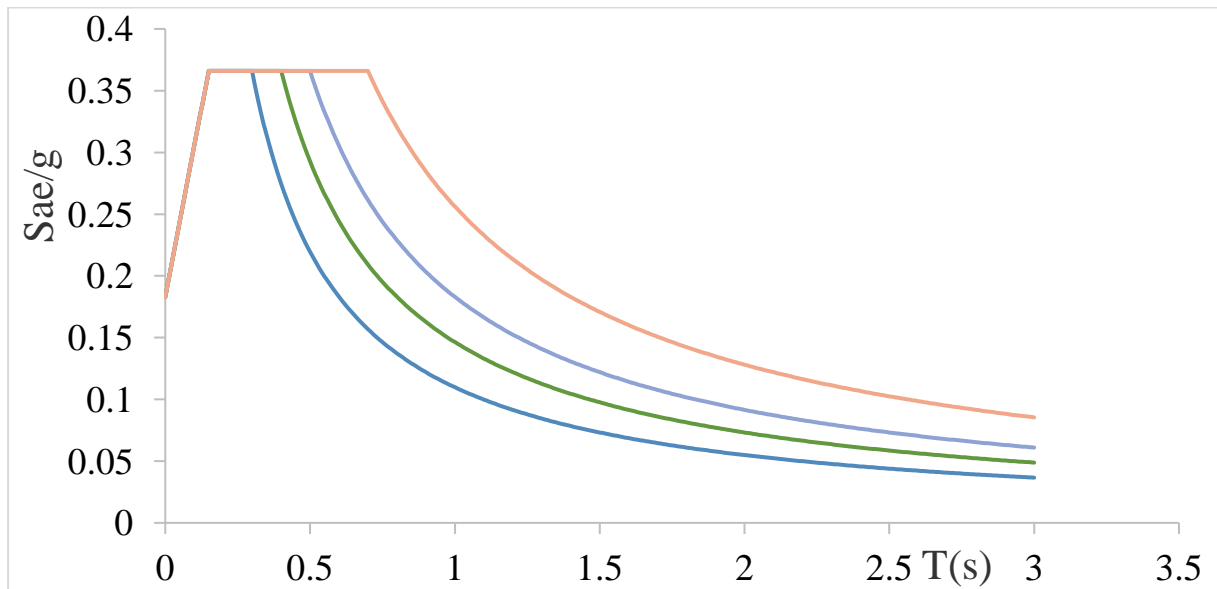
Donc

- **La zone IIa :**



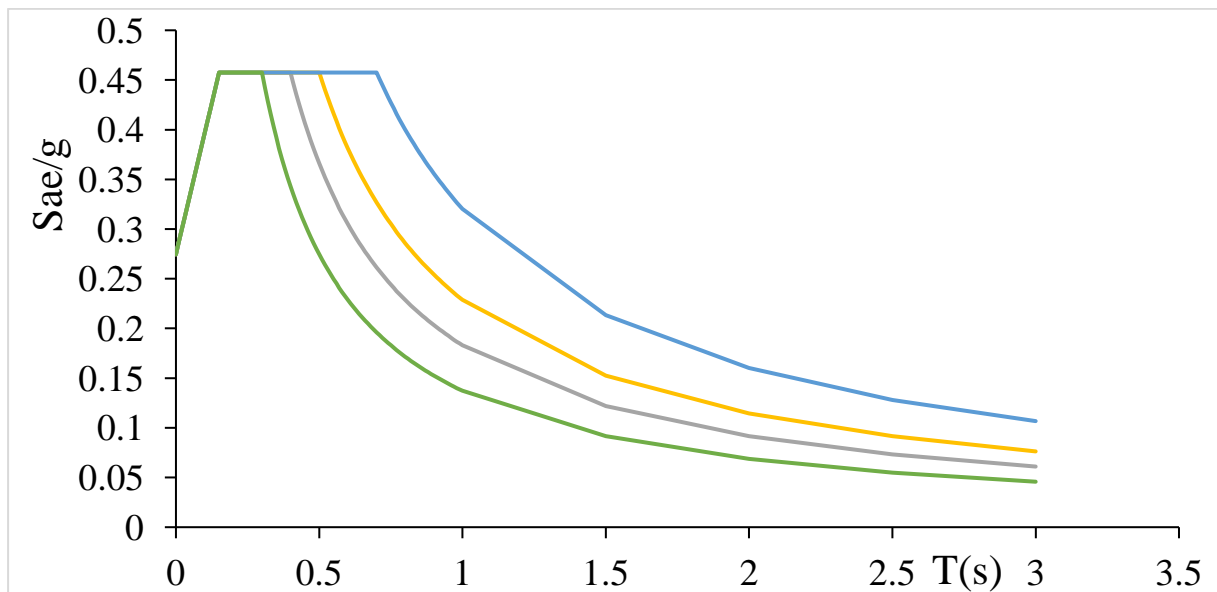
FigureIII.12 : le spectre de proposé de la zone IIa inélastique

- **La zone IIb :**



FigureIII.13 : le spectre de proposé de la zone IIb inélastique

- **La zone III :**



FigureIII.14 : le spectre de proposé de la zone III inélastique

La comparaison :

Dans cette partie nous allons comparer et analyser le spectre proposé avec le spectre de l'RPA et les spectres globaux .

Pour la zone :

Ila :

$$A = 0.25$$

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0.7 = 0.9$$

$$R = 3.5$$

$$Q = 1.1$$

Puis :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{T_1}(-0.293)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.22 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.22 \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.22 \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S1 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.3$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.293)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.22 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.22 \left(\frac{0.3}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.047 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S2 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.4$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.293)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.22 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.22 \left(\frac{0.4}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.0574 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S3 :

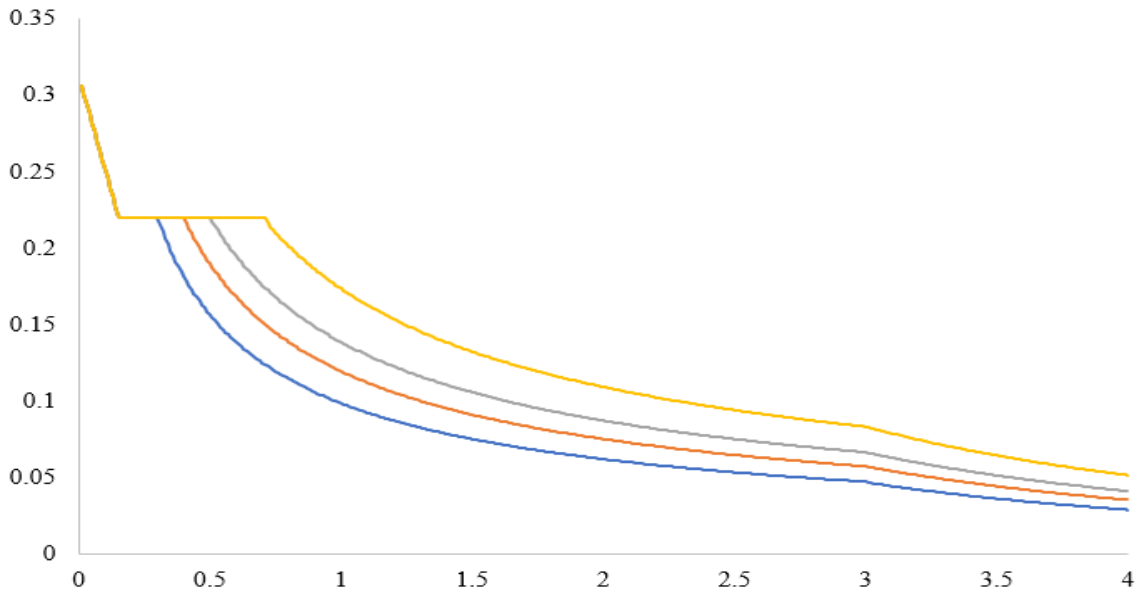
$$T_1=0.15 \quad T_2=0.5$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.293)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.22 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.22 \left(\frac{0.5}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.0666 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S4 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.7$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.293)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.22 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.22 \left(\frac{0.7}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.0834 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$



$$A = 0.25$$

$$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} \geq 0.7 = 0.83$$

$$R = 5$$

$$Q = 1.1$$

Puis :

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{T_1}(-0.544)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.14 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.14 \left(\frac{T_2}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.14 \left(\frac{T_2}{3}\right)^{2/3} \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S1 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.3$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.544)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.14 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.14 \left(\frac{0.3}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.03 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S2 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.4$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.544)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.14 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.14 \left(\frac{0.4}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.04 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S3 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.5$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.544)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.14 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.14 \left(\frac{0.5}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.042 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

Pour S4 :

$$T_1=0.15 \quad T_2=0.7$$

$$\frac{S_a}{g} = \begin{cases} 0.3125(1 + \frac{T}{0.15}(-0.544)) & 0 \leq T \leq T_1 \\ 0.14 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 0.14 \left(\frac{0.7}{T}\right)^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 0.053 \left(\frac{3}{T}\right)^{5/3} & T \geq 3s \end{cases}$$

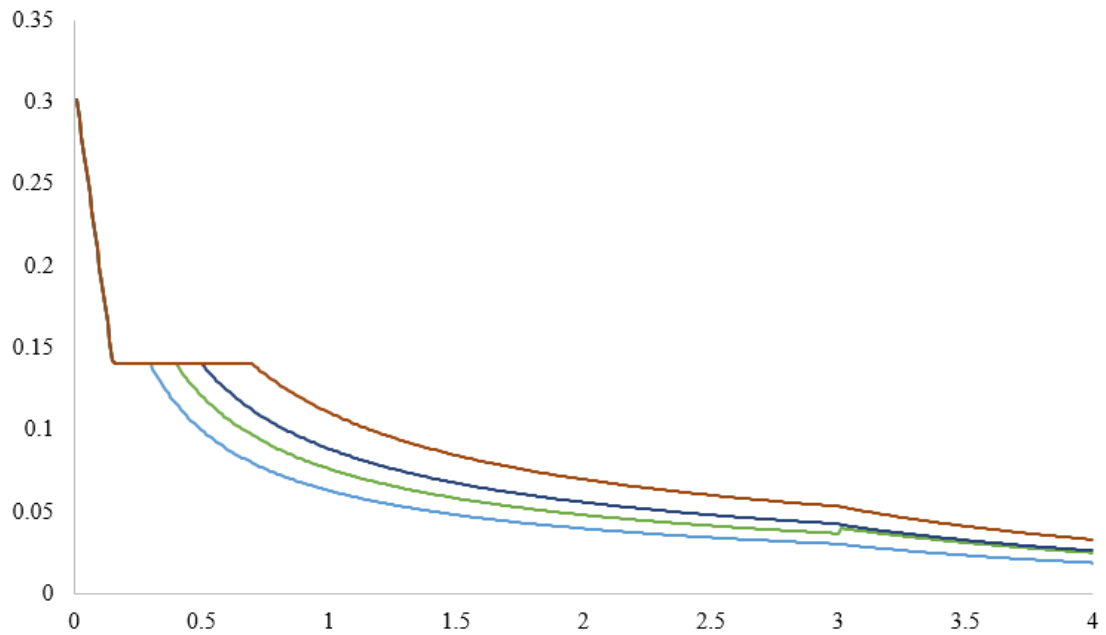


Figure III.8 : le spectre de IRPA

En fin en déterminé un spectre avec des caractéristiques mondial et plus proche a les autres spectres « EC8, FEMA356 » que le spectre de l'RPA

T(s)	RPA	Proposé	EC8	FEMA 356
0	0.31	0.28	0.2	0.2
0.08	0.25	0.37	0.36	0.5
0.1	0.23	0.4	0.4	0.5
0.15	0.19	0.46	0.5	0.5
0.3	0.19	0.46	0.5	0.5
0.4	0.19	0.46	0.5	0.5
0.5	0.17	0.3	0.5	0.4
0.7	0.13	0.2	0.43	0.285714
1	0.11	0.12	0.3	0.2
1.5	0.08	0.08	0.2	0.133333
2	0.07	0.06	0.15	0.1
2.5	0.06	0.05	0.12	0.08
3	0.05	0.04	0.1	0.066667

Tableau III.1 :la comparaison les valeurs finales de spectre proposé

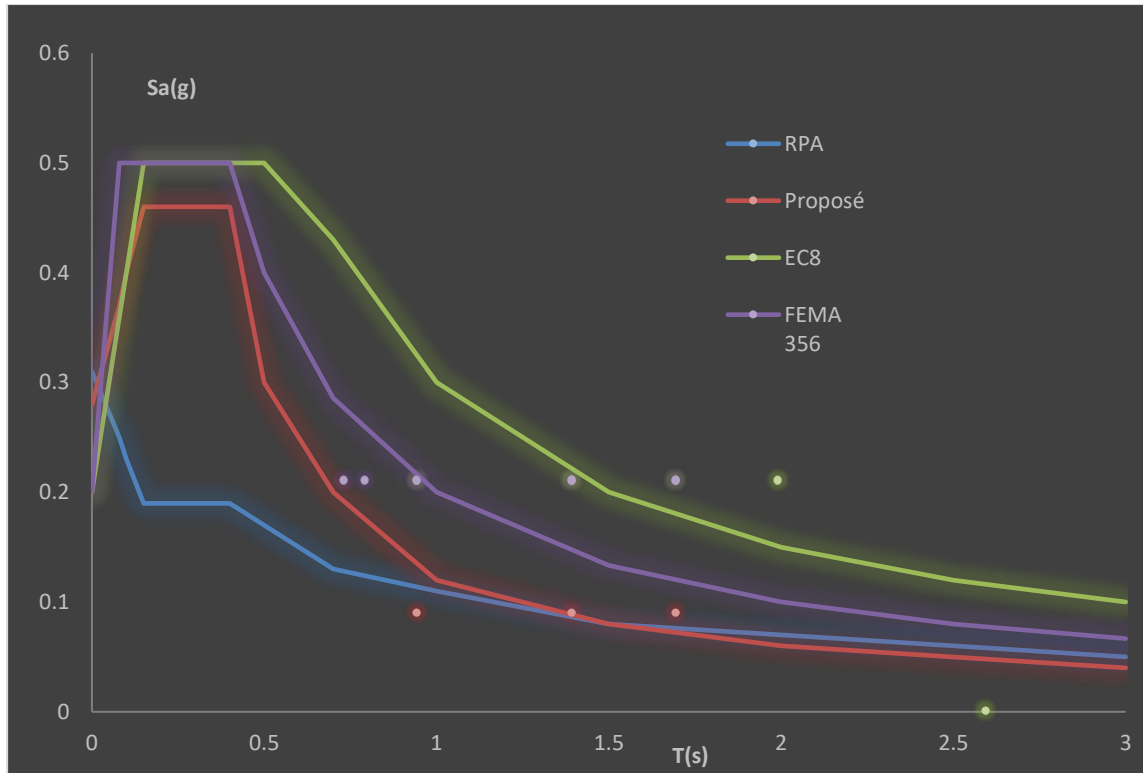


Figure III.14 : la comparaison de spectre proposé avec les spectres mondial

Analyse :

Il existe de nombreuses différences entre les quatre spectres, dont les suivants :

- Le spectre propose est le plus proche que le spectre de l'RPA au les spectres mondiaux.
- Dans la période de 0 au 0.15s les spectres de l'RPA est le seul spectre qui décroissent par contre les autres.
- La représentation du spectre proposé est la plus proche des représentations mondiales.

Conclusion

En conclusion, on peut dire que cette étude nous a permis de nous familiariser avec la construction des spectres de réponse et qu'elle nous a surtout permis de confirmer les résultats suivants :

- le déficit du code RPA concernant la forme de la première branche du spectre de calcul qui est descendante alors qu'elle doit être ascendante et les résultats donnés par ce spectre sont relativement faibles.
- le spectre proposé est comparable aux spectres FEMA et EC8 dans des conditions similaires.
- Les équations proposées pour les spectres élastique et inélastique sont beaucoup plus simples que les formules RPA.

Nous estimons donc que les spectres proposés sont plus simples et plus réalistes.

En perspective, nous espérons que notre travail sera complété par d'autres travaux similaires afin de combler les vides et valider encore mieux les résultats, notamment par l'utilisation d'autres accélérogrammes réels ou artificiels.

