

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

BADJI MOKHTAR-ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



جامعة باجي مختار - عنابة

Promotion 2016

Faculté : Sciences de L'ingéniorat
Département : Génie Civil

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de : MASTER

Intitulé

**SECTION ET ETALONNAGE DES
ACCELOGRAMMES POUR L'ANALYSE NON
LINEAIRE**

Domaine : Sciences et Technologies
Filière : Génie Civil
Spécialité : Structure

Par : BOUGUETTOUCHA AMIRA
CHAOUI IMEN

DIRECTEUR DE MEMOIRE : MR.GOUASMIA ABD ELHACINE

Remerciements

Toute notre gratitude, grâce et remerciement vont à dieu le tout puissant d'accorder notre travail avec succès et conciliation.

Nous remerciant vivement notre encadreur le professeur monsieur GOUASMIA qui était le père compatissant qui a accompagné toutes les étapes de notre modeste travail avec ses observations, son contrôle et son orientation, il corrige les erreurs, fournit des conseils et élimine les obstacles, à lui notre gratitude salutations.

À tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à élaborer ce modeste travail de fin d'étude.

Nos remerciements aussi tout la famille BOUGUETTOUCHA et tout la famille CHAOUI.

Résumé

Cette recherche présente une comparaison de différentes méthodes d'étalonnage et de sélection de secousses sismiques utilisées dans la pratique pour accomplir des analyses dynamiques non linéaires. Le but est de déterminer quelles sont les variations de magnitudes que l'on peut obtenir et qui devraient être utilisées dans la pratique. La méthode est appliquée aux accélérogrammes représentant des tremblements de terre en Algérie.

Ces accélérogrammes sont ensuite utilisés lors d'analyses dynamiques non linéaires à l'aide de structures à un degré de liberté.

Le facteur d'étalonnage à utiliser est celui permettant d'obtenir une aire égale sous les courbes. La méthode est celle visant à minimiser la moyenne du carré de l'erreur entre les logarithmes naturels des ordonnées spectrales du spectre cible et du spectre de réponse.

***Mots clés : Accélérogramme ,Spectre cible ,étalonnage .**

Abstract

This research compares different methods of calibration and selection of seismic used in practice to perform nonlinear dynamic analysis. The object is to determine the variations of magnitudes that can be obtained and which should be used in practice. The method is applied to accelerograms representative earthquakes in Algeria.

These accelerograms is subsequently used in nonlinear dynamic analysis of structures with a degree of freedom.

The calibration factor to use is to obtain an equal area under the curves. The method to minimize the mean square error between the natural logarithms of the spectral ordinates of the target spectrum and the response spectrum.

* **Keywords: Accelerogram, target spectrum, calibration.**

ملخص

هذا البحث حول مقارنة مختلف الأساليب و اختيار الاهتزازات الزلزالية المستخدمة في الواقع لإداء التحليل الديناميكي غير خطي و الهدف هو تحديد تباينات في المقادير بمعنى تحقيقها و التي يجب استخدامها و هي تمثل الهزات الارضية في الممارسة العلمية

يتم بتطبيق أجهزة المسجلة في الجزائر.

"هذه التسجيلات تستخدم في التحليل الديناميكي الغير خطي بمساعدة الهياكل و البنيات مع درجة واحدة من الحرية "

يستخدم معامل المعايرة للحصول علي مساحة متساوية تحت المنحنيات هذه الطريقة لتقليل خطئ المربع الوسطي بين اللوغاريتمات الطبيعية لتنسيق من طيف الهدف و طيف الاستجابة

* كلمات مفتاحية

التسجيلات , طيف الهدف , قياسات

Remerciements

Résumé/Abstract/ملخص

Sommaire i

Introduction générale 1

Problématique et objectifs 2

Partie I: étude Bibliographique

Chapitre 1 : Généralités sur « méthode section » et « méthode d'étalonnage » 3

I.1. Introduction 3

I.2. Caractérisation des secousses sismiques 3

I.3. Mouvement sismique 4

I.3.1. Le mouvement sismique est souvent caractérisé par 4

I.4. Méthodes de sélection 5

I.4.1. Magnitude (M) et distance (R) 6

I.5. Méthodes d'étalonnages 7

I.5.1. Introduction 7

I.4.2. Etalonnage 7

I.5.3. Méthode dite de type « Matching » 8

I.5.4. Méthode dite de type « Scaling » 9

I.6. Spectre cible 16

I.6.1. Définition par paire de valeurs spectrales 17

I.6.1. Définition par valeur spectrale unique 17

I.6.2. Désagrégation 18

I.6.3. Effet de sol 19

I.6.4. Techniques d'étalonnage 19

Partie II : partie projet

CHAPITRE 2 : Méthodes de Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures	21
II. 2.1 Introduction	21
II.2.2. Présentation temporelle du mouvement sismique	21
II.2.2. a Les accélérogrammes réels	22
II.2.2. b. Les accélérogrammes synthétiques	23
II.2.2.c. Les accélérogrammes artificiels	23
II.2.3. Accélérogrammes	24
II.2.3.1.Critères de sélection des accélérogrammes	25
a-Contenu fréquentiel	25
b-Type de sol	26
c-Durée significative	26
d-Environnement tectonique	26
II.2.3.2.Choix des accélérogrammes	27
CHAPITRE 3 : Logiciels de Sélection et étalonnage des accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures.	28
II.3.1. Seismo Artif	28
II.3.2. Seismo match	29
II.3.3. Seismo spect	30
II.3 .4. SeismoSignal	31
II.3.5. Bispec	32
II.3.6.SigmaSpectra	34
II.3.7. Accélérogrammes Algériennes pour le calcul non linéaire	35

SOMMAIRE

II.3 .7.1 Introduction	35
II.3.7.2 Historique des séismes en Algérie	35
II.3 .7.3. Accélérogramme Algérien	40
II.3 .7.4. Facteurs à considérer pour le choix d'un accélérogramme	41
II.3 .8. Accélérogrammes étudiés	42
II.3.9.Spectres de réponse	44
II.3.9.1. Spectre de réponse élastique	45
II.3.9.2. Etapes de construction d'un spectre de réponse élastique	46
II.3.10. Spectre lissé	50
II.3.11. Spectre normalisé	50
II.3.12. Spectre de capacité	51
II.3.13. Spectre inélastique	52
II.3.13.1. Elaboration des spectres de réponse inélastiques	53
II.3.13.2. Spectres de réponse utilisés	53

- **Partie logiciel :**

II.3 .14. Filtre et Correction de la ligne directrice de logiciel seismo signal	55
II.3.14.1. Erreurs dans les enregistrements	55
II.3.14.2. Filtres	55
II.3.14.3. Correction de la ligne directrice (« Baseline correction »)	57
II.3.15. Accélérogramme simulés	58
II.3.16. Conclusion	60

Chapitre 4 : Exemple d'utilisation d'un logiciel « seismo signal » pour créer des accélérogrammes synthétiques compatibles avec le spectre de réponse algérien.

II.4.1. Présentation	61
II.4.2. Résumé	61
II.4.3. Région d'Annaba	62
II.4.3.1. Spectre de repense de la région « Annaba »	63
II.4.5. Logiciel« seismo Signal »	65

SOMMAIRE

II.4.6. Utilisation de logiciel « siesmo signal »	65
II.4.7. Utilisation de logiciel « siesmo Artif »	73
Partie III : résultats et conclusions	76
III.1. Introduction	76
III.2. Accélérogramme synthétique	77
III.2.1. Analyse et commentaire	80
III.3. Les accélérogrammes artificiel	81
III.3.1 Analyse et commentaire	83
III.4. Spectre de réponse	84
III.4.1. Conclusion	85
Conclusion générale et perspective	86

LISTE DES TABLEAU

Partie II :

Tableau II.1. Les séismes d'Algérie les plus importants depuis 1365	39
Tableau II.2. Caractéristiques du séisme de Boumerdes	43
Tableau II.4.1. La zone et groupe d'Annaba d'après RPA 99	62
Tableau II.4.2. Coefficient d'accélération de zone A	62

Partie III : résultat et conclusion

Tableau III.1. Statistiques globales du spectre cible pour Annaba	83
Tableau III.2. Durée significative des accélérogrammes	83
Tableau III.3. Accélérogramme moyenne	84

LISTE DES FIGURE

Partie II :

Figure II.1. Génération des accelerogramme	29
Figure II.2. Spectre de repense	29
Figure II.3.spectre cible	30
Figure II.4. Comparaison de spectre de repense	31
Figure II.5 .Les séismes d'Algérie les plus importants (de 1365 à 2003)	36
Figure II.6. Exemple d'accélérogramme (en cm/s^2)	40
Figure II .7.Enregistrement Boumerdes	42
Figure II.8. Enregistrement a Azazga	42
Figure II.9.Spectre de réponse en accélération	45
Figure II .10.Caractéristiques du système à un seul degré de liberté	47
Figure II .11.Construction d'un spectre de réponse élastique sous l'action D'un séisme	48
Figure II .12.Spectre de calcul (ou spectre de code). T_b et T_c sont les périodes de transition	49
Figure II.13.spectre lisse	50
Figure II.14. Spectre normalisé	51
Figure II.15.conversion accèlèrogramme-spectres de réponse	54
Figure II.16. Accélération, Vitesse et déplacement du séisme à filtre $F_c = 0.10$ Hz en noir et non filtré en gris	56
Figure II.17. Vitesse en fonction du temps de l'enregistrement du tremblement de terre avant et après la correction de la ligne directrice.	57

Figure II.4.1. Logiciel RPA 99 version 2003	63
Figure II.4.2. Les valeurs du spectre du repense	64
Figure II.4.3. Paramètre de seismo signal	66
Figure II.4.3. Les graphs et les tableaux de série De temps	67
Figure II.4.5. Correction de la ligne directrice et de filtrage	68
Figure II.4.6. Correction de la série de temps	69
Figure II.4.7. Correction « fourier and power spectra »	70
Figure II.4.8. Spectre élastique accélération en fonction période	71
Figure II.4. 9. spectre de repense inélastique	72
Figure II.4. 10 paramètres de mouvement du sol	73
FigureII.4.11. logeciel siesmo Artif	75
 Partie III :resultat et conclusion	
Figure III.1. Accélérogramme synthétique n°1	77
Figure III.2. Accélérogramme synthétique n °2	77
Figure III.3 .Accélérogramme synthétique n °3	78
Figure III.4.Accélérogramme synthétique n °4	78
Figure III.5. Accélérogramme synthétique n °5	79
Figure III.6. Accélérogramme synthétique n °6	79
Figure III.7. Accélérogramme synthétique n °7	79
Figure III.8. Accélérogramme artificiel n°1	81
Figure III.9. Accélérogramme artificiel n°2	81
Figure III.10. Accélérogramme artificiel n°3	81
Figure III.11. Accélérogramme artificiel n°4	81
Figure III.12. Accélérogramme artificiel n°5	82

Figure III.13. Accélérogramme artificiel n°6	82
Figure III.14. accélérogramme artificiel n°7	82
Figure III .15.Les sept spectre de repense obtenue	85

INTRODUCTION GENERALE

Généralités :

Lors de la conception des systèmes résistant aux charges sismiques, l'ingénieur opte habituellement, en raison de sa simplicité, pour une analyse par la méthode statique équivalente. Certaines structures ne peuvent pas être soumises à ce type d'analyse, car le Code européens EC8 indique que, pour y avoir droit, la structure doit respecter certaines conditions. Par exemple, la structure ne doit pas présenter d'irrégularités de masse et de rigidité et ne doit pas dépasser 60m de haut.

Les structures ne répondant pas à ces critères doivent être soumises à une analyse dynamique de type spectrale. Dans certains cas il est nécessaire d'effectuer des analyses transitoires linéaires ou non linéaires. Les analyses transitoires doivent être effectuées par un logiciel qui utilisera des accélérogrammes spécifiés par l'utilisateur et les appliquera à la structure. Lors d'une analyse non linéaire le logiciel utilisé affichera, par la suite, des données relatives aux dommages structuraux. Les secousses sismiques sélectionnées doivent correspondre à un spectre de réponse sismique compatible avec le spectre cible du code. Les critères de compatibilités spectrales et les techniques d'étalonnage sont abordés plus en détail dans la revue de littérature et constituent l'objet de recherche du présent mémoire qui est orienté vers l'évaluation du comportement sismique des structures localisés dans Algérie.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Problématique et objectifs :

Afin d'obtenir des secousses sismiques compatibles avec le spectre cible, de nombreuses méthodes d'étalonnage ou de modification spectrale d'accélérogrammes (« spectral matching ») ont été recommandées dans la littérature. L'ingénieur a donc l'embaras du choix quant à celle qu'il désire utiliser, sachant que ce choix a une influence bien évidente sur la réponse de la structure.

Habituellement, chaque méthode a des côtés positifs, des côtés négatifs et des limitations. Il est donc primordial d'identifier ces aspects pour chaque méthode d'étalonnage lors de la Comparaison des réponses sismiques avec une base de données de référence afin d'identifier lesquelles sont à recommander ou à proscrire selon les situations.

Ce mémoire vise principalement à contribuer au développement de lignes directrices afin d'aider l'ingénieur lors de la sélection et de l'étalonnage d'accélérogrammes pour des fins d'analyses dynamiques non linéaire de structures localisées dans Algérie.

Plus spécifiquement, le premier objectif est de sélectionner et comparer les caractéristiques des accélérogrammes à partir de banques de données de signaux historiques et simulés selon la désagrégation (Magnitude-Distance-Sol). Par la suite, il s'agit de comparer plusieurs méthodes d'étalonnage existantes entre elles à l'aide d'indicateurs de dommage potentiel, de systèmes à un degré de liberté ainsi qu'avec deux systèmes à plusieurs degrés de liberté et de déterminer quelles méthodes sont à recommander. Ensuite, il est question de vérifier les avantages et les inconvénients à faire les analyses avec des groupes de 3 ou 7 jeux de secousses sismiques. Il s'agit également de vérifier s'il est possible de diminuer le nombre d'accélérogramme de ces groupes en utilisant des méthodes d'étalonnage spectral élaborées définies par des transformations appliquées dans le domaine des fréquences (FD) ou dans le domaine du temps (TD).[1]

Partie I : Etude Bibliographique

Chapitre I : Généralité sur « Méthode de section » et « Méthode d'étalonnage »

I.1. Introduction:

L'analyse structurale de bâtiments nécessite une sélection rigoureuse de l'excitation sismique afin de représenter adéquatement les conditions sismotectoniques du site à l'étude. Lors d'analyses simplifiées, telles la méthode statique équivalente et la méthode modale du spectre de réponse, cette représentation se résume à l'utilisation d'un spectre de réponse correctement défini pour le niveau de risque désiré. Toutefois, lors d'analyses requérant des enregistrements sismiques (accélérogrammes), le processus est plus ardu. Dans un premier temps, les scénarios magnitude (M) - distance (R) contribuant le plus au risque sismique doivent être déterminés afin de guider le choix des enregistrements sismiques. Dans un second temps, les secousses sismiques choisies à partir de banques de données doivent être étalonnées sur un spectre cible afin de se conformer aux exigences légales du Code National du bâtiment. Cet étalonnage nécessite l'utilisation d'une méthode adéquate afin d'assurer la compatibilité entre le spectre de l'accélérogramme et le spectre cible. Dans le cas d'analyses considérant deux composantes sismiques, on doit aussi choisir une représentation spectrale bidirectionnelle appropriée qui servira à l'étalonnage des accélérogrammes. [2]

I.2. Caractérisation des secousses sismiques :

Plusieurs indices ont été développés afin de caractériser l'intensité, le contenu fréquentiel et la durée d'enregistrements sismiques. Certains de ces indices sont notamment utilisés comme facteur d'étalonnage. La complexité et le caractère aléatoire des sollicitations sismiques font toutefois en sorte qu'il est difficile d'utiliser une seule valeur pour décrire efficacement leur intensité. Voici quelques indices couramment utilisés.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

PGA, PGV et PGD : Ce sont respectivement les accélérations, vitesse et déplacements maximaux tels qu'enregistrés.

PGV/PGA : Cet indice est fréquemment utilisé pour caractériser l'intensité induite par différentes composantes spectrales.

1.3.Mouvement sismique

Le tremblement de terre correspond à une vibration transitoire du sol provoquée par une libération soudaine de l'énergie de déformation accumulée dans la croûte terrestre ou dans la couche sous-jacente

1.3.1. Le mouvement sismique est souvent caractérisé par :

- L'énergie E :

Pour évaluer l'énergie émise au cours d'un séisme donnée, il suffit en théorie de déterminer l'énergie contenue dans les ondes P et S enregistrées en une station, en tenant compte du mécanisme focal et des propriétés des milieux traversés. [10]

La formule qui permet de relier la magnitude à l'énergie s'écrit de la façon suite :

$$\log E_{\text{joules}} = 4,8 + 1,5 M$$

Avec M : Magnitude des séismes superficiels à partir des ondes de surface.

E : C'est énergie libérée au foyer (hypocentre).

- La Magnitude M :

La notion de magnitude a été introduite en 1935 par le sismologue américain RICHTER. Elle caractérise l'énergie libérée par la rupture de la faille dans la zone épiscopentrale.

En pratique, la magnitude d'une secousse sismique est déterminée d'après les enregistrements des mouvements du sol effectués en un certain nombre de points d'observation situés à des distances quelconques de l'épicentre.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

La magnitude est calculée soit à partir de l'amplitude du signal enregistrée par un sismomètre, soit à partir de la durée du signal lue sur le sismogramme.

Son calcul nécessite plusieurs corrélations tenant compte du type de sismographe utilisé, de la distance entre le séisme et la station d'enregistrement, de la profondeur du séisme, de la nature du sous-sol où se trouve la station d'enregistrement. Les corrélations permettent de calculer partout dans le monde la même magnitude pour un même séisme. [10]

- **L'intensité I** (échelle de *MERCALLI*) :

L'intensité I est mesurée par l'importance des secousses perçues, donc des dégâts occasionnés, qui seront principalement en fonction de la distance par rapport à l'épicentre et de la profondeur du foyer, mais aussi de la vulnérabilité des constructions. [10]

1.4. Méthodes de sélection :

L'utilisation d'enregistrements sismiques, en général des accélérogrammes, est nécessaire à la réalisation d'analyses dynamiques temporelles qui deviennent des outils de plus en plus utilisés dans la pratique. Toutefois, leur utilisation nécessite une sélection et un étalonnage adéquat afin qu'ils représentent efficacement les conditions de séismicité locale ainsi que le niveau de risque désiré pour réaliser l'évaluation ou la conception. Dans ce contexte, le *National Institute of Standards and Technology* a établi certaines lignes directrices, permettant d'obtenir des enregistrements conformes. Ces derniers proposent l'utilisation de la méthode d'analyse probabiliste de l'aléa sismique qui est aussi la base des normes parasismiques du *CNB 2010*. Cette approche permet de générer des équations qui tiennent compte des forts mouvements de sol (souvent référés sous l'acronyme *GMPE*) à partir de données sismiques historiques.

Ces équations relient différentes caractéristiques sismiques (magnitude, distance épacentrale, condition de sol, etc.) à l'intensité sismique attendue au site à l'étude. Concrètement, ces équations permettent de générer des courbes de probabilité de dépassement de l'accélération spectrale pour une période donnée. [2]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

1.4.1. Magnitude (M) et distance (R) :

Ces premiers critères de sélection consistent à établir des limites supérieures et inférieures de magnitudes et de distances hypo centrales correspondant aux valeurs utilisées dans la désagrégation.

Il faut ensuite faire ressortir les secousses répondant à ces critères dans des bases de données mises à la disposition des ingénieurs. Se fier seulement sur ces deux critères est de plus en plus critiqué, car la réponse d'une structure à plusieurs secousses sismiques ayant la même magnitude et la même distance hypocentrale peut être très différente d'un cas à l'autre tel que démontré dans les études de Iervolino et Cornell (2005).

La magnitude et la distance ont cependant une influence significative sur le spectre de réponse car, tel que démontré par Abrahamson et Silva (1997), plus la distance hypocentrale est grande, plus la période dominante du spectre de réponse d'un séisme augmente.

En ajoutant d'autres paramètres de sélection tels que le contenu fréquentiel de la secousse, le type de sol et la durée significative, il est possible d'obtenir une sélection plus éclairée.

Cependant, la sélection n'utilisant que la magnitude et la distance comme critères est pratique courante, car elle est très facile d'utilisation.

Le plus utilisé de ces spectres est sans doute le *Uniform Hazard Spectral (UHS)* spectre qui est construit en calculant, pour une probabilité de dépassement fixe, une intensité spectrale pour chaque période utilisée dans l'analyse probabiliste. le *UHS* est une approximation conservatrice du risque sismique surtout pour les niveaux de sismicité très élevés, car il est très improbable que ces fortes valeurs spectrales soient présentes pour l'ensemble des périodes dans un même séisme.

D'un autre côté, les *GMPE* permettent aussi de générer le *Conditional Mean Spectra (CMS)*. Celui-ci conditionne les valeurs d'accélération spectrales sur une seule période qui est spécifiée par l'utilisateur du spectre. [1]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Pour les autres périodes, une valeur moyenne du spectre d'accélération est ensuite calculée. L'utilisation de ce spectre permet de mieux conserver les caractéristiques du séisme original lors de l'étalonnage. Certains chercheurs (Al Atik & Abrahamson, 2010) ont aussi permis d'améliorer le CMS en quantifiant la variabilité issue de ce spectre. Ce spectre est connu sur le nom de Conditional Spectra (CS). On note aussi que bien que sécuritaires le CMS et le CS donnent des résultats moins conservateurs que le UHS.

1.5. Méthodes d'étalonnages :

1.5.1. Introduction :

Plusieurs méthodes ont été proposées afin d'étalonner les accélérogrammes pour que leur spectre soit compatible avec un spectre de dimensionnement (généralement fourni par une législation quelconque). Parmi ces méthodes, on retrouve deux grandes familles; le "scaling" et le "matching". La première consiste en l'application d'une valeur scalaire à l'ensemble de l'accélérogramme afin de faire concorder, dans la mesure du possible, les deux spectres. Cette technique permet de conserver intégralement la forme spectrale de l'enregistrement initial. Dans le second cas, on modifie la forme spectrale, soit dans le domaine du temps ou dans le domaine des fréquences, afin d'obtenir une correspondance entre le spectre de l'enregistrement et le spectre cible. Bien que certains chercheurs aient démontré que, si effectué adéquatement, le choix de la technique d'étalonnage n'a que peu d'effets sur la réponse structurale, elle demeure une étape cruciale dans le processus d'analyses temporelles.

1.4.2. Etalonnage :

- Définition Spectral:

La présente étude utilisera trois définitions spectrales afin de caractériser la bidirectionnalité des enregistrements sismiques utilisés : les spectres originaux, le spectre moyen géométrique (GMS) et les spectres rotationnels maximaux (*MaxRot*).

- Spectres Originaux :

Ces spectres ont été créés en appliquant aux enregistrements originaux la méthode d'intégration linéaire par morceau. Les spectres ont été construits pour un amortissement de 5% sur une plage de 0 s. à 4 s. avec un pas de période de 0.

1.5.3. Méthode dite de type « Matching » :

- ***Méthode dans le domaine du temps (TD):*** Cette méthode consiste en l'ajout et la soustraction d'ondelettes à l'accélérogramme original. Si elles sont choisies adéquatement, ces ondelettes permettent un étalonnage adéquat des spectres sans l'ajout de déplacements supplémentaires. [2]
- ***Méthode dans le domaine des fréquences (FD):*** Cette méthode s'appuie sur une décomposition du signal par une série de Fourier. Les coefficients de Fourier sont ensuite modifiés scalairement afin d'obtenir une correspondance période par période avec le spectre cible. Une transformée inverse de Fourier est ensuite réalisée afin d'obtenir l'accélérogramme modifié.

Bien qu'elles permettent en général une meilleure concordance entre le spectre de réponse de l'accélérogramme et le spectre cible, plusieurs chercheurs ont émis des doutes quant à l'utilisation de techniques de type « ***Matching*** », car elles modifient de façon significative les caractéristiques sismiques et le spectre de réponse de l'enregistrement original. Dans le cas d'analyses structurales non linéaires, il est préférable de ne pas modifier les formes spectrales de l'enregistrement original, ce qui rend ces méthodes moins attrayantes pour ce type d'analyses. Toutefois, si une telle méthode est utilisée, on recommande d'utiliser la méthode *TD*, car celle-ci conserve mieux les caractéristiques du signal original. Le *NIST* (NIST, 2011) a aussi émis certaines balises quant à l'utilisation des techniques de type « ***Matching*** », notamment afin d'éviter la présence d'impulsions de vitesse qui induisent un biais lors de l'étalonnage. On recommande aussi d'utiliser des techniques de type « ***Matching*** » avec l'UHS ou le CMS seulement à des fins.

D'évaluation d'une valeur moyenne et non de la dispersion statistique de cette valeur. De leur côté, Leger et Tremblay (2009) ont démontré que la Méthode *TD* peut être sur conservatrice pour les bâtiments avec une période fondamentale relativement faible. Ainsi, ils recommandent d'utiliser, pour des structures avec une période fondamentale sous 1.5 s, une combinaison de la méthode *FD* effectuée lâchement (avec peu d'itération et donc une correspondance spectrale approximative) en combinaison avec un étalonnage scalaire.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Pour les bâtiments avec une période fondamentale de plus de 1.5 s, on recommande d'utiliser soit la méthode TD ou soit la méthode FD effectuée lâchement.

1.5.4.Méthode dite de type « Scaling » :

- ***PGA*** : Cette méthode consiste en l'utilisation d'un facteur sur le signal initial afin que l'accélération de pointe au sol (PGA) de celui-ci corresponde à celui du spectre cible.
- ***Sa(T1)*** : Cette méthode consiste en l'utilisation d'un facteur qui permet d'égaliser la valeur spectrale du spectre de réponse, à une période précise, à celui du spectre cible à cette même période. Cette période est généralement prise comme étant la période du premier mode de vibration de la structure étudiée (T1). La méthode Sa(T1) est celle recommandée dans le commentaire J du Code National du Bâtiment 2010 (CNRC, 2010).

Cette méthode est, sans aucun doute, très précise pour un système élastique à un degré de liberté cependant, elle ne prend pas en considération les modes de vibration supérieurs qui peuvent être importants dans les structures ayant une certaine élévation. Tel que mentionné par Mehanny (1999), Alavi et Krawinkler, (2000) et Kurama et Farrow (2003), ce manquement concernant les modes supérieurs aura une influence significative sur la réponse de certaines structures. Cette méthode ne considère également pas le fait que la période T1 puisse s'allonger avec le comportement ductile d'une structure.

- ***Sla*** : Cette méthode consiste en l'application d'un scalaire au signal original qui permet d'égaliser l'aire sous le spectre de réponse entre deux périodes prédéfinies à l'aire sous le spectre cible entre

Ces deux mêmes périodes. La plage de périodes utilisée est généralement définie par des bornes permettant de regrouper assez de modes de vibration pour solliciter un certain pourcentage de masse modale effective dans chaque direction orthogonale.

Afin d'appliquer la méthode Sla, il faut, en premier lieu, déterminer entre quelles périodes l'accélérogramme sera étalonné. Une possibilité est d'utiliser les périodes 0 s et 4 s comme bornes afin de considérer toutes les périodes de vibration habituellement rencontrées cependant. [2]

Ces bornes peuvent varier dépendamment de la structure étudiée. Une fois cela fait, IL faut calculer

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

L'aire sous la courbe représentant le spectre cible ainsi que l'aire sous la courbe du spectre de réponse entre ces deux périodes sélectionnées.

- **ATK** : Cette méthode a été proposée en premier lieu pour l'étalonnage des séismes simulés générés par Atkinson (2009b). Elle consiste en le calcul du ratio de l'accélération spectrale cible (S_{target}) sur l'accélération spectrale de l'enregistrement (S_{aeq}) à chaque période sur une plage de période donnée. La valeur moyenne de S_{target}/S_{aeq} est ensuite utilisée comme facteur d'étalonnage. De plus, si l'on recherche un certain nombre d'enregistrements dans une banque de données beaucoup plus volumineuse, on peut calculer pour chacun l'écart type de S_{target}/S_{aeq} . On sélectionne ensuite les enregistrements présentant des écarts types de petites magnitudes. On recommande aussi d'utiliser différentes plages d'étalonnage pour différents scénarios sismiques (M-R). Par exemple, on utiliserait des événements de magnitude modérée à petite distance pour une plage de période courte et des événements de plus grande magnitude à grande distance pour la plage de période longue.
- **MSE** : Cette méthode consiste en la minimisation, sur une plage de période donnée, du *Mean Square Error (MSE)*, un indicateur caractérisant l'écart entre l'accélération spectrale de l'enregistrement et celle du spectre cible.
- **ASCE** : La méthode issue du code de la *American Society of Civil Engineering*, demande à l'utilisateur de multiplier les spectres d'accélération originaux afin que son intégration sur une

Plage de $0.2 \cdot T$ à $1.5 \cdot T$ soit égale à l'intégration du spectre cible sur cette même plage (T étant la période fondamentale de la structure étudiée).
- **ATC** : Dans un premier temps, cette méthode demande d'étalonner chacun des enregistrements choisis afin que sa vitesse de pointe corresponde à la vitesse de pointe moyenne du groupe choisi.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Parmi ces méthodes, les méthodes *MSE*, *Sa(T)* et *Sla* ont été recommandées, car elles présentent une dispersion inférieure aux autres méthodes, peu importe si cette dispersion est évaluée sur la base d'indicateur de dommage, d'un système à un DDL ou un système à plusieurs DDL. On recommande aussi l'utilisation de la moyenne de sept accélérogrammes plutôt que l'utilisation de la valeur maximale issue de trois accélérogrammes, car on obtient des résultats beaucoup plus stables avec sept enregistrements. Beaucoup de chercheurs (Katsanos et al. 2010; Leger & Tremblay, 2009) ont aussi démontré que la méthode *PGA*, qui est utilisée dans plusieurs normes, n'est pas efficace et que son utilisation peut mener à des valeurs non conservatrices. On a aussi démontré que la méthode *ATK*, utilisée avec des séismes artificiels, génère des résultats acceptables et comparables avec ceux obtenus pour des séismes historiques. On recommande toutefois d'utiliser cette méthode en combinaison avec une présélection des enregistrements basée sur la conformité du spectre de réponse avec le spectre cible. L'efficacité de cette présélection a aussi été démontrée par Luco et Bazzurro (2007) qui ont démontré qu'il existe un biais inhérent à l'étalonnage et que celui-ci augmente en fonction de la magnitude du scalaire utilisé lors de l'étalonnage. Ainsi, une présélection permet de diminuer la valeur du scalaire d'étalonnage ce qui diminue le biais.

- **Étalonnage $T_2 - 1.2T_1$:**

Recommandée par Naumoski et al. (2004), l'étalonnage entre T_2 et $1.2 T_1$ vise à s'assurer que l'aire sous le spectre de réponse entre ces deux périodes soit égale au spectre cible sur cette même plage. Le tout permet de considérer le deuxième mode de vibration dans l'analyse tout en allongeant la période naturelle. Cette modification est justifiée, car la T_1 risque de s'allonger face au comportement non linéaire de la structure. [1]

- **Étalonnage à $Sa(T_1) - Sa(T_2)$:**

- Cette méthode, introduite par Bazzurro (1998), permet de pallier un des problèmes de la méthode.
- $Sa(T_1)$ en considérant le second mode de vibration de la structure à l'aide de $Sa(T_2)$ et du ratio.
- $Sa(T_1)/Sa(T_2)$. Ce scalaire améliore la précision de l'étalonnage qui manque cependant de précision pour les séismes de faible distance hypo centrale.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

- **Méthode SI_v :**

Le scalaire déterminé par cette méthode permet à la vitesse spectrale de la secousse d'être équivalente à la vitesse spectrale cible pour la période naturelle de réponse de la structure.

- **Méthode $SI_v - Sa(T_1)$:**

Dans ce cas, il s'agit d'appliquer le scalaire d'étalonnage FSI_v déterminé précédemment, équation 2.13, suivi d'un scalaire $FSa(T_1) \geq 1$, déterminé à l'équation 2.11, permettant de s'assurer que l'accélération spectrale soit égale ou plus élevée que le spectre de conception à la période T_1 .

Cette méthode permet d'être plus conservateur qu'avec les méthodes SI_v ou $Sa(T_1)$ appliquées individuellement.

- **Méthode Rozon 2008 :**

Cette méthode est issue du mémoire de Rozon (2008) qui traite le comportement des cadres à contreventement excentrique de faible et moyenne hauteur. Il recommande l'utilisation d'une méthode semblable à SI_a décrite dans la section 2.5.5. Cependant, la plage de périodes sur lesquels les secousses sismiques sont étalonnées est variable selon les cas :

S'il s'agit d'une secousse de basse magnitude ($M = 6.5$) et de courte distance ($r < 20$ km), l'étalonnage doit être fait sur de courtes périodes, soit $0.2 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$ et ce, sur une plage d'au moins 0.7 s. Le choix exact de la plage revient à l'utilisateur;

Les évènements de hautes magnitudes ($M = 7.5$) et longues distances ($r > 20$ km) doivent être étalonnés sur des périodes $T > 1$ s et ce, sur une plage d'au moins 1.5 s;

Tout au long de cette plage sélectionnée, l'aire sous le spectre de réponse ne doit pas différer de plus de 5 % du spectre cible.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Sur cette même plage, l'accélération spectrale (g) ne doit pas s'éloigner de plus de 40 % de l'accélération cible;

L'écart entre le spectre de réponse et le spectre cible doit être minimisé.

- **Méthode ASCE 2005 :**

La méthode ASCE est celle prescrite par le code ASCE/SEI7-05 (2005) où le spectre de réponse entre $0.2 T1$ et $1.5 T1$, où $T1$ est la période naturelle de vibration de la structure, ne peut pas être inférieure au spectre cible pour chaque période $T(s)$ entre ces mêmes deux bornes. Cette méthode est également recommandée par le « International Building Code » (IBC), ICBO (2006) et par le « California Building Code » (CBC), ICBO (2007)

- **Méthode ATC 2009 :**

Cette méthode est celle présentée et recommandée par ATC (2009). Elle est constituée des deux étapes qui sont décrites ci-dessous :

Minimiser la variabilité entre les différents accélérogrammes qui est dû à la variation dans la magnitude (M), la distance (R) et les caractéristiques spécifiques de chaque site. La première étape consiste à déterminer la valeur médiane du PGV de la série d'accélérogrammes au complet. Chaque accélérogramme doit ensuite être étalonné de façon à avoir un PGV égal au PGV médian.

- Prendre en considération le spectre cible ainsi que la période de vibration naturelle de la structure étudiée, $T1$. Il faut déterminer l'accélération spectrale cible du code pour la période $T1$, puis l'accélération du spectre de réponse pour chacune des secousses. Tel qu'indiqué, la deuxième étape ne génère qu'un seul facteur qui est appliqué à l'ensemble des secousses sismiques. [1]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

- **Méthode LS :**

Le projet SAC, mené par Somerville et al. (1997), propose l'utilisation d'une autre méthode d'étalonnage nommée « least squares – LS ». Il s'agit de déterminer un seul facteur scalaire utilisé sur toute la série de secousses.

Ce facteur doit être tel qu'il minimisera la somme des carrés des erreurs entre le spectre cible et les spectres de réponse de chaque accélérogrammes selon le poids associé à chacune de ces périodes de vibration. Les poids utilisés sont 0.1, 0.3, 0.3 et 0.3 pour respectivement $T = 0.3$ s, 1.0 s, 2.0 s, 4.0 s.

- **Méthode Mean Square Error :**

Méthode utilisée par la base de données de PEER et détaillée dans le rapport technique PEER (2010a), le « Mean Square Error » (MSE) signifie la moyenne du carré de l'erreur entre les logarithmes naturels du spectre cible et du spectre de réponse. Il s'agit en fait de trouver le facteur d'étalonnage qui minimisera cette erreur. L'axe T , représentant la période du spectre, est subdivisé en un grand nombre (T_i) également espacé selon $\ln(T)$.

- **Méthode Modal Push over:**

La méthode du « Modal Pushover » (MP) (Kalkan et Chopra 2010) est la méthode la plus compliquée à appliquer parmi celles qui consistent à étalonner à l'aide d'un facteur scalaire. Pour l'appliquer, il faut suivre les étapes suivantes :

« Structure dont la réponse est contrôlée par le premier mode de vibration »

- Déterminer la relation de cisaillement à la base-déplacement au toit, ou la courbe de poussée latérale, « push over », non linéaire à l'aide d'une distribution des forces est la matrice des masses et le premier mode.
- Déterminer le facteur de plastification-réduction de résistance R_y déterminé par l'équation :

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

$$R_y = M^* / V_{bly}$$

Ou M_1^* : représente les masses modales effective.

V_{bly} : est la limite élastique en cisaillement

- Déterminé à l'aide de la courbe de poussée latérale.
- Convertir la courbe de poussée latérale à la relation force-déformation du

Premier mode de vibration inélastique.

- Pour le premier mode de vibration non linéaire, déterminer la déformation cible est l'accélération spectrale au premier mode de vibration et est une valeur empirique détaillée par Kalkan et Chopra (2010).

- Calculer la différence entre la déformation cible et la déformation maximale.
- Déterminer la déformation maximale du premier mode de vibration
- Déterminer le facteur d'étalonnage ; Ce processus recuire des itérations des étapes.

« **Structure dont la réponse est contrôlée par plusieurs modes de vibration** »

- Déterminer les déformations cible des modes supérieurs de vibration en les considérants comme élastiques.

- Déterminer la déformation maximal.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

1.6. Spectre cible:

Le spectre cible est la représentation spectrale des accélérations absolues auxquelles une structure doit être en mesure de résister en illustrant l'accélération $S_a(T)$ en fonction des périodes de vibration, T . Il change d'une région à l'autre en fonction des sols et de l'aléa sismique.

Jayaram et al. (2011) proposent un algorithme de sélection de secousses sismiques qui prend en considération le spectre cible recherché. Il vise à obtenir des secousses ayant une moyenne et une variance spécifiée tout minimisant la somme des erreurs au carré entre le spectre cible, S_a , et le spectre de réponse, $S_a^{(s)}$.

Certains chercheurs (Katsanos, Sextos, & Manolis, 2010) ont aussi proposé d'utiliser une combinaison de ces deux techniques afin de bien modéliser les conditions sismiques d'un site particulier.

Cette technique consiste en une première sélection selon les scénarios sismiques les plus probables (issus de la désagrégation) suivie d'une seconde sélection en fonction de la correspondance au spectre cible.

Cette même étude rappelle l'importance de la sélection selon la magnitude et la distance épacentrale. En effet, l'utilisation d'une approche probabiliste ferait en sorte de perdre la signification physique de la magnitude et de la distance épacentrale qui serait retrouvée lors de la désagrégation. Cette recherche démontre aussi que la magnitude a beaucoup plus d'influence que la distance épacentrale sur la réponse structurale.

Comme le rappelle Beyer et al. (2007), il existe plusieurs définitions différentes pour caractériser, à l'aide de spectre(s) de réponse, une excitation bidirectionnelle. Ces définitions peuvent être classées en 2 catégories : (1) une paire de valeurs spectrales pour chaque composante et (2) une seule valeur spectrale issue du vecteur des deux composantes orthogonales. [1]

1.6.1. Définition par paire de valeurs spectrales :

- **x,y** : Ce sont les spectres des deux composantes horizontales telles qu'enregistrées lors de l'événement. L'angle dans lequel celles-ci ont été enregistrées est arbitraire et n'a que très peu de signification physique.
- **FN, FP** : Ce sont les valeurs des deux spectres issus des enregistrements originaux lorsque ces derniers subissent une rotation matricielle pour être alignés selon les axes normaux (FN) et parallèles (FP) à la faille instigatrice du séisme.

Principal₁, Principal₂: Ce sont les valeurs des deux spectres issus des enregistrements originaux lorsque ceux-ci subissent une rotation matricielle qui permet de réduire à zéro la covariance entre les deux accélérogrammes qui sont maintenant non corrélés. L'angle qui permet d'obtenir ces enregistrements non corrélés est reconnu comme étant relativement constant sur toute la durée du séisme.

Toutefois, certains chercheurs ont démontré que l'angle qui permet de décarreler les enregistrements originaux est sensible à la durée du séisme et qu'il est donc primordial de choisir avec soin la durée effective du séisme. [2]

1.6.1. Définition par valeur spectrale unique :

- **GMS** : utilisé dans la plupart des GMPE pour générer les courbes de probabilité de dépassement en fonction de l'intensité, le **Geometric Mean Spectra** calcule la moyenne géométrique¹ des spectres des deux composantes tels qu'enregistrés. Il est important de noter que le **GMS** est dépendant de l'angle dans lequel la secousse sismique a été enregistrée.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

- **AMS** : Le **Arithmetic Mean Spectra** calcule la valeur moyenne des deux composantes spectrales telles qu'enregistrées.
- **ENVS** : Le spectre enveloppe, aussi fréquemment utilisé dans la définition des GMPE, est défini par la plus grande valeur possible, pour chaque période, des spectres issus des enregistrements originaux
- **MaxRotS** : Correspond à la plus grande accélération unidirectionnelle pour toutes les orientations possibles de la paire de composantes. Des études relatives à cette définition ont permis de démontrer que pour les périodes plus longues, l'angle donnant la réponse maximale reste relativement constant alors qu'il varie beaucoup dans les périodes plus courtes. Certains auteurs définissent aussi un spectre correspondant à la composante orthogonale au **MaxRotS**, ces deux spectres ont été nommés respectivement : **minor axis spectra** et **major axis spectra**.

1.6.2. Désagrégation :

La désagrégation est la méthode utilisée afin de déterminer quelle série de secousses sismiques représente bien le spectre cible. Il s'agit de sélectionner une grande quantité de secousses sismiques ayant une magnitude (M) et une distance hypo centrale (R) variable, permettant de représenter le spectre de conception sur toutes les périodes de vibration jugées importantes pour capturer le comportement structural. Cette sélection est nécessaire, car une secousse de petite magnitude et de distance proche du site dicte généralement le comportement en hautes fréquences de vibration tandis qu'une secousse de grande magnitude et longue distance contrôle généralement les basses fréquences de vibration. [1]

1.6.3. Effet de sol :

Le type de sol a une grande influence, surtout sur le contenu fréquentiel des secousses sismiques. Plus le sol est rigide, plus les hautes fréquences seront amplifiées. On considérant l'effet des sols sur les secousses sismiques dans l'Algérie on trouve les deux méthodes précédant,

« *Méthode de section et méthode d'étalonnage* »

1.6.4. Techniques d'étalonnage :

Plusieurs techniques différentes ont été proposées dans la littérature afin de permettre l'étalonnage d'un spectre issu d'un enregistrement sismique quelconque sur un spectre cible.

Dans le cas de la présente étude, quatre techniques différentes ainsi que et l'effet de leur utilisation sur la caractérisation bidirectionnelle seront étudiés. Les quatre méthodes utilisées sont celles:

- Recommandées par Michaud (Michaud & Léger, 2012) dans le cadre de son étude sur les différentes techniques d'étalonnage. Ainsi, les techniques Sa(T), SIa, MSE, et ATK seront étudiées.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Afin d'étudier l'effet de la technique d'étalonnage sur la représentation spectrale bidirectionnelle d'un séisme, les facteurs d'étalonnage pour chacune des quatre techniques sont évalués pour les méthodes 1, 2 et 3 de représentation spectrale bidirectionnelle. Ensuite, pour chacune des trois représentations spectrales bidirectionnelles, la méthode *SIa* a été sélectionnée arbitrairement comme méthode de référence, et le ratio de chaque technique par rapport à la méthode *SIa* est calculé. Finalement, la différence, pour une même technique d'étalonnage, entre les valeurs issues des trois représentations spectrales bidirectionnelles est comparée afin d'évaluer le biais que la technique d'étalonnage peut induire sur la représentation spectrale bidirectionnelle.

[1]

Partie I : PARTIE PROJET

Chapitre 2 : Méthodes de Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

II. 2.1 Introduction :

Notre compréhension des forces ou déformations induites par les séismes s'est développée de manière considérable conséquemment à des mouvements de sol dus aux séismes, ou à la réponse des structures enregistrée sous forme d'accélérogrammes.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme se mettent principalement sous la forme d'un accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps, nous pouvons de même enregistrer la vitesse ou le déplacement.

Les accélérogrammes utilisés pour le dimensionnement sont habituellement classés en trois catégories :

- les accélérogrammes réels enregistrés lors de tremblement de terre.
- les accélérogrammes synthétiques générés à partir de modèles de ruptures ou glissement de faille.
- les accélérogrammes artificiels générés de façon à correspondre à un spectre de réponse désiré.

[9]

II.2.2. Présentation temporelle du mouvement sismique :

Les mouvements sismiques sont restitués par un sismographe, sous forme de représentation analogique, du déplacement, de la vitesse ou de l'accélération en fonction du temps. Les accélérogrammes représentent les enregistrements qui correspondent à l'accélération et constituent le paramètre principal dans l'analyse dynamique des structures.

L'accélérogramme est une fonction qui varie d'une manière irrégulière et rapide autour de zéro pendant quelques dizaines de secondes. Il est généralement décomposé en trois phases : (i) une phase initiale où l'accélération est faible,

(ii) une phase forte pendant laquelle l'accélération atteint un maximum suivi d'une phase modérée,

(iii) une phase faible où l'accélération converge vers zéro.

Pour conduire une analyse sismique d'un ouvrage, la durée de la phase forte est la plus significative parce qu'elle représente le temps requis pour obtenir le maximum de l'énergie de la secousse.

Étant donné que deux séismes successifs ne se ressemblent pas en termes de magnitude et du contenu fréquentiel, un enregistrement est donc unique et il n'est pas représentatif de l'ensemble des mouvements sismiques pouvant survenir en un site donné. De ce fait, l'un des enjeux cruciaux de l'analyse dynamique transitoire est la sélection des accélérogrammes pour satisfaire les exigences des règlements parasismiques. La démarche préconisée consiste à retenir plusieurs accélérogrammes pour éviter de biaiser certains aspects du contenu fréquentiel du spectre de réponse. Les accélérogrammes peuvent provenir ou être obtenus à partir de :

- un phénomène naturel (accélérogramme naturel);
- un signal synthétisé.

Cette dernière représente les accélérogrammes artificiels. [3]

II.2.a. Les accélérogrammes réels :

Ce type d'accélérogramme se rencontre tout d'abord dans le cas de codes nationaux, pour des pays de petite superficie et tels que les caractéristiques géologiques, puissent être considérées comme uniformes sur l'entièreté du territoire. Les accélérogrammes enregistrés peuvent ainsi être utilisés pour le dimensionnement d'une structure.

La plupart des pays dispose de ce type d'information. Si un accélérogramme est nécessaire, il faudra soit en trouver un dans un pays voisin, soit avoir recours à la génération. Dans d'autres pays, les normes en vigueur ne permettent pas d'employer des accélérogrammes artificiels ou synthétiques.

L'autre cas fréquent d'utilisation d'accélérogrammes réels se rencontre dans le cas du dimensionnement d'une structure pour une étude plus poussée peut être entreprise en ce qui concerne le risque sismique :

Type de faille, distance par rapport au plan de faille, profondeur focale,... L'estimation de ces grandeurs permet de rentrer dans une base de données d'accélérogrammes (comme par exemple le « CD-ROM of European accelerograms ») et de sélectionner les enregistrements réels représentant le mieux l'action sismique à escompter.

Les accélérogrammes historiques représentent une mine d'informations sur la nature et les caractéristiques du mouvement de sol (l'amplitude, la fréquence, la durée, et le contenu énergétique), en plus ils reflètent tous les facteurs qui influencent les accélérogrammes naturels (les caractéristiques de la source, le chemin et le site). Cependant, des accélérogrammes historiques, d'intensité suffisamment élevée pour représenter les exigences du code ne sont pas toujours disponibles. [7][3]

II.2.b. Les accélérogrammes synthétiques :

Ce type d'accélérogramme est obtenu à partir de considérations géologiques du site étudié. L'accélérogramme est généré à partir d'un schéma de rupture le long d'une faille.

En raison de son évidente complexité au niveau des informations nécessaires à l'obtention de résultats cohérents, cette technique n'est employée que lors de projets spécifiques par leur importance ou par leur géologie locale.

I.1.c. Les accélérogrammes artificiels :

Ce type d'accélérogrammes à partir d'un processus aléatoire, est généré de façon telle que son spectre de réponse élastique corresponde au spectre de projet (le spectre cible).

Puisqu'un spectre est la seule donnée nécessaire à la génération d'un accélérogramme, cette méthode s'avère être la plus rapide quand aucun enregistrement n'est disponible pour la zone sismique considérée.

Le recours aux accélérogrammes artificiels est dû au manque de séismes historiques, cela a amené les sismologues et ingénieurs à développer des enregistrements sismiques artificiels.

Les accélérogrammes artificiels sont générés sous forme de séries temporelles construites mathématiquement dans le but de reproduire du mieux possible les caractéristiques des séismes naturels. Ils sont classés en deux groupes selon le type de leur simulation :

- (i) stationnaire,
- (ii) non stationnaire.

En fait, les accélérogrammes synthétisés à partir d'une simulation stationnaire présentent un contenu fréquentiel invariable en fonction du temps. La phase de forte accélération n'apparaît pas dans ce cas.

Selon les travaux de Lestuzzi, Badoux et Selami (2008), la simulation stationnaire conduit à une sous-estimation de la demande de ductilité dans le cas d'une analyse non linéaire. Donc, elle ne convient que dans le cas du comportement élastique de la structure. Ces auteurs conviennent qu'une simulation non stationnaire est plus appropriée. [3]

II.2.3. Accélérogrammes :

Notre compréhension des forces ou déformations induites par les séismes s'est développée de manière considérable conséquemment à des mouvements de sol dus aux séismes, ou à la réponse des structures enregistrée sous forme d'accélérogrammes.

Les mouvements du sol enregistrés lors d'un séisme s'écrivent principalement sous la forme d'accélérogramme qui représente la variation de l'accélération dans une direction donnée en fonction du temps.

Nous pouvons de même enregistrer la vitesse ou le déplacement des particules du sol.

La nature des accélérogrammes dépend d'un certain nombre de facteurs :

- La magnitude du séisme.
- La distance de la source de libération d'énergie.
- Les caractéristiques géologiques du terrain le long du trajet de la transmission d'onde.
- Le mécanisme de la source et les conditions locales du sol. [4]

Un accélérogramme est considéré comme représentatif du mouvement sismique de dimensionnement. Si le spectre de réponse moyen des spectres des accélérogrammes retenus est enveloppe, au sens du spectre caractérisant le mouvement sismique pour un amortissement réduit à 5 %. Si des écarts à l'enveloppe, au sens du plus importants que des défauts locaux de 10 % sont observés pour les spectres moyens des autres amortissements d'intérêt, une justification est apportée.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Ce spectre de réponse moyen des accélérogrammes est calculé, à un nombre suffisant de fréquences en tant que moyenne des accélérations spectrales, pour s'assurer de son caractère enveloppe.

La sélection des accélérogrammes peut être effectuée en considérant les paramètres complémentaires cités. Participant à la caractérisation du mouvement sismique (durée de phase forte, vitesse et déplacement du sol, rapport A/V , intensité d'Arias, cumul en valeur absolue de la vitesse).

Le nombre d'accélérogrammes constituant un jeu d'accélérogrammes est adapté à la méthodologie des calculs effectués et à la méthode de traitement de la variabilité des résultats retenue. Le nombre d'accélérogrammes constituant un jeu d'accélérogrammes est au moins égal à 3. [4]

II.2.3.1. Critères de sélection des accélérogrammes :

Il est important de s'assurer que la sélection d'accélérogrammes pour des fins d'analyses dynamiques transitoires soit faite judicieusement sans quoi certaines fréquences peuvent être négligées. Katsanos et al. (2010) font le point sur l'état-de-l'art sur les méthodes de sélection de secousses sismiques historiques.[1]

a-Contenu fréquentiel :

Le rapport a/v , soit accélération de pointe au sol (m/s^2) divisée par la vitesse de pointe (m/s), permet de considérer le contenu fréquentiel de l'accélérogramme. Un rapport a/v élevé indique habituellement une secousse ayant un contenu riche en hautes fréquences tandis qu'un rapport a/v faible indique un contenu élevé en basses fréquences. Il est recommandé de faire varier ce facteur parmi les secousses sélectionnées afin de couvrir une large gamme de fréquences.

Fréquentiel peut être estimé par A/V

A : l'accélération maximale du sol

V : la vitesse maximale.

b-Type de sol :

Il est possible de considérer le profil géotechnique. Ce profil est habituellement représenté par la vitesse de propagation moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de profondeur (V_{S30}). Ce critère contrôle le contenu fréquentiel de l'accélérogramme car un sol constitué de rocher, donc très rigide, aura un contenu en haute fréquence beaucoup plus élevé qu'un sol plus lâche. V_{S30} doit être limité selon la classe de sol selon les recommandations du CNB (2005).

c-Durée significative :

La durée significative est mesurée en secondes et représente le temps qui est nécessaire à l'intensité Arias pour accumuler entre 5 % et 95 % de sa valeur finale (il s'agit ici d'une définition parmi d'autres). Tel que mentionné par Bommer et Scott (2000), la durée peut être considérée comme une composante secondaire car elle est habituellement fonction de la magnitude. Celle-ci est contrôlée par la durée de la rupture le long de la faille et donc déjà prise en considération. Iervolino et al. (2006) ont prouvés que la réponse maximale d'une structure n'est pas fonction de la durée de la secousse tandis que les dommages reliés à la dissipation d'énergie tels que la fatigue et le nombre de cycles inélastiques seront affectés par cette dernière.

d-Environnement tectonique :

Il peut être intéressant de considérer le type de faille, le mécanisme de rupture et la direction empruntée par les ondes sismiques. Kawaga et al. (2004) mentionne que l'environnement tectonique influence grandement la puissance des secousses en étudiant l'effet de la profondeur de la faille sur les périodes prédominantes de ces secousses. Bolt et Abrahamson (2003), de leur côté, démontrent que les ondes issues de faille de subduction s'atténuent significativement plus lentement que les ondes de faille de surface.

II.2.3.2. Choix des accélérogrammes :

Dans le cadre de cette recherche, le choix des accélérogrammes représente une étape fondamentale. Ces accélérogrammes sont utilisés pour réaliser des analyses temporelles qui permettent de caractériser le comportement des structures à étudier.

La réponse non linéaire augmente pour un changement d'accélérogramme correspondant à une diminution du spectre élastique.

Le type de non-linéarité, en particulier du point de vue du caractère cumulatif ou non-cumulatif de l'endommagement, est essentiel pour un choix approprié de l'accélérogramme. [1]

Chapitre III : Logiciels de Sélection et étalonnage des accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Il existe plusieurs logiciels de sélection et étalonnage des accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures comme :

II.3.1. Seismo Artif :

SeismoArtif est une application capable de générer des tremblements de terre artificielle (accélérogrammes) adaptés à un spectre de réponse cible spécifique en utilisant différentes méthodes de calcul et des hypothèses variées. Il est à noter que l'utilisation des accélérogrammes réels et des techniques d'adaptation du spectre, ainsi que des outils de sélection [par exemple, Iervolino et al. 2009; Dias et al. 2010], a tendance à être recommandée pour le calcul des combinaisons des accélérogrammes réels pour une utilisation dans l'analyse dynamique non linéaire des structures.

Ce logiciel peut être utilisé pour générer des suites d'accélérogrammes pour l'analyse dynamique non linéaire des structures nouvelles ou existantes. Les utilisateurs doivent se référer à la littérature pour trouver les fondements de base sur les processus aléatoires et accélérogrammes artificiels [par exemple Yang, 1986; Clough et Penzien, 1994; Lynn et Fuerst, 1998], ainsi que des publications sur les sujets d'enregistrements et algorithmes de vérification [par exemple Bradley, 2010]. La sélection des suites d'enregistrements pour l'analyse dynamique non linéaire des structures nouvelles ou existantes [par exemple Bommer et Acevedo 2004; Watson-lamproie 2006; Hancock et Bommer 2007; Hancock et al. 2008; Haselton et al. 2009; Katsanos 2010; Iervolino et al. 2010; Jayaram et al. 2011].

Le programme est capable de lire accélérogrammes et spectres enregistrés dans différents formats de fichier texte. Cette collection d'enregistrements de mouvements du sol et les spectres sont ensuite utilisées dans la phase de simulation pour la définition des formes de spectre ou de l'enveloppe cible. [5]

À l'heure actuelle, le spectre cible peut être créé en suivant les règles de l'Euro Code 8, en calculant le spectre d'un accélérogramme spécifique ou en chargeant simplement un spectre défini par l'utilisateur.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

À la fois le spectre cible et le type d'enveloppe définie, un accélérogramme artificiel est généré et une comparaison entre le spectre de réponse et le spectre cible est donnée, y compris l'erreur moyenne en pourcentage, le coefficient de variation et de PGA de l'accélérogramme.

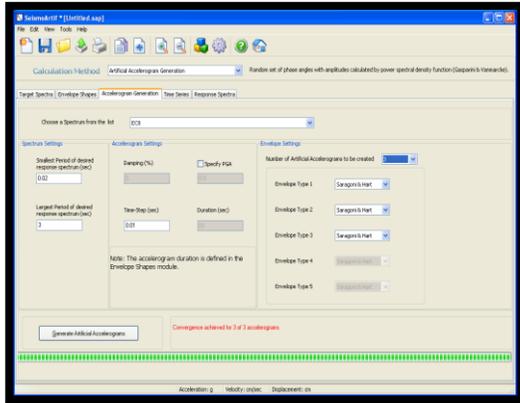


Figure II.1. Génération des accélérogramme

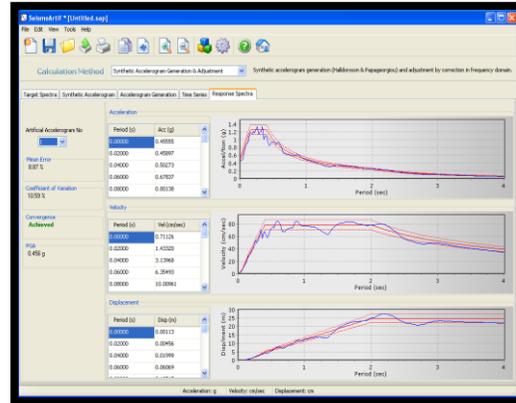


Figure II.2. Spectre de repense

II.3.2. Seismo match :

SeismoMatch est une application capable d'ajuster un tremblement de terre, accélérogrammes pour correspondre à un spectre de réponse cible spécifique, en utilisant l'algorithme des ondelettes proposé par Abrahamson [1992] et Hancock et al. [2006]. Certaines de ses caractéristiques sont les suivantes:

- * Adaptation simultanée d'un certain nombre d'accélérogrammes, puis la création d'un spectre approprié moyen inadapté, respecte une tolérance prédéfinie.

- * Possibilité d'utiliser ce logiciel en combinaison avec des outils de sélection des secousses sismique vérification de pertinence pour définir les suites adéquates pour l'analyse dynamique non linéaire des structures nouvelles ou existantes.

- * Capacité de lecture d'accélérogrammes simples définies dans les deux valeurs multiples simple ou par formats de ligne (les deux formats les plus populaires utilisés par les bases de données de mouvements forts) ou de la lecture d'un certain nombre d'accélérogrammes en même temps (si elles sont définies dans la simple valeur par format de ligne).

La création du spectre cible en suivant les règles de l'euro code 8, en calculant le spectre d'un accélérogramme spécifique ou en chargeant simplement un spectre défini par l'utilisateur. En outre, SeismoMatch dispose également d'un module dans lequel un utilisateur peut combiner plusieurs accélérogrammes appropriés afin d'obtenir un spectre moyen combiné qui remplit les exigences de l'utilisateur concernant la moyenne maximal inadapté.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Enfin, et en raison de son intégration complète avec l'environnement Windows, SeismoMatch permet des résultats numériques et graphiques à utiliser dans toute application Windows (par exemple, MS Excel, MS Word, etc.), en notant que les caractéristiques des terrains peuvent être entièrement personnalisés à l'intérieur du programme lui-même.

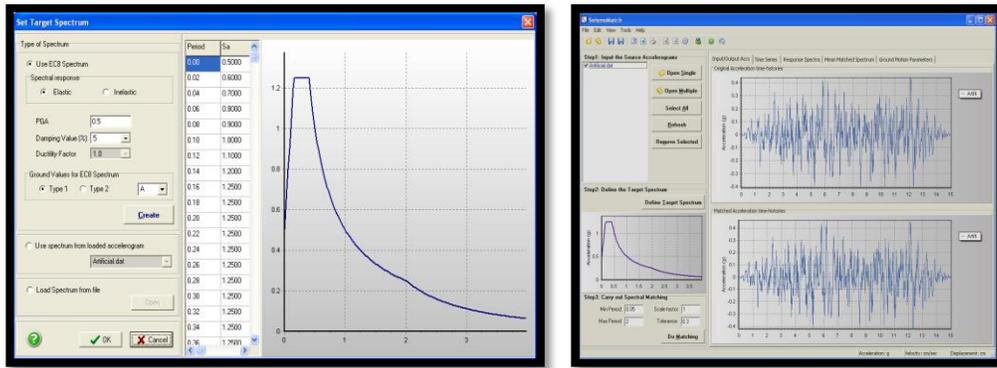


Figure II.3. Accélérogramme spectre de repense

II.3.3. Seismo spect :

SeismoSpect constitue une plate-forme simple et efficace qui permettra aux utilisateurs de créer leur propre bibliothèque d'enregistrements de mouvement de sol et les sauvegarder dans un seul fichier, le rendant facile à manipuler. Cette application est capable d'appliquer plusieurs types de filtres et d'effectuer la ligne de base de correction en utilisant jusqu'à troisième ordre polynômes. Cet outil est également capable de calculer la réponse spectrale moyenne d'une collection d'accélérogrammes et de comparer ces résultats avec un spectre de référence .

(les utilisateurs peuvent ainsi combiner différents des enregistrements afin d'individualiser ceux dont le spectre moyen rencontrera un certain spectre de référence).

Enfin, un module a été introduit pour calculer un certain nombre de paramètres de mouvements forts souvent requis par les sismologues mécaniciens et ingénieurs du tremblement de terre. [5]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

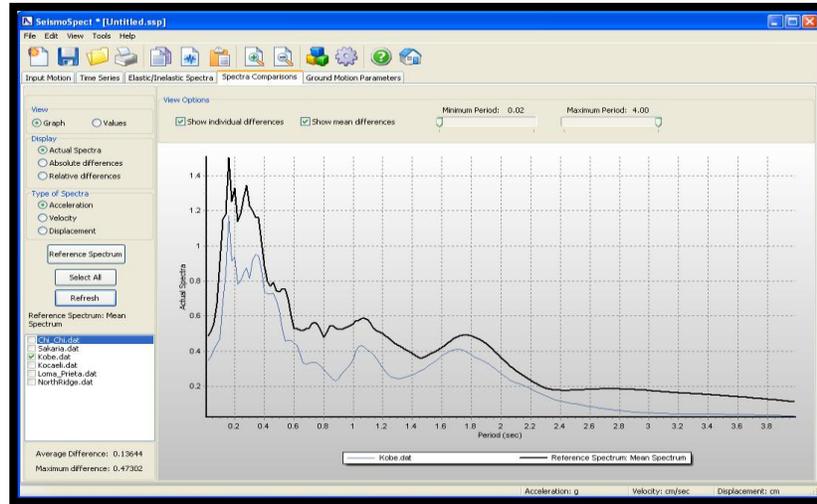


Figure II.4. Comparaison de spectre de repense

En outre, SeismoSpect dispose d'une interface utilisateur graphique conviviale capable de lire les accélérogrammes simples définies par deux valeurs uniques ou multiples par formats de ligne (les deux formats les plus populaires utilisés par les bases de données de mouvements forts).

II.3.4. SeismoSignal :

SeismoSignal constitue un moyen facile et efficace pour traiter les données de mouvements forts, avec une interface visuelle conviviale et la capacité de tirer un certain nombre de paramètres de mouvements forts souvent requis par les sismologues mécaniciens et ingénieurs du tremblement de terre.

Le programme est capable de lire des accélérogrammes définies dans les deux valeurs multiples en simple et à et par formats de ligne (les deux formats les plus populaires utilisés par les bases de données de mouvements forts), et peut appliquer une correction de base et le filtrage avant intégration temporelle du signal (à obtenir la vitesse et le déplacement de temps historiques).

II.3.5. Bispec:

Bispec est un logiciel d'analyse spectrale non linéaire qui effectue une analyse dynamique unidirectionnelle et bidirectionnelle dans le temps d'un système dynamique simple dans les enregistrements de mouvement au sol de tremblement de terre. Il peut également calculer plusieurs types de spectres non linéaires avec Force-Constante, ductilité-Constante et les spectres dommages- Constant.

- *Voici quelques-unes des caractéristiques de Bispec:*

- Effectuer une analyse dynamique unique d'un système, ou Générer des spectres de mouvement du sol (par le biais d'une série d'analyse dynamique unique).

- Générer "Spectre linéaire" qui est utilisés pour la conception sismique.

- Générer 5 types de spectres non linéaire (résistance-constante, force normalisée constante, R constant, ductilité constante, indice de dommages constant), 10 différents modèles hystérétiques linéaires et non linéaires ou modèle de comportement non linéaire réaliste, pour étudier les différents types de comportement structurel.

- Calcule plus de 60 différentes quantités spectrales d'amortissement linéaire visqueux et amortissement visqueux non linéaire, idéal pour l'analyse des structures avec un amortissement supplémentaire.

- Calcul de la période effective, la raideur et plusieurs mesures d'amortissement efficace équivalent (hystérétique, linéaire et amortissement visqueux non linéaire, l'amortissement total).

- Analyse rapide des structures à base isolée.

- Une caractéristique unique de Bispec est la capacité à générer des " Spectre Bidirectionnel ", en analysant le mouvement dans deux directions et la résultante de rapports maximum ou réponse rotation maximale. Il peut également calculer l'angle de réponse maximum, ainsi que SRSS bidirectionnel et la réponse moyenne géométrique (Moyenne géométrique).

- Calculer les spectres pour plusieurs enregistrements de mouvements du sol pour plus de commodité ou pour effectuer des études paramétriques.

- Extrêmement rapide avec de nombreuses fonctionnalités de productivité, ce qui permet à l'utilisateur d'économiser des heures de travail. [8]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

-Encore plus rapide maintenant avec le calcul Parallèle: Exécution de l'analyse spectrale avec Bispec est maintenant encore beaucoup plus rapide avec un support pour plusieurs processeurs et à plusieurs cœurs. Par exemple, avec deux processeurs quad-core, l'analyse spectrale peut fonctionner près de 8 fois plus rapide, ce qui peut être utile lors de l'analyse multiples des mouvements du sol.

Bispec offre une grande flexibilité pour modifier et contrôler les propriétés dynamiques du système (masse, raideur, l'amortissement, etc.) et les propriétés non linéaires de l'élément non dynamique linéaire (force d'élasticité, etc.). Le programme permet actuellement de prendre 10 modèles d'éléments d'hystéresis différents (voir ci-dessous). Ces modèles peuvent être configurés pour modéliser la réponse structurelle d'une grande variété de structures (bâtiment, ponts, tour, réservoirs, etc.), ainsi que la réponse sismique de nombreux systèmes sismiques différents (portique en acier avec des systèmes de contreventements, portique en béton armé et les murs de cisaillement (voiles), préfabriqué, précontraint et post-tension des structures en béton, des dispositifs d'isolement parasismique à la base, des dispositifs de dissipation d'énergie, etc.

Il peut être utilisé comme un outil pédagogique pour enseigner aux élèves les notions sur le comportement dynamique des structures, ainsi qu'un outil d'ingénierie qui permet aux ingénieurs de calculer les spectres de réponse des mouvements du sol pour la conception et étudier la sensibilité de réponse structurelle aux diverses propriétés structurelles telles que la résistance, la rigidité et forme de la courbe force-déplacement hystérétique. Il est également un outil de recherche très efficace qui peut être utilisé pour effectuer des analyses paramétriques d'un grand nombre d'enregistrements de mouvements du sol. Avec 10 modèles différents hystéresis, et environ 61 différentes quantités spectrales allant du déplacement spectral à l'accélération, aux forces et ductilité.

y compris divers énergie de puissance et des valeurs spectrales, il offre des options illimitées pour la recherche et l'investigation de la réponse dynamique et des mouvements du sol.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Notre thème de recherche trouve des applications dans beaucoup de domaines de recherches tel que dans les ***Méthodes déterministes basées sur le critère de performance***

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

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

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

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

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

Par conséquent, le calcul non linéaire en poussée progressive (représente une alternative intéressante car les données matérielles sont similaires à celles de l'analyse temporelle non linéaire et les difficultés du calcul temporel pas à pas sont évitées. [11]

II.3.6. SigmaSpectra :

SigmaSpectra est un programme informatique qui sélectionne des suites de des mouvements du sol du tremblement de terre d'une bibliothèque de mouvements du sol de telle sorte que la médiane de la suite correspond à un spectre de réponse cible à toutes les périodes définies, et les échelles de la suite alors telle que l'écart type est d'accord avec la cible écart-type.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

SigmaSpectra utilise un processus en deux étapes pour la sélection et mise à l'échelle. Suites de motions sont d'abord choisies dans la bibliothèque pour correspondre au spectre de réponse cible. Les mouvements de bords sont ensuite mis à l'échelle pour correspondre à l'écart-type de cible, tout en maintenant un accord avec le spectre de réponse cible.

II.3.7. Accélérogrammes Algériennes pour le calcul non linéaire :

II.3.7.1. Introduction :

L'Algérie se situe sur une frontière active de plaques au niveau de la convergence de l'Afrique et de l'Eurasie. Ces plaques se rapprochent à une vitesse de l'ordre de 6 millimètres par an, ce qui génère une accumulation importante de contraintes.

Lorsque ces contraintes deviennent trop fortes, certaines failles peuvent être mises en mouvement. Le mouvement se propage jusqu'à la surface. Les principales failles actives sont localisées au niveau de la chaîne de montagne nord-africaine (Atlas). Le mouvement relatif des bords de la faille tel qu'il a été enregistré par les sismomètres montre un raccourcissement cohérent avec le mouvement global des plaques. Pour compte tenu de la première information sismologique la prolongation orientale de la faille majeure connue localement (faille de Thenia) pourrait avoir été activée lors de séisme de Boumerdes en 2003.

II.3.7.2. Historique des séismes en Algérie

Historiquement, l'Algérie est connue pour être une zone sismique très active.

Le catalogue de sismicité historique ne couvre qu'une infime partie de l'histoire de la sismicité de cette région.

Du point de vue de l'histoire, l'activité sismique en Algérie est connue depuis le 03 Janvier 1365, la date à laquelle s'est produit le séisme d'Alger (Al Suyuti, 1505, Ambraseys, 1988).

Antérieurement à cette date, la sismicité n'est pas connue faute de disponibilité de documentation ou d'étude sur les archives relatives. [4]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non
linéaire des structures

Localité	Date	M	Vectime	Observation
Alger	03.01.1365	forte	Plusieurs	Alger complètement détruite. 100 répliques pendant la nuit. une partie d'Alger fut inondée
Gouraya	15.01.1891	7.5	38	Dégâts importants: Gouraya a été complètement détruite. ⁵³ immeubles et maisons détruis ou endommagés. Dégâts à Cherchell, kherba, Blida, El-Affroun, Mouzaia, Miliana etOrléansville. Mouvement vertical observé à Gouraya. Ressenti à Saida et Djelfa. Fortes répliques. Rayon macrosismique 200 kms
El Kalaâ	29.11.1887	6.5/7.5	20	El Kalaâ et Dehba : une mosquée ainsi que plusieurs maisons ont été détruites. Thiouanet : importants dégâts (80 maisons ont été complètement détruites). Ressenti à Oran, Arzew, Relizane, Mostaganem et Mascara. Forte réplique ressentie quelques minutes apres.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Chelf	10-10-1980	7.3	2633	8369 blessés, 348 portés disparus, 6.778.948 sinistrés. 70% des habitations détruites.
Chelf Ville Asnam	09-09-1954	6.7	1243	20.000 habitations détruites. Effets observés: glissement de terrain et liquéfaction du sol. Mouvement vertical maximum (10) (1.33m) au voisinage de Ouled Abbas. Plusieurs répliques.
Alger	04-09-1996	5.7	/	Ce séisme qui a été ressenti jusqu'à Dellys à l'Est, Menaceur à l'Ouest et Berrouaghia au Sud, a atteint l'intensité VII à Ain-Benian, Cheraga et Staoueli, appartenant à la région épiscopale. Le rayon macrosismique moyen est de 140km.
Ain timochent	22.12.1999	5.8	plusieurs	Ce séisme a atteint une intensité maximale de VII a occasionné des dégâts matériels importants et la perte de plusieurs vies humaines, la surface macrosismique dépasse 260km de rayon.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Béni-Ouarrtilane	10-11-2000	5.4	02	<p>Ce séisme a occasionné dans la région pleistocène qui regroupe Béni-Ouarrtilane, Fréha et El-Main, des dégâts matériels et la perte de</p> <p style="text-align: right;">02 vies humaines.</p>
Zemmouri	21-05-2003	6.8	2268	<p>Ce séisme a occasionné dans la région épiscopale qui regroupe principalement : Boumerdes, Zemmouri, Corso, Tidjelabine, Reghaïa, Thénia, Bordj Menail, Sidi Daoud et Dellys des dégâts très importants.</p> <p>Des immeubles et des maisons récemment construits ont été complètement détruits ou endommagés.</p>

Tableau I I.1. Les séismes d'Algérie les plus importants depuis 1365

II.3.7.3. Accélérogramme Algérien :

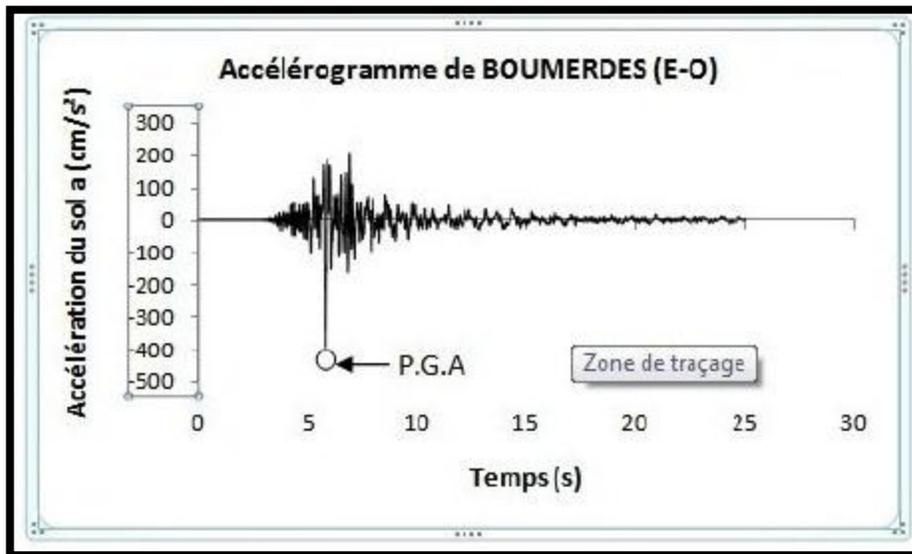


Figure II.6. Exemple d'accélérogramme (en cm/s²)

Il convient de noter qu'en un point du sol donné, les mouvements lors d'un séisme s'effectuent dans toutes même séisme trois accélérogrammes :

- Un accélérogramme de direction Nord-Sud ;
- Un accélérogramme de direction Est-Ouest ;
- Un accélérogramme à la direction verticale.

L'amplitude du mouvement verticale est nettement inférieure à celle du mouvement horizontal, il est horizontal, il est Généralement admis de prendre un rapport de 2/3 entre ces amplitudes.

Les trois données les plus importantes d'un accélérogramme sont:

- L'amplitude, qui est généralement définie par la valeur du pic d'accélération ;
- La fréquence, qui est une fréquence moyenne déterminée en comptant le nombre de fois que l'accélérogramme coupe l'axe des abscisses par unité de temps
- La durée, définie par le temps qui s'écoule entre le premier et le dernier pic au-dessus d'un certain niveau où l'amplitude des accélérations est notablement plus élevée.

II.3.7.4. Facteurs à considérer pour le choix d'un accélérogramme :

La nature des accélérogrammes dépend d'un certain nombre de facteurs tels que :

- La magnitude du séisme;
- La distance à partir de la source de libération d'énergie;
- Les caractéristiques géologiques le long du trajet de la transmission d'onde;
- Le mécanisme de source;
- Les conditions locales du sol.

Malgré le nombre de ces facteurs et leurs natures variables, il est toutefois possible de prédire le type de mouvement attendu pour un certain sol.

Le recours au calcul transitoire implique le choix des accélérogrammes à retenir pour ce calcul. C'est un sujet qui a suscité de nombreuses discussions et dont on ne peut certainement pas considérer qu'il est actuellement réglé, en raison de ses multiples aspects (caractère naturel ou synthétique des accélérogrammes, etc.) et de ses répercussions sur la représentativité et le coût des réalisations.

Pour des applications lors des analyses linéaires, le choix des accélérogrammes n'est pas trop pertinent, car la base de définition de l'action sismique est alors naturellement représentée par un spectre élastique de réponse de calcul et les accélérogrammes retenus fournissent une approximation satisfaisante du spectre de base.

Dans le cas des analyses non-linéaires, le choix de l'accélérogramme est beaucoup plus difficile, car la réponse non linéaire change (augmentation) en cas de changement d'accélérogramme correspondant à une diminution du spectre élastique.

Le type de non-linéarité, en particulier du point de vue du caractère cumulatif ou non-cumulatif de l'endommagement, est essentiel pour un choix approprié de l'accélérogramme.

On distingue deux types d'accélérogrammes utilisés dans les calculs:

- Des accélérogrammes naturels enregistrés sur des sites ;
- Des accélérogrammes artificiels (synthétiques), qui tiennent compte de la géologie locale,

C'est-à-dire déterminés par le calcul pour que le spectre d'oscillateur soit très voisin du spectre donné. L'établissement des accélérogrammes comporte donc une grande part d'approximation. [4]

II.3.8. Accélérogrammes étudiés :

Pour notre étude nous avons à notre disposition 02 accélérogramme, enregistrés dans deux zones différentes lors de séisme de BOUMERDES 2003 :

Un accélérogramme (considéré comme séisme proche), enregistré dans la wilaya de Boumerdes (zone épiscopale) dans la direction nord-sud (figure II.7) ;

Un autre (considéré comme séisme lointain), enregistré dans la région d'AZAZGA, wilaya de Tizi-Ouzou, dans la direction nord-sud (figure II.8) .

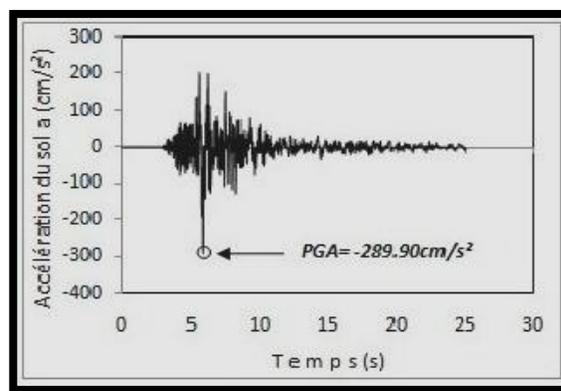
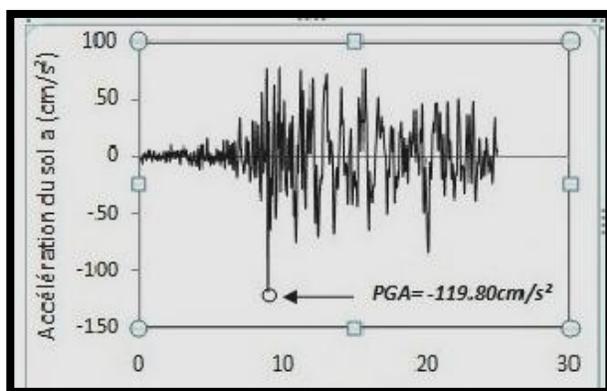


Figure II.7 Enregistrement Boumerdes

Figure II.8 Enregistrement à Azazga

Le séisme de Boumerdes a eu lieu le 21/05/2003 à ZEMMOURI (l'épicentre) dans la wilaya de BOUMERDES, dont la magnitude était évaluée à 6,8 sur l'échelle de Richter.

Les caractéristiques des deux enregistrements sont données par le tableau (II.2) suivant :

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Lieu d'enregistrement	Boumeres	Azazga
Distance épacentrale (km)	10	80
Distance hypo centrale (km)	10	10
ACC. Maximal PGA(cm/s ²)	289.90	119.80

Tableau II.2 .Caractéristiques du séisme de Boumerdes

II.3 .9.Spectres de réponse :

II.3 .9.1.Introduction :

L'essentiel des dommages lors de séismes sont dus aux mouvements du sol qui font vibrer les bâtiments.

Ces mouvements sont enregistrés notamment par des accéléromètres, sous forme de série temporelle retraçant l'histoire de l'accélération subie par le sol, et donc par les constructions Au cours de la durée du phénomène vibratoire. En effet, ces mouvements sismiques sont représentés par un spectre de réponse, qui permet de déterminer directement, selon les caractéristiques du site et de la structure, la réponse maximale en déplacement, en vitesse ou en accélération. Celle-ci (la structure) étant considérée à un seul degré de liberté en déplacement.

Dans la réglementation, un spectre de réponse est déterminé par l'accélération d'ancrage (accélération à la période nulle) et les valeurs des périodes TB, TC et TD définies ci-après (Figure II.9)

- T : période de vibration d'un oscillateur simple (système linéaire à un seul degré de liberté).
- a : amplitude d'accélération maximale de l'oscillateur simple de période propre T.
- TB : limite inférieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.
- TC : limite supérieure des périodes correspondant au palier d'accélération spectrale constante.
- TD : valeur définissant le début de la branche à déplacement constant. [6]

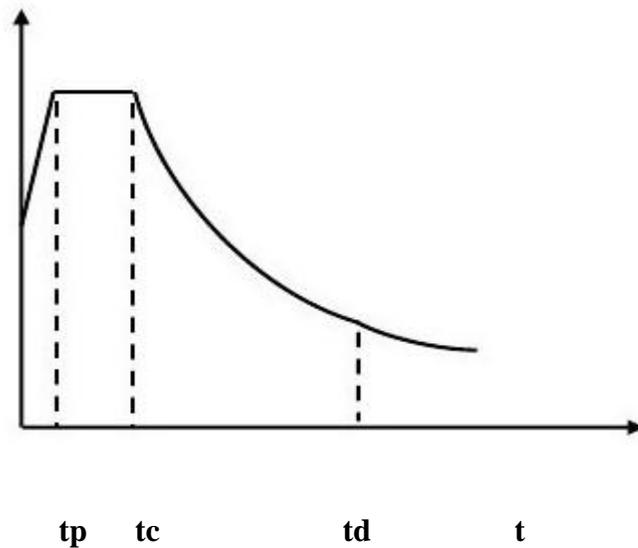


Figure II.9. Spectre de réponse en accélération.

II.3.9.2. Spectre de réponse élastique :

La réponse élastique d'un système à un seul degré de liberté (SDOF) est déterminée après avoir digitalisé l'accélérogramme (naturel ou artificiel) d'un séisme donné en assumant des valeurs numériques pour la période et l'amortissement. Le mouvement dynamique est appliqué à la base du modèle (comme une console représentant la structure encastrée dans le sol). L'histoire complète de la réponse de ce système élastique peut être calculée. Les valeurs maximales des accélérations, vitesses et déplacements sont alors déterminées. En répétant cette procédure pour un grand nombre de systèmes SDOF pour une valeur spécifique de l'amortissement, le graphe du spectre de réponse est obtenu. Pour cause d'effet de résonance, le spectre a la tendance à amplifier l'action sismique pour une certaine gamme de périodes.

Le but de ces spectres est d'introduire cette amplification. Il existe deux manières de représentation du spectre de réponse :

- Tripartite; la réponse de tous les paramètres ensemble
- Graphe séparé; les accélérations, les vitesses et les déplacements, pour une période donnée, sont obtenus par lecture de valeurs correspondantes aux paramètres introduits. [9]

II.3 .9.3. Etapes de construction d'un spectre de réponse élastique :

La mise en œuvre des spectres de réponse est basée sur le principe suivant :

Etape N° 01

La structure du bâtiment est modélisée par un oscillateur simple équivalent. Un oscillateur simple est un système matériel à un seul degré de liberté de translation formé d'une masse « M » et lié au sol à l'aide d'une tige de rigidité « K » (Figure 4). Ce système est aussi caractérisé par son amortissement « C ». En effet, selon les principes de la mécanique, lorsqu'une structure est sollicitée par une action dynamique, telle l'effet des ondes sismiques, sa réaction fait intervenir :

- La distribution des masses au sein de la structure du bâtiment ; de ce point de vue, l'effet des masses en hauteur est plus difficile à maîtriser que celui des mêmes masses dans la partie basse ;
- La rigidité locale et globale de la structure du bâtiment ;

La possibilité de dissiper de l'énergie injectée par le séisme, par frottement et interactions entre les différents éléments constitutifs de la structure ou entre le sol et la structure. [4]

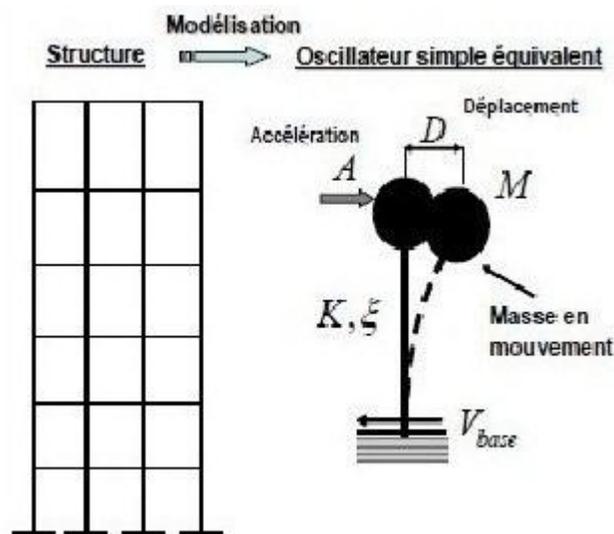


Figure II.10. Caractéristiques du système à un seul degré de liberté.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Lorsqu'on applique à ce système un séisme sous forme d'un accélérogramme $a_g(t)$, l'équation de mouvement d'oscillations forcées est la suivante (Principe fondamental de la dynamique) :

$$M\ddot{U}(t) + C\dot{U}(t) + KU(t) = -M a_g(t) \dots \dots \dots (1)$$

Où $\ddot{U}(t)$, $\dot{U}(t)$ et $U(t)$ sont respectivement l'accélération, la vitesse et le déplacement de l'oscillateur simple à l'instant t .

L'oscillateur simple est caractérisé par :

Sa période propre $T = 2\pi$

Sa fréquence d'oscillation $f = 1/T$ ou sa pulsation $\omega = 2\pi f$

Son amortissement relatif $\xi = c/c_0$ Si $C > C_0$

l'oscillateur retourne au repos sans oscillation (amortissement important) ;

Si $C < C_0$ l'oscillateur s'amortit avec des oscillations périodiques sinusoïdales.

L'équation (1) peut donc être résolue (détermination de $\ddot{U}(t)$, $\dot{U}(t)$ et $U(t)$) soit analytiquement (intégrale de Duhamel) soit numériquement.

Etape N° 02

L'étape suivante consiste à rechercher l'amplitude maximale de la réponse de l'oscillateur simple en accélération, en vitesse ou en déplacement. Les résultats sont ensuite reportés dans un graphique en fonction de la période T ou de la fréquence f .

Ce calcul est ensuite appliqué à de multiples oscillateurs simples, en faisant varier leurs périodes propres T (figure II.11).

La série de valeurs discrètes $S(T_i)$ obtenues représente le spectre de réponse d'une variable physique donnée correspondant à l'accélérogramme $a_g(t)$. Lorsque la variable « S » est une accélération.

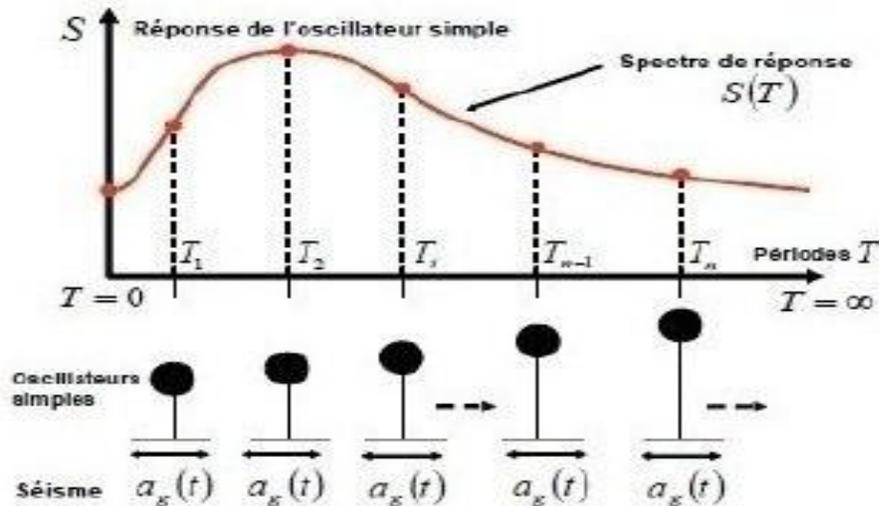


Figure II.11. Construction d'un spectre de réponse élastique sous l'action d'un séisme.

Etape N° 03

Dans les codes parasismiques, on tient compte des incertitudes liées à l'accélérogramme réel d'un site, en considérant plusieurs accélérogrammes enregistrés dans un site ou dans une région donnée. Ensuite, on retient la courbe enveloppe des spectres correspondants.

Le spectre de réponse ainsi obtenu est parfois appelé dans les codes spectre de calcul (Figure .II.12)

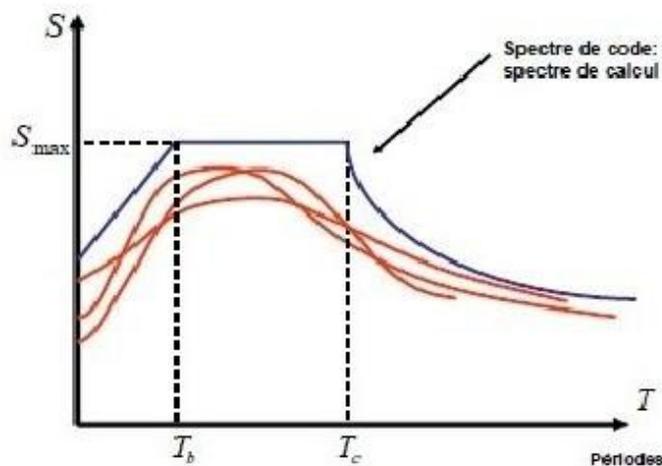


Figure II.12. Spectre de calcul (ou spectre de code). T_b et T_c sont les périodes de transition

Etape N° 04

Par conséquent, il est possible d'obtenir directement, pour une structure ayant une fréquence ou une période propre connue, la réponse maximale de la structure sous l'action du séisme ou encore l'effet maximum dû à un tremblement de terre par simple lecture sur le spectre de réponse ainsi obtenu. Ces spectres sont aussi appelés spectres de réponses élastiques. Le comportement des oscillateurs est considéré comme élastique linéaire et est déterminé pour un amortissement relatif (ξ) constant et égal à 5%.

Si l'oscillateur est infiniment rigide ($K \rightarrow \infty$, $T=0$) : l'oscillateur subit alors l'accélération maximale du sol A_{max} sans déformation.

Si l'oscillateur est infiniment flexible ($K=0$, $T \rightarrow \infty$), l'oscillateur ne subit aucune accélération mais subit exactement le déplacement maximal du sol D_{max} (Figure 7) (Mouvement d'un corps rigide).

Si le spectre est d'accélération, de vitesse ou de déplacement, on note S_{max} respectivement par PSA, PSV ou PSD. Dans l'analyse spectrale, dans le domaine élastique, les relations entre les accélérations A , les vitesses V et les déplacements D s'écrivent :

$$A = 2\pi/T \cdot V \quad \text{et} \quad V = 2\pi/T \cdot D$$

II.3 .10. Spectre lissé :

Comme le spectre élastique actuel présente beaucoup de pics, il ne pourra, donc, être utilisé dans la pratique, pour cela il devient nécessaire de le lisser (Cette ondulation est lissée par une combinaison de variations linéaires et hyperboliques). [9]

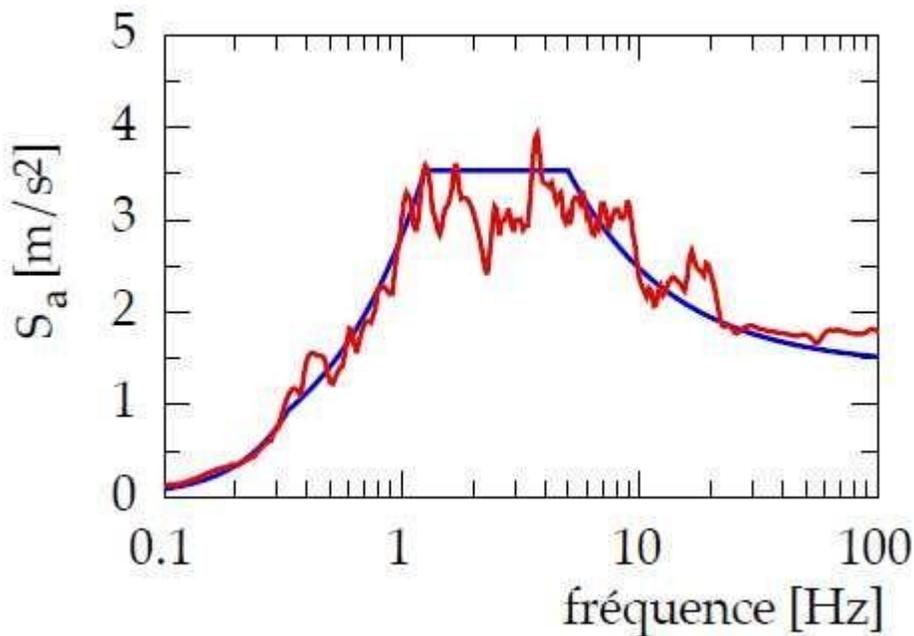


Figure II.13.spectre lisse

II.3 .11. Spectre normalisé :

Il est d'usage recommandé d'employer un spectre de dimensionnement ou de calcul de forme générale tel que indiquée sur la (figure), il est souvent normalisé pour la valeur max de l'accélération du sol. Le spectre de dimensionnement prend les valeurs max des pseudos accélérations 'Sa' en fonction de la période et d'un coefficient d'amortissement donné. Cependant, il a été constaté qu'adopter un comportement élastique pour une structure, donnera de grandes forces sismiques qui conduiront inévitablement à des coûts très élevés, car nul avantage n'a été tiré de l'aptitude de dissipation d'énergie.

Cette dernière est atteinte à travers le comportement inélastique des matériaux constituants, et concrétisée naturellement par l'apparition des fissures et la plastification des aciers.

Dans le but de réduire les forces sismiques induites par la réponse structurelle, cette inélasticité est introduite à travers un amortissement hystérétique reconverti généralement en amortissement visqueux équivalent.

Le spectre d'accélération recommandé par les différents codes pour le dimensionnement de structures parasismiques introduit l'effet de site (S) à travers la période caractéristiques (T1).

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Le facteur de site désigne effectivement le rapport des réponses d'accélérations spectrales dans les plages des moyennes et longues périodes. Il a été introduit afin d'adapter le spectre donné pour un site rocheux aux autres sites, en d'autres termes modifier ce spectre en fonction de la catégorisation de sites. [9]

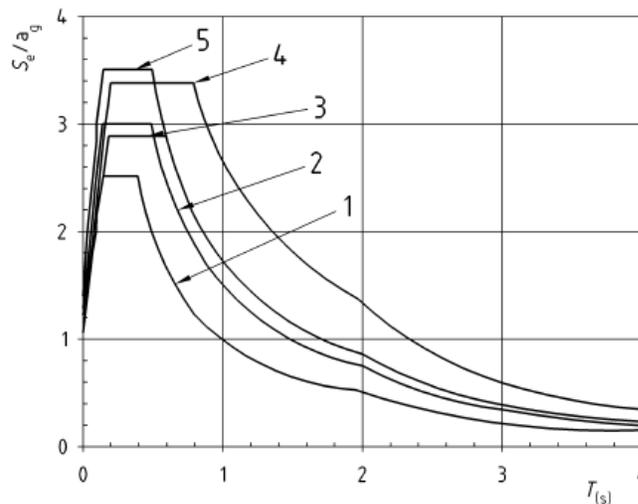


Figure II.14. Spectre normalisé

II.3.12. Spectre de capacité :

L'une des étapes primordiales dans la procédure d'évaluation de la capacité parasismique (performance sismique) des structures, consiste en l'estimation inélastique max « demande » sous un niveau d'excitation sismique donné. Des méthodes simplifiées ont été proposées afin d'éviter l'analyse temporelle non linéaire. Les plus utilisées sont la méthode du spectre de capacité et la méthode du coefficient de déplacement.

Le spectre de capacité est une autre alternative de représentation du spectre inélastique. Au lieu d'utiliser le graphe accélération-période, une courbe force-capacité (accélération-déplacement) est tracée (figure II.13).

L'avantage de cette représentation est l'illustration conjuguée de la force et de la demande de déplacement. Pour les forces élastiques la demande du déplacement élastique et la période élastique peuvent être déterminées.

Pour le comportement inélastique la demande du déplacement inélastique est obtenue au niveau de la branche horizontale de la courbe de capacité avec un spectre inélastique réduit; et la période concordante avec le déplacement inélastique peut être déterminée.

La méthode du spectre de capacité incluse dans la procédure ATC 40 est basée sur la méthode de linéarisation équivalente, dans laquelle le déplacement inélastique max est évalué en utilisant une méthode itérative nécessitant l'analyse d'une série de systèmes linéaires équivalents [9].

II. 3.13. Spectre inélastique :

Le spectre de réponse élastique est obtenu à partir de l'amplification de la réponse maximale du mouvement du sol exprimée soit en accélération, vitesse et déplacement sous l'effet de la résonance. Le spectre inélastique est obtenu en réduisant le spectre élastique de calcul afin de tenir compte de la capacité de dissipation d'énergie de la structure.

Ce spectre inélastique peut être obtenu de plusieurs façons :

- En réduisant le spectre de réponse élastique par un coefficient empirique indépendant de la période de vibration de la structure connu aussi comme facteur de comportement R afin de considérer la déformation inélastique de la structure.
- En réduisant le spectre de réponse élastique par un coefficient variable en fonction de la période de vibration de la structure connu comme le facteur de comportement (R ou q) afin de considérer la déformation inélastique de la structure.
- Le spectre inélastique peut être déterminé directement en utilisant un système élasto-plastique.

À un seul degré de liberté SDOF sujet à un mouvement du sol (figure Le spectre inélastique dans ce cas prend en considération les conditions locales du site, la période de vibration. [4]

II.3.13.1. Elaboration des spectres de réponse inélastiques :

Le spectre de réponse élastique obtenu à partir de l'amplification de réponse maximale du mouvement du sol exprimée en accélération, vitesse et déplacement de l'effet de résonance. Le spectre d'inélastique est obtenu en réduisant le spectre élastique de calcul afin de tenir compte de la capacité de dissipation d'énergie de la structure.

Ce spectre inélastique peut être obtenu de plusieurs façons :

En réduisant le spectre de réponse élastique par un coefficient empirique indépendant de la période de vibration de la structure connu aussi comme facteur de comportement R afin de considérer la déformation inélastique de la structure.

En réduisant le spectre de réponse élastique par un coefficient variable fonction de la période de vibration de la structure connu comme facteur de comportement (R ou q) afin de considérer la déformation inélastique de la structure.

Le spectre inélastique peut être déterminé directement en utilisant un système élasto-plastique à un seul degré de liberté sujet à un mouvement du sol. Le spectre inélastique dans ce cas prend en considération les conditions locales du site, période de vibration, etc.

Dans les trois cas, le spectre de réponse inélastique est obtenu en divisant le spectre élastique par le coefficient « R ». [4]

II.3.13.2. Spectres de réponse utilisés :

Dans cette étude, le spectre de réponse élastique et la famille de spectres inélastiques utilisés sont déterminés à partir de deux accélérogrammes, enregistrés lors du séisme de Boumerdes, définis précédemment (Figure II.15). La transformation est assurée par un logiciel de conversion « PRISM ».

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

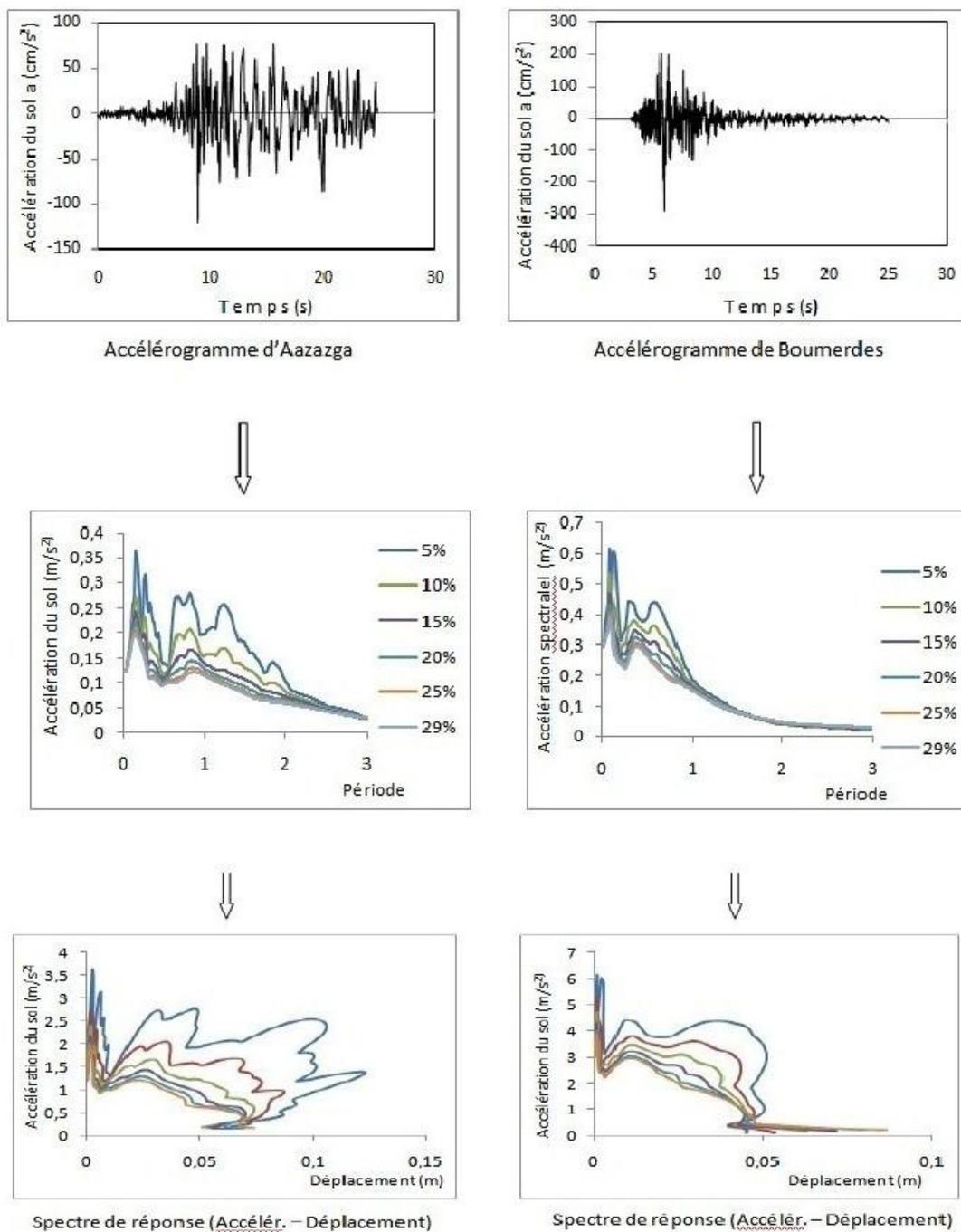


Figure II.15. Conversion Accélérogramme – Spectre de réponse

- **Partie logiciel :**

SeismoSignal permet également le filtrage du contenu de fréquence indésirable du signal. Trois types de filtres numériques différents sont disponibles, tous capables de réaliser passe-haut, passe-bas, passe-bande et un filtrage coupe-bande.

II.3.14. Filtre et Correction de la ligne directrice de logiciel seismo signal :

II.3.14.1. Erreurs dans les enregistrements :

L'utilisateur doit noter qu'un accélérogramme n'est jamais une parfaite représentation de la secousse sismique. Les erreurs peuvent avoir de nombreuses sources, la première venant des accélérographes analogues fonctionnant à l'aide d'un pendule. La fréquence de vibration de ce pendule peut influencer le signal enregistré, il est très difficile de capturer des hautes fréquences avec ce type d'appareil. Les accélérographes modernes sont numériques donc ils ne sont pas assujettis à ce type d'erreur.

Des erreurs telles qu'un bruit de haute fréquence ou une erreur humaine peuvent également être introduites lors de la numérisation des signaux qui ne sera jamais parfaitement effectuée.

Les vitesses et les déplacements non réalistes des secousses sismiques sont habituellement dues à l'ignorance des conditions initiales (constantes d'intégration) lors de l'intégration de l'accélérogramme. Il est alors assumé que l'accélération initiale et la vitesse initiale sont nulles.

Chaque correction doit être justifiée indépendamment les unes par rapport aux autres par l'utilisateur, car la solution choisie est spécifique à chaque problème. Si possible, il est recommandé de ne pas appliquer de correction afin de conserver un maximum d'information concernant l'enregistrement initial. [1]

II.3.14.2. Filtres :

Les filtres permettent d'atténuer, voire d'éliminer, certaines bandes de fréquences. Cela est habituellement nécessaire quand, dans la courbe de vitesse ou de déplacement en fonction du temps, une ondulation non habituelle est observée.

Ce phénomène est observable sur l'accélérogramme du séisme d'Imperial Valley, El Centro.

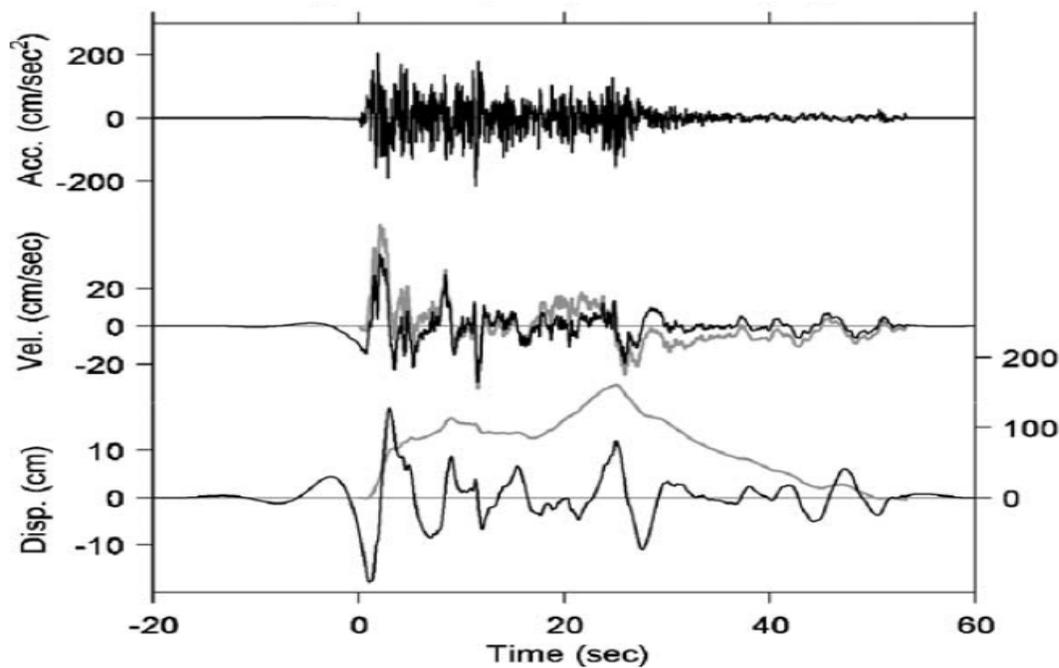


Figure II.16 Accélération, Vitesse et déplacement du séisme à filtre $f_c = 0.10$ Hz en noir et non filtré en gris.

Un filtre éliminant les fréquences sous 10 Hz a été appliqué. Il est important de limiter le filtre afin de ne pas retirer de parties importantes du signal. Ces filtres sont appliqués en décomposant le signal en séries Fourier, éliminant certaines amplitudes et en recomposant l'accélérogramme corrigé. Il est possible de retirer les basses fréquences, les hautes fréquences ou les fréquences contenues dans une bande intermédiaire. Le logiciel SeismoSignal, SeismoSoft (2010a) peut être utilisé pour appliquer ces corrections.

II.3.14.3. Correction de la ligne directrice (« *Baseline correction* ») :

Il arrive que la courbe représentant le déplacement en fonction du temps s'éloigne graduellement de 0, atteignant des valeurs non réalistes. Cela est dû, en partie, à la double intégration de l'accélérogramme sans que les conditions limitent, les constantes d'intégration, ne soient connues.

(La figure II.17) montre un exemple de cette situation à l'aide de l'enregistrement du tremblement de terre Chi-Chi 1999. Il y a évidemment une erreur causant une distorsion dans le signal. Une correction de la ligne directrice permet de diriger cette droite afin de s'assurer qu'elle oscille autour de 0.

Il existe des corrections linéaires, quadratiques et cubiques, dépendamment de l'allure que prend la courbe à corriger. Ce type de correction est applicable à l'aide de SeismoSignal, SeismoSoft

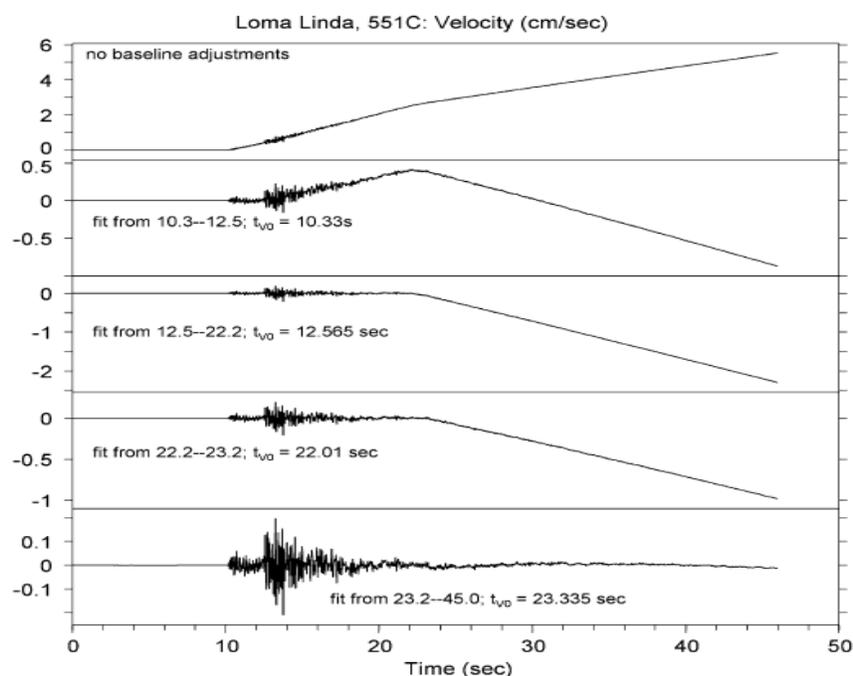


Figure II.17: Vitesse en fonction du temps de l'enregistrement du tremblement de terre avant et après la correction de la ligne directrice.

II.3.15 .Accélérogramme simulés :

Les banques de données de secousses sismiques historiques n'ont pas une grande quantité d'enregistrements représentant des tremblements de terre représentatifs à ANNABA. Ce problème a été très limitant dans la facilité de se procurer des séries d'accélérogrammes reflétant la situation de cette région.

Présenté une solution à ce problème en générant numériquement des accélérogrammes respectant les normes du EC08 À l'aide de logiciel (seismo Artif et seismo signal) les simulations prennent en considération de nombreux facteurs dont l'atténuation des ondes et la géométrie des ruptures. Ce logiciel a été créé afin de respecter les situations de l'ouest et de l'est d'annaba. La banque d'accélérogrammes complète est disponible en visitant le site web, Avant leur utilisation, il est cependant requis de procéder à la sélection et à l'étalonnage des différents accélérogrammes afin de s'adapter à un spectre cible d'un site en particulier. L'étalonnage doit être fait sur une plage de périodes de vibration déterminé par l'utilisateur.

[1]

La première étape consiste à déterminer l'écart type de $\frac{S_{a_{cible}}}{S_{a_{simul}}}$ ou

- $S_{a_{cible}}$ est le spectre cible;

- $S_{a_{simul}}$ est le spectre de réponse d'un accélérogramme simulé.

Il faut ensuite sélectionner les accélérogrammes en conservant ceux qui ont le plus petit écart type de Les secousses sélectionnées sont ensuite étalonnées à l'aide d'un facteur étant égal à la moyenne

$S_{a_{cible}}$

$S_{a_{simulé}}$

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

de $\frac{S_{a_{cible}}}{S_{a_{simul}}}$ pour chaque accélérogramme à l'aide des équation. Dans ce cas en particulier, la

$S_{a_{simul}}$

plage d'étalonnage sélectionné est de 0 s à 4 s.

- *Indicateur de performance :*

Lors des analyses dynamiques non linéaires, plusieurs indicateurs de performance peuvent être notés et comparés. Ces indicateurs dépendent de la structure étudiée, en voici quelques-uns intéressants à noter :

δ : Déplacement;

Δ : Déplacement inter-étages;

M : Moment à la base (mur en béton);

V : Force dans les contreventements (charpente en acier);

μ : Demande en ductilité.

Donnés énergétiques

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

II.3.16. Conclusion :

La caractérisation des secousses sismiques qui seront utilisées pour la suite des analyses nous a permis de bien cerner les paramètres qui seront étudiés. Ainsi un spectre de réponse élastique, basé sur les recommandations sur le EC8 été établi. Celui-ci servira à la fois de représentation de l'excitation sismique pour les analyses spectrales ainsi que de spectre cible pour l'étalonnage des accélérogrammes à des fins d'analyses temporelles. Dans un second temps, deux scénarios sismiques (séisme de courtes distances et éloignés) ont émergé des analyses des données de désagrégation sismique comme étant ceux contribuant le plus à l'aléa sismique.

Une quantité d'enregistrements représentatifs, autant historiques que simulés, ont ensuite été choisis pour construire une banque de séisme qui servira aux analyses structurales. Ceux-ci ont été étalonnés sur le spectre cible en utilisant différentes méthodes.

A fin de caractériser l'effet des deux composantes des séismes, trois méthodes d'étalonnage bidirectionnelles sont retenues pour la suite des analyses. Celles-ci se basent sur le spectre cible, sur le spectre de repense

L'effet de la technique d'étalonnage (qui permet de trouver le facteur afin de faire coïncider le spectre élastique du séisme avec le spectre cible) sur la représentation de la bidirectionnalité du séisme à aussi été étudié. Il en fut conclu que le choix de la méthode n'exerçait qu'un faible biais et seule la technique SIa a été retenue pour le reste des analyses. Finalement, l'étude de la corrélation entre les composantes horizontales nous a permis de repérer trois séismes qui présentaient une corrélation relativement élevé (plus de 10%). À partir de ces enregistrements, 7 enregistrements supplémentaires, qui ont subi une dé corrélation, ont été générés.

Chapitre 4 : Exemple d'utilisation des logiciels pour créer des accélérogrammes synthétiques compatibles avec le spectre de réponse Algérien.

II.4.1. Présentation :

Tel que démontré dans le présent chapitre IV, de nombreuses considérations sont à tenir en compte lors de l'analyse dynamique non linéaire des structures, que ce soit par rapport à la sélection des secousses sismiques, la sélection des structures à analyser, la considération des sols ou l'étalonnage même des secousses. Le chapitre de ce mémoire présentera systématiquement les différentes démarches suivies afin d'appliquer et de comparer les différentes méthodes d'étalonnage. Le tout est fait avec les logiciels « seismo signale 2016 seismoArtif 2016 ». [12]

II.4.2. Résumé:

Cet exemple présente les méthodes d'étalonnage des secousses sismiques et de deux méthodes d'ajustement spectral pour assurer la compatibilité avec l'Euro Code 8 (EC08) afin d'effectuer des analyses sismiques non linéaires. Des bases de données de 30 accélérogrammes historiques et 30 signaux simulés ont été sélectionnés pour calculer la moyenne de référence de la demande sismique et sa dispersion. Les caractéristiques et la capacité destructrice des secousses sismiques ont été étudiées en utilisant un grand nombre d'indices sur (i) les secousses eux-mêmes, (ii) une série de SDOF, Les méthodes d'étalonnage des accélérogrammes au spectre cible utilisant (i) l'intensité spectrale, SIA, (ii) la réduction de l'erreur quadratique moyenne, MSE et (iii) et la minimisation de la dispersion (ATK), ainsi que l'ajustement spectral dans le domaine du temps ont généré une demande sismique cohérente et une dispersion en accord avec les valeurs de référence. L'ajustement spectral ne réduit pas la dispersion de la réponse non linéaire, et au moins 3 accélérogrammes doivent être utilisés pour caractériser la réponse sismique.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

II.4.3. Région d'Annaba :

Annaba est une région de sismicité moyenne, On appliquant le logiciel RPA99 pour calculer le spectre de réponse de cette région pour voir s'il est compatible avec les accélérogrammes synthétiques pour le calcul non linéaire.

Annaba	Zone IIa	Groupe 2 : ouvrage courant d'importance moyen
---------------	-----------------	--

Tableau II.4.1 La zone et groupe d'Annaba d'après RPA 99

-D'après le tableau de RPA99 version 2003 en conclu le coefficient l'accélération **A=0.15**

Zone				
Groupe	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 II.4.2 Coefficient d'accélération de zone A.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

II.4.4 Spectre de repense de la région « Annaba » :

Pour appliquer logiciel de RPA 99 version 2003 il faut entrée les coordonnées suivantes : ouvrage courant d'importance moyenne, usage d'habitation de Maçonnerie insérée contreventée par voile en béton armé, site ferme.

- Enregistrement de la zone « Annaba ».

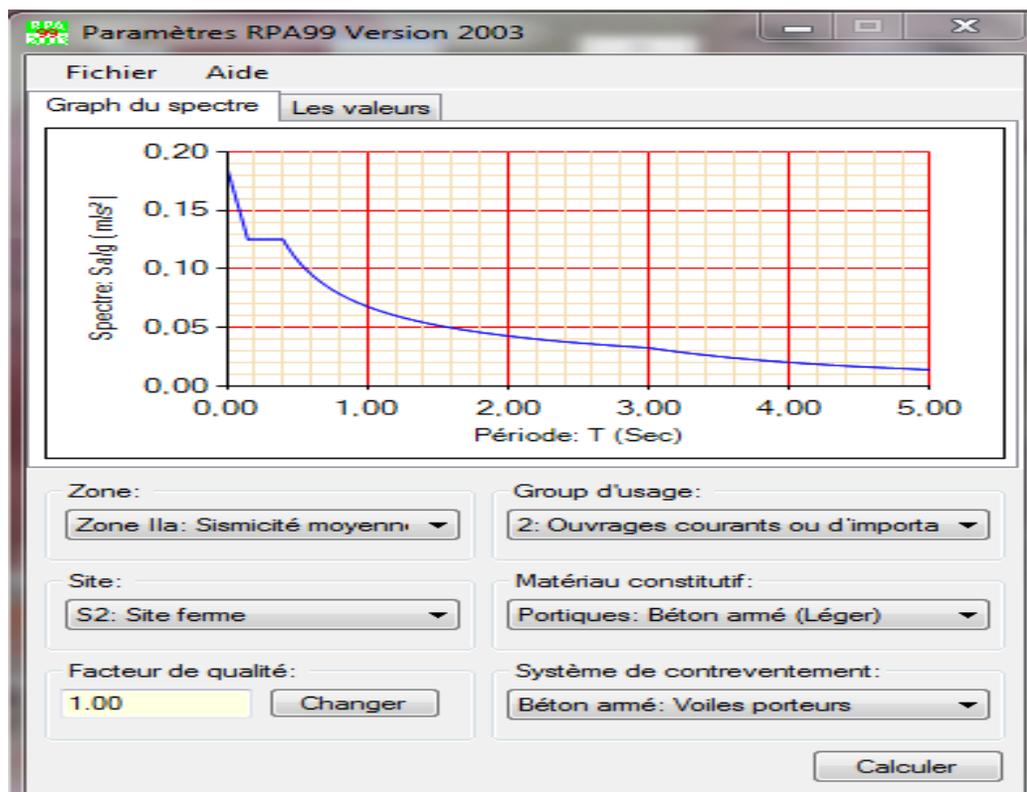


Figure II.4.1. Logiciel RPA 99 version 2003

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

- **Logiciel RPA 99 nous donne les valeurs de la région :**

1) Coef. d'accélération de zone:

$$A = 0,15$$

2) Facteur de qualité:

$$Q = 1,00$$

3) Coef. de comportement:

$$R = 3,50$$

4) Période caractéristique 1:

$$T_1 = 0,15$$

5) Période caractéristique 2:

$$T_2 = 0,40$$

6) Pourcentage d'amortissement critique:

$$\xi = 6,00$$

7) Facteur de correction d'amortissement:

$$\eta = 0,94$$

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

-\Coef. d'accélération de zone: A = 0,15	Graph du spectre	Text
-\Facteur de qualité: Q = 1,00	0,000	0,188
-\Coef. de comportement: R = 3,50	0,010	0,184
-\Période caractéristique 1: T1 = 0,15	0,020	0,181
-\Période caractéristique 2: T2 = 0,40	0,030	0,178
-\Pourcentage d'amortissement critique: $\xi = 6,00$	0,040	0,174
-\Facteur de correction d'amortissement: $\eta = 0,94$	0,050	0,171
	0,060	0,168
	0,070	0,164
	0,080	0,161
	0,090	0,158
	0,100	0,154
	0,110	0,151
	0,120	0,148
	0,130	0,144
	0,140	0,141

Figure II.4.2. Les valeurs du spectre du repense

II.4. 5. Logiciel « seismo Signal » :

Il ya un certain nombre de paramètres de mouvement du sol généralement calculés qui sont fournis, tel que spécifié dans le panneau des paramètres du programme. Par défaut, ils sont présentés uniquement pour l'accélérogramme corrigé. Si, toutefois, dans la correction de base et le module de filtrage que l'utilisateur a choisi de visualiser le mouvement d'entrée "non corrigée" d'origine, voici les paramètres de mouvement du sol qui seront affichés aussi pour l'enregistrement non corrigé, afin de permettre à l'utilisateur de les comparer avec le filtre ,il est à noter que les points de données de l'intensité Arias et les parcelles d'énergie Flux ne sont donnés qu'à l'accélérogramme corrigée (si un utilisateur souhaite obtenir ces données aussi pour l'accélérogramme non corrigée, il devra désactiver la correction de base ou le filtrage et la copie les données dans une application externe, pour une comparaison ultérieure).[12]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

II.4.6. Utilisation de logiciel « siesmo signal » :

Etape 1 :

- On clique FICHER pour ouvrir l'icône et choisir Documents RPA de manière à définir une histoire de temps de l'accélérogramme
- Sélectionner le Document RPA
- Introduire les paramètres

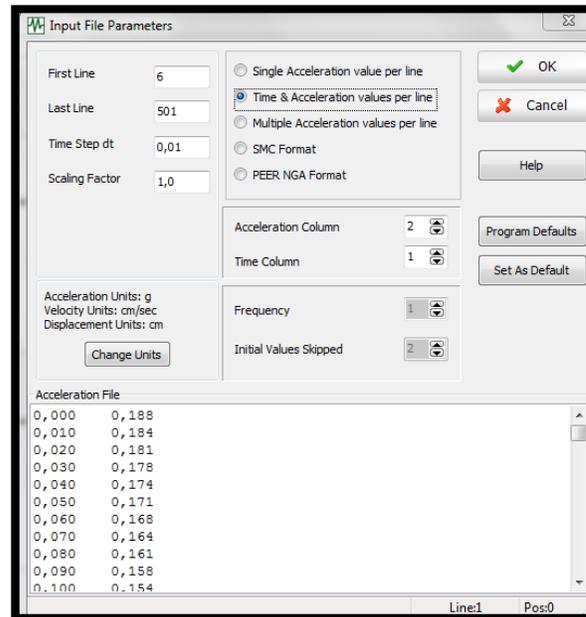


Figure II.4.3. paramètre de seismo signal

- On Choisi le temps et la valeur d'accélération par ligne
- **Résultat de la Série de Temps :**
 - L'accélération en fonction de temps.
 - La vitesse en fonction de temps.
 - Le déplacement en fonction de temps.

Sélection et étalonnage des Accélérographes pour l'analyse non linéaire des structures

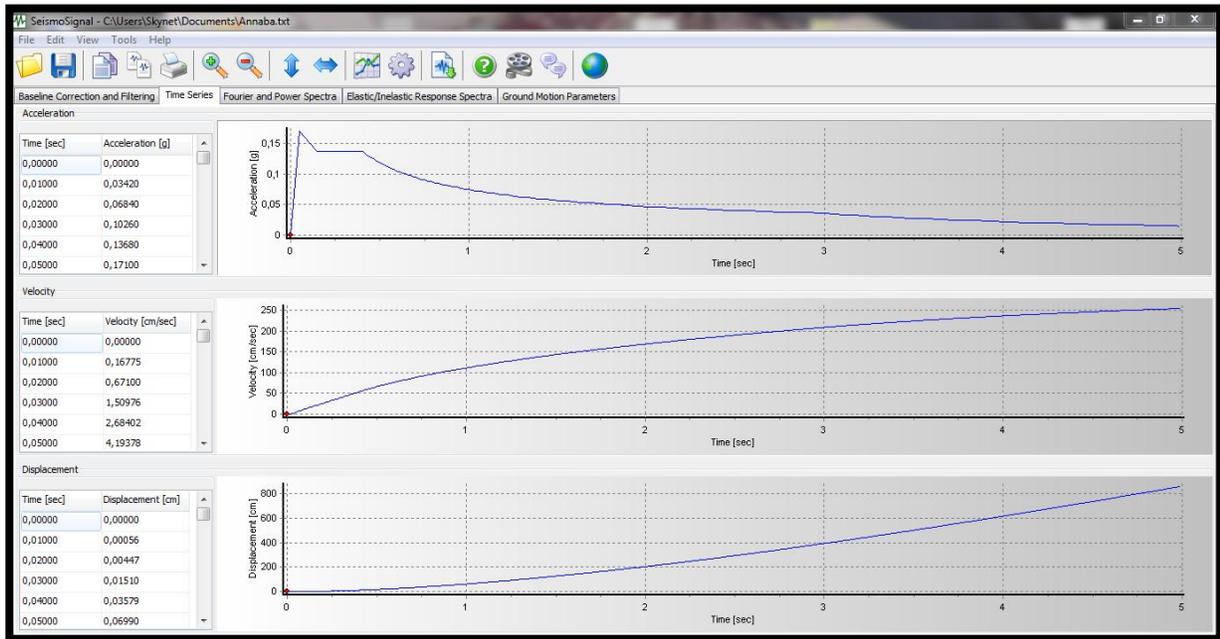


Figure II.4.3. Les graphs et les tableaux de série de temps

Etape 02 :

- **Correction de la ligne directrice et de filtrage :**
 - Appliquer "Baseline correction".
 - Appliquer filtrage.
 - Montrer les résultats non corrigés (ligne grise).

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

■ Résultat de la correction « Baseline et filtrage » :

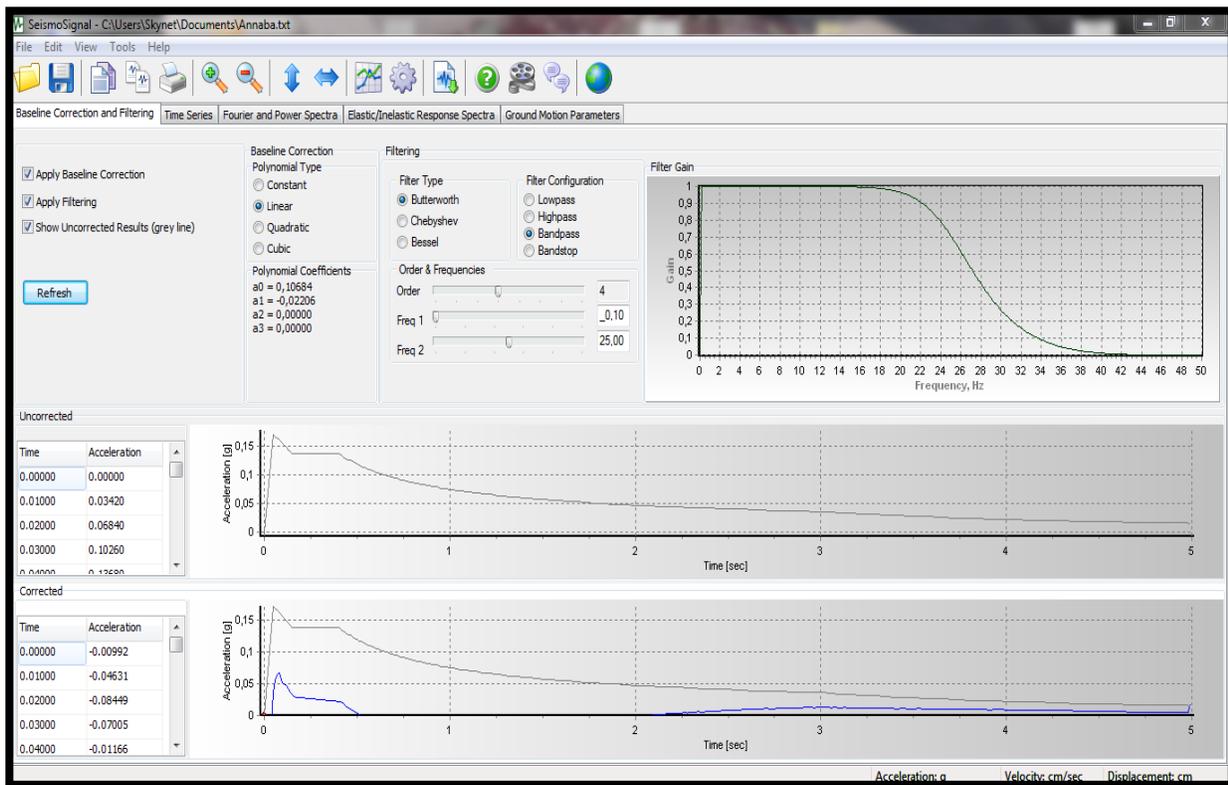


Figure II.4.5. Correction de la ligne directrice et de filtrage

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

■ Résultat de la correction de la Série de Temps :

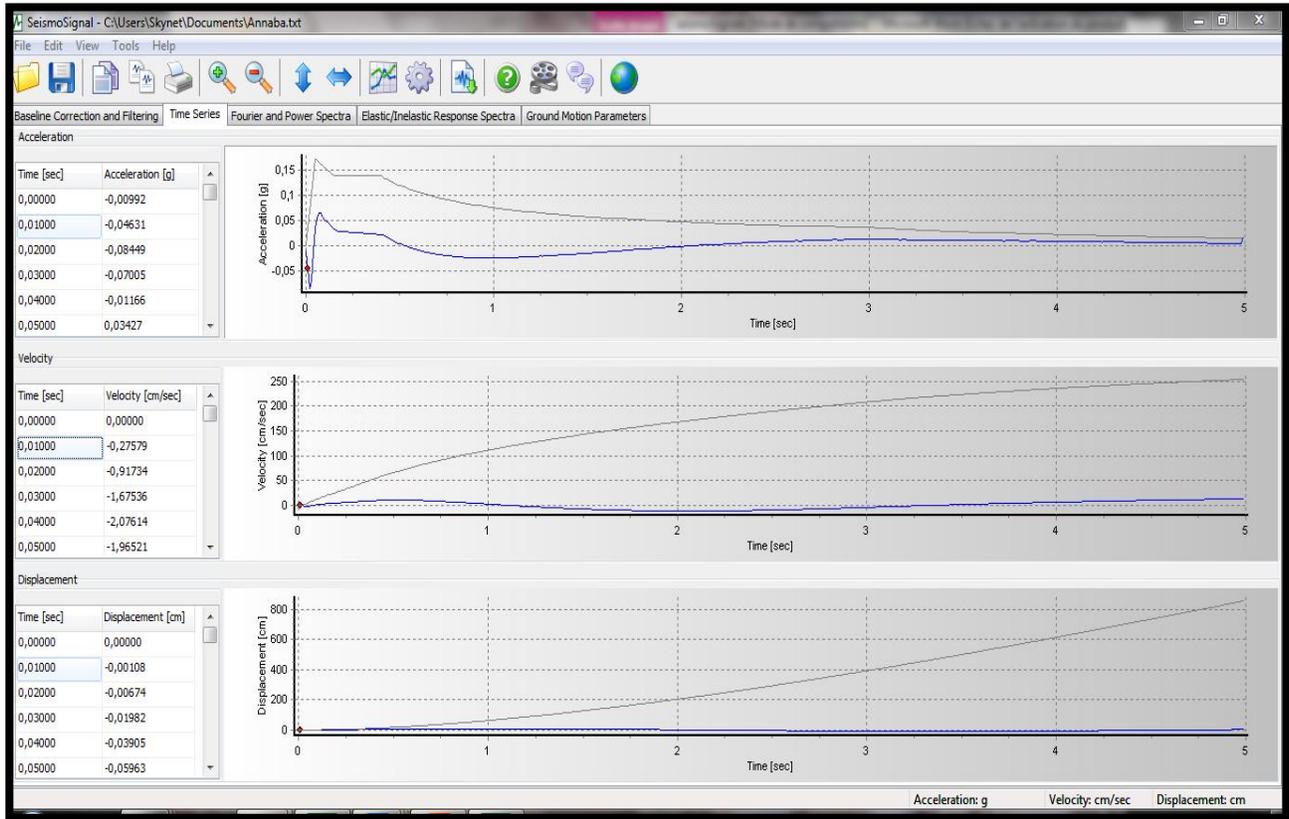


Figure II.4.6. Correction de la série de temps

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

▪ Les résultats Des spectres de puissance :

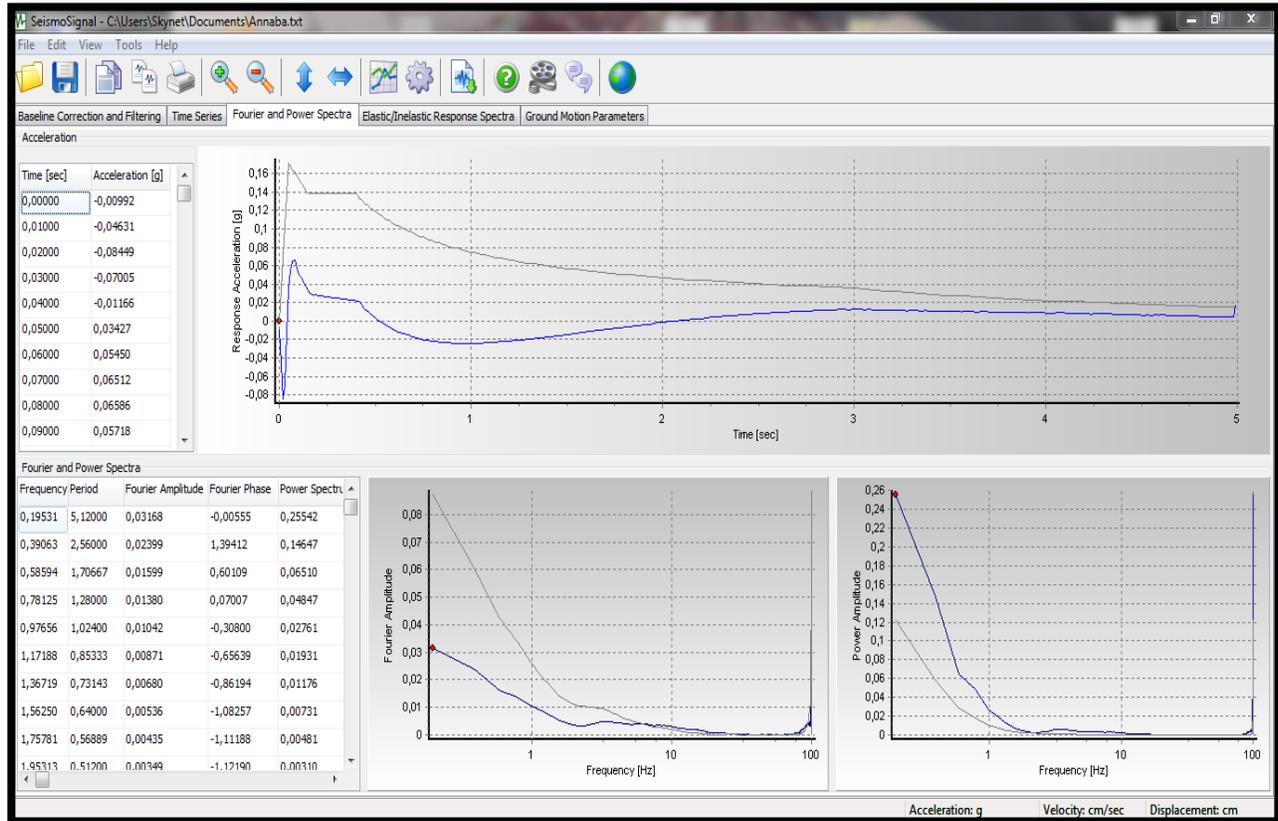


Figure II.4.7. Correction « Fourier and power spectra »

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Etape 03:

- **Spectre de réponse élastique et inélastique**
 - Actualiser spectre élastique.

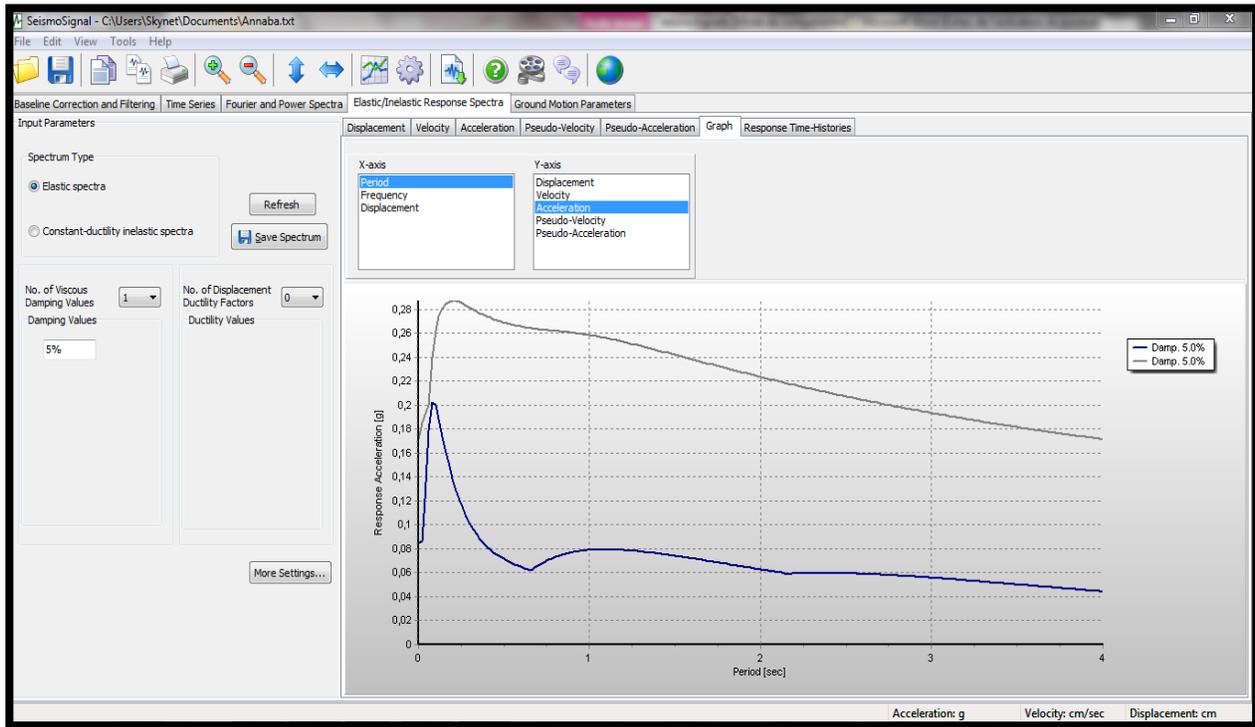
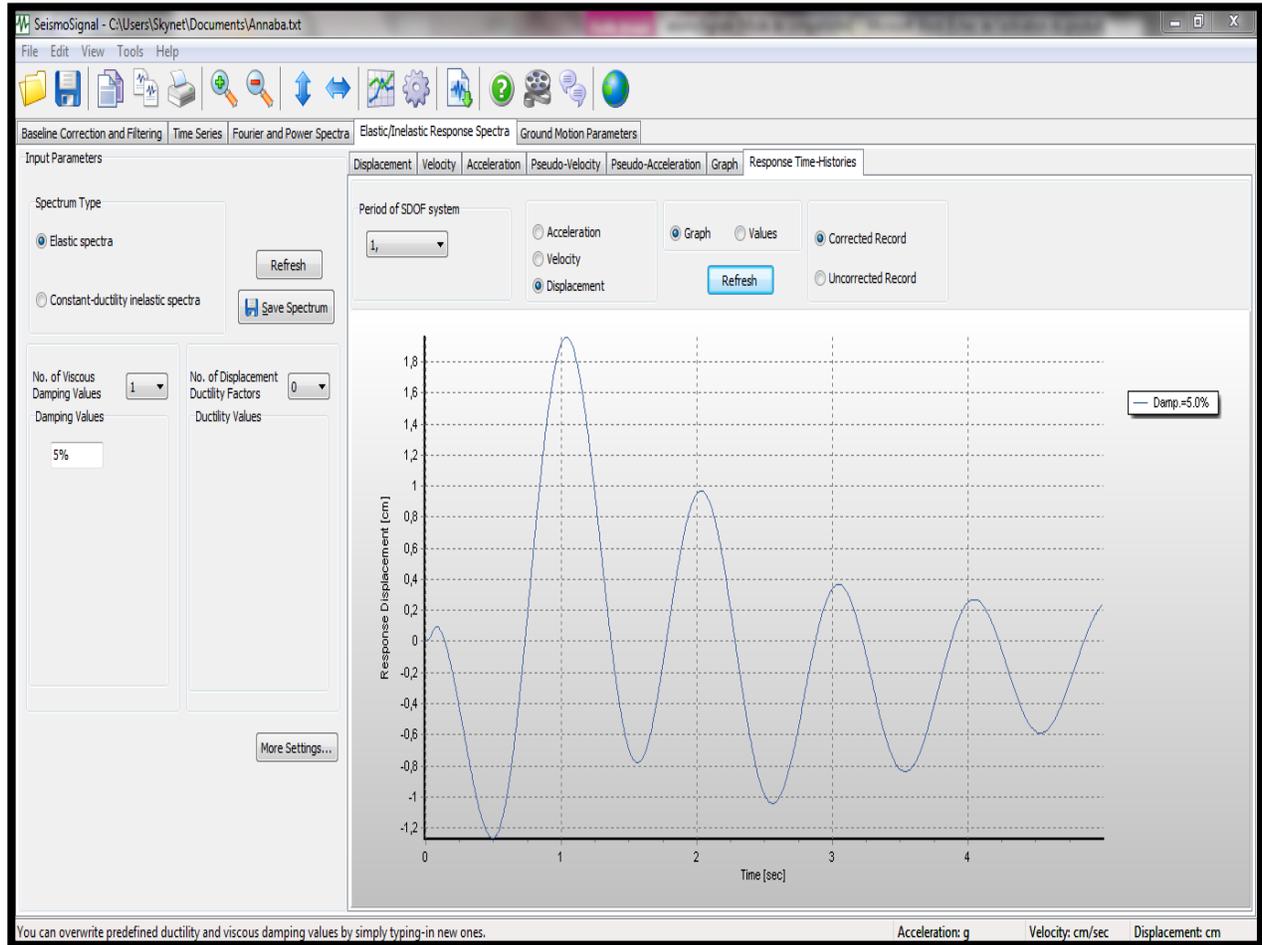


Figure II.4.8. Spectre élastique accélération en fonction période

- **Réponse histoire du temps :**
 - Modifier la période de SDOF système
 - Remplacé accélération par le déplacement
 - Corrigée l'enregistrement
 - Actualiser tous les paramètres.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

■ Résultat Spectre de réponse inélastique



FigureII.4. 9. De spectre de repense inélastique

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Etape04 :

- **Paramètre de mouvement du sol :** c'est une étape de calculs de certains paramètres de mouvement du sol et exprime tous les résultats maximal et final de tous les paramètres avec les accélérogramme synthétique ou artificiel.

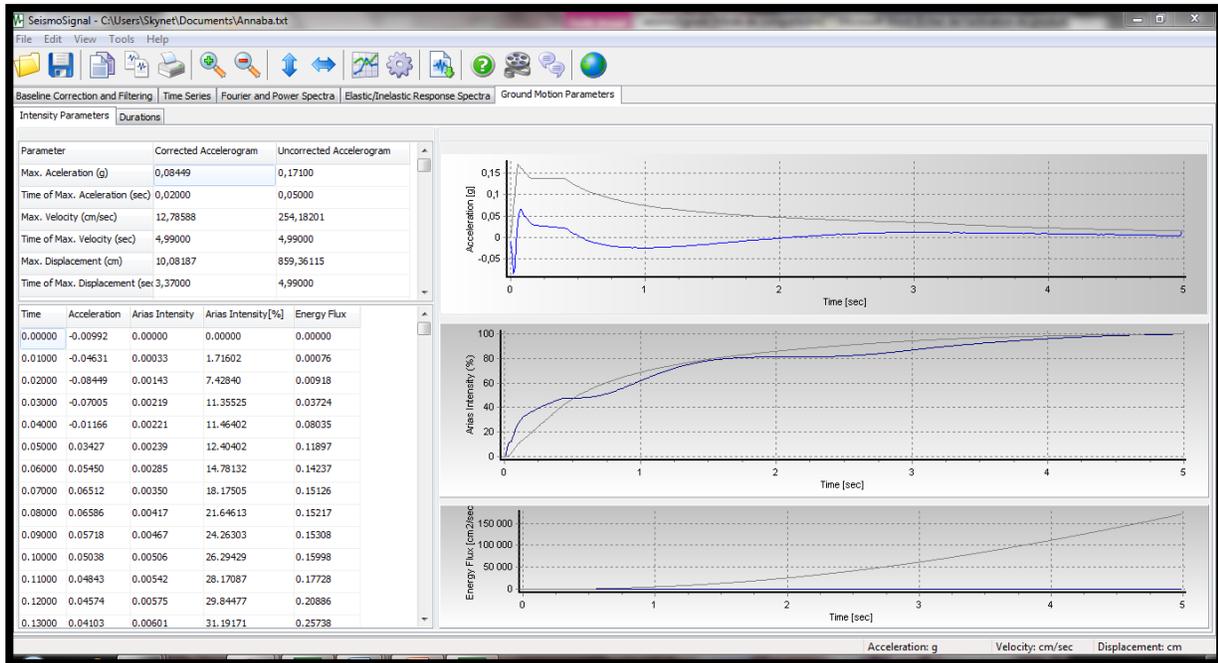


Figure II.4. 10. Paramètres de mouvement du sol

II.4.7. Utilisation de logiciel « siesmo Artif » :

Etape 1: on utilise les deux méthodes suivantes :

- **Méthode de Génération et adaptation des accélérogrammes synthétique :**
C'est l'option par défaut. Les accélérogrammes synthétiques ont tendance à apparaître réalistes et ils peuvent être générés avec quelques connaissances de base (ou plus étendue) de l'histoire des tremblements de terre et les conditions du sol de la région / site d'intérêt. Cette méthode est capable de combiner efficacement les données d'entrée simples avec de bons résultats. [13]

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

- **Méthodes artificielles de Génération d'accélérogramme :**

Elles sont basées sur l'adaptation d'un processus aléatoire à un spectre cible. Le spectre cible est et les données nécessaires à la génération d'un accélérogramme dans ces cas. Cependant, ils exigent de l'expérience pour l'évaluation de la pertinence de l'accélérogramme généré.

Dans la méthode d'ajustement d'accélération réel, l'accélérogramme artificiel est définie à partir d'un séisme réel et adapter son contenu en fréquence en fonction du spectre cible en utilisant la méthode de transformation de Fourier. [13]

Etape 2 : Définir le spectre cible :

- **Utilisez le spectre d'accélérogramme chargé :**

Dans cette option, les utilisateurs peuvent charger un accélérogramme enregistré dans un fichier texte et utiliser le spectre de réponse de ce disque comme le spectre cible. Une deuxième fenêtre sera affichée pour spécifier les colonnes contenant le temps et les valeurs d'accélération et les lignes du fichier doit être pris en considération.

Etape 3 : Accélérogrammes synthétiques :

Les utilisateurs peuvent spécifier les régimes en sélectionnant l'une des options suivantes:

-Régimes Inter-plaque.

-Régimes d'extension tectonique active.

-Régimes intra-plaque.

En outre, l'utilisateur peut sélectionner le champ lointain ou l'option de champ proche (champ proche effets se réfèrent à la présence de longue période des impulsions de vitesse / de déplacement dans les délais historiques générés par certains <100 km événements éloignés).

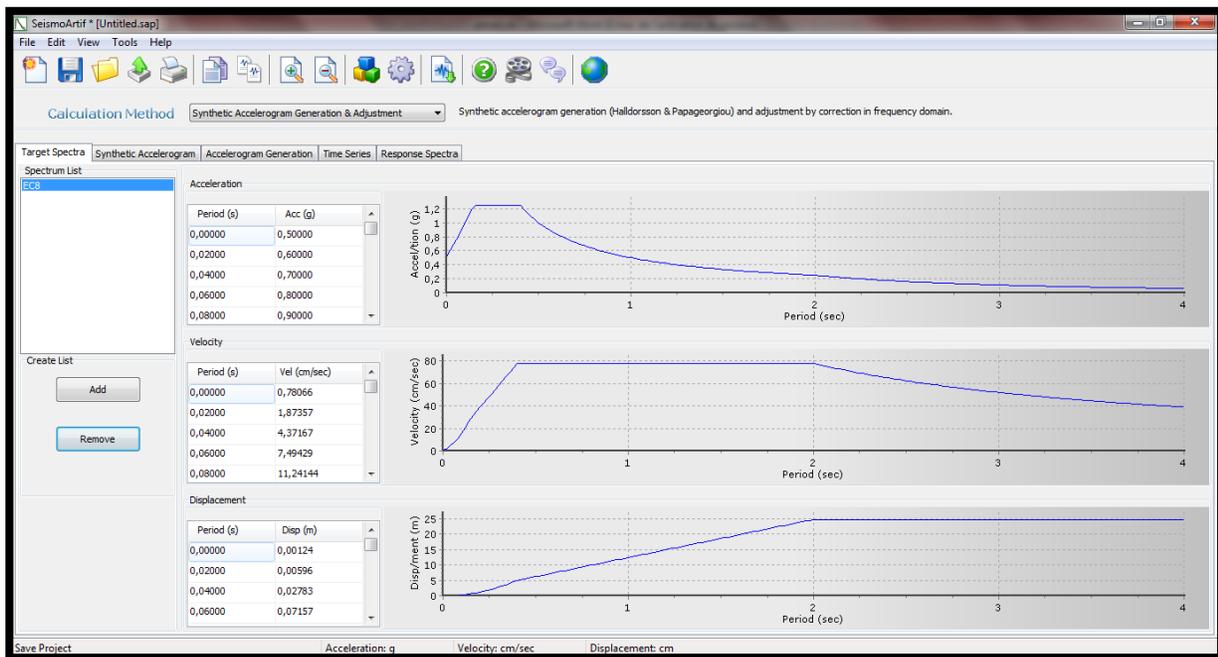
Une fois que les accélérogrammes artificiels ont été générés, il est possible de visualiser les résultats en termes de séries chronologiques et les spectres de réponse.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

La série chronologique (accélération, vitesse, déplacement) sont données dans le module 'Time Series', où le nom de l'enveloppe (si la méthode artificielle Accélérogramme génération ou la méthode artificielle Accélérogramme génération et réglage a été sélectionné),

l'état de la convergence, PGA, PGV , PGD, Arias Intensity, CAV, Significant Durée (A5-95) sont également représentées, de manière à fournir à l'utilisateur un aperçu immédiat des caractéristiques de chaque accélérogramme artificiel généré.

Les spectres de réponse correspondant sont présentés dans le module 'Response Spectra ', où une comparaison avec le spectre cible (tracé en rouge) est également fourni, avec les lignes en pointillés indiquant la tolérance définie dans les paramètres. L'erreur moyenne, le coefficient de variation (par rapport au spectre cible), l'état de convergence et de PGA sont également représentées. S'il vous plaît se référer à ici pour plus de détails sur la façon dont les spectres de réponse sont calculés.[13]



FigureII.4.11. Logiciel siesmo Artif

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Partie III : Résultat et conclusion

III. Introduction :

Cette partie sera réservée au différent résultat de notre projet constitué essentiellement de la méthode « de section et d'étalonnage des accélérogrammes synthétique dans le calcul non linéaire des structures ».

Cette méthode est présentée en partie I et détaillée en partie II ,peut nous renseigner

Sur les accélérogrammes synthétiques compatibles avec le spectre de réponse Algérien.

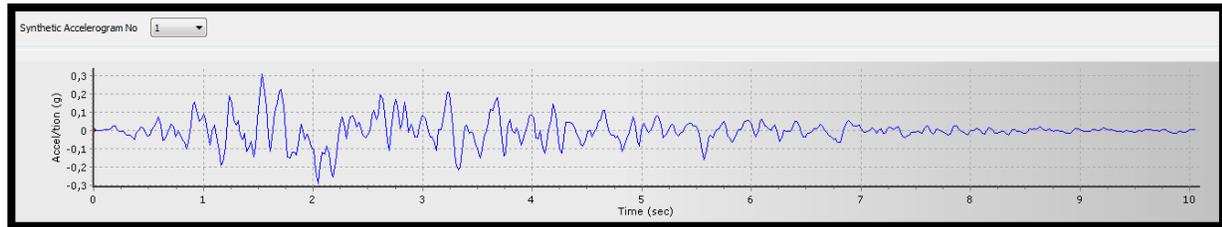
Dans cette partie, on va exposer nos résultats avec les logiciels « seismo Artif »

Accélérogrammes Synthétique

- Génération des accélérogrammes synthétique
- La discussion qui porte sur ces résultats, seront comme suit:
 - Comparaison entre les 7 accélérogrammes synthétique
 - Comparaison entre les 7accélérogrammes artificiel
 - Comparaison entre les 7 spectres de réponse

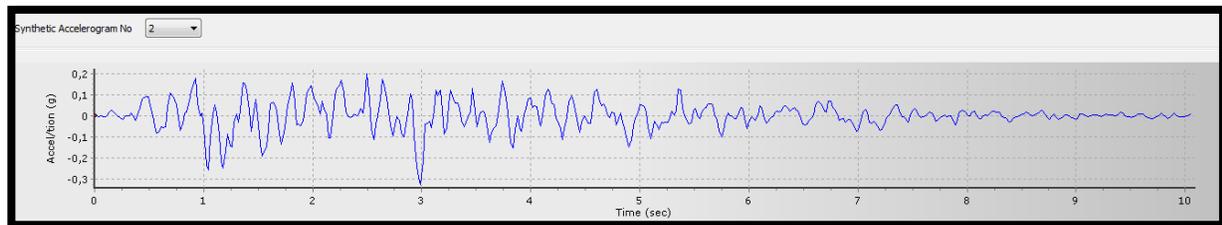
Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

III.1. Accélérogramme synthétique :



Duration: 10,057 sec PGA: 0,310 g

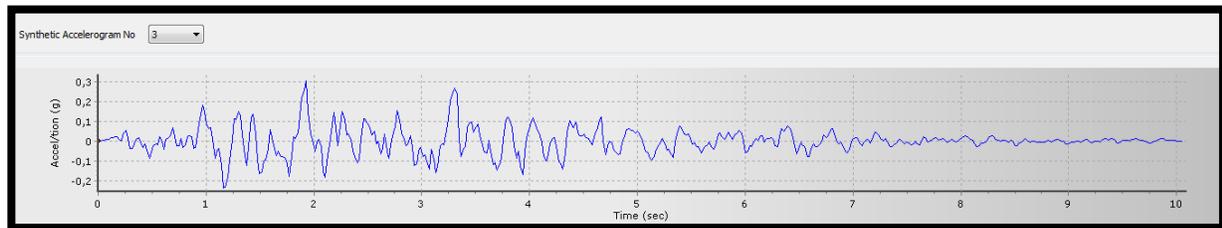
Figure III.1. Accélérogramme synthétique n°1



Duration: 10,057 sec PGA: 0,327 g

Figure III.2. Accélérogramme synthétique n °2

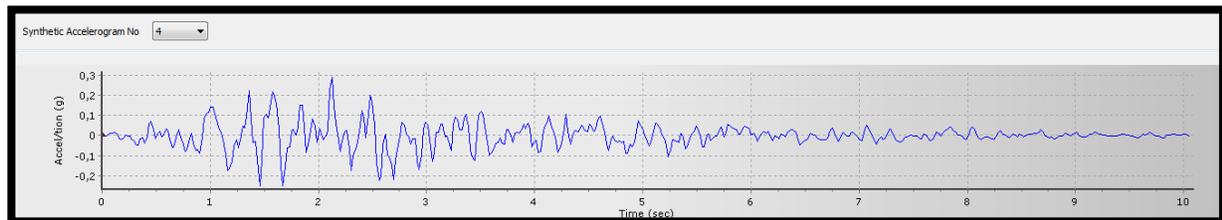
Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures



Duration: 10,057 sec

PGA: 0,306 g

Figure III.3. Accélérogramme synthétique n °3



Duration: 10,057 sec

PGA: 0,288 g

Figure III.4. Accélérogramme synthétique n °4

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

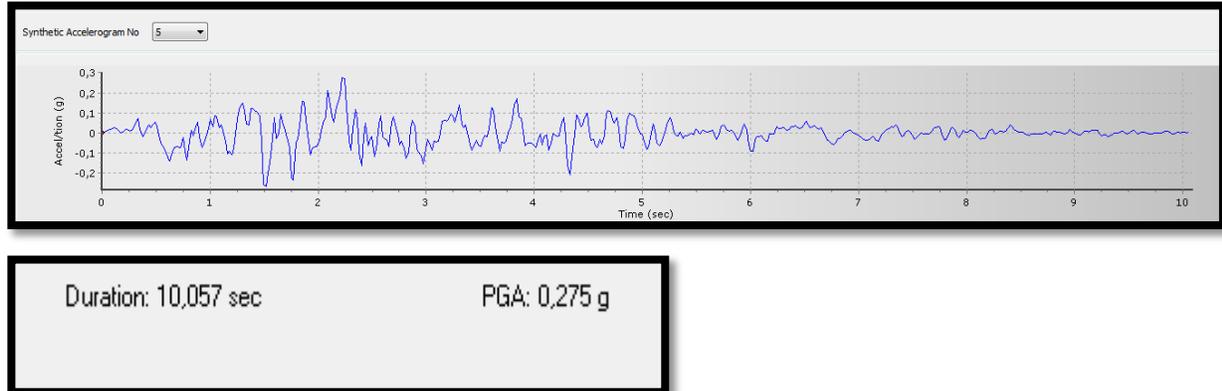


Figure III.5. Accélérogramme synthétique n °5

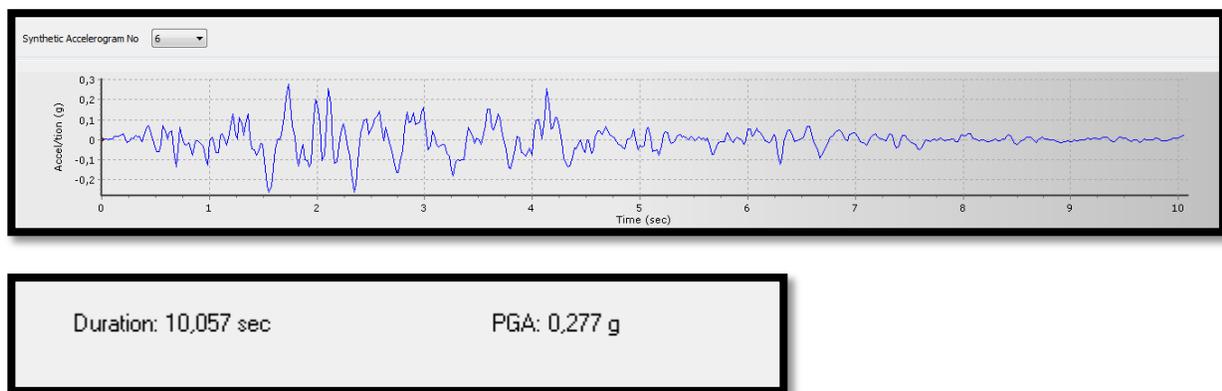


Figure III.6. Accélérogramme synthétique n °6

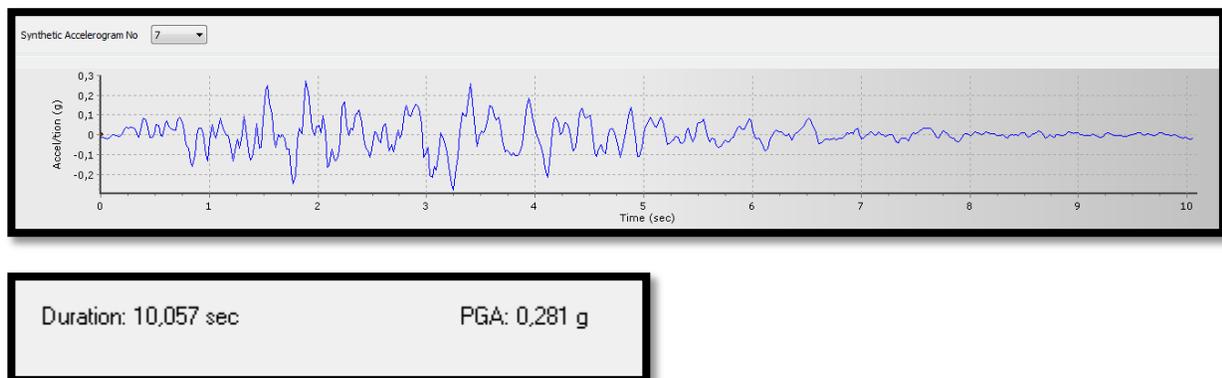


Figure III.7 .Accélérogramme synthétique n °7

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

III.1.1. Analyse et commentaire :

L'enregistrement sismique se fait pour une durée de 10.057 (s) avec sept accélérogrammes synthétique. On trouve qu'il ya une petit déférence entre les signaux.

- PGA dans 1^{er} accélérogramme est de 0.310g
2^{eme} accélérogramme est de 0.327g
3^{eme} accélérogramme est de 0.306g
4^{eme} accélérogramme est de 0.288g
5^{eme} accélérogramme est de 0.275g
6^{eme} accélérogramme est de 0.277g
7^{eme} accélérogramme est de 0.281g

La différence est à cause de la méthode PGA mise à l'échelle. Cette méthode consiste à multiplier l'accélérogramme sélectionné par un coefficient scalaire pour obtenir un PGA pour les mouvements du sol à échelle égale à la PGA cible. Cette méthode a été critiquée par Nau et Hall (1984), car elle ne prend pas en considération le contenu de la fréquence des mouvements du sol. En outre, le PGA n'est pas un bon indicateur de la force et de la fréquence du contenu des mouvements du sol. Le spectre de la PGA de réponse mise à l'échelle des mouvements du sol, présente un large éventail des accélérations spectrales à travers les différentes périodes. Cela confirme que la PGA produit une forte dispersion et, par conséquent, elle n'est pas trop fiable. À cet égard, la méthode de mise à l'échelle PGA n'a pas été retenue dans cette étude. [2]

III.2. Les accélérogrammes artificiel :

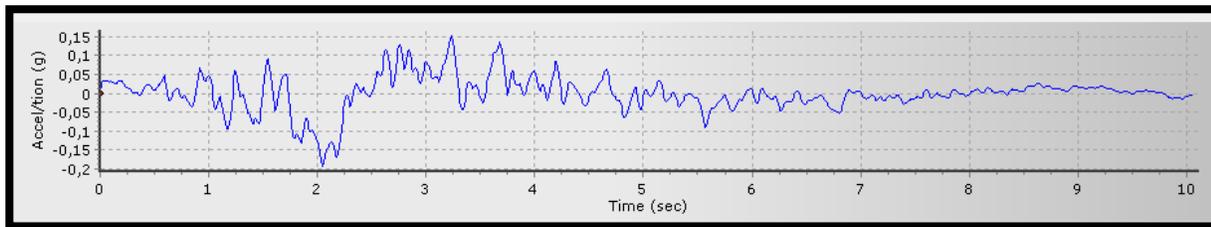


Figure III.8. Accélérogramme artificiel n°1

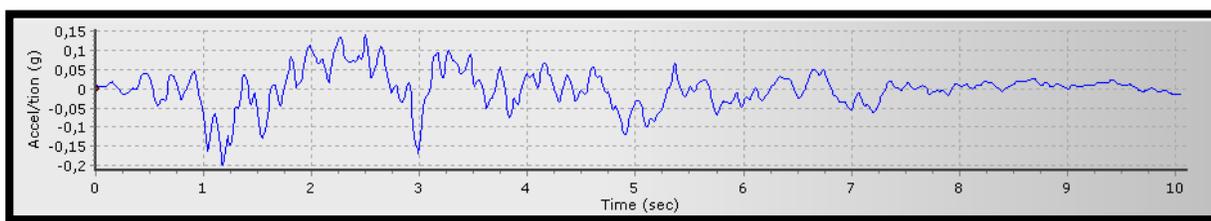


Figure III.9 Accélérogramme artificiel n°2

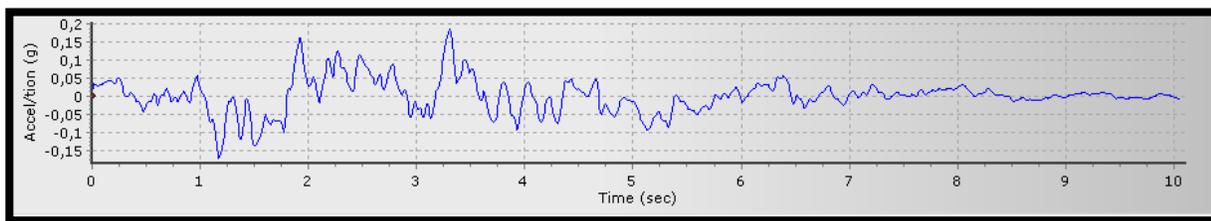


Figure III.10. Accélérogramme artificiel n°3

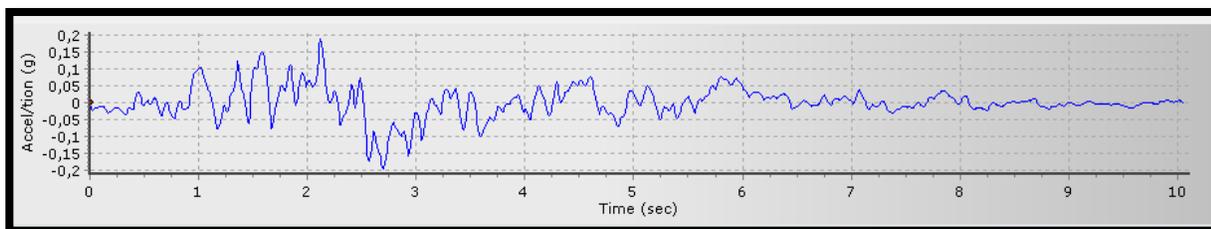


Figure III.11. Accélérogramme artificiel n°4

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

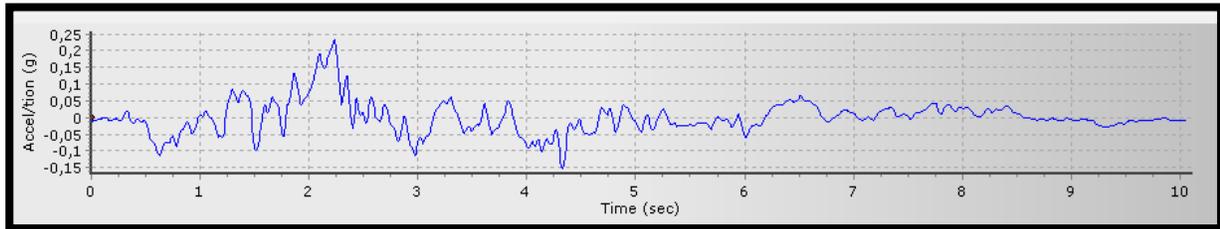


Figure III.12. Accélérogramme artificiel n°5

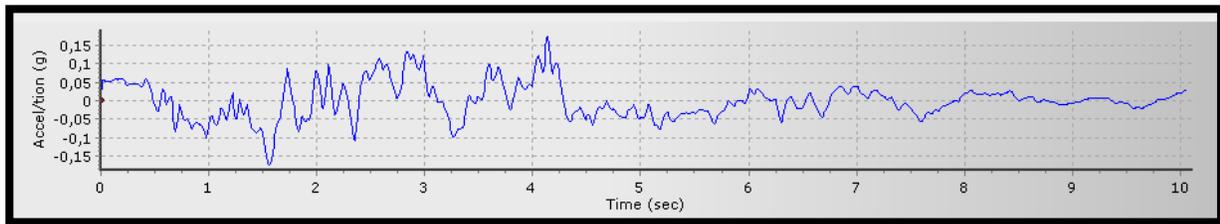


Figure III.13. Accélérogramme artificiel n°6

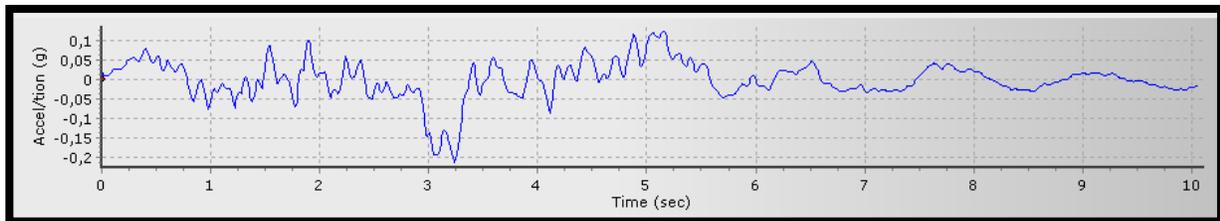


Figure III.14. accélérogramme artificiel n°7

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

III.2.1 Analyse et commentaire :

On remarque que les sept graphs d'enregistrement sismique ne sont pas symétriques, Il existe une différence entre les signaux, cet écart appartient à l'accélération maximale du sol et de l'erreur d'enregistrement due à l'accélérogramme sélectionné qui sont multipliée par un coefficient scalaire(PGA).

Accelerogram No.	Envelope Name	Mean Error (%)	Coeff. of Variation (%)	PGA (g)
1	No Envelope	9,26	9,58	0,193
2	No Envelope	9,13	9,81	0,199
3	No Envelope	9,89	10,38	0,184
4	No Envelope	9,03	12,10	0,197
5	No Envelope	9,55	10,97	0,233
6	No Envelope	9,53	10,72	0,175
7	No Envelope	9,38	9,65	0,213

Tableau III.1. Statistiques globales du spectre cible pour Annaba

Les accélérogrammes Artificiel	Durée significative (s)
N°1	4.660
N°2	5.700
N°3	4.510
N°4	4.920
N°5	5.910
N°6	6.420
N°7	6.710

Tableau III.2. Durée significative des accélérogrammes

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

	durée significative (s)	PGA(g)	Moyenne d'erreur %	Coefficient De variation %
Accélérogramme moyenne	5.547	0.199	9.39	10.46

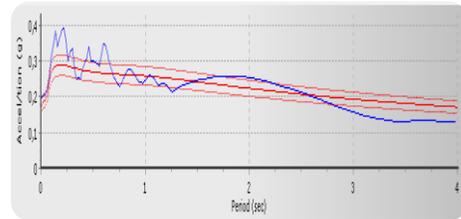
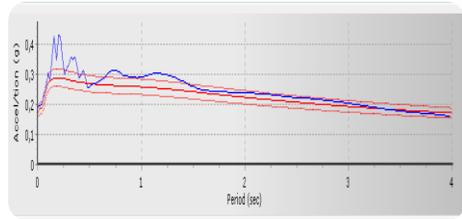
Tableau III.3. Accélérogramme moyenne

III.3.Spectre de réponse :

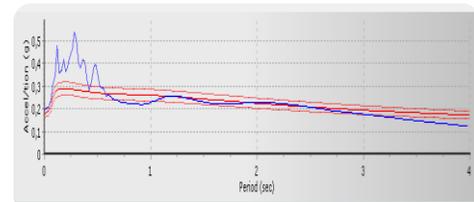
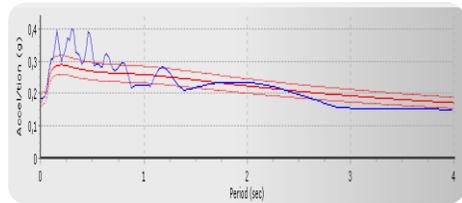
Nous avons transformé les données accélérométriques enregistrées lors du séisme d'Annaba en spectres de réponse de forme (Sd – Sa).

On a obtenue sept spectres de réponse :

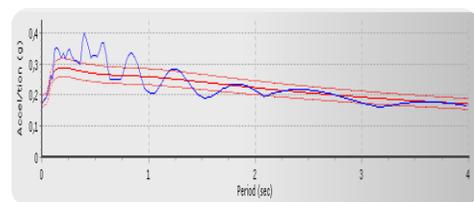
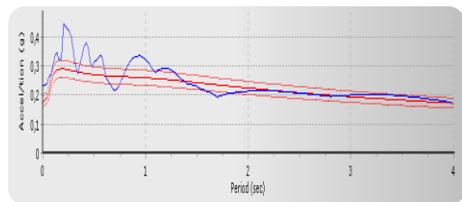
Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures



Spectre 1 et 2



3 et 4



5 et 6

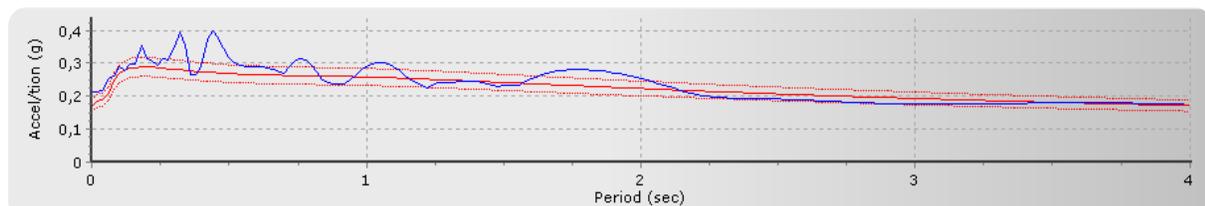


Figure III .15.Les sept spectre de repense obtenue

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

III.3.1. Conclusion :

Une fois ce travail accompli, nous sommes arrivés à formuler des spectres de réponses élastiques à partir des données accélérométriques obtenues à partir des sept (07) accélérogrammes choisis, pour la région d'Annaba et cela dans les deux directions (Est-Ouest) et (Nord-Sud). Par la suite nous allons évaluer l'effet des séismes dans la région sur la performance sismique des structures en se basant principalement sur ces spectres obtenus.

Les accélérogrammes synthétique sont compatible avec le spectre de réponse Algérien de la région d'Annaba.

Conclusion générale et perspective

Ce mémoire présente une comparaison des différentes méthodes d'étalonnage de secousses sismiques pour l'analyse dynamique non linéaire. Les méthodes d'étalonnage SIA et MSE sont les deux méthodes qui se sont démarquées des autres par leur précision et leur dispersion. Il faut cependant noter que ces résultats sont limités aux structures utilisées et pourraient donc varier quelque peu si de nouvelles structures sont utilisées.

Vu les résultats obtenus, il est important de noter que la forme du spectre de réponse n'est pas un indicateur prépondérant de potentiel de dommage inélastique car les méthodes à concordance spectrale FD et TD ne produisent pas les résultats attendus même si leur spectre de réponse correspondent pratiquement avec le spectre de conception.

Afin de confirmer les conclusions établies, certains approfondissements sont nécessaires. Un plus grand nombre de structures devraient être étudiées afin d'augmenter la fiabilité des résultats. Les conclusions du chapitre sont cependant suffisantes pour éclairer le choix de méthode d'étalonnage. La caractérisation de la banque de données sismiques, constituée de séismes représentant les caractéristiques sismiques d'Annaba permis de démontrer que le rapport entre les composantes horizontales d'un même séisme.

Cette observation s'appuie sur ce qui est présent dans la littérature, qui suggère un facteur pour différents indices de dommages été utilisés pour évaluer ce rapport. Autant pour les séismes historiques que simulés, les indices *PGA* et *PGV* ont démontré des résultats moins dispersés et plus près de la moyenne, tandis que l'indice *CAV* a démontré la plus petite dispersion, mais une valeur supérieure à la moyenne. Ainsi les deux premiers indices pourraient être utiles pour obtenir une valeur moyenne et l'indice *CAV*, une borne supérieure au ratio des composantes horizontales.

Généralement, les rapports pour les séismes simulés ont aussi démontré une dispersion plus faible que les rapports pour les séismes historiques.

Il est recommandé, dans la littérature, que la moyenne des deux spectres de l'événement étalonnés soit située près du spectre cible.

Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures

Il a aussi été démontré que la méthode permettant d'obtenir le facteur d'étalonnage (SIa , $Sa(T)$, MSE , etc.) n'influence pas significativement sur le facteur d'étalonnage issu de la technique d'étalonnage bidirectionnel. En effet, l'évaluation des méthodes d'étalonnage différentes a permis de conclure qu'en moyenne, le biais induit par celle-ci n'est pas supérieur à 10%.

Les analyses temporelles réalisées à l'aide des sollicitations ajustées selon les 3 techniques d'étalonnage bidirectionnel préalablement choisies permettent de tirer plusieurs conclusions quant à la validité de ces techniques. Premièrement, on remarque que les techniques temporelles produisent des résultats significativement plus élevés que les méthodes spectrales. En moyenne, cette différence peut atteindre 40% pour les efforts internes. De plus, la technique 3 (*MaxRot – Beyer*) génèrent des résultats beaucoup plus élevés que les deux autres méthodes qui semblent générer des résultats semblables. Les séismes simulés quant à eux engendrent des résultats qui sont inférieurs et moins dispersés que les séismes historiques (jusqu'à 20% plus faible). Au sein des séismes simulés, les enregistrements sismiques produisent des résultats moins dispersés et de valeurs moindres que les séismes d'Annaba.

- Les calculs linéaires (spectraux ou transitoires) produisent sensiblement les mêmes résultats avec des accélérogramme artificielle corrigée.
- Des précautions sont à prendre sur la réalisation et l'utilisation des accélérogramme (critère de validation)
- La recherche d'accélérogramme naturels dans les base disponible est très difficile et donne très peu d'accélérogrammes compatible en magnitude, distance, sol et leur spectre est éloigné du spectre cible.
- Il faudrait établir des critères d'acceptation de l'accélérogramme (spectre correspondant à la ductilité à atteindre)
- pour les calcule non linéaire, les accélérogramme artificielle donnent en général des résultats plus pénalisants et dispersées que l'accélérogramme naturel associé.

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. Mémoire de méthodologie pour la Sélection et étalonnage des Accélérogrammes pour l'analyse non linéaire des structures de bâtiment localisés dans l'est de l'Amérique de nord. Dominic Michaud. 2012.
- [2]. Mémoire de Sélection, étalonnage et orientation critique des secousses sismiques bidirectionnelles pour l'analyse des bâtiments situés dans l'est du Canada. Jean-Philippe Ouellette. 2014.
- [3]. Fahjan, Yasin.M. 2008. « Selection and Scaling of Real Earthquake Accelerograms to Fit the Turkish Design Spectra ». vol. 19, p. 4423-4444.
- EFFET DES SEISMES BIDIRECTIONNELS SUR LA LONGUEUR D'APPUI DES
TABLIERS DE PONTS. Djerdane Mabrouk.
- [4]. Mémoire de magister « évaluation des mécanismes de ruine des structures auto stable sous les séismes proches et lointains ». **Mr HABBI Djamel**.
- [5]. © 2016 Seismosoft Ltd. VAT: 02763660830
- [6]. Analyse spectrale non itérative des oscillateurs simple sous l'action des tremblements de terre, Youssef BELMOUDEN. (*Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Laboratoire d'informatique et de mécanique appliquées à la construction (IMAC), GC G1494, ENAC-IS-IMAC, CH-1015 Lausanne.*
- [7]. <https://orbi.ulg.ac.be/bitstream/2268/164345/3/RapportTFE.pdf>
- [8]. Earthquake Solutions, Providing State-of-the-Art Software for Structural and Earthquake Engineering. Bispec.
- [9]. Thèse de doctorat présentée par DJEBBAR Nabil « Contribution à l'étude de la performance parasismique des éléments linéaire en béton ».
- [10]. Mémoire de magister effet des séismes proches et lointain sur la performance sismique des structures auto-stable en béton armé. Hassani Karim.
- [11]. manuel de seismo signale version 2016.

[12]. Mémoire de magister influence de la disposition des voiles sur la performance sismique des bâtiments. BELKHEIR Mohammed Aghiles.

[13].Manuel de seismo Artif version 2016.