



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université de Tissemsilt



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département des Sciences et de la Technologie

Mémoire de fin d'études pour l'obtention du diplôme
de Master académique en
Filière : **Génie Civil**
Spécialité : **Structures**

Présenté par : **MISSOUM Tarek Amine**

Thème

Effets de la sélection des enregistrements sismiques sur la réponse d'une structure en béton armé

Soutenu le, 11/06/2023

Devant le Jury :

Besseglier Abderrahmane	Président	Prof.	Univ-Tissemsilt
Abdelhamid Abdelmalek	Encadrant	M.A.A.	Univ-Tissemsilt
Bouderba Bachir	Co-Encadrant	Prof.	Univ-Tissemsilt
Ouazir Mansour	Examineur	M.C.B.	Univ-Tissemsilt

Année universitaire : 2022-2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

A l'issue de ce travail, je remercie, en premier lieu, Allah de m'avoir donné la force et le courage de mener à terme ce travail.

Ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide de mes chers promoteurs, Monsieur ABDELHAMID Abdelmalek et Monsieur BOUDERBA Bachir, je les remercie pour la qualité de leur encadrement exceptionnel, pour leur patience, leur disponibilité, leur conseil et leur encouragement lors de ma préparation de ce mémoire.

Mes vifs remerciements vont à Monsieur BESSEGIIER Abderrahmane pour l'honneur qu'il nous a fait en acceptant de présider le jury de ce mémoire.

Je tiens à remercier et à exprimer mes reconnaissances et mes gratitude envers Monsieur OUAZIR Mansour pour l'honneur qu'ils m'ont fait en prenant part à ce jury.

Mes remerciements les plus sincères au staff pédagogique de département de science et technologie, de l'université de Tissemsilt pour la qualité de l'enseignement.

J'adresse mes remerciements aussi à ma famille et toute personne ayant participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail qu'elle trouve ici l'expression de mes sincères remerciements.

Dédicace

A peine je viens de terminer la rédaction de mon travail, je voudrais très vite le dédier avec une immense joie, un grand honneur et un cœur chaleureux :

A mes très chers parents en signe de mes profondes et affectueuses reconnaissances pour les amours sans mesure, tous les sacrifices, les soutiens, les tolérances et les encouragements qu'ils ont bien voulu consentir pour moi. Tous les mots restent faibles pour leur exprimer mes sentiments et qu'ils acceptent seulement ces lignes en guise de témoignage.

A mes chers frères Abdelaziz et Abderrahim.

A ma très chère sœur Safaa Rayhana.

A mes grands-parents.

A toute la famille Missoum et Hamzaoui.

A tous mes chers amis au nom de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

A tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

A toute la promotion 2022/2023.

Résumé

Cette étude analyse l'effet de la sélection des enregistrements sismiques issues des bases de données mondiales tel que PEER, sur la réponse temporelle d'une structure en béton armé.

La structure est constituée d'un Rez-de-chaussée plus cinq étages, implantée dans une zone de moyenne sismicité IIa conformément au Règlement Parasismique Algérien 99 version 2003.

Dans un premier chapitre, une revue bibliographique sur la représentation et les caractéristiques d'un mouvement sismique ainsi que sur les méthodes de sélection et d'étalonnage des enregistrements sismiques, ont été présentées. Dans un deuxième chapitre, cinq enregistrements sismiques ont été sélectionnés à partir d'un spectre cible réglementaire et à l'aide des logiciels SeismoSelect et SeismoMatch. Les accélérogrammes ajustés par les techniques jugées appropriées sont ensuite utilisés pour des analyses dynamiques temporelles d'une structure en béton armé à cinq étages à l'aide du logiciel ETABS.

Dans une dernière partie, les résultats de l'analyse issues les méthodes dynamiques temporelle sont comparés avec ceux issues de la méthode modale spectrale. Cette comparaison permet d'évaluer l'effet de la sélection des enregistrements sismiques sur la réponse de la structure.

Mots clés : Enregistrements sismiques, Sélection, Spectre cible, Analyse modale spectrale, Analyse temporelle.

Abstract

This study analyzes the effect of selecting seismic records from global databases like PEER, on the time history of a reinforced concrete structure.

The structure consists of a basement and five stories, located in a region of moderate seismicity IIa in accordance with the Algerian Seismic Regulations 99 version 2003.

The first chapter provides a literature review on the representations and characteristics of seismic ground-motion and methods for selecting and scaling seismic records. In the second chapter, five seismic records are selected from a target spectrum, using SeismoSelect and SeismoMatch software. The selected and scaled records, obtained through suitable techniques, are then used for dynamic time history analyses of the structure using the ETABS software.

In the final part, the results are compared with the modal spectral analysis. This comparison allows us to evaluate the effect of the selection of seismic records on the structural response.

Keywords: Seismic records, Selection, Target Spectrum, Modal Spectral analysis, Time history analysis.

ملخص

هذه الدراسة تقوم بتحليل تأثير اختيار التسجيلات الزلزالية من قواعد البيانات العالمية مثل PEER على الاستجابة اللحظية لمنشأ من الخرسانة المسلحة. يتكون هذا المنشأ من طابق أرضي وخمسة طوابق ويقع في منطقة ذات نشاط زلزالي متوسط IIa وفقاً لقانون مقاومة الزلازل الجزائري 99 نسخة 2003.

يقدم الفصل الأول عرضاً لمخلص علمي للتمثيلات والخصائص الخاصة بحركة الزلازل، بالإضافة إلى أساليب اختيار ومعايرة السجلات الزلزالية. في الفصل الثاني، يتم اختيار خمسة تسجيلات زلزالية وفقاً لطيف مستهدف وباستخدام برامج مثل SeismoSelect و SeismoMatch. يتم بعدها استخدام التسارعات المعدلة بواسطة التقنيات المناسبة في التحليل الديناميكي للمنشأ السالف الذكر.

أخيراً، يتم مقارنة نتائج التحليل الديناميكي اللحظي مع التحليل النمطي الطيفي. وتسمح هذه المقارنة بتقييم مدى تأثير اختيار التسجيلات الزلزالية على استجابة المنشأ.

كلمات مفتاحية: التسجيل الزلزالي، اختيار، الطيف المستهدف، التحليل الطيفي النمطي، التحليل اللحظي.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Notations et symboles

Introduction Générale	1
Chapitre I: Etude Bibliographique	4
I.1 Introduction :	4
I.2 Représentation du mouvement sismique :	4
I.2.1 Spectre cible :	4
I.2.2 Présentation temporelle du mouvement sismique :	5
I.2.3 Accélérogrammes :	7
I.3 Critères de sélection des accélérogrammes :	8
I.3.1 Contenu fréquentiel :	8
I.3.2 Magnitude (M) et distance (R) :	9
I.3.3 Type de sol :	10
I.3.4 Durée significative :	11
I.3.5 Environnement tectonique :	11
I.4 Méthodes d'étalonnage :	12
I.4.1 Méthode dite de type « Matching » :	13
I.4.2 Méthode dite de type « Scaling » :	14
I.5 Présentation de la méthode temporelle :	21
I.6 Exemples des bases de données disponibles :	21
I.7 Conclusion :	23
Chapitre II: Sélection et étalonnage des accélérogrammes	25
II.1 Introduction :	25
II.2 Spectre de réponse élastique :	25
II.2.1 Coefficient d'accélération A :	26
II.2.2 Coefficient de comportement de la structure R :	26
II.2.3 Facteur de qualité Q :	26
II.2.4 Pourcentage d'amortissement critique ξ :	26
II.2.5 Le facteur de correction d'amortissement η :	26
II.2.6 Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site :	26

II.3	Indicateurs de potentiel de dommages des enregistrements sismiques :	27
II.4	Sélection des enregistrements historiques :	28
II.5	L'application sur SeismoSelect	30
II.5.1	Définir le spectre cible.....	31
II.5.2	Sélectionner des enregistrements	32
II.5.3	SeismoMatch :	33
II.6	Etalonnage des mouvements sélectionnés :	38
II.6.1	La méthode PGA	38
II.6.2	Méthode de correspondance spectrale dans le domaine temporelle « Matching » :	39
II.7	Conclusion :	40
Chapitre III:	Etude d'un bâtiment et recherche	42
III.1	Introduction :	42
III.2	Présentation de l'ouvrage.....	42
III.2.1	Situation du projet :	42
III.2.2	Présentation de l'ouvrage :	43
III.2.3	Données géotechniques du site.....	46
III.2.4	Caractéristiques géométriques.....	46
III.2.5	Ossature et système constructif adopté	47
III.2.6	Caractéristiques mécaniques des matériaux	49
III.2.7	Contrainte admissible de cisaillement	54
III.2.8	Etats limites	54
III.2.9	Sollicitation du calcul vis-à-vis des états limites.....	56
III.3	Descende des charges et Pré dimensionnement :	57
III.3.1	Les charges et des surcharges.....	57
III.4	Pré dimensionnement des éléments principaux :	58
III.4.1	Les poteaux :	58
III.4.2	Les poutres :	58
III.4.3	Les voiles :	59
III.5	Modélisation de la structure :	59
III.5.1	Présentation du logiciel ETABS V.9.6.0 :	59
III.5.2	Présentation de la vue de la structure :	59
III.5.3	Choix de la disposition des voiles :	60
III.6	Analyse modale de la structure :	61
III.7	Choix des accélérogrammes pour les analyses temporelles élastiques :	61

III.7.1	Définition de la fonction temporelle :	62
III.7.2	Définition des fonctions temporelles pour chaque enregistrement :	62
III.7.3	Définir les noms de cas de charge statique :	63
III.7.4	Effets des méthodes d'étalonnage sur la réponse sismique de la structure :.....	63
III.8	Conclusion :	72
Conclusion générale		74
Références Bibliographiques		78

Liste des figures

Fig I-1 – Accélérogrammes mesuré durant le séisme de Mexico City 1985.....	6
Fig I-2 – Ondelette sinusoïdale corrigée	13
Fig II-1 – Spectre de réponse.....	27
Fig II-2 – Sélection des accélérations sismiques.....	29
Fig II-3 – Sélection des accélérogrammes.....	30
Fig II-4 – Spectre de réponse élastique cible.....	31
Fig II-5 – Enregistrements sélectionnés	32
Fig II-6 – Chargement des historiques de temps d'accélération	34
Fig II-7 – Spectres de réponse des séismes sélectionnés et le spectre de réponse cible.....	34
Fig II-8 – Matching des séries d'accélération.....	35
Fig II-9 – Fenêtre de progression des accélérogrammes	35
Fig II-10 – Matching spectre Moyenne	36
Fig II-11 – Accélérogrammes des séismes sélectionnés	37
Fig II-12 – Spectres de réponse des séismes sélectionnés et le spectre de réponse cible.....	38
Fig II-13 – Spectre cible et spectres de réponse des enregistrements	39
Fig II-14 – Spectre cible et spectres de réponse par la méthode (Matching)	39
Fig II-15 – Spectre cible et Spectre de réponse moyen	40
Fig III-1 – Situation du projet vue de Google Earth.....	42
Fig III-2 – Façade principale du bâtiment étudié	43
Fig III-3 – Plan étage de la structure	44
Fig III-4 – Vue en plan d'étage courant	45
Fig III-5 – Diagramme de Contrainte-Déformation à l'E.L.U.R	51
Fig III-6 – Diagramme de Contrainte-Déformation à l'E.L.S.....	51
Fig III-7 – Diagramme Contrainte-Déformation pour l'Acier	52
Fig III-8 – Diagramme des déformations limitées de la section (Règles des trois pivots).....	55
Fig III-9 – La poutre principale et la poutre secondaire.....	58
Fig III-10 – La vue en plan.....	59
Fig III-11 – La vue en 3D.....	60
Fig III-12 – Disposition des voiles	60
Fig III-13 – Les fonctions temporelles	62
Fig III-14 – Les cas d'historique temporel.....	62
Fig III-15 – Définir la charge	63
Fig III-16 – la poutre le plus sollicité de la structure	64
Fig III-17 – Le poteau le plus sollicité de la structure.....	64
Fig III-18 – Nœud de mesure au sommet de portique.....	65
Fig III-19 – Les déplacements sur le nœud	68
Fig III-20 – Les moments fléchissant et les efforts tranchant sur la poutre	69
Fig III-21 – Les moments fléchissant et les efforts tranchant sur le poteau.....	69

Liste des tableaux

Tableau I-1 – Classification sismique des sols, tirés du RPA99/version2003	10
Tableau II-1 – Valeurs de la pénalité P_q	26
Tableau II-2 – Valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique	27
Tableau II-3 – Mouvements sismiques sélectionnées	33
Tableau III-1 – Système constructif adopté.....	47
Tableau III-2 – Règles de trois Pivots	55
Tableau III-3 – Les charges et les surcharges	57
Tableau III-4 – Pourcentage de la participation de la masse modale	61
Tableau III-5 – Déplacements relatifs par la méthode Matching	65
Tableau III-6 – Moment fléchissant et effort tranchant par la méthode Matching	66
Tableau III-7 – Déplacements relatifs par la méthode PGA	66
Tableau III-8 – Moment fléchissant et effort tranchant la méthode PGA	67
Tableau III-9 – Les résultats moyens	68
Tableau III-10 – Différence entre PGA et Matching	70
Tableau III-11 – Différence entre PGA et l'analyse modale spectrale	70
Tableau III-12 – Différence entre Matching et l'analyse modale spectrale.....	71

Notations et symboles

Symboles

E.L.S	État limite de Service
E.L.U	État limite ultime
A	Coefficient d'accélération de zone
$a(t)$	L'accélération du sol
AI	Indicateur énergétique « Arias Intensity »
ASCE	American society of civil engineer
NIST	National institute of standards and technology
ATC	Applied technology council
ATK	Méthode d'étalonnage recommandée par Atkinson
CNB	Code national du bâtiment
CAV	Vitesse cumulative absolue (Cumulative Absolute Velocity)
dT	Le pas de temps
E_s	Module d'élasticité
G	Action permanente
h_e	Hauteur libre d'étage
h	Hauteur de contre marche
g	Giron
M	Magnitude
MSE	Méthode d'étalonnage « Mean Square Error »
n	Le nombre d'accélérogrammes sélectionnés
PEER	Le Pacific Earthquake Engineering Research Center
$a - b$	Dimensions en plans d'un poteau
e	Épaisseur des voiles
f_{cj}	Résistance caractéristique du béton à la compression à j- jours
f_{c28}	Résistance caractéristique du béton à la compression à 28 jours
f_{tj}	Résistance conventionnelle à la traction du béton à j- jours
f_{t28}	Résistance conventionnelle a la traction du béton a 28 jours
η	Facteur de correction d'amortissement
ν	Coefficient de poisson ; effort normal réduit
σ_{bc}	Contrainte de compression du béton
σ_{bc}	Contrainte limite du béton comprimé à L'E.L.S
σ_s	Contrainte de traction de l'acier

τ_{su}	Contrainte d'adhérence limite
τ_U	Contrainte tangentielle conventionnelle
PGA	Accélération de pointe au sol
PGV	Vitesse de pointe au sol
Q	Facteur de qualité
R_{rup}	La distance la plus proche entre la station d'enregistrement et le plan de rupture
R	Coefficient de comportement de la structure
RMSA	Racine carrée de la moyenne des carrés d'accélération
RPA	Le règlement parasismique Algérien
$Sa(T)$	Accélération spectrale à la période de vibration T
Sla	Méthode d'étalonnage basée sur l'intensité spectrale
Slv	La vitesse spectrale
T	Période de vibration
T_1, T_2	Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site
$V_{s,30}$	Vitesse des ondes sur les 30 premiers mètres
$\xi\%$	Le pourcentage d'amortissement
U	Le déplacement maximal

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Introduction Générale

Un séisme se produit lorsque les roches se fracturent en profondeur le long d'une faille préexistante, ce qui entraîne une libération brusque d'une quantité significative d'énergie. Cette libération se manifeste ensuite à la surface sous forme de vibrations du sol. Ces mouvements du sol provoquent des vibrations dans les structures en provoquant des déplacements de leurs points d'appui, et ces vibrations sont amplifiées à l'intérieur de la structure. Cela nécessite une étude approfondie afin de mettre en évidence le comportement dynamique de la structure.

Les codes de conception sismique décrivent un chargement sismique comme un spectre de réponse à l'accélération et autorisent l'utilisation des accélérogrammes naturels enregistrés lors de ces séismes. Les enregistrements sismiques choisis doivent correspondre à un spectre de réponse sismique compatible avec celui prescrit par le code. Les critères de compatibilité spectrale ainsi que les techniques d'étalonnage sont examinés de manière plus approfondie dans la revue de littérature.

Ensuite, il est important de sélectionner et d'étalonner les mouvements sismiques afin de réaliser des analyses sismiques temporelles représentatives du site et du niveau de risque sismique associé à une structure en béton armé.

Problématique et objectifs

Lorsqu'il s'agit d'étudier le comportement des structures, il est courant de réaliser des analyses temporelles élastiques et inélastiques dans la pratique. Pour effectuer ces analyses, on utilise généralement des accélérogrammes historiques. Ces accélérogrammes ont peut les trouves dans plusieurs bases de données, les questions imposés :

- Comment sélectionner les accélérogrammes appropriés ?

- Comment étalonner ces séismes pour que leurs spectres soient compatibles avec l'aléa sismique anticipé et les normes de conception ?

En outre, les analyses transitoires « Time History Analysis » sont devenues un outil intéressant pour évaluer le comportement linéaire d'une structure soumise à des charges spécifiques, cela pose une question importante :

- Est-ce que la réponse d'une structure est comparable à celle obtenue lors des évènements historiques ?

Ce mémoire est constitué de trois chapitre :

Chapitre I : Etude bibliographique :

- A- Caractéristiques du mouvement sismique ;
- B- Représentation du mouvement sismique ;
- C- Sélection et étalonnage des enregistrements sismiques ;
- D- Méthodes d'analyse sismiques ;
- E- Présentation de la méthode temporelle.

Chapitre II : Sélection et étalonnage des accélérogrammes.

Chapitre III : Cas d'étude : Analyse dynamique temporel d'un bâtiment :

- A- Etude du bâtiment ;
- B- Analyse temporelle du Bâtiment ;
- C- Résultats et discussion ;
- D- Comparaison.

En fin, et comme tout travail, ce mémoire sera achevé par une conclusion générale

CHAPITRE I

Etude Bibliographique

Chapitre I: Etude Bibliographique

I.1 Introduction

Le comportement dynamique d'une structure soumise à un mouvement du sol, dépend aussi bien du mouvement d'excitation que des caractéristiques mécaniques et géométriques de la structure. Il est donc nécessaire d'en tenir compte lors de la modélisation numérique qui constitue une étape importante dans l'analyse de la réponse dynamique de la structure en fournissant en données des lois de comportement.

Tant que les mouvements sont faibles, les structures ont tendance à se comporter de manière élastique. Cependant, pour résister à des mouvements importants du sol, il est nécessaire que les structures puissent gérer des déformations inélastiques, ce qui entraîne un comportement non linéaire.

Des études expérimentales simulant les conditions de sollicitation sismique ont été menées ces dernières années sur des éléments structuraux, des ensembles d'éléments, des modèles réduits et des prototypes de structures relativement simples à grande échelle. La modélisation post-élastique consiste à localiser les déformations non linéaires en plusieurs points et à idéaliser la courbe de charge-déplacement à l'aide de segments droits ou de courbes.

Des critères pour sélectionner les enregistrements sismiques ont été développés, tels que la magnitude, la distance et la durée de ces enregistrements. Les codes de construction sismique définissent généralement les séismes en tant que spectres de réponse d'accélération et permettent l'utilisation d'enregistrements sismiques naturels. L'enregistrement sismique choisi doit correspondre au spectre cible du code, ce qui peut être accompli à l'aide des techniques d'étalonnage. Ce chapitre constitue une étude bibliographique qui résume les connaissances sur la sélection et l'étalonnage sismique.

I.2 Représentation du mouvement sismique

I.2.1 Spectre cible

Le spectre cible est un élément essentiel de l'ingénierie parasismique, utilisé pour décrire les niveaux d'accélération maximale anticipés pour une structure donnée en réponse à un séisme. Il représente graphiquement les accélérations absolues auxquelles une structure doit être capable de résister, en présentant l'accélération S_a en fonction des périodes de vibrations T . Il convient de noter

que le spectre cible varie d'une région à une autre en raison de la variation des caractéristiques du sol et de l'aléa sismique présent.

Pour un même séisme et donc pour un même spectre de réglementation, chaque structure subit une accélération maximale en fonction de sa période propre. Il est important de noter que le spectre cible n'est qu'une estimation des niveaux d'accélération prévus et que la performance réelle de la structure en réponse à un séisme peut varier en fonction de nombreux facteurs.

Le spectre cible est donné par la réglementation parasismique. [1]

I.2.2 Présentation temporelle du mouvement sismique

Les mouvements sismiques sont enregistrés par un sismographe et sont représentés sous forme analogique, soit en termes de déplacement, de vitesse ou d'accélération en fonction du temps. Les enregistrements qui reflètent l'accélération sont appelés accélérogrammes et constituent le paramètre principal dans l'analyse dynamique des structures.

L'accélérogramme est une fonction qui présente une variabilité irrégulière et rapide autour de zéro pendant quelques dizaines de secondes. Il peut être divisé en trois phases distinctes :

- Une phase initiale où l'accélération est faible.
- Une phase forte pendant laquelle l'accélération atteint un maximum suivi d'une phase modérée.
- 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 méthode de l'analyse temporelle consiste à sélectionner plusieurs enregistrements d'accélération afin d'éviter de négliger 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. [2]

I.2.2.a Les accélérogrammes réels

Un accélérogramme réel est une représentation graphique de l'accélération en fonction du temps enregistrée lors d'un événement sismique ou d'une perturbation mécanique. Il est utilisé pour décrire et analyser les mouvements vibratoires réels d'un sol, d'une structure ou d'un objet, tels que ceux causés par un tremblement de terre.

L'accélérogramme réel est essentiel dans la conception sismique des structures, car il fournit des informations précieuses sur les forces sismiques qui agissent sur une structure donnée. Il permet d'évaluer la réponse dynamique d'un système et d'effectuer des analyses de réponse spectrale, de calculer les déformations, les vitesses et les déplacements correspondants, ainsi que de déterminer les périodes propres et les modes de vibration de la structure. La figure I-1 présente un exemple d'accélérogrammes.

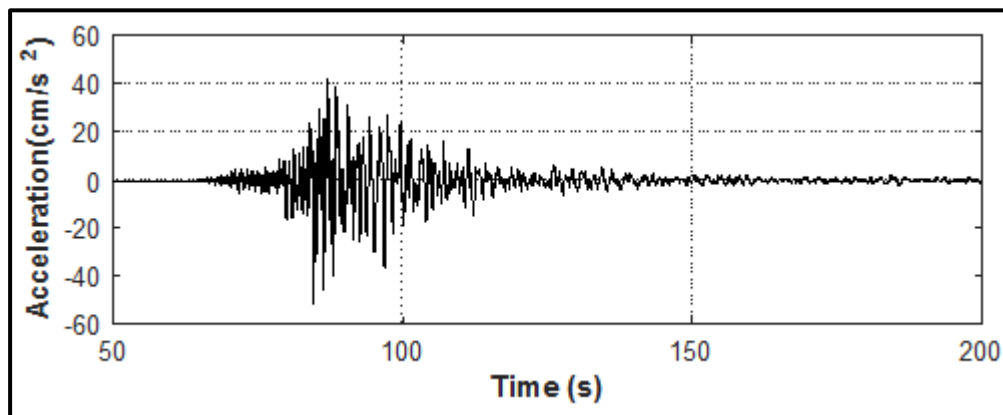


Fig I-1 – Accélérogrammes mesuré durant le séisme de Mexico City 1985 [3]

I.2.2.b Accélérogrammes artificiels

Les accélérogrammes artificiels sont des représentations graphiques de l'accélération en fonction du temps qui sont générées de manière synthétique ou simulée. Contrairement aux accélérogrammes réels qui sont enregistrés à partir de données sismiques ou de perturbations réelles, les accélérogrammes artificiels sont créés à l'aide de techniques de modélisation et de simulation et ils sont classés en deux groupes selon le type de leur simulation :

- Stationnaire.
- Non stationnaire.

Lorsqu'une simulation stationnaire est utilisée, cela entraîne une sous-estimation de la demande de ductilité lors 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.

I.2.2.c Accélérogrammes synthétiques

Les séismes synthétiques sont le résultat d'un modèle stochastique. Ce modèle permet de simuler des enregistrements sismiques en reproduisant sismologiquement la faille d'un séisme.

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.2.3 Accélérogrammes

Un accélérogramme est un enregistrement graphique de l'accélération en fonction du temps, utilisé pour analyser les mouvements vibratoires et évaluer la réponse sismique des structures.

Notre compréhension des forces ou déformations causées par les séismes a considérablement progressé grâce à l'observation des mouvements du sol provoqués par les séismes eux-mêmes, ainsi qu'à l'enregistrement de la réponse des structures sous forme d'accélérogrammes.

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.

La sélection des accélérogrammes peut être réalisée en prenant en compte les paramètres complémentaires mentionnés. 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 inclus dans un ensemble est ajusté en fonction de la méthodologie des calculs utilisée et de la méthode choisie pour traiter la variabilité des résultats. Il est recommandé d'avoir au moins trois accélérogrammes. [4]

I.3 Critères de sélection des accélérogrammes

Il est essentiel de veiller à ce que la sélection d'accélérogrammes réels à des fins d'analyse dynamique transitoire soit effectuée avec soin, de manière à ne pas négliger certaines fréquences importantes.

Les critères de sélection peuvent inclure :

- La localisation géographique : les accélérogrammes provenant de régions sismiques spécifiques peuvent être sélectionnés.
- La magnitude du séisme : les accélérogrammes enregistrés lors de séismes de magnitudes particulières peuvent être considérés pertinents.
- La direction de l'onde sismique : les accélérogrammes enregistrant des ondes sismiques provenant de directions spécifiques peuvent être sélectionnés.
- La durée de l'enregistrement : les accélérogrammes enregistrés pendant une durée particulière peuvent être considérés pertinents.
- La qualité de l'enregistrement : les accélérogrammes de bonne qualité peuvent être sélectionnés pour une analyse plus précise.

Ces critères peuvent varier en fonction de l'objectif de l'analyse et des données disponibles. Il est important de choisir les bons critères de sélection des accélérogrammes pour garantir la pertinence et la fiabilité des résultats de l'analyse.

On peut caractériser un mouvement sismique par différents paramètres.

I.3.1 Contenu fréquentiel :

L'utilisation du rapport a/v qui représente l'accélération de pointe au sol (m/s^2) divisée par la vitesse de pointe (m/s) dans l'analyse des accélérogrammes est importante car il fournit une indication du contenu fréquentiel de la secousse sismique. Un rapport a/v élevé suggère une secousse dominée par des fréquences élevées, ce qui peut être le cas dans des événements sismiques violents. En revanche,

des rapports a/v faibles indiquent une prépondérance de basses fréquences, ce qui peut être typique dans des séismes de plus longue période. En incluant des accélérogrammes avec différents rapports a/v dans la sélection, on peut obtenir une représentation plus complète des fréquences sismiques potentiellement rencontrées dans la réalité. Cela permet de mieux évaluer les performances et la réponse structurelle face à des séismes variés. L'estimation du contenu fréquentiel basée sur le rapport A/V est donc une approche pratique pour caractériser les accélérogrammes et assurer une analyse dynamique plus précise. [5]

A : l'accélération maximale du sol

V : la vitesse maximale.

I.3.2 Magnitude (M) et distance (R)

La sélection des accélérogrammes pour l'analyse sismique repose sur plusieurs critères initiaux, notamment les limites supérieures et inférieures de magnitudes et de distances hypocentrales. Ces critères sont établis en fonction des valeurs utilisées dans l'agrégation des données sismiques. L'objectif est de trouver des secousses qui correspondent à ces critères dans les bases de données accessibles aux ingénieurs.

Il est important de reconnaître que la magnitude et la distance jouent un rôle significatif dans le spectre de réponse sismique. Des recherches menées par Abrahamson et Silva [7] ont montré que plus la distance hypocentrale est grande, plus la période dominante du spectre de réponse augmente. Cela signifie que les caractéristiques fréquentielles d'un séisme peuvent varier en fonction de sa magnitude et de sa distance hypocentrale.

Cependant, il est de plus en plus remis en question de se fier uniquement à la magnitude et à la distance comme seuls critères de sélection. Des études, telles que celles menées par Iervolino et Cornell [6], ont démontré que même lorsque deux séismes ont la même magnitude et la même distance hypocentrale, la réponse structurelle peut varier considérablement d'un cas à l'autre. Ainsi, se baser uniquement sur ces deux critères ne permet pas de capturer pleinement la diversité des séismes et de leurs effets.

Pour une sélection plus éclairée des accélérogrammes, il est recommandé d'inclure d'autres paramètres tels que le contenu fréquentiel de la secousse, le type de sol et la durée significative. L'utilisation de ces critères supplémentaires permet de mieux représenter la variabilité des séismes réels et de prendre

en compte les caractéristiques spécifiques du site d'étude. Cependant, il est important de noter que la sélection basée uniquement sur la magnitude et la distance reste courante car elle est pratique et facile à utiliser. Pour une analyse plus approfondie et précise, il est recommandé de considérer des critères de sélection plus complets et adaptés au contexte spécifique.

I.3.3 Type de sol

Le profil géotechnique peut jouer un rôle crucial dans la sélection des accélérogrammes, car il influe sur le comportement dynamique du sol et, par conséquent, sur le contenu fréquentiel des secousses sismiques enregistrées. Un paramètre couramment utilisé pour représenter le profil géotechnique est la vitesse de propagation moyenne des ondes de cisaillement dans les 30 premiers mètres de profondeur ($V_s, 30$). Ce paramètre est significatif car il est lié à la rigidité du sol : un sol constitué de roches dures aura une valeur élevée de ($V_s, 30$), tandis qu'un sol plus meuble aura une valeur plus faible.

La valeur de ($V_s, 30$) est utilisée pour évaluer le contenu fréquentiel de l'accélérogramme, car un sol rigide transmettra plus efficacement les hautes fréquences, tandis qu'un sol plus lâche atténuera ces fréquences plus rapidement. Ainsi, la sélection des accélérogrammes peut être adaptée en fonction de la classe de sol, en se référant aux recommandations du CNB ou d'autres normes applicables.

En prenant en compte le profil géotechnique et en limitant la valeur de ($V_s, 30$) selon la classe de sol spécifique, il est possible d'affiner la sélection des accélérogrammes pour mieux refléter les conditions géotechniques du site d'étude. Cela permet d'obtenir des données sismiques plus appropriées et représentatives, contribuant ainsi à une analyse plus précise et fiable de la réponse structurelle aux séismes.

Tableau I-1 – Classification sismique des sols, tirés du RPA99/version2003 [8]

Catégorie	Description	q_c (Mpa)	N	p_l (Mpa)	E_p (Mpa)	q_u (Mpa)	V_s (m/s)
S₁	Rocheux	-	-	>5	>100	>10	≥800
S₂	Ferme	>15	>50	>2	>20	>0.4	≥400 <800
S₃	Meuble	15~15	10~50	1~2	5~20	0.1~0.4	≥200 >400
S₄	Très Meuble ou Présence de 3 m au moins d'argile molle	<1.5	<10	<1	<5	<0.1	≥100 <200

Avec :

V_s : vitesse d'ondes de cisaillement.

q_c : Résistance de pointe.

N : Nombre de coups.

p_l : Pression limite.

E_p : Module pressiométrique.

q_u : Résistance en compression simple.

I.3.4 Durée significative

La durée significative d'une secousse sismique est un paramètre essentiel à prendre en compte lors de la sélection des accélérogrammes. Elle représente le temps nécessaire à l'intensité Arias pour accumuler entre 5 % et 95 % de sa valeur finale. Cependant, la signification de la durée dans le contexte de l'analyse sismique a suscité des discussions et des débats parmi les chercheurs.

Selon les études menées par Bommer et Scott [9], la durée peut être considérée comme une composante secondaire dans la sélection des accélérogrammes. Elle est généralement fonction de la magnitude du séisme, car la durée de la rupture le long de la faille est déjà prise en compte. Ainsi, certains chercheurs remettent en question l'importance de la durée en tant que critère de sélection indépendant.

Cependant, d'autres recherches menées par Iervolino et al [10] ont montré que bien que la réponse maximale d'une structure ne soit pas directement influencée par la durée de la secousse, celle-ci peut avoir un impact sur les dommages liés à la dissipation d'énergie, tels que la fatigue et le nombre de cycles inélastiques subis par la structure. Ainsi, la durée significative peut jouer un rôle dans l'évaluation des effets à long terme et de la capacité de la structure à résister aux cycles répétés de sollicitation sismique.

Il est donc important de considérer la durée significative lors de la sélection des accélérogrammes, en tenant compte de sa relation avec la magnitude du séisme et de son impact potentiel sur les dommages cumulatifs. Une analyse approfondie de la durée peut contribuer à une meilleure compréhension des effets sismiques à long terme et à une évaluation plus précise de la résistance structurale. [11]

I.3.5 Environnement tectonique

Il est pertinent de prendre en compte plusieurs facteurs lors de la sélection des accélérogrammes, tels que le type de faille, le mécanisme de rupture et la direction des ondes sismiques.

Des études, telles que celle de Kawaga et al [12], soulignent l'influence de l'environnement tectonique sur la puissance des secousses, en examinant l'effet de la profondeur de la faille sur les périodes prédominantes de ces secousses. De leur côté, Bolt et Abrahamson [13] démontrent que les ondes provenant de failles de subduction s'atténuent significativement plus lentement que les ondes issues de failles de surface.

En prenant en considération le type de faille, il est possible de mieux appréhender les caractéristiques de la secousse sismique et d'adapter la sélection des accélérogrammes en conséquence. Par exemple, les failles de subduction peuvent générer des secousses à plus longue période, tandis que les failles de surface peuvent produire des secousses à période plus courte.

Comprendre le mécanisme de rupture et la direction des ondes sismiques permet également de mieux modéliser le comportement du sol et la réponse structurelle. Ces informations contribuent à une sélection plus précise des accélérogrammes qui représentent les caractéristiques spécifiques des séismes étudiés.

En somme, en tenant compte du type de faille, du mécanisme de rupture et de la direction des ondes sismiques, il est possible d'améliorer la pertinence des accélérogrammes sélectionnés et d'obtenir des données sismiques plus représentatives pour l'analyse des structures soumises à des séismes.

I.4 Méthodes d'étalonnage

Dans la littérature, différentes méthodes d'étalonnage des secousses sismiques sont décrites. Parmi ces méthodes, on distingue principalement deux grandes familles : la méthode d'étalonnage à l'aide d'un scalaire, appelée également méthode de mise à l'échelle (Scaling method), et la méthode de correspondance spectrale (Spectral Matching method).

La méthode de correspondance spectrale consiste à modifier la représentation spectrale de l'accélérogramme, afin d'obtenir une concordance entre le spectre enregistré et le spectre cible. Cette approche vise à ajuster la réponse fréquentielle de l'accélérogramme aux caractéristiques spécifiques du spectre cible.

D'autre part, la méthode d'étalonnage à l'aide d'un scalaire repose sur une comparaison spectrale. Elle se base sur le redimensionnement de l'histoire temporelle de l'accélération sélectionnée dans le domaine

temporel. Cette opération consiste à multiplier les enregistrements par un facteur constant, de manière à se rapprocher du spectre cible à une ou plusieurs périodes d'intérêt.

Ces deux approches offrent des méthodologies différentes pour l'étalonnage des secousses sismiques. La méthode de correspondance spectrale permet une adaptation fine des caractéristiques spectrales, tandis que la méthode d'étalonnage à l'aide d'un scalaire se concentre sur le redimensionnement global de l'accélérogramme. Le choix entre ces deux méthodes dépend des objectifs spécifiques de l'étude et des exigences de l'analyse sismique. [14]

I.4.1 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. [15]

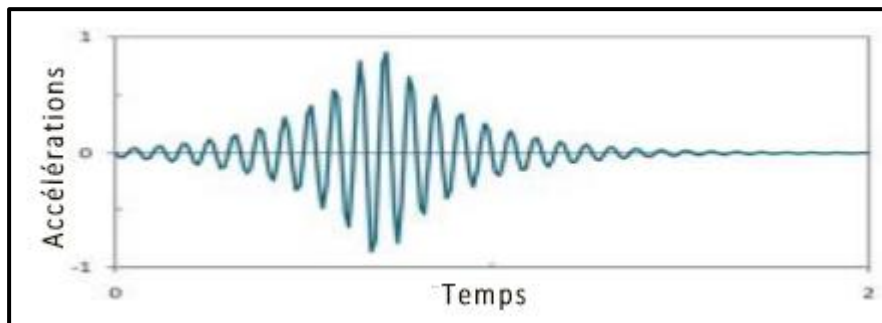


Fig I-2 – Ondelette sinusoidale corrigée [16]

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 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 [17] ont démontré que la Méthode TD peut être 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.

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.

I.4.2 Méthode dite de type « Scaling »

Étalonnage au PGA :

Cette méthode consiste à multiplier l'accélérogrammes par un facteur permettant à l'accélération maximale de cette dernière notée $PGA_{secouse}$ d'être égale à l'accélération maximale cible notée PGA_{cible} . Ce facteur est donné par la formule suivante :

$$F_{PGA} = \frac{PGA_{cible}}{PGA_{secouse}} \quad (I-1)$$

Cette méthode est très critiquée parce qu'elle ne tient pas compte du contenu fréquentiel du tremblement. Il en résulte une très grande dispersion des indicateurs du potentiel de dommages sismiques.

Étalonnage à $Sa(T_1)$:

Cette méthode consiste à étalonner en multipliant par une valeur de facteur $F_{Sa(T_1)}$ mentionné par l'équation (I-2). Ce scalaire fournit une réponse spectrale Sa à la période de vibration fondamentale de

la structure T_1 notée $Sa(T_1)_{cible}$ égale à l'accélération du spectre cible pour la même période de vibration notée $Sa(T_1)_{secouse}$

$$F_{Sa(T_1)} = \frac{Sa(T_1)_{cible}}{Sa(T_1)_{secouse}} \quad (I-2)$$

Cette méthode est très précise pour un système élastique à un degré de liberté. Cependant, elle ne prend pas en compte les modes de vibration supérieurs qui peuvent jouer un rôle important dans les structures présentant une certaine hauteur. Comme l'ont souligné Mehanny [18], Alavi et Krawinkler [19] et Kurama et Farrow [20], l'absence de considération des modes supérieurs aura une influence significative sur la réponse de certaines structures. De plus, cette méthode ne tient pas compte du fait que la période T_1 peut s'allonger en raison du comportement ductile d'une structure.

Étalonnage $T_2 - 1, 2T_1$:

L'étalonnage entre T_2 et $1,2T_1$, sachant que T_2 est la deuxième période de vibration de la structure, vise à s'assurer que l'aire sous le spectre de réponse entre ces deux périodes est égale au spectre cible sur la même plage de périodes. Ceci permet de prendre en compte le second mode vibratoire dans l'analyse tout en permettant d'allonger la période naturelle. Cette modification est justifiée, car T_1 peut s'allonger face au comportement non linéaire de la structure. Cette méthode s'exprime par la formule suivante :

$$F_{(T_2 - 1,2T_1)} = \frac{\int_{T_2}^{1,2T_1} Sa(T)_{cible} dT}{\int_{T_2}^{1,2T_1} Sa(T)_{secouse} dT} \quad (I-3)$$

Avec :

Sa : est l'accélération spectrale.

dT : est le pas de temps (périodes).

Étalonnage à $Sa(T_1) - Sa(T_2)$:

Cette méthode permet de résoudre l'un des problèmes de la méthode $Sa(T_1)$ en considérant le second mode de vibration de la structure en utilisant $Sa(T_2)$ et le rapport $\frac{Sa(T_1)}{Sa(T_2)}$. Ce scalaire améliore la

précision de l'étalonnage, mais il présente une limitation en termes de précision pour les séismes ayant de petites distances hypocentrales.

Méthode SIv :

Le paramètre déterminé par cette méthode permet d'égaliser la vitesse spectrale de la secousse à la vitesse spectrale cible pour la période naturelle de réponse de la structure. Ce paramètre est représenté par l'équation (I-4).

$$F_{SIv} = \frac{SIv(T_1)_{cible}}{SIv(T_1)_{secousse}} \quad (I-4)$$

Avec :

SIv : est la vitesse spectrale.

Méthode $SIv - Sa(T_1)$:

Dans ce cas, le scalaire d'étalonnage F_{SIv} déterminé par équation (I-4) est appliqué en premier lieu. Ensuite le scalaire $F_{Sa(T_1)} \geq 1$, déterminé dans l'équation (I-2) sera appliqué. Cette procédure est mise en place pour garantir que l'accélération spectrale soit égale ou supérieure au spectre de conception à la période T_1 . Cette méthode permet d'être plus conservatrice que l'utilisation individuelle des méthodes SIv ou $Sa(T_1)$.

Méthode Sla :

Pour appliquer la méthode Sla , il faut d'abord déterminer entre quelles périodes l'accélérogrammes sera étalonné. Une possibilité est d'utiliser les périodes 0(s) et 4(s) comme limites afin de tenir compte de toutes les périodes de vibrations habituellement rencontrées. Ces périodes peuvent être variées selon la structure étudiée. Une fois cela fait, il est nécessaire de calculer l'aire sous la courbe représentant le spectre cible ainsi que l'aire sous la courbe du spectre de la secousse entre ces deux périodes sélectionnées. Le facteur d'étalonnage à utiliser est déterminé à l'aide de l'équation (I-5) pour obtenir une aire égale sous les deux courbes.

$$F_{Sla} = \frac{\int_{T_2}^{1,2T_1} Sa(T)_{cible} dT}{\int_{T_2}^{1,2T_1} Sa(T)_{secousse} dT} \quad (I-5)$$

Méthode Rozon 2008 :

Cette méthode est issue du mémoire de Rozon [21] qui traite le comportement des cadres à contreventement excentrique de faible et moyenne hauteur. Il est recommandé d'utiliser une méthode similaire à *Sla*. Cependant, la plage de périodes pour laquelle les secousses sismiques sont étalonnées varie selon les scénarios suivants :

- Pour les secousses de faible magnitude ($M = 6,5$) et de courte distance ($r < 20$ km), l'étalonnage doit être effectué sur de courtes périodes, soit $0,2 \text{ s} < T < 2 \text{ s}$, sur une plage d'au moins $0,7 \text{ s}$. Le choix précis de la plage dépend de l'utilisateur.
- Pour les événements de forte magnitude ($M = 7,5$) et longue distance ($r > 20$ km), l'étalonnage doit être réalisé sur des périodes $T > 1 \text{ s}$, sur une plage d'au moins $1,5 \text{ s}$.

Tout au long de cette plage sélectionnée, il est important que l'aire sous le spectre de réponse ne diffère pas de plus de 5 % du spectre cible. De plus, l'accélération spectrale (g) ne doit pas s'éloigner de plus de 40 % de l'accélération cible.

Il est essentiel de minimiser l'écart entre le spectre de réponse et le spectre cible.

Méthode ASCE 2005 :

La méthode est dérivée du code ASCE. Selon cette méthode les spectres d'accélération originaux ne peuvent pas être inférieures au spectre cible sur une plage de périodes variant de $0,2 T_1$ à $1,5 T_1$.

T_1 : La période fondamentale de la structure étudiée

Méthode ATC 2009 :

Cette méthode est celle présentée et recommandée par ATC. 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.

$$F_{ACT1} = \frac{PGV_{médiane}}{PGV_{secouse}} \quad (I-6)$$

- Prendre en considération le spectre cible ainsi que la période de vibration naturelle de la structure étudiée, T_1 . Il faut déterminer l'accélération spectrale cible du code pour la période T_1 , 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.

$$F_{ACT2} = \frac{Sa(T_1)_{cible}}{Médiane (Sa(T_1)_{réponse})} \quad (I-7)$$

Méthode LS :

Le projet SAC, dirigé par Somerville et al [22], propose l'utilisation d'une méthode d'étalonnage alternative appelée « least squares - LS ». Cette méthode consiste à déterminer un seul facteur scalaire qui sera utilisé pour l'ensemble des séries de secousses. Ce facteur est choisi de manière à minimiser la somme des carrés des erreurs entre le spectre cible et les spectres de réponse de chaque accélérogramme, en prenant en compte le poids associé à chaque période de vibration. Les poids utilisés sont de 0.1, 0.3, 0.3 et 0.3 respectivement pour les périodes $T = 0.3$ s, 1.0 s, 2.0 s et 4.0 s.

Méthode Mean Square Error :

La méthode utilisée par la base de données de PEER, décrite en détail dans le rapport technique PEER (2010), est appelée « Mean Square Error » (MSE), qui correspond à la moyenne du carré de l'erreur entre les logarithmes naturels du spectre cible et du spectre de réponse. L'objectif est de trouver le facteur d'étalonnage qui minimisera cette erreur. L'axe T , qui représente la période du spectre, est subdivisé en un grand nombre de points (T_i) équidistants selon $\ln(T)$. [23]

L'indicateur MSE est calculé par l'équation suivant :

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^n [Sa^{cible}(T_i) - f(Sa^{sélectionné}(T_i))]^2}{n} \quad (I-8)$$

Avec :

f : Est un facteur d'échelle linéaire

n : Est le nombre d'accélérogrammes sélectionnés

Méthode ATK :

Elle consiste à calculer le rapport d'accélération sur l'accélération spectrale de l'enregistrement à chaque période sur une plage de périodes donnée. La valeur moyenne est alors utilisée comme facteur d'étalonnage. De plus, si on recherche un certain nombre d'enregistrements dans une base de données beaucoup plus grande, il est possible de calculer pour chacun l'écart-type. L'étape suivante consiste à sélectionner les enregistrements avec des écarts-types de petites grandeurs. Il est recommandé d'utiliser également différentes plages d'étalonnage pour différents scénarios sismiques (M-R). Par exemple, les événements d'amplitude modérée seraient utilisés sur de courtes distances jusqu'à une courte période

et les événements d'amplitude plus importante sur de longues distances pour la longue période de temps.

$$F_{ATK} = \frac{\int_{T_1}^{T_2} \left[\frac{Sa(T_i)_{cible} dT}{Sa(T_i)_{simul}} \right]}{T_2 - T_1} \quad (I-9)$$

Méthode Modal Push-over :

La méthode du « Modal Pushover » (MP) 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 :

$$R_y = M_1^* / V_{b1y} \quad (I-10)$$

Avec :

M_1^* : représente les masses modales effectives.

V_{b1y} : est la limite élastique en cisaillement déterminée à l'aide de la courbe de poussée latérale.

- 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. [24]
- 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 considérant comme élastiques.
- Déterminer la déformation maximale.

I.5 Présentation de la méthode temporelle

Les méthodes d'étalonnage dans le domaine temporel sont des techniques utilisées pour mesurer et synchroniser les enregistrements de différents sismomètres lors de l'analyse des mouvements sismiques. L'objectif est de s'assurer que les enregistrements des différents sismomètres sont synchronisés en temps afin de pouvoir les comparer et les utiliser ensemble pour comprendre les caractéristiques des mouvements sismiques.

Il existe plusieurs méthodes d'étalonnage dans le domaine temporel, telles que :

- La méthode de cross-correlation : cette méthode utilise des algorithmes de corrélation pour synchroniser les enregistrements de deux ou plusieurs sismomètres.
- La méthode de référence absolue : cette méthode utilise un signal de référence absolu, tel qu'un signal GPS, pour synchroniser les enregistrements de différents sismomètres.
- La méthode de synchronisation par temps d'arrivée : cette méthode utilise le temps d'arrivée des ondes sismiques à différents sites pour synchroniser les enregistrements de différents sismomètres.

Il est important d'utiliser des méthodes d'étalonnage fiables pour s'assurer que les enregistrements des sismomètres sont synchronisés en temps, car cela peut avoir un impact significatif sur l'analyse des mouvements sismiques et sur les conclusions qui peuvent être tirées à partir de ces enregistrements.

I.6 Exemples des bases de données disponibles

Il est crucial de choisir soigneusement les bases de données appropriées pour l'évaluation des aléas sismiques et la conception parasismique des structures. Plusieurs options sont disponibles pour répondre à ces besoins, parmi lesquelles :

- La base de données mondiale des séismes (WSDB) : une ressource en ligne qui recense les séismes historiques et récents, fournissant des détails tels que la magnitude, la profondeur, la localisation et d'autres caractéristiques.
- La base de données des mouvements sismiques forts (Strong Motion Database) : une compilation d'accélérogrammes enregistrés lors de séismes récents, comprenant des informations sur les caractéristiques du site, la direction de l'onde sismique et d'autres données pertinentes.
- La base de données des séismes en Europe (European Earthquake database) : une source d'informations sur les séismes enregistrés en Europe, incluant des détails sur la source sismique, la magnitude, la profondeur et d'autres informations importantes.
- La base de données des mouvements forts au Japon (Japanese Strong Motion Database) : une ressource qui réunit les accélérogrammes enregistrés lors de séismes survenus au Japon, avec des informations sur les caractéristiques du site, la direction de l'onde sismique et d'autres éléments significatifs.
- La base de données PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center) : l'une des bases les plus utilisées et les plus riches en informations dans la recherche. Cette base de données, développée par le Pacific Engineering au cours des années 1990, comprend plus de 29 000 enregistrements provenant de 81 événements sismiques et 1379 stations d'enregistrement.
- La base de données TR-NSMN : une ressource qui permet aux utilisateurs de sélectionner et de télécharger toutes les formes d'ondes d'accélération sans nécessiter de procédure d'enregistrement. Les données des accéléromètres de cette base proviennent du Türkiye (Strong Motion Network) et comprennent 751 accéléromètres numériques de nouvelle génération à trois composantes.

Il est essentiel de choisir les bases de données appropriées en fonction des critères pertinents pour chaque projet, tels que la localisation géographique, la magnitude du séisme, la direction de l'onde sismique, la durée de l'enregistrement et la qualité des données. Cette approche garantit la pertinence et la fiabilité des analyses parasismiques.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons examiné les nombreux aspects à prendre en compte dans l'analyse dynamique linéaire des structures, tels que la sélection des enregistrements sismiques et l'étalonnage de celles-ci.

Au chapitre suivant, on va faire la sélection et l'étalonnage des accélérogrammes à partir de la base des données PEER et en utilisant les deux méthodes d'étalonnage temporelle Matching et PGA.

CHAPITRE II

Sélection et étalonnage des accélérogrammes

Chapitre II: Sélection et étalonnage des accélérogrammes

II.1 Introduction

En matière de conception parasismique, les séismes sont généralement considérés sous la forme d'un spectre de réponse d'accélération, ce qui permet d'effectuer des analyses dynamiques spectrales. Toutefois, dans certains cas, des analyses temporelles linéaires ou non linéaires doivent être effectuées à l'aide d'accélérogrammes spécifiés qui doivent correspondre à la sismicité du projet étudié. Ces accélérogrammes peuvent être déterminés à l'aide des méthodes d'étalonnage et de sélection présentées dans le chapitre 1. L'objectif de ce chapitre est d'utiliser quelques-unes de ces méthodes d'étalonnage pour un ensemble de mouvements sismiques naturels afin d'obtenir une compatibilité avec un spectre cible défini par le RPA99 version 2003. Des indicateurs de potentiel de dommages sont utilisés pour quantifier les méthodes recommandées dans la pratique. [2]

II.2 Spectre de réponse cible

Le spectre de réponse défini par la réglementation parasismique algérienne "RPA99/version 2003" représente la variation de l'accélération maximale (S_a/g) d'un système à un seul degré de liberté en fonction des valeurs successives de périodes propres T . L'action sismique est représentée par le spectre de calcul suivant : [8]

$$\frac{S_a}{g} \begin{cases} 1.25A \left(1 + \frac{T}{T_1} \left(2.5\eta \frac{Q}{R} - 1 \right) \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) T_1 & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{Q}{R} \right) \left(\frac{T_2}{T} \right)^{\frac{2}{3}} & T_2 \leq T \leq 3.0s \\ 2.5\eta(1.25A) \left(\frac{T_2}{3} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{3}{T} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{Q}{R} \right) & T > 3.0s \end{cases} \quad (\text{II-1})$$

Avec :

A : Coefficient d'accélération de zone.

η : Facteur de correction d'amortissement.

ξ : Pourcentage d'amortissement critique.

R : Coefficient de comportement de la structure.

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

Q : Facteur de qualité.

II.2.1 Coefficient d'accélération A

D'après le RPA 99 version 2003, on a : $\begin{cases} \text{Zone sismique IIa} \\ \text{Groupe d'usage 2} \end{cases} \rightarrow A = 0.15$

II.2.2 Coefficient de comportement de la structure R

On a $R=4$ (Portiques autostables ordinaires)

II.2.3 Facteur de qualité Q

Tableau II-1 – Valeurs de la pénalité Pq [8]

Critère q	Pq	
	Observé	Non observé
1. Condition minimale sur les filles de contreventement	0	0,05
2. Redondance en plan	0	0,05
3. La régularité en plan	0	0,05
4. La régularité en élévation	0	0,05
5. Contrôle la qualité des matériaux	0,05	0
6. Contrôle la qualité de l'exécution	0,10	0

La valeur de Q est déterminée par la formule $Q = 1 + \sum Pq$

$Q = 1 + (0 + 0 + 0 + 0 + 0,05 + 0,10) = 1,15 \rightarrow Q = 1,15$ [14]

II.2.4 Pourcentage d'amortissement critique ξ

$\begin{cases} \text{Portique en béton armé} \\ \text{Remplissage dense} \end{cases} \rightarrow \xi = 7\%$

II.2.5 Le facteur de correction d'amortissement η

$\eta = \sqrt{7/(2 + \xi)} = 0.882 \geq 0.7$

II.2.6 Périodes caractéristiques associées à la catégorie de site

Sol meuble (site 3) $\Rightarrow \begin{cases} T_1 = 0.15 \text{ sec} \\ T_2 = 0.50 \text{ sec} \end{cases}$

Pour la présente étude les valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique cible sont présentées sur le tableau II-2 ces valeurs correspondent à la zone IIa et le site S3 (sol meuble).

Tableau II-2 – Valeurs caractérisant le spectre de réponse élastique

A	ξ	η	R	T_1	T_2	Q
0.15	7%	0,882	4	0.15	0.5	1.15

La figure II-1 présente le spectre de réponse dans ce cas.

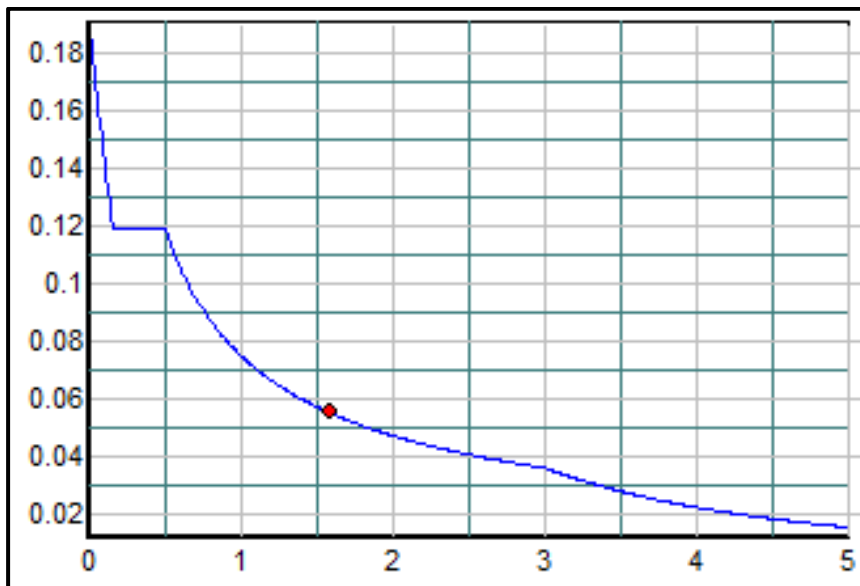


Fig II-1 – Spectre de réponse

II.3 Indicateurs de potentiel de dommages des enregistrements sismiques

Avant d'analyser les systèmes structuraux sous les mouvements étalonnés, on calcule certains paramètres de dommages potentiels. Ces Paramètres permettent de caractériser l'intensité, le contenu fréquentiel ainsi que la durée des enregistrements sismique. Dans le présent mémoire les paramètres suivants ont été utilisés : [25]

- **PGA** : C'est la valeur maximale de l'accélération (Peak Ground Acceleration)

$$PGA = \text{Max} |a(t)| \quad (\text{II-2})$$

- Rapport de vitesse

$$a_{max}/V_{max} = \frac{\text{Max}|a(t)|}{\text{Max}|V(t)|} \quad (\text{II-3})$$

Avec : $V(t)$ et $a(t)$ sont respectivement la vitesse et l'accélération temporelles.

- **AI** : indicateur énergétique (Arias Intensity) :

$$AI = \frac{2\pi}{2g} \int_0^{\infty} (a(t))^2 dt \quad (\text{II-4})$$

- **RMSA**: la Moyenne quadratique des accélérations (Root mean square of accelerations) :

$$RMSA = \sqrt{\frac{1}{t_r} \int_0^{t_r} (a(t))^2 dt} \quad (\text{II-5})$$

Avec : $a(t)$ est l'accélération du sol (g) tandis que 0 et t_r sont respectivement le temps (s) au début et à la fin de la section de l'accélérogrammes étudiée.

- **CAV** : la Vitesse absolue cumulée (Cumulative absolute velocity) :

$$CAV = \int_0^{t_r} (a(t)) dt \quad (\text{II-6})$$

- **Durée significative (Significative duration)** : le temps que prend la secousse à établir entre 5 % et 95 % de son AI final

II.4 Sélection des enregistrements historiques

La sélection des enregistrements historiques par la base de données PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center). Implique de rechercher et de filtrer les enregistrements sismiques disponibles dans la base de données en fonction de critères spécifiques. Ces critères peuvent inclure la magnitude du séisme, la localisation géographique, les conditions géologiques, la qualité des enregistrements, etc.

Les utilisateurs peuvent effectuer des requêtes dans la base de données PEER en spécifiant les critères de sélection souhaités. Le système de la base de données retournera alors les enregistrements correspondants qui satisfont aux critères spécifiés. Une fois les enregistrements sélectionnés, ils

peuvent être téléchargés à partir de la base de données PEER pour une utilisation ultérieure dans des analyses de réponse sismique, des études de la réponse des structures ou d'autres applications liées à l'ingénierie sismique.

La figure II-2 présente la fenêtre principale de la base donnée PEER utilisée pour la sélection des mouvements sismiques.

PEER Ground Motion Database *NGA-West2*
Pacific Earthquake Engineering Research Center

HOME DOCUMENTATION HELP SUBSCRIBE PEER
T.MISSOUM@ENSH.DZ SIGN_OUT

Edit Search

Load Sample Input Values Clear Input Values

Search

These characteristics are defined in the NGA-West2 Flatfile.
You need to re-run Search when any of these parameters are updated.

Record Characteristics:

RSN(s) : 234, 1833, 345; *RSN1,...RSNn*

Event Name :

Station Name :

Search Parameters:

Fault Type : All Types ▾

Magnitude : *min,max*

R_JB(km) : *min,max*

R_rup(km) : *min,max*

Vs30(m/s) : *min,max*

D5-95(sec) : *min,max*

Pulse : Any Record ▾

Additional Characteristics:

Max No. Records :
(≤ 100)

Suite

Spectral Ordinate : SRSS ▾

Damping Ratio : 5% ▾

Suite Average : Arithmetic ▾

Fig II-2 – Sélection des accélérations sismiques

II.5 L'application sur SeismoSelect

Sélection et génération des accélérogrammes :

The screenshot displays the SeismoSelect software interface, divided into several sections:

- Selection Parameters:** A panel on the left with various filters:
 - Magnitude: MIN 5.500, MAX 7.500
 - Distance (km): Epicentral Distance, MIN 0.000, MAX 100.000
 - Vs30 (m/sec): MIN 200.000, MAX 400.000
 - Faulting Style: Strike Slip, Pulse, Pulse-Like
 - Significant Duration (D5-95): MIN 0.000, MAX 20.000
 - PGA (g): MIN 0.150, MAX 0.750
 - Event date (day/month/year): MAX 12/31/2020 12:00:00 AM, MIN 1/ 1/1980 12:00:00 AM
 - Event Nation: [Dropdown]
 - Maximum number of records per event: 10
 - Maximum number of required candidates: 1000
- Response Spectrum:** A graph on the right showing Acceleration (g) vs. Period (sec). The curve peaks at approximately 0.12g at a period of 0.2 seconds and then decays.
- Candidate Records:** A table at the bottom right listing records with checkboxes for selection.

Include	RSN	Event/Station	Ev
<input checked="" type="checkbox"/>	3	Humbolt Bay/Ferndale City Hall	2/
<input checked="" type="checkbox"/>	5	Northwest Calif-01/Ferndale City Hall	9/
<input checked="" type="checkbox"/>	6	Imperial Valley-02/EI Centro Array #9	5/
<input checked="" type="checkbox"/>	7	Northwest Calif-02/Ferndale City Hall	2/
<input checked="" type="checkbox"/>	8	Northern Calif-01/Ferndale City Hall	10
<input checked="" type="checkbox"/>	9	Borrego/EI Centro Array #9	10
<input checked="" type="checkbox"/>	10	Imperial Valley-03/EI Centro Array #9	1/
<input checked="" type="checkbox"/>	11	Northwest Calif-03/Ferndale City Hall	10

Fig II-3 – Sélection des accélérogrammes

II.5.1 Définir le spectre cible

The image displays a software interface for defining a target elastic response spectrum. It is divided into two main sections.

Top Section: Spectrum Configuration

- Code-based Spectrum:**
 - Structural Code: EuroCode 8, Part-3
 - Options: elastic spectrum (selected), design\inelastic spectrum
 - Eurocode 8 National Annex: EN Recommended
- Spectrum from loaded accelerogram:**
 - Damping Value (%): 5
 - Load button
- Load Spectrum from file:**
 - Damping Value (%): 5
 - Open button

Table: Period (sec) vs Sa (g)

Period (sec)	Sa (g)
0.00	0.1740
0.02	0.1740
0.04	0.1690
0.06	0.1600
0.08	0.1510
0.10	0.1420
0.12	0.1330
0.14	0.1230
0.16	0.1190
0.18	0.1190
0.20	0.1190
0.22	0.1190
0.24	0.1190
0.26	0.1190
0.28	0.1190
0.30	0.1190
0.32	0.1190
0.34	0.1190
0.36	0.1190
0.38	0.1190
0.40	0.1190

Graph: Acceleration (g) vs Period (sec)

The graph shows a blue curve representing the target spectrum. The y-axis is Acceleration (g) ranging from 0.01 to 0.19. The x-axis is Period (sec) ranging from 0 to 4. The curve starts at approximately 0.174g at 0.00s, remains constant until 0.02s, then decreases to about 0.12g at 0.04s, and continues to decay towards 0.02g at 4.0s.

Bottom Section: Record Selection and Target Intensity Measures

- Target Intensity Measures:**
 - Component Definition: RotD50
 - Intensity Measures based on Spectral Ordinates: Define Target Spectral Ordinates
 - Multiple Spectral Ordinates: checked
 - Average Spectral Acceleration (AvgSA): unchecked
 - Single Spectral Ordinate: unchecked
 - Other Intensity Measures:
 - PGA (g): 0.150
 - PGV (cm/sec): 5.000
 - PGD (cm): 5.000
 - Target Spectrum: A small graph showing the target spectrum.
- Record Selection:**
 - Candidate Records: 1369
 - Select and Sort All Records: unchecked
 - Select only Records with Error Smaller than: 20.0 %
 - Select the: 5 Records for which the Average Spectrum has the Best Fit (max. 5 records with Academic licenses)
 - Scaling:
 - Do not Scale Records: unchecked
 - Scale Records: checked
 - Scaling Factor Limits:
 - Set Scaling Factor Limits: checked
 - Min. Scaling Factor: 0.2
 - Max. Scaling Factor: 1.5
 - Progress bar: 0%
 - Select Records button

Fig II-4 – Spectre de réponse élastique cible

II.5.2 Sélectionner des enregistrements

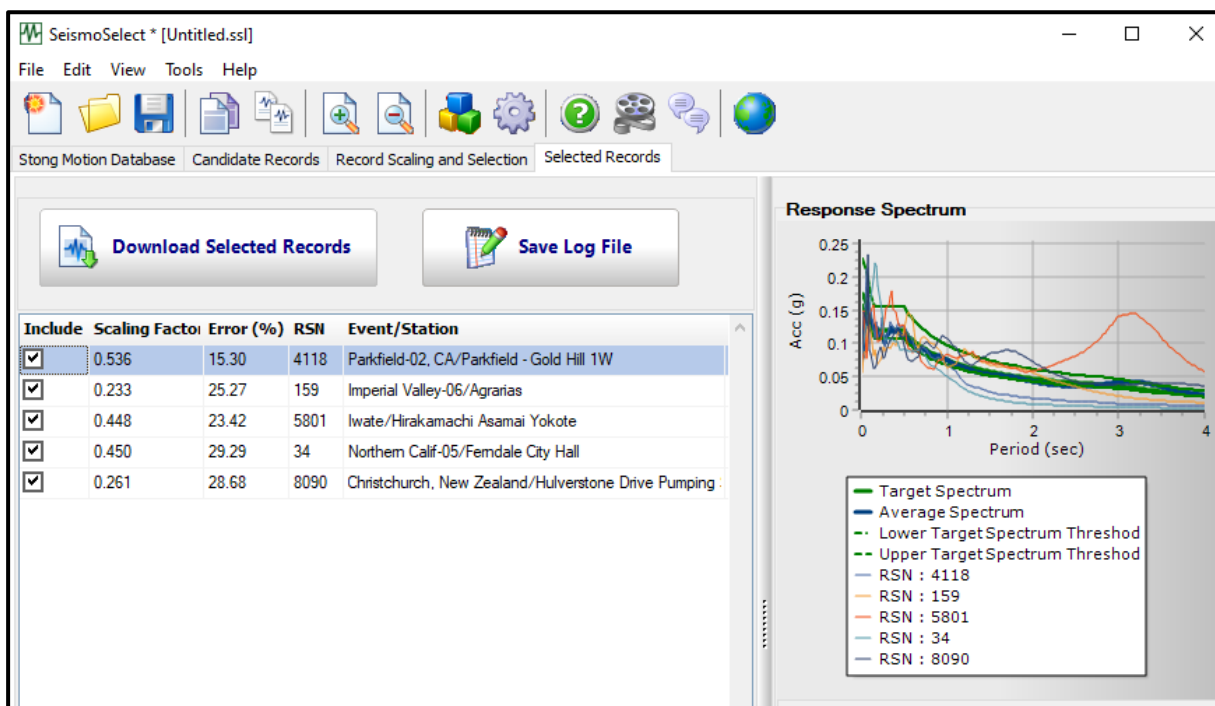


Fig II-5 – Enregistrements sélectionnés

Cinq (05) enregistrements sismiques ont d'abord été pris en considération (Tableau II-3). Ces enregistrements comprennent les mouvements du sol de magnitude (M) comprise entre 5,5 et 7,5 avec la distance la plus proche entre la station d'enregistrement et le plan de rupture compris entre 0 km et 100 km. Le type de sol a été défini en utilisant la vitesse de l'onde de cisaillement à la couche de sol la plus élevée de 30 m. Elle est à noter que pour un site de catégorie S3 (sol meuble) on a $200 \leq V_{s,30} < 400$.

Le tableau II-3 représente les enregistrements sismiques sélectionnés avec magnitude (M), la distance la plus proche entre la station d'enregistrement et le plan de rupture (R_{rup}) et la vitesse de l'onde de cisaillement pour les 30 mètres supérieurs ($V_{s,30}$).

L'histoire temporelle de ces mouvements est illustrée par la figure II-11. Les spectres de réponse de ces accélérogrammes sont donnés avec le spectre cible par la figure II-12 à l'aide de logiciel SeismoMatch.

Tableau II-3 – Mouvements sismiques sélectionnées

Evènement	Année	Station	Magnitude	R_{rup} (Km)	$V_{s,30}$ (m/s)
Northern Calif-05	1967	Ferndale City Hall	5.6	28.73	219.31
Imperial Valley-06	1979	Agrarias	6.53	0.65	242.05
Parkfield-02, CA	2004	Parkfield - Gold Hill 1W	6	2.67	214.43
Iwate, Japan	2008	Hirakamachi Asamai Yokote	6.9	34.76	325.79
Christchurch, New Zealand	2011	Hulverstone Drive Pumping Station	6.2	4.35	206.00

II.5.3 SeismoMatch

SeismoMatch est une application capable d'ajuster les accélérogrammes sismiques en fonction d'un spectre de réponse cible spécifique, en utilisant l'algorithme des ondelettes proposé par Abrahamson et Bommer [26]. On note qu'il y a une possibilité d'utiliser ce logiciel en combinaison avec des outils de sélection des secousses sismiques pour définir les suites adéquates pour l'analyse dynamique non linéaire des structures nouvelles ou existantes. Cette section fournit des informations sur la façon de commencer à utiliser SeismoMatch. Dans ces rubriques, les utilisateurs trouveront une description de la manière de charger les accélérogrammes qui doivent être adaptés au spectre, les différentes options dans lesquelles le spectre cible peut être défini et l'algorithme utilisé pour ajuster les accélérogrammes et les faire correspondre au spectre cible. On commence par le chargement simultané d'un certain nombre d'accélérogrammes et la définition du spectre cible (Figure II-6 et II-7).

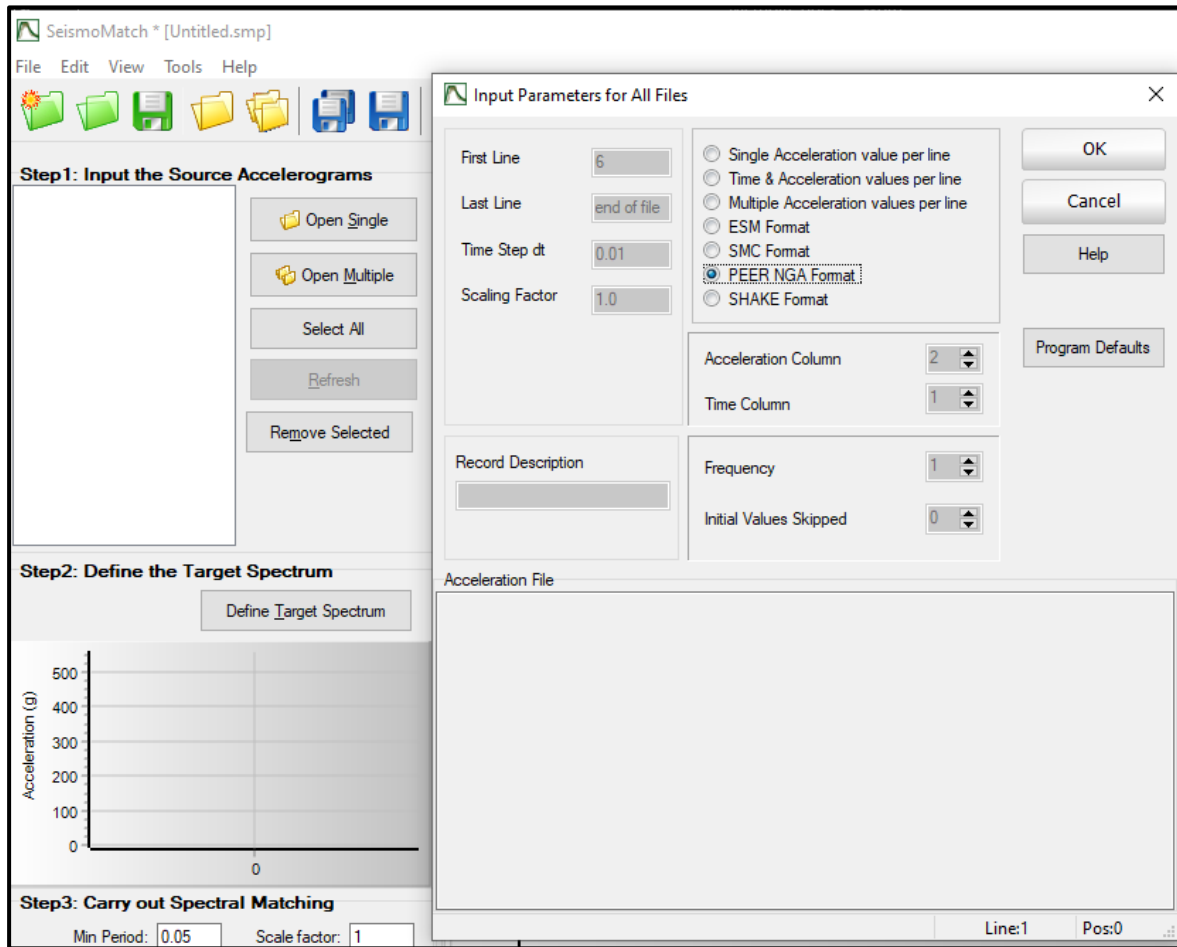


Fig II-6 – Chargement des historiques de temps d'accélération

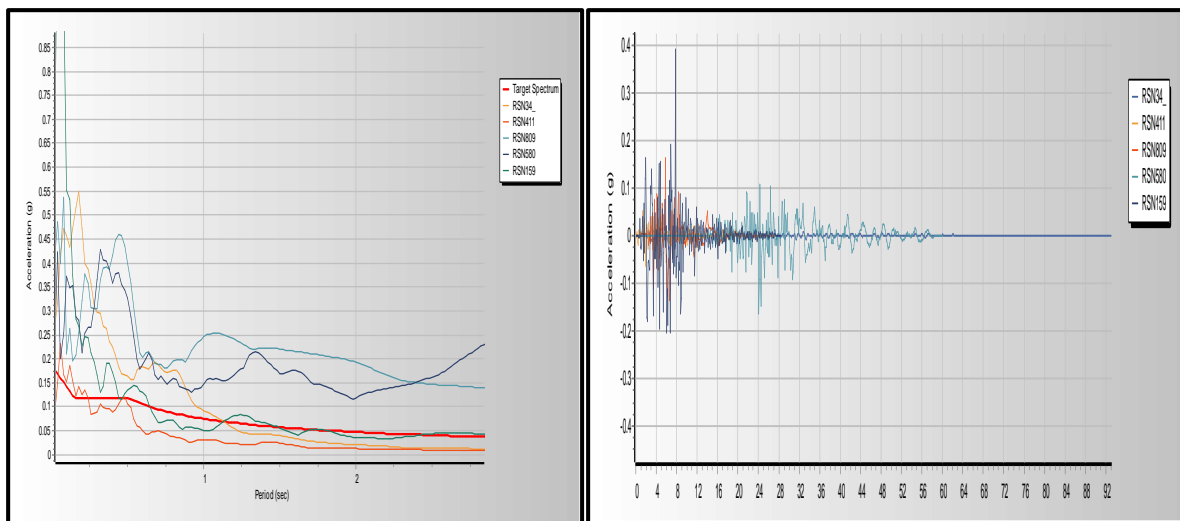


Fig II-7 – Spectres de réponse des séismes sélectionnés et le spectre de réponse cible

Une fois cela fait, l'utilisateur peut simplement déterminer l'algorithme d'appariement, ajuster la plage de période d'appariement, définir la tolérance requise et cliquer sur le bouton 'Appariement'. Ces paramètres peuvent être configurés soit dans la fenêtre principale de prétraitement du programme (voir Figure II-8), soit dans le module Paramètres d'adaptation des réglages du programme. Une fois le processus d'appariement déclenché, une fenêtre contextuelle s'affiche montrant la progression de chaque accélérogrammes ainsi que des informations sur l'inadéquation spectrale, les itérations et la tolérance

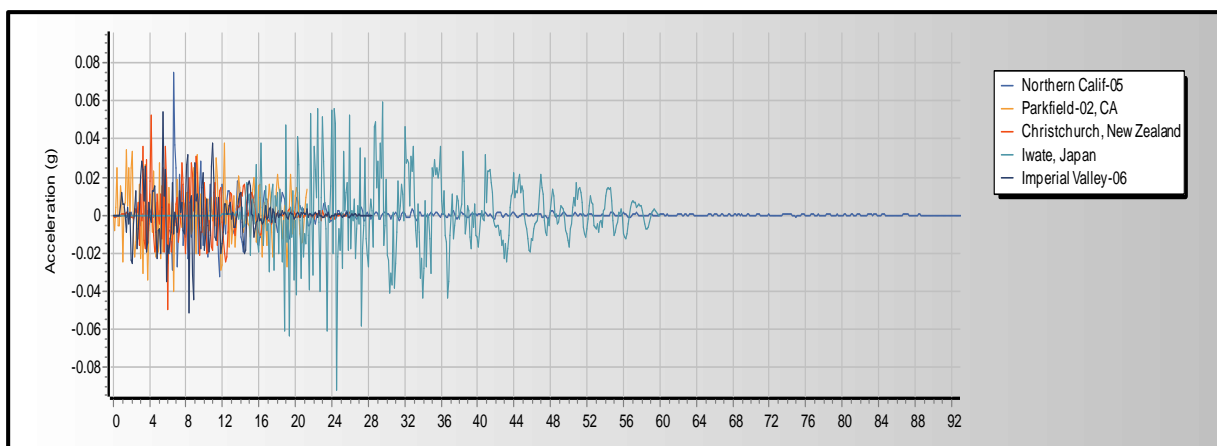


Fig II-8 – Matching des séries d'accélérogrammes

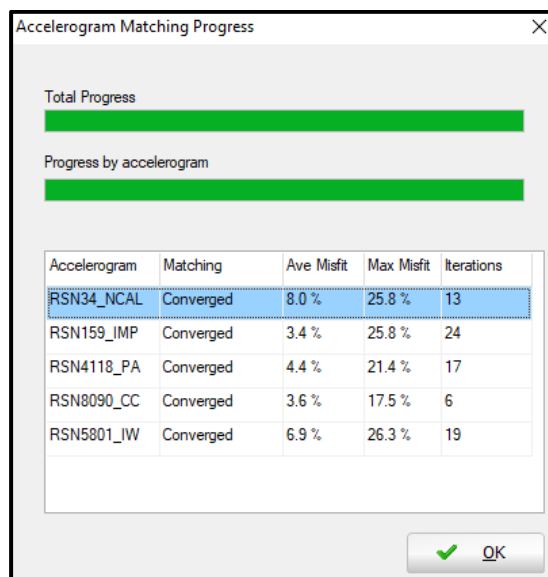


Fig II-9 – Fenêtre de progression des accélérogrammes

Dans la plupart des cas, il est nécessaire pour les utilisateurs de respecter les critères d'appariement basés sur la moyenne d'un groupe de spectres d'enregistrements plutôt que sur le spectre individuel de chaque enregistrement. Ce module offre donc aux utilisateurs la possibilité de regrouper différents accélérogrammes appariés et de comparer la moyenne des spectres des enregistrements sélectionnés avec le spectre cible dans l'intervalle de temps spécifié, comme illustré dans la figure II-10. Grâce à ce module, il est également possible d'extraire les enregistrements correspondants ou la réponse spectrale moyenne

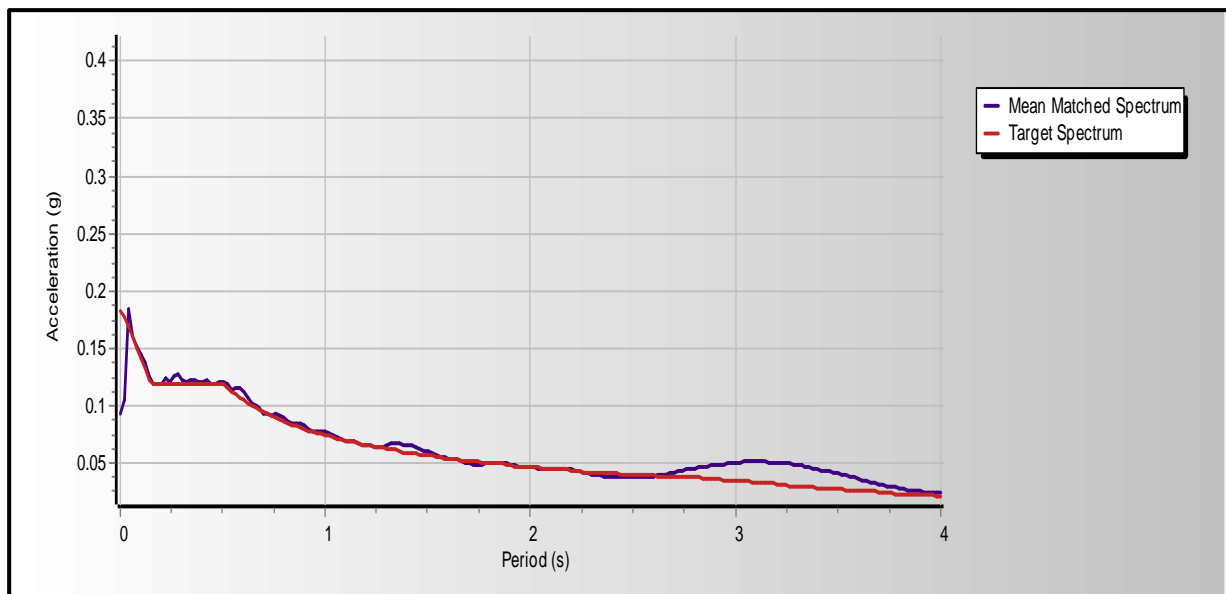


Fig II-10 – Matching spectre Moyenne

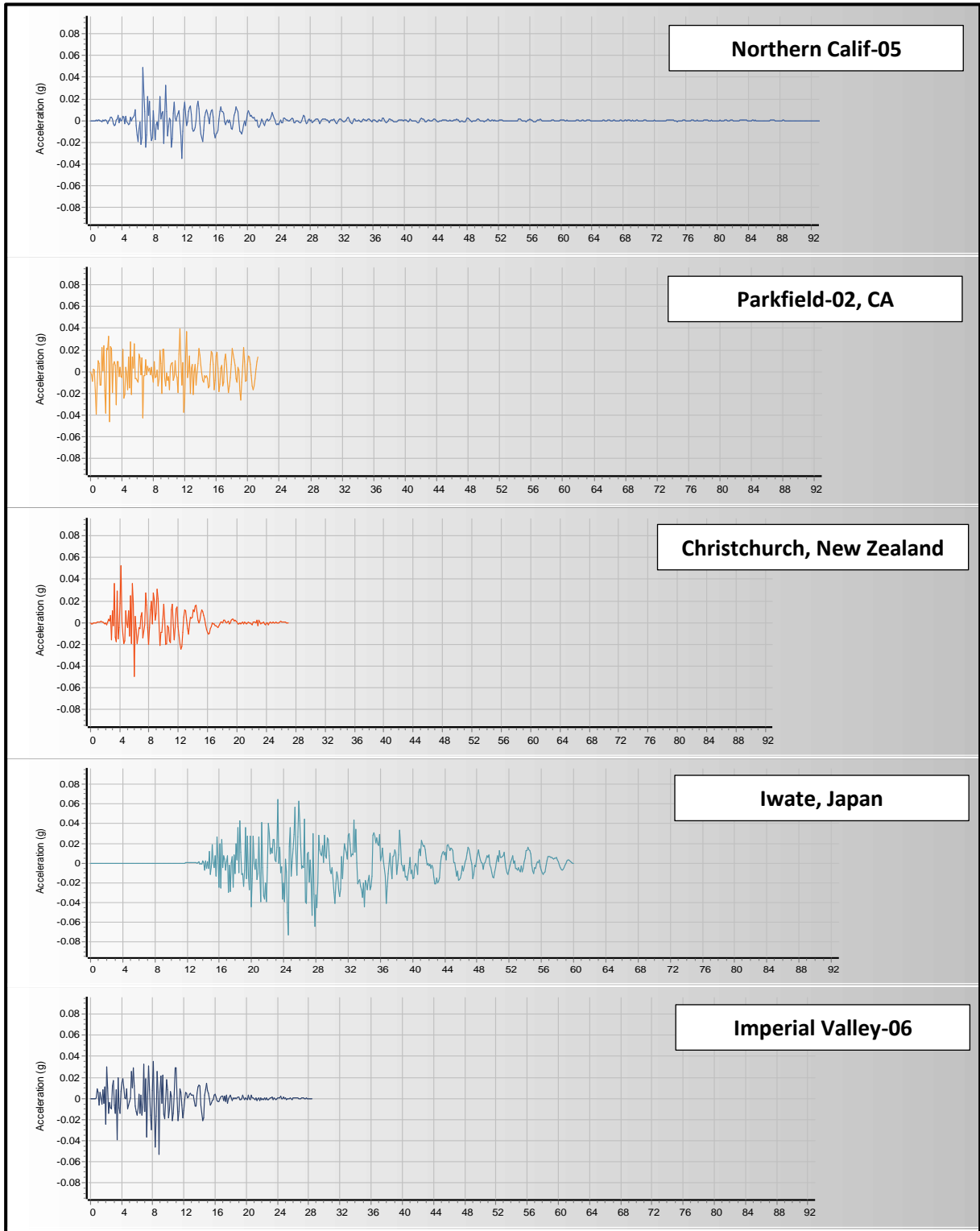


Fig II-11 – Accélérogrammes des séismes sélectionnés

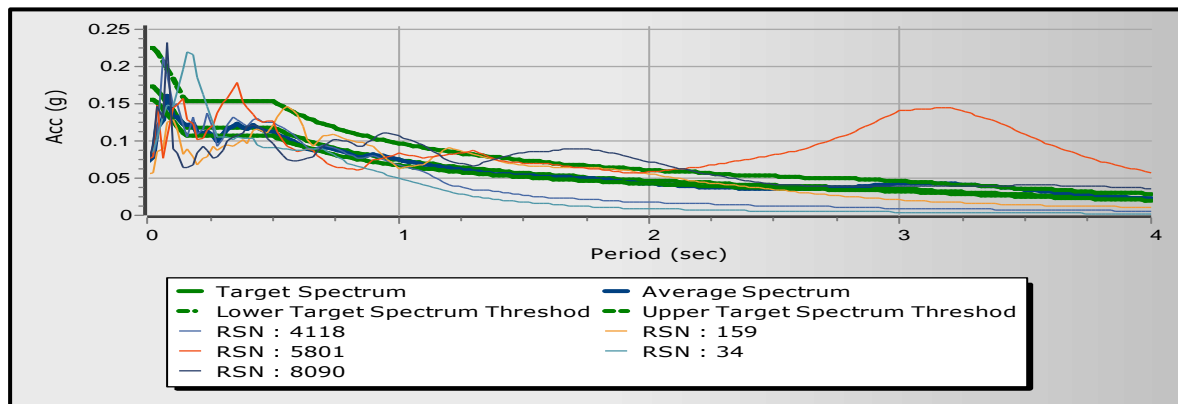


Fig II-12 – Spectres de réponse des séismes sélectionnés et le spectre de réponse cible

II.6 Etalonnage des mouvements sélectionnés

II.6.1 La méthode « PGA »

Cette méthode implique de prendre le fichier choisi et de le multiplier par un facteur scalaire qui est calculé à partir de l'équation (I-1) afin d'obtenir une valeur de PGA étalonnée pour les mouvements du sol, qui est égale à la valeur de PGA_{cible} .

Dans notre cas la valeur de PGA_{cible} est égale à la première valeur du spectre élastique qui vaut $A \times 1,25 = 0,1875 g$.

La figure II-13 illustre les spectres de réponse des enregistrements étalonnés en utilisant la méthode PGA, en comparaison avec le spectre cible. D'après cette figure, il est apparent que bien que tous les mouvements étalonnés aient des valeurs PGA équivalentes à celles du PGA cible, il y a une grande dispersion entre les cinq spectres de réponse par rapport au spectre cible durant la période allant de 0 à 4 secondes. Cela confirme que la méthode d'étalonnage PGA n'est pas un indicateur fiable.

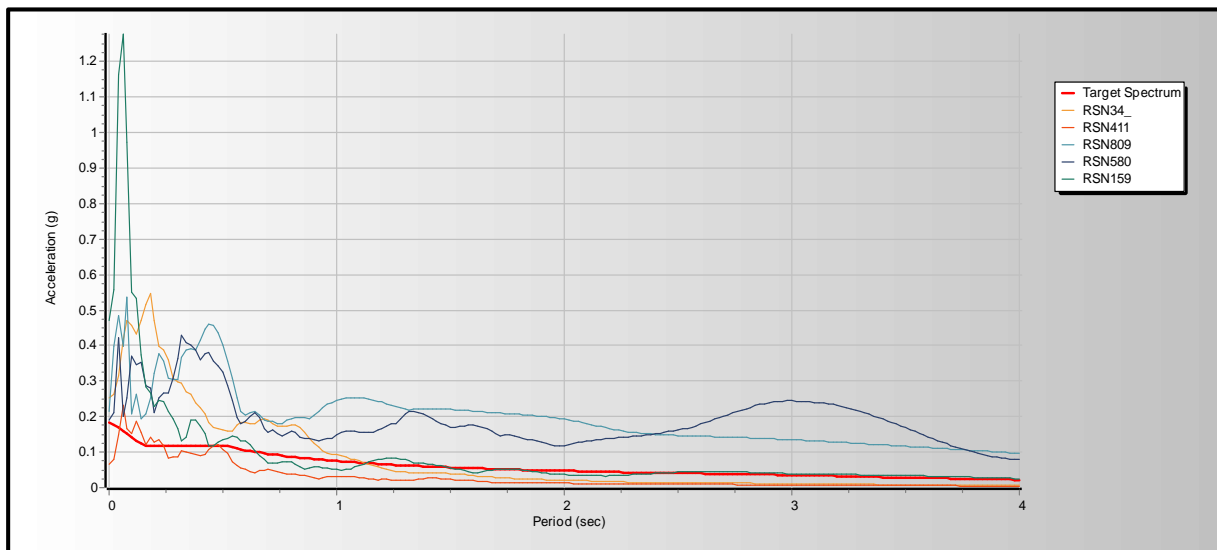


Fig II-13 – Spectre cible et spectres de réponse des enregistrements

II.6.2 Méthode de correspondance spectrale dans le domaine temporelle « Matching »

On a utilisé le logiciel SeismoMatch (2023) pour réaliser cette méthode d'étalonnage. La figure II-14 présente les spectres des mouvements qui ont été étalonnés. Après l'application de cette méthode, il est remarqué que les spectres des séismes étalonnés sont en accord avec le spectre de réponse d'accélération souhaité, surtout pour les périodes inférieures à 2 secondes.

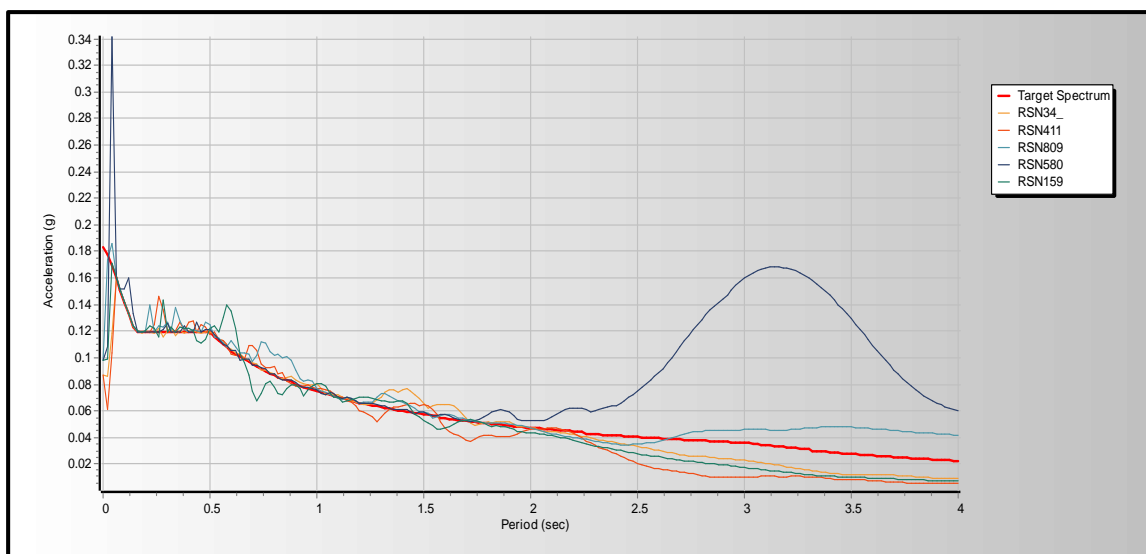


Fig II-14 – Spectre cible et spectres de réponse par la méthode (Matching)

En combinant le spectre cible, la moyenne des spectres des mouvements sismiques non traités et la moyenne des spectres des enregistrements étalonnés, la figure II-15 démontre que les spectres de mouvements étalonnés sont en conformité avec le spectre cible. En utilisant ce module, il est également faisable d'extraire les enregistrements appropriés ou la réponse spectrale moyenne.

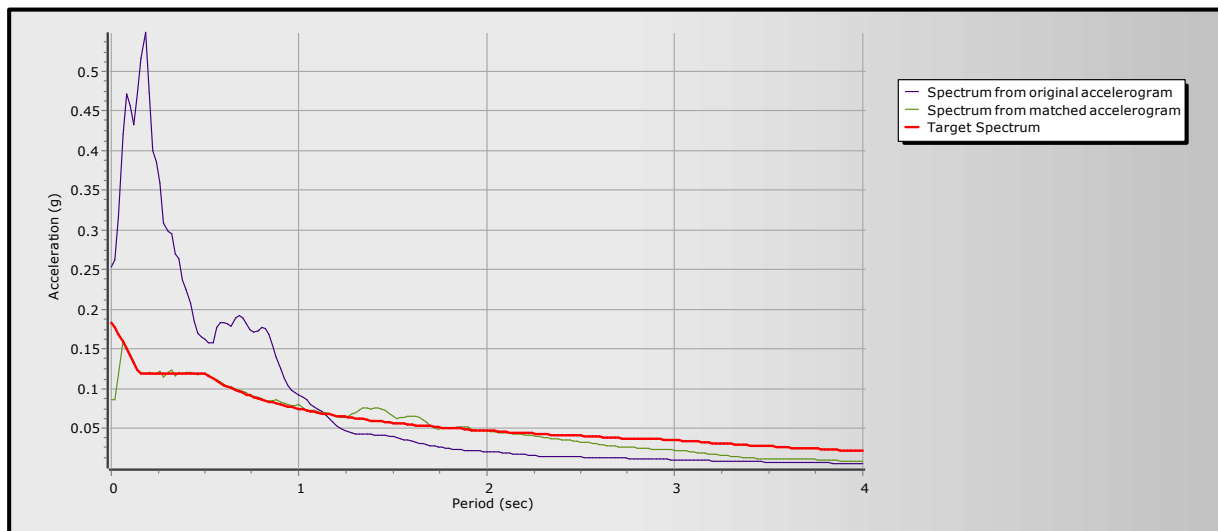


Fig II-15 – Spectre cible et Spectre de réponse moyen

II.7 Conclusion :

Dans la première partie du chapitre a été mis sur la sélection des mouvements sismiques où on a choisi où cinq accélérogrammes ont été choisis à partir de la base de données PEER. Ensuite, ces enregistrements ont été traités à l'aide de deux méthodes d'étalonnage afin de les rendre compatibles avec un spectre cible spécifié.

La méthode PGA est utilisée pour évaluer l'accélération maximale du sol à un point spécifique, tandis que la méthode Matching est utilisée pour comparer les caractéristiques spectrales d'un ensemble d'enregistrements sismiques à un spectre cible.

D'après les résultats et les comparaisons faites on conclut que la méthode Matching peut conduire à des résultats efficaces. Tandis que la méthode PGA ne peut pas produire des résultats attendus.

CHAPITRE III

Etude d'un bâtiment et recherche

Chapitre III: Etude d'un bâtiment et recherche

III.1 Introduction

L'étude de bâtiment consiste en une évaluation approfondie de la structure, des fondations, des éléments structurels et des systèmes de bâtiment pour assurer leur sécurité et leur conformité aux normes de qualité. Les ingénieurs en structure utilisent des outils tels que des logiciels de modélisation 3D et des capteurs pour identifier les problèmes potentiels, évaluer les performances mécaniques et les systèmes électriques et de plomberie. L'objectif est de prévenir les problèmes structurels et les défauts de construction, garantir la sécurité des occupants et assurer la conformité aux normes de construction et de sécurité.

Ce chapitre c'est une continuité de l'étude de bâtiment a été fait par Besri et Loudjani. [27]

III.2 Présentation de l'ouvrage

III.2.1 Situation du projet



Fig III-1 – Situation du projet vue de Google Earth

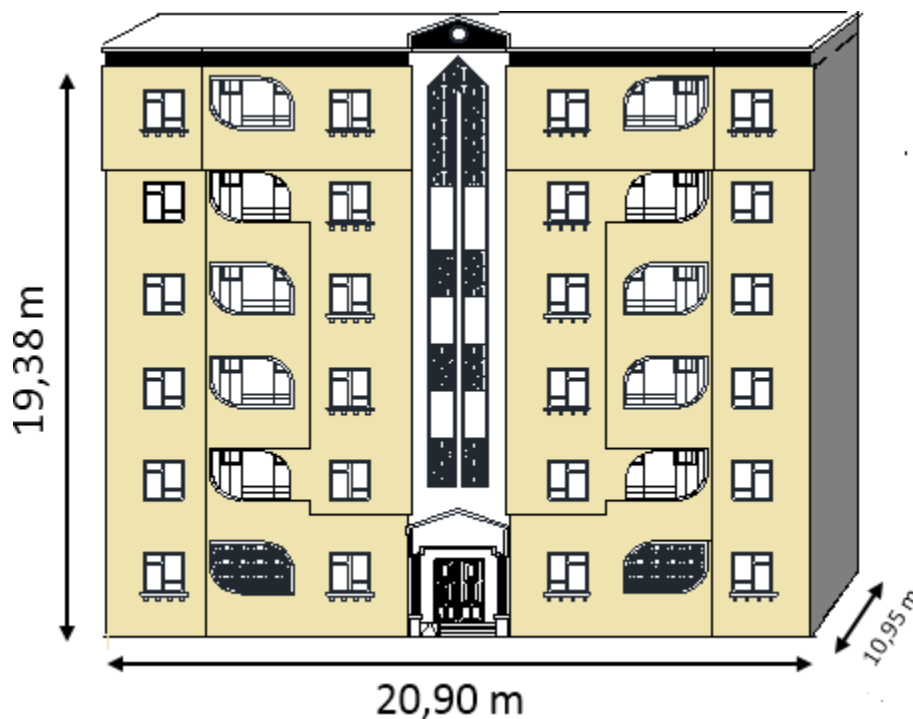


Fig III-2 – Façade principale du bâtiment étudié

III.2.2 Présentation de l'ouvrage

Nous avons choisi un bâtiment à usage d'habitation implanté à la commune d'Ammari wilaya de **Tissemsilt** ; qui est composé d'un Rez-de-Chaussée (RDC) plus cinq étages à savoir :

Ce projet est un ouvrage courant ayant une importance moyenne, sa hauteur totale est inférieure à 48 mètres, ce qui nous conduit à le classer d'après le règlement parasismique algérien RPA 99/version 2003 « article 3.2 » dans le groupe d'usage 2.

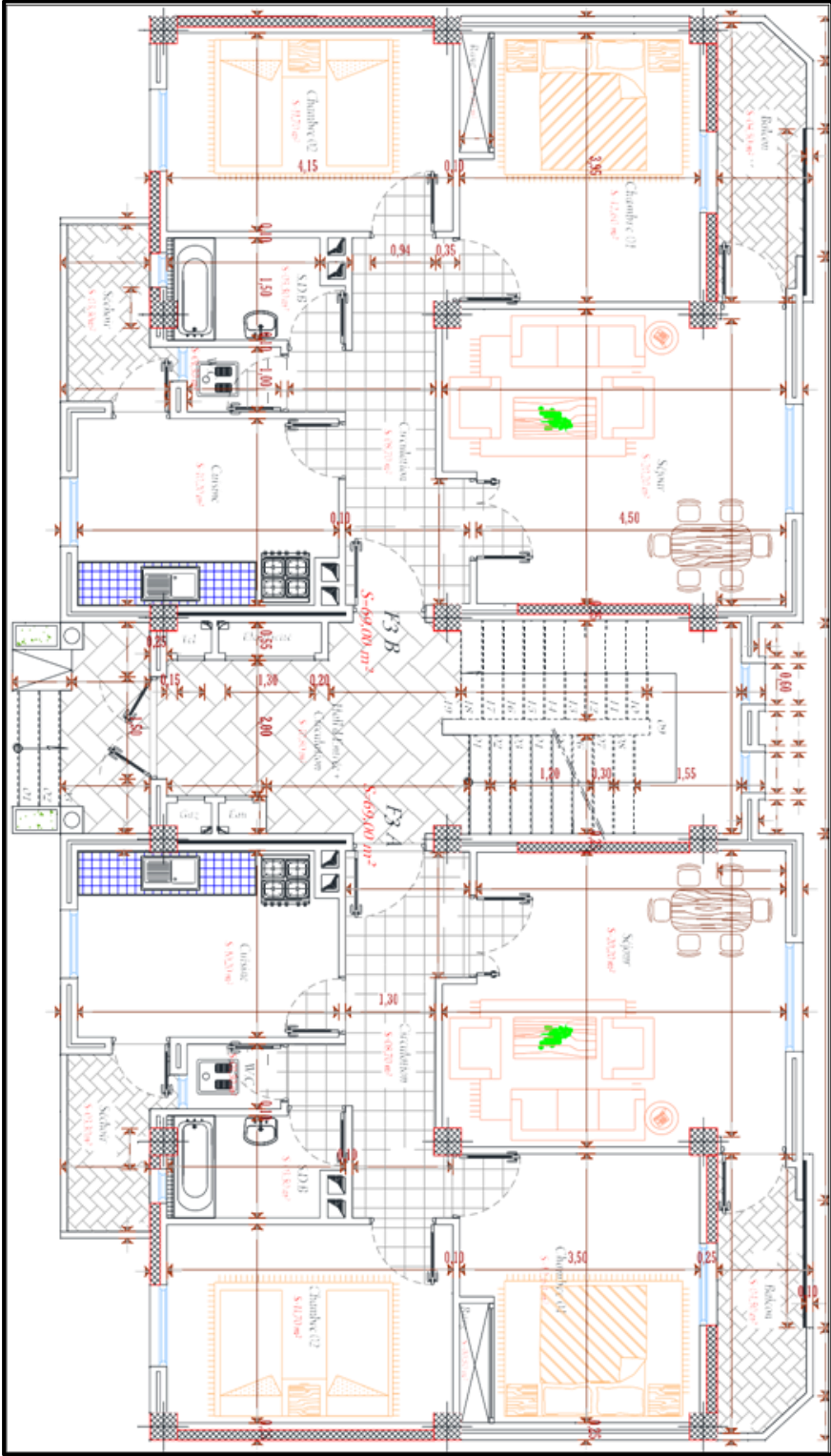


Fig III-3 – Plan étage de la structure

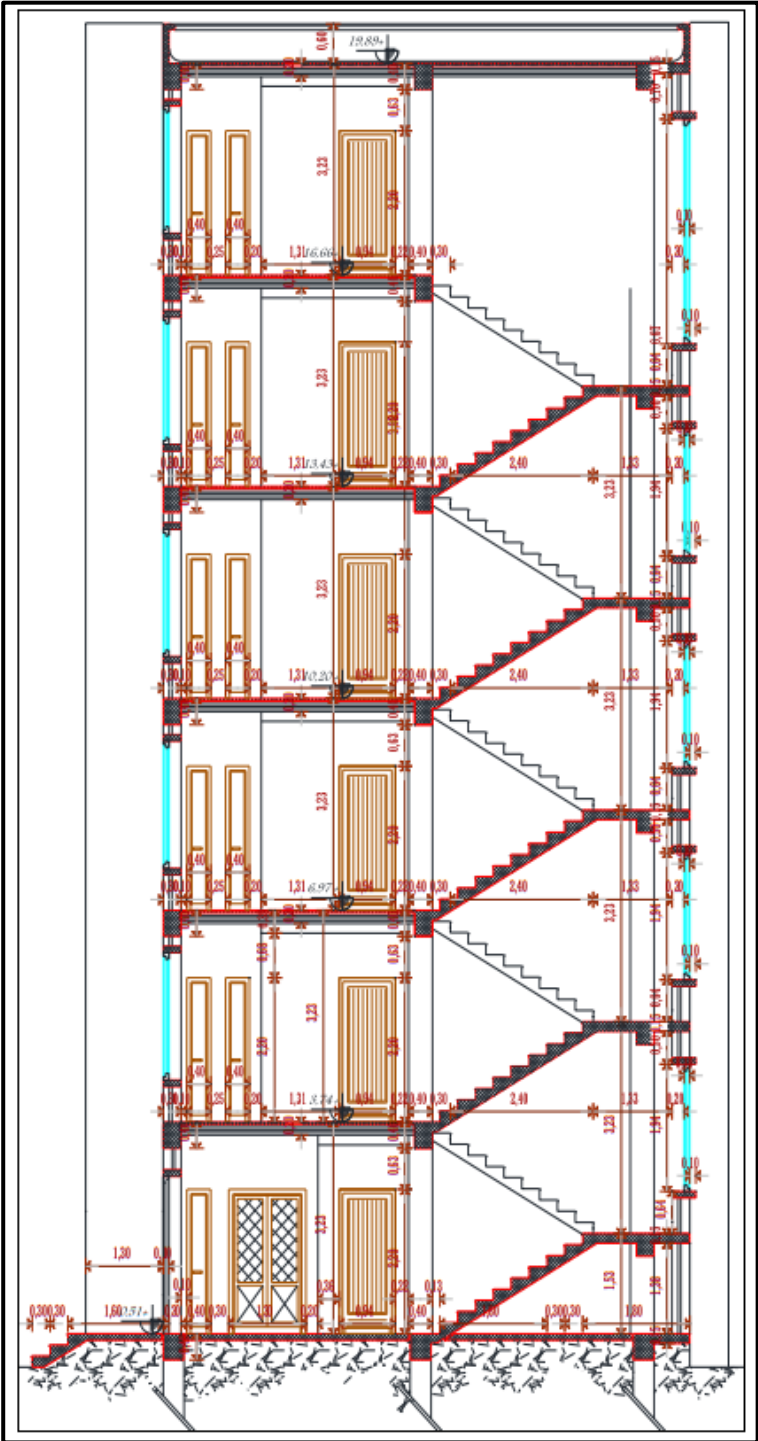


Fig III-4 – Vue en plan d'étage courant

III.2.3 Données géotechniques du site

Les caractéristiques du sol sont les suivantes selon le rapport géotechnique du laboratoire LTPO unité de Tiaret, antenne de Tissemsilt :

- L'ouvrage appartient au groupe d'usage 2 en vertu du règlement.
- La contrainte admissible du sol $\bar{\sigma} = 1.3 \text{ bars}$ pour un ancrage $h = 1.5 \text{ m}$.
- L'accélération de zone $A = 0.15$.
- Le poids spécifique du sol : $\gamma = 1,70 \text{ t/m}^3$, l'angle de frottement interne du sol $\varphi = 20,53^\circ$, la cohésion $C = 0,33 \text{ bars}$.

III.2.4 Caractéristiques géométriques

Le bâtiment est constitué d'un seul bloc rectangulaire, de forme en plan régulière, avec les dimensions suivantes :

- Hauteur avec acrotère 19.98 m
- Hauteur sans acrotère 19.38 m
- Hauteur du rez-de-chaussée 3.23 m
- Hauteur des étages courants 3.23 m
- La longueur totale 20.90 m
- La largeur totale 10.95 m

III.2.5 Ossature et système constructif adopté

Tableau III-1 – Système constructif adopté

<p>Les planchers</p>	<p>Le plancher est une aire plane horizontale séparant deux niveaux d'une construction et capable de supporter des charges, notre structure comporte deux types de planchers :</p> <p>a. Planchers en corps creux (16+4) cm</p> <p>Ce type de plancher est constitué de poutrelles préfabriquées en béton armé ou bétonné sur place espacées de 65 cm de corps creux (hourdis) et d'une table de compression en béton armé d'une épaisseur de 4 cm.</p> <p>Ce type de planchers est utilisé pour les raisons suivantes :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Facilité de réalisation ; • Lorsque les portées de l'ouvrage ne sont pas importantes ; • Diminution du poids de la structure et par conséquent la résultante de la force sismique ; • Une économie du coût de coffrage (coffrage perdu constitué par le corps creux). <p>b. Plancher en dalle pleine (ep=15cm)</p> <p>La dalle en béton armé coulée en place sur un coffrage plat.</p>
<p>Terrasse</p>	<p>Il existe un seul type de terrasse :</p> <p>Terrasse inaccessible.</p>
<p>Escaliers</p>	<p>Est un ouvrage constitué d'une suite régulière de plans horizontaux (marches et paliers), ils servent à relier les niveaux successifs et à faciliter les déplacements inter étages.</p> <p>Notre structure comporte un seul type d'escaliers :</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Escalier droit à deux volées avec un palier intermédiaire.

Maçonnerie	<p>Les murs de notre structure seront exécutés comme suit :</p> <p>a. Murs extérieurs</p> <p>Ils sont constitués d'une double cloison de 30cm d'épaisseur, brique creuse de 15 cm d'épaisseur pour les parois externes du mur, lame d'air de 5 cm d'épaisseur, brique creuse de 10 cm d'épaisseur pour les parois internes du mur.</p> <p>b. Murs intérieurs</p> <p>Ils sont constitués par une cloison de 10 cm d'épaisseur qui sert à séparer deux services et une double cloison de 25 cm d'épaisseur qui sert à séparer deux logements.</p>
Balcon	Sont des éléments non structuraux formés de dalle pleine en béton armé.
Acrotère	La terrasse étant inaccessible, le dernier niveau est entouré d'un acrotère en béton armé d'une hauteur 60 cm.
Revêtement	<ul style="list-style-type: none"> • Enduit en plâtre pour les plafonds. • Enduit en ciment pour les murs extérieurs et les cloisons. • Revêtement à carrelage pour les planchers. <p>Le plancher terrasse sera recouvert par une étanchéité multicouche imperméable évitant la pénétration des eaux pluviales.</p>
Isolation	<p>L'isolation acoustique est assurée par le vide de corps creux et la masse du plancher, par contre au niveau de murs extérieurs l'isolation est assurée par le vide d'air entre les deux parois qui compose se dernier, et par la minimisation des ponts thermique en cours de réalisation.</p> <ul style="list-style-type: none"> • A noter que l'isolation thermique est assurée par les couches de liège pour le plancher terrasse.

III.2.6 Caractéristiques mécaniques des matériaux

Les caractéristiques des matériaux utilisés dans la construction seront conformes au règlement du béton armé aux états limites (**B.A.E.L 91 modifiée 99**) [28], ainsi que le Règlement Parasismique Algérien (**R.P.A 99/version 2003**) [8]

III.2.6.a Le Béton :

Le Béton est constitué par un mélange hétérogène de matériaux inertes appelés «Granulats » (sable, gravier), du ciment et de l'eau.

- $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$, $f_{t28} = 2.1 \text{ MPa}$.

Les composantes de la pâte du béton doivent respectes certaines normes techniques telle que :

- La propreté et la qualité des composants.
- Le malaxage (mécanique).
- La vibration de la masse du béton lors de sa mise en œuvre.

La préparation du béton sera faite conformément aux normes techniques en respectant le dosage y compris toutes sujétions de bonne exécution.

1) Résistance mécanique

Résistance caractéristique à la compression

Le béton est caractérisé par sa bonne résistance à la compression, cette dernière elle est donnée à "j" jour en fonction de la résistance à l'âge de 28 jours par les formules suivantes :

- Pour $j < 28$:

$$\begin{cases} f_{cj} = \frac{j}{4.76+0.83j} f_{c28} \text{ Pour } f_{c28} \leq 40 \text{ MPa} \\ f_{cj} = \frac{j}{1.4+0.95j} f_{c28} \text{ Pour } f_{c28} > 40 \text{ MPa} \end{cases} \quad \text{(III-1)}$$

$$f_{cj} = 1.1 f_{c28} \quad \text{(III-2)}$$

Résistance caractéristique à la traction

Elle est désignée par le symbole f_{tj}

Donc pour $f_{c28} = 25 \text{ MPa} \rightarrow f_{tj} = 2.1 \text{ MPa}$

2) Module de déformation longitudinale

Selon la durée de l'application de la contrainte, on distingue deux types de modules de déformations longitudinales

Module de déformation instantanée

Pour des charges d'une durée d'application inférieure à 24 heures

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (\text{III-3})$$

$$E_{ij} = 11000 \sqrt[3]{25} = 32164.20 \text{ MPa}$$

Module de déformation longitudinale différée

Pour des charges de longue durée d'application on a :

$$E_{ij} = 3700 \sqrt[3]{f_{cj}} \quad (\text{III-4})$$

$$E_{ij} = 3700 \sqrt[3]{25} = 10818.9 \text{ MPa}$$

Déformation transversale coefficient de poisson

La déformation longitudinale est accompagnée par une déformation transversale, le coefficient de poisson est le rapport entre la déformation transversale et la déformation longitudinale. Dans les calculs, le coefficient de poisson est égal à :

$\nu = 0$ Béton fissuré à L'E.L.U.R.

$\nu = 0.2$ Béton non fissuré à L'E.L.S.

3) Contrainte limite

Etat limite ultime de résistance (E.L.U.R)

La contrainte ultime du béton en compression est donnée par :

$$\overline{\sigma}_{bc} = \frac{0.85}{\theta \times \gamma_b} f_{c28} \quad (\text{III-5})$$

Avec :

γ_b : Coefficient de sécurité tel que :

$$\overline{\sigma}_{bc} = \frac{0.85}{\theta \times \gamma_b} f_{c28} = 14.17 \text{ MPa. En situation durable } (\gamma_b = 1.5)$$

$$\overline{\sigma}_{bc} = \frac{0.85}{\theta \times \gamma_b} f_{c28} = 18.5 \text{ MPa. En situation accidentelle } (\gamma_b = 1.15)$$

Le coefficient de minoration 0,85 a pour objet de couvrir l'erreur faite en négligeant le fluage du béton

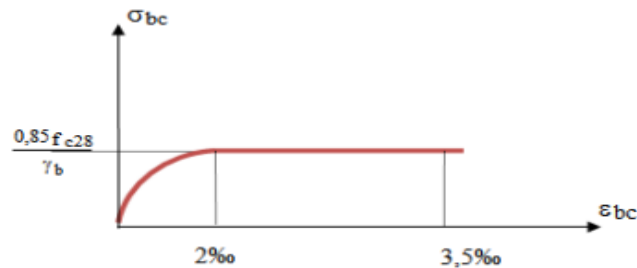


Fig III-5 – Diagramme de Contrainte-Déformation à l'E.L.U.R

Etat limite de service (E.L.S)

La Contrainte de service à la compression est donnée par :

$$\overline{\sigma}_{bc} = 0.6 f_{c28} = 15 \text{ MPa} \quad (\text{III-6})$$

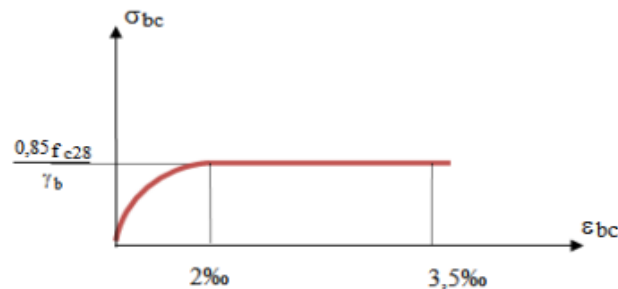


Fig III-6 – Diagramme de Contrainte-Déformation à l'E.L.S

III.2.6.b Aciers

L'acier est un matériau caractérisé par sa bonne résistance à la traction, nous utilisons les types d'aciers suivants :

- Les ronds lisses (R.L) : FeE235
- Haute adhérences (HA) : FeE400, FeE500
- Treillis soudés de maille $150 \times 150 \text{ mm}^2$ avec $\Phi = 5\text{mm}$

1. Contrainte limite de l'acier

Etat limite ultime « E.L.U »

Pour le diagramme Contrainte Déformation de calcul relatif aux états limites on utilisera le diagramme simplifié de la figure III.7 suivants :

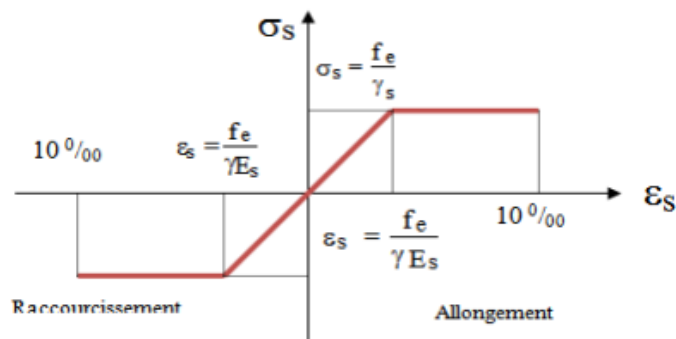


Fig III-7 – Diagramme Contrainte-Déformation pour l'Acier

On adopte le Diagramme Contrainte-Déformations suivant avec :

$$\sigma_s = \frac{f_e}{\gamma_s} \quad (\text{III-7})$$

$$\sigma_s = 348 \text{ MPa} \text{ En situation durable } (\gamma_s = 1.15)$$

$$\sigma_s = 400 \text{ MPa} \text{ En situation durable } (\gamma_s = 1)$$

Etat limite de service (ELS)

Il est nécessaire de limiter l'ouverture des fissures (risque de corrosion des armatures), et c'en limitant les contraintes dans les armatures tendues sous l'action des sollicitations de service D'après les règles **BAEL91**, on distingue trois cas de fissuration :

- Fissuration peu nuisible, pas de vérification
- Fissuration préjudiciable :

$$\bar{\sigma}_s = \min\left(\frac{2}{3}f_e; 110\sqrt{\eta \cdot f_{tj}}\right) \quad (\text{III-8})$$

Pour les aciers de nuances FeE400 avec $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

$$\bar{\sigma}_s = \min\left(\frac{2}{3} \times 400; 110 \times \sqrt{1.6 \times 2.1}\right) = 201.63 \text{ MPa}$$

- Fissuration très préjudiciable :

$$\bar{\sigma}_s = \min(0.5f_e; 110\sqrt{\eta \cdot f_{tj}}) \quad (\text{III-9})$$

Pour les aciers de nuances FeE400 avec $f_{c28} = 25 \text{ MPa}$

$$\bar{\sigma}_s = \min(0.5 \times 400; 110 \times \sqrt{1.6 \times 2.1}) = 167.97 \text{ MPa}$$

Avec :

η : Coefficient de fissuration tels que :

$\eta = 1$ pour des aciers ronds lisses.

$\eta = 1,6$ pour des aciers de H.A.

2. Module d'élasticité de l'Acier

Le module d'élasticité de l'Acier sera pris égale à : $E_s = 2 \times 10^5 \text{ MPa}$

III.2.7 Contrainte admissible de cisaillement

$$\tau_u = \min \left(\frac{0.2f_{cj}}{\gamma_b}, 5\text{MPa} \right) \text{ Fissuration peu préjudiciable.}$$

$$\tau_u = \min \left(\frac{0.15f_{cj}}{\gamma_b}, 4\text{MPa} \right) \text{ Fissuration préjudiciable ou très préjudiciable.}$$

La contrainte ultime de cisaillement dans une pièce en béton définie par rapport à l'effort tranchant ultime T_μ . [18]

$$\tau_u = \frac{T_\mu}{b_0 \times d} \quad (\text{III-10})$$

Avec : b_0 : largeur de la pièce.

d : hauteur utile.

III.2.8 Etats limites

Suivant les règles **B.A.E.L** on distingue deux états de calcul :

- Etats limites ultimes de résistance E.L.U.R
- Etats limites de service E.L.S

III.2.8.a E.L.U.R

Les sollicitations de calculs ne doivent pas dépasser dans le sens défavorables les sollicitations limites ultime résultant des règles énoncées dans la suite

- **Hypothèse de calcul** : les hypothèses de calcul sont énumérées ci-dessous :
 - 1- (Hypothèse de Navier) les sections droites restent planes après déformation et il n'y a pas de glissement relatif entre les armatures et le béton
 - 2- La résistance à la traction du béton est négligée (à cause de la fissuration).
 - 3- Les déformations des sections sont limitées pour l'allongement unitaire de l'acier à 10‰ et pour le raccourcissement unitaire du béton à 3,5‰ en flexion et 2‰ en compression simple.

4- Le béton et l'acier sont considérés comme matériaux linéairement élastique c'est-à-dire la contrainte est proportionnelle à la déformation : $\sigma_b = E_b \cdot \epsilon_b$ Le coefficient d'équivalent est

$$n = \frac{E_s}{E_b} = 15$$

5- Le diagramme linéaire de déformation de la section passe par l'un des trois pivots

• Règles de trois Pivots

On fonction des sollicitations normales la rupture d'une section en béton armé peut intervenir :

- Par écrasement du béton comprimé.
- Par épuisement de la résistance de l'armature tendue.

Les positions limites que peut prendre le diagramme des déformations sont déterminées à partir des déformations limites du béton et de l'acier

- La déformation est représentée par une droite passant par l'un des points **A**, **B** ou **C** appelés pivots.

Tableau III-2 – Règles de trois Pivots

Pivot	Domaine	Déformations limites du pivot considéré
A	1	Allongement unitaire de l'acier 10 ‰
B	2	Raccourcissement unitaire du béton a la flexion 3.5 ‰
C	3	Raccourcissement unitaire du béton a la compression 2 ‰

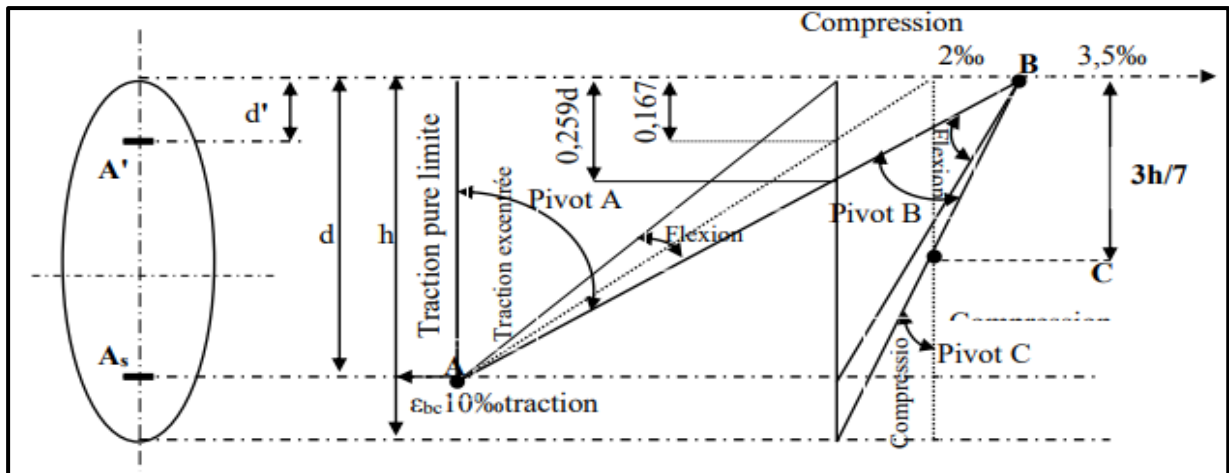


Fig III-8 – Diagramme des déformations limitées de la section (Règles des trois pivots)

III.2.8.b E.L.S

Il consiste à l'équilibre des sollicitations d'actions réelles (non majorée) et les sollicitations résistances calculées dépassement des contraintes limites.

$$G + Q \text{ avec } \begin{cases} G : \text{Charges permanentes} \\ Q : \text{Charges d'exploitations.} \end{cases}$$

III.2.9 Sollicitation du calcul vis-à-vis des états limites**Etat limite ultime**

Les sollicitations de calcul sont déterminées à partir de la combinaison d'action suivante :

$$1,35G+1,5Q$$

S'il y aura intervention des efforts horizontaux due au séisme, les règles parasismiques Algériennes ont prévus les combinaisons d'action suivantes :

$$\text{Pour les poutres } \begin{cases} 0.8G \pm E \\ G + Q \pm E \end{cases} \quad \text{pour les poteaux } \begin{cases} 0.8G \pm E \\ G + Q \pm 1.2E \end{cases}$$

III.3 Descende des charges et Pré dimensionnement :

L'objectif du pré dimensionnement est de déterminer les dimensions des différents éléments constituant la structure conformément aux réglementations (RPA99/version2003) et (C.B.A.93). Le pré dimensionnement sert de base pour justifier la résistance, la stabilité et la durabilité de l'ouvrage face aux contraintes verticales et horizontales.

III.3.1 Les charges et des surcharges

L'étude de descende des charges a été faite par Besri et Loudjani [27] et les résultats sont résumés dans le tableau suivant

Tableau III-3 – Les charges et les surcharges [14]

Plancher terrasse	G (KN/m²)	6,48
	Q (KN/m²)	1
Plancher étage courants	G (KN/m²)	5,04
	Q (KN/m²)	1,5
Mur extérieur	G (KN/m²) (RDC, 1er au 5ème étage)	2,67
Mur intérieur	G (KN/m²) (RDC, 1^{er} au 5^{ème} étage)	1,32
Balcon	G (KN/m²)	5,27
	Q (KN/m²)	3,5
Escaliers	G (KN/m²) (RDC, 1er au 5eme étage)	7,27
	Q (KN/m²)	2,5
Palier	G (KN/m²)	4,86
	Q (KN/m²)	2,5
Acrotère	G (KN/ml)	1.83

III.4 Pré dimensionnement des éléments principaux

III.4.1 Les poteaux

Le calcul de la section du béton sera fait en compression centrée, est doivent vérifier les conditions imposées par les règles RPA99 (version 2003). Le pré- dimensionnement des poteaux ainsi que la vérification à l'effet de flambement sont présentés par l'étude précédent.

On adopte :

$(40 \times 40)\text{cm}^2$: R. D. C , 1^{er} étage ;
 $(35 \times 35)\text{cm}^2$: 2^{ème} étage, 3^{ème} étage;
 $(30 \times 30)\text{cm}^2$: 4^{ème} étage , 5^{ème} étage.

III.4.2 Les poutres

De manière générale, les poutres sont des éléments horizontaux qui supportent une charge. Il existe deux types de poutres : les poutres principales et les poutres secondaires.

Les vérifications sont faites par BAEL91 et la réglementation de RPA 99 (Article 7.5.1) et on adopte les résultats obtenus par [27]

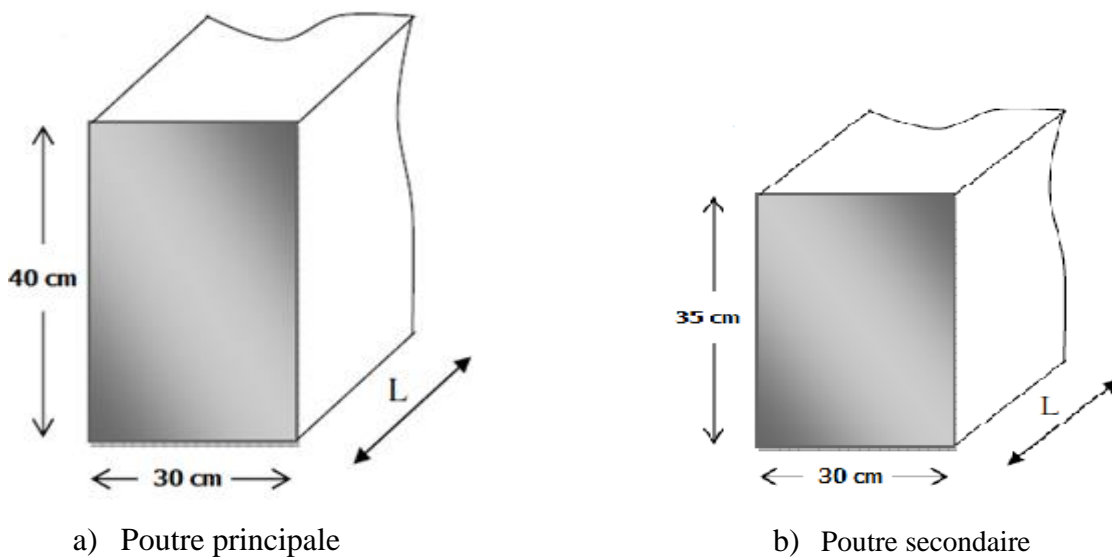


Figure III-9 La poutre principale et la poutre secondaire

III.4.3 Les voiles

Les voiles de contreventement sont des éléments qui résistent aux charges horizontales dues au vent et au séisme. Dans la présente étude on prend une épaisseur constante pour tous les niveaux. L'épaisseur des voiles est donc $e = 15 \text{ cm}$.

III.5 Modélisation de la structure

III.5.1 Présentation du logiciel ETABS

L'élaboration de structures en génie civil est une tâche complexe et très chronophage, ce qui rend l'utilisation de l'informatique extrêmement bénéfique. ETABS, acronyme de "Extended Three Dimensional Analysis of Building Systems", est un logiciel largement adopté dans l'industrie de la construction pour la modélisation, l'analyse et la conception de structures de génie civil. Il permet la création de modèles tridimensionnels de structures, la réalisation d'analyses statiques et dynamiques, ainsi que la conception de structures conformes aux normes en vigueur. Grâce à son interface conviviale et à ses fonctionnalités avancées, ETABS aide les ingénieurs à optimiser leurs conceptions, à améliorer la sécurité et l'efficacité des structures, et à réduire les risques associés aux vibrations sismiques et aux charges environnementales.

III.5.2 Présentation de la vue de la structure

La modélisation de la structure :

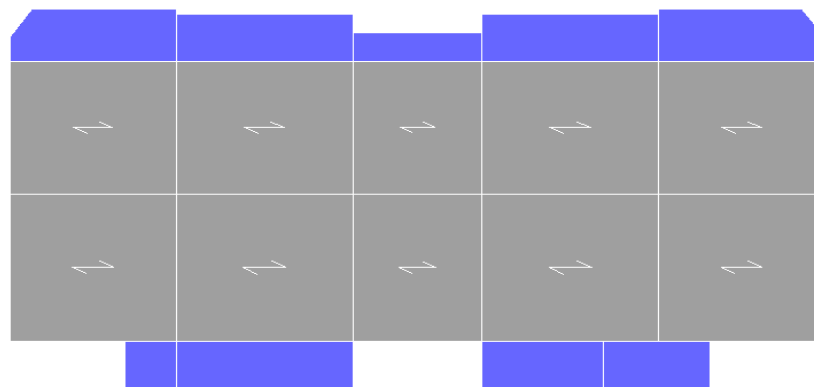


Fig III-10 – La vue en plan [27]

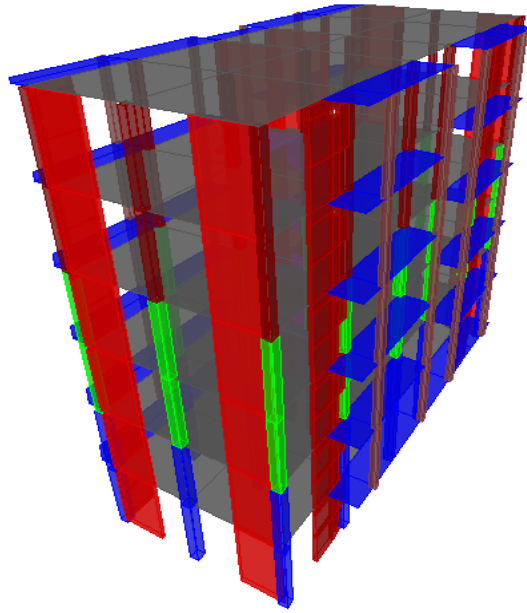


Fig III-11 – La vue en 3D [27]

III.5.3 Choix de la disposition des voiles

Plusieurs dispositions ont été essayées qui aboutissaient soit à un mauvais comportement de la structure, soit à la non-vérification de la condition liée à l'interaction voiles-portiques qui influe sur la valeur du coefficient de comportement. La disposition retenue (Figure III-13) est celle qui donne les meilleurs résultats vis-à-vis l'interaction (portique-voile) et le comportement vibratoire.

La disposition adoptée représentée ci-dessous :

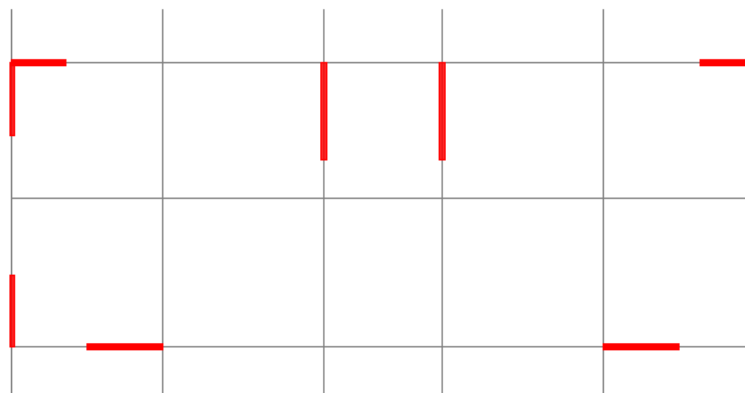


Fig III-12 – Disposition des voiles

III.6 Analyse modale de la structure

L'analyse modale de la structure est une étape fondamentale pour l'analyse sismique, elle permet de calculer les périodes propres ainsi que les modes propres de vibration. Ceux-ci caractérisent le comportement dynamique de la structure. Grâce à cette analyse le modèle approprié pour le bâtiment étudié peut être choisi, et certaines vérifications peuvent être effectuées sur la valeur de la période fondamentale et les modes spécifiques de vibration considérés comme importants. Les résultats de l'analyse modale sont illustrés par le tableau III-4. A partir de ce tableau on constate que 08 modes propres sont nécessaires pour effectuer une analyse modale spectrale de la présente structure suivant le sens transversal et suivant le sens longitudinal.

Tableau III-4 – Pourcentage de la participation de la masse modale [27]

Mode	Période	UX	UY	SumUX	SumUY	RZ
1	0,334244	0,0052	69,4887	0,0052	69,4887	0,0004
2	0,320889	58,3763	0,0055	58,3815	69,4942	11,2008
3	0,213784	12,0944	0,0002	70,476	69,4943	60,118
4	0,113235	0	4,5248	70,476	74,0192	0
5	0,109754	0,1367	0,0002	70,6126	74,0194	1,0032
6	0,086799	11,0904	0	81,703	74,0195	0,5428
7	0,069024	0,0039	16,2105	81,7069	90,23	0,0013
8	0,068027	5,1038	0,0125	86,8107	90,2425	1,607
9	0,059141	0,0003	0,0001	86,8109	90,2426	0
10	0,056621	3,2552	0,0001	90,0661	90,2427	0,8408
La condition du RPA se vérifié au 8^{ème} Mode						

III.7 Choix des accélérogrammes pour les analyses temporelles élastiques

L'utilisation d'analyses temporelles élastiques implique l'application d'une série d'accélérogrammes aux modèles préalablement définis, qui sont compatibles avec le spectre de réponse élastique amorti à 5%. Les enregistrements sismiques utilisés pour ces analyses ont été choisis

conformément aux recommandations formulées. Ainsi, nous avons appliqué les cinq enregistrements sismiques sélectionnés à la structure pour ces analyses.

III.7.1 Définition de la fonction temporelle :

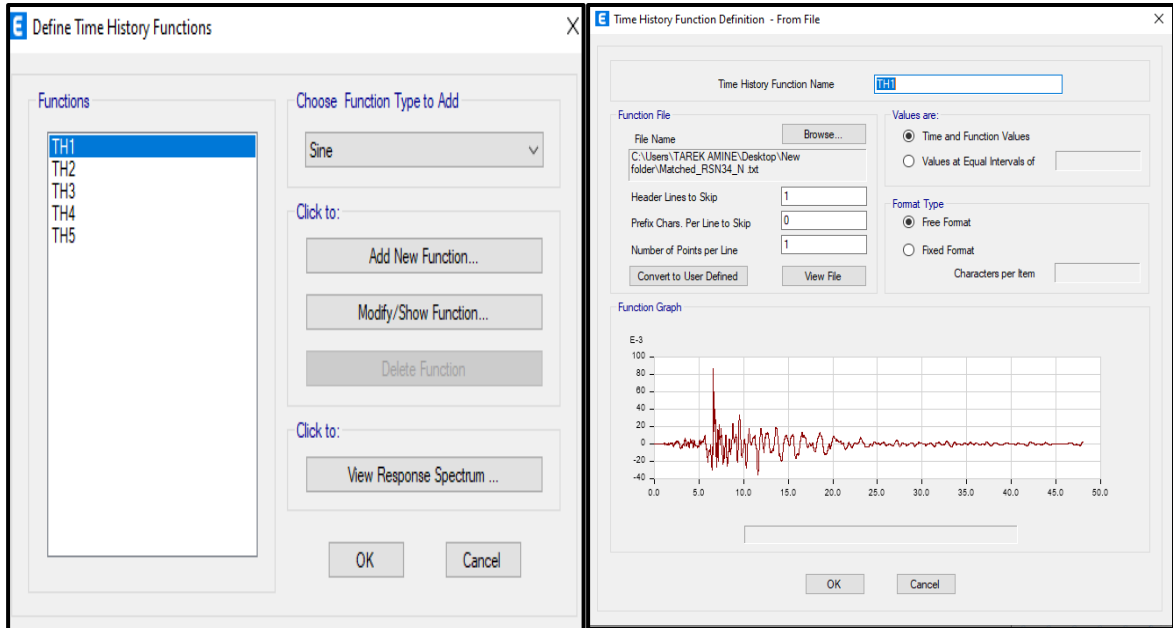


Fig III-13 – Les fonctions temporelles

III.7.2 Définition des fonctions temporelles pour chaque enregistrement :

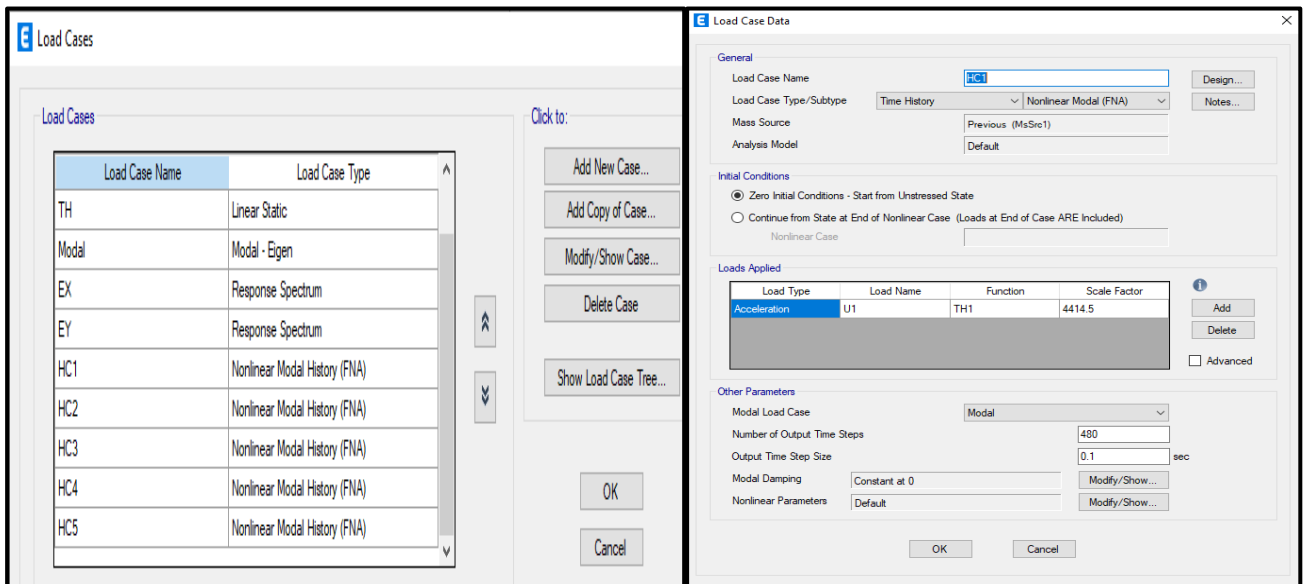


Fig III-14 – Les cas d'historique temporel

III.7.3 Définir les noms de cas de charge statique :

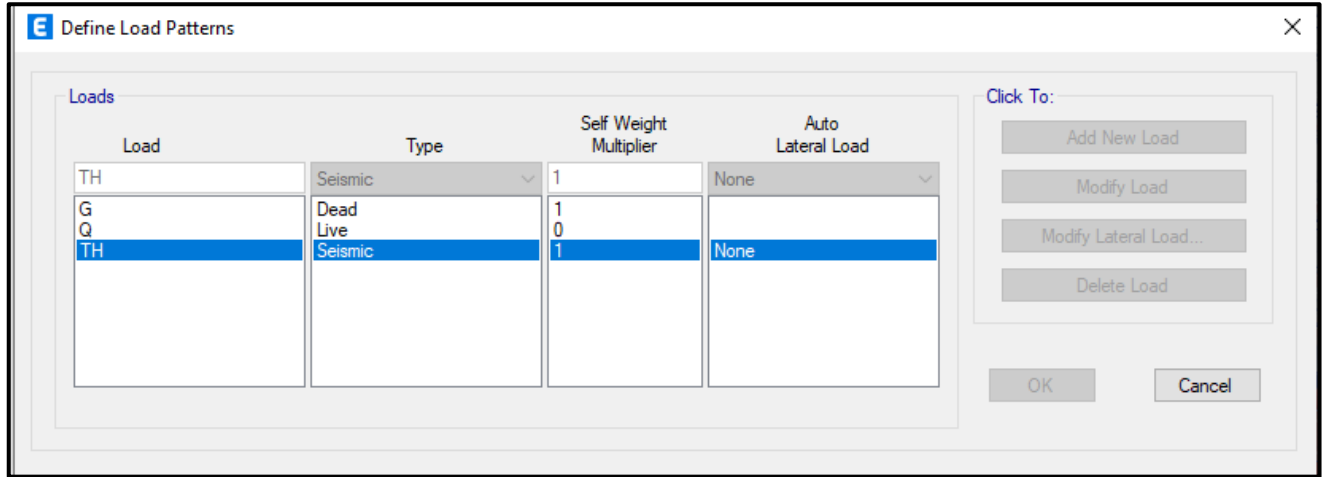


Fig III-15 – Définir la charge

III.7.4 Effets des méthodes d'étalonnage sur la réponse sismique de la structure :

Afin d'évaluer l'impact de l'étalonnage des enregistrements sismiques sur la réponse dynamique élastique de la structure, nous réalisons une étude comparative en utilisant la méthode modale spectrale et en considérant un spectre élastique.

Les résultats seront présentés en termes des forces internes exercées sur la poutre et le poteau les plus sollicités de la structure, comme indiqué dans les figures III-17 et III-18, ainsi que les déplacements du nœud illustré dans la figure III-19.

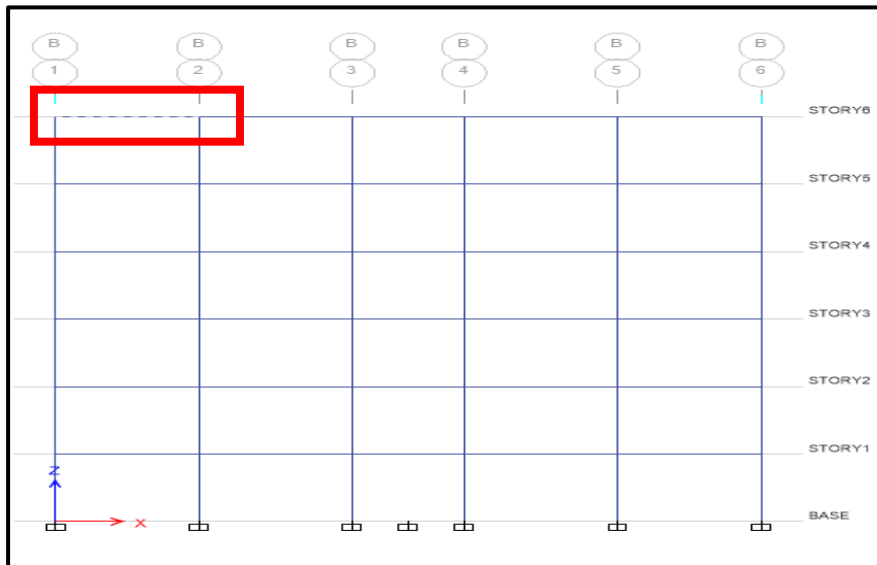


Fig III-16 – la poutre le plus sollicité de la structure

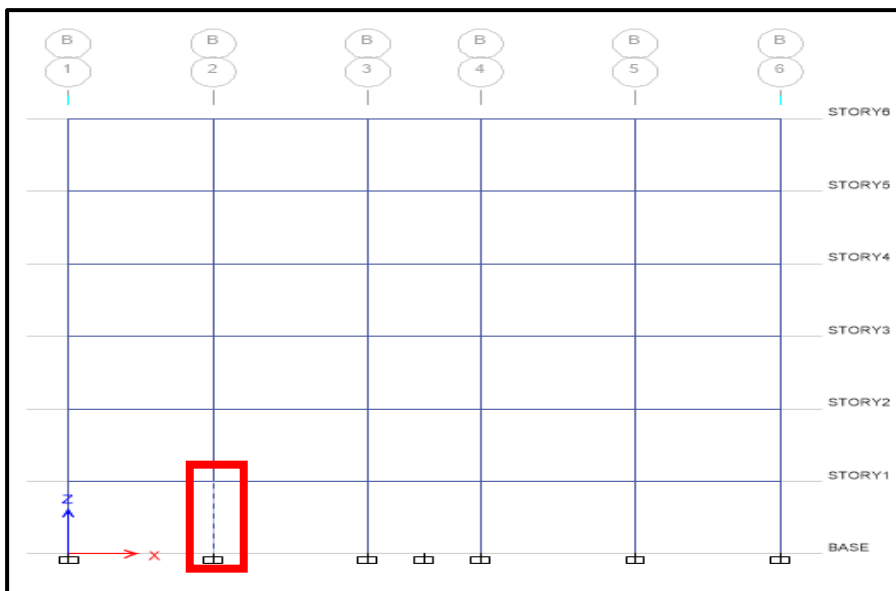


Fig III-17 – Le poteau le plus sollicité de la structure

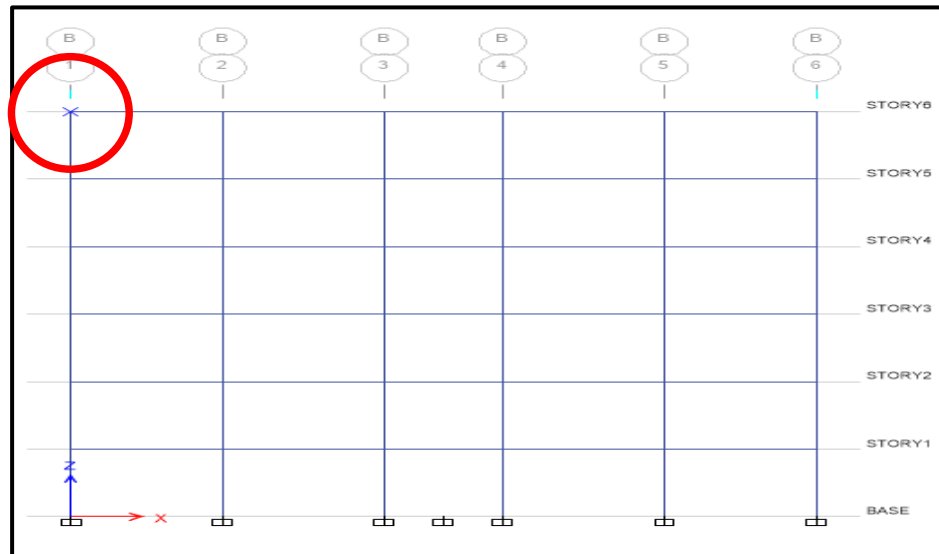


Fig III-18 – Nœud de mesure au sommet de portique

Les résultats obtenus pour chaque accélérogrammes sont résumés dans les tableaux suivant :

Tableau III-5 – Déplacements relatifs par la méthode Matching

Evènement	Nœud 1	
	$U_{max}(cm)$	$U_{min}(cm)$
Northern Calif-05	7.258	-7.177
Imperial Valley-06	2.833	-3.292
Parkfield-02, CA	12.073	-10.699
Iwate, Japan	11.978	-13.077
Christchurch, New Zealand	9.736	-8.849
Médian	8.6972	

Tableau III-6 – Moment fléchissant et effort tranchant par la méthode Matching

Evènement	Poutre 1			
	$M_{max}(kn.m)$	$M_{min}(kn.m)$	$T_{max}(kn)$	$T_{min}(kn)$
Northern Calif-05	2.719	-2.508	17.628	-16.120
Imperial Valley-06	1.220	-1.131	7.909	-7.014
Parkfield-02, CA	3.970	-4.576	24.740	-28.849
Iwate, Japan	4.723	-4.509	29.493	-27.037
Christchurch, New Zealand	3.274	-3.502	20.718	-22.135
Médians	3.2132		20.1643	
Evènement	Poteau 2			
	$M_{max}(kn.m)$	$M_{min}(kn.m)$	$T_{max}(kn)$	$T_{min}(kn)$
Northern Calif-05	21.153	- 17.485	11.171	-9.239
Imperial Valley-06	7.676	-9.968	4.194	-5.253
Parkfield-02, CA	31.080	-29.173	16.408	-15.399
Iwate, Japan	34.630	-31.331	18.453	-16.540
Christchurch, New Zealand	25.986	-23.487	13.707	-12.423
Médian	22.4484		12.2787	

Tableau III-7 – Déplacements relatifs par la méthode PGA

Evènement	Nœud 1	
	$U_{max}(cm)$	$U_{min}(cm)$
Northern Calif-05	8.690	-8.124
Imperial Valley-06	6.207	-6.869
Parkfield-02, CA	9.541	-8.989
Iwate, Japan	26.429	-25.515
Christchurch, New Zealand	14.494	-16.277
Médian	13.1135	

Tableau III-8 – Moment fléchissant et effort tranchant la méthode PGA

Evènement	Poutre 1			
	$M_{max}(kn.m)$	$M_{min}(kn.m)$	$T_{max}(kn)$	$T_{min}(kn)$
Northern Calif-05	3.719	-3.985	25.665	-27.852
Imperial Valley-06	2.827	-2.625	21.239	-20.250
Parkfield-02, CA	3.364	-3.736	22.642	-24.410
Iwate, Japan	9.224	-9.551	57.708	-56.618
Christchurch, New Zealand	5.578	-5.163	35.128	-32.360
Médians	4.9772		32.3872	
Evènement	Poteau 2			
	$M_{max}(kn.m)$	$M_{min}(kn.m)$	$T_{max}(kn)$	$T_{min}(kn)$
Northern Calif-05	29.677	-27.376	18.816	-17.355
Imperial Valley-06	21.678	-27.783	13.785	-14.467
Parkfield-02, CA	26.413	-24.187	16.745	-15.333
Iwate, Japan	61.367	-62.418	38.886	-39.571
Christchurch, New Zealand	35.132	-38.328	22.275	-24.298
Médians	32.6983		22.1531	

Les résultats moyens (médians) obtenus en termes de déplacement, moment fléchissant et effort tranchant des différents points de mesures sont récapitulé dans le tableau ci-après :

Tableau III-9 – Les résultats moyens

		Analyse modale spectrale	Analyse temporelle	
			PGA	Matching
Nœud	Déplacement (cm)	10.834	13.1135	8.6972
Poutre	Moment fléchissant (KN.m)	3.8259	4.9772	3.2132
	Effort tranchant (KN)	23.2811	32.3872	20.1643
Poteau	Moment fléchissant (KN.m)	26.2583	32.6983	22.4484
	Effort tranchant (KN)	13.7786	22.1531	12.2787

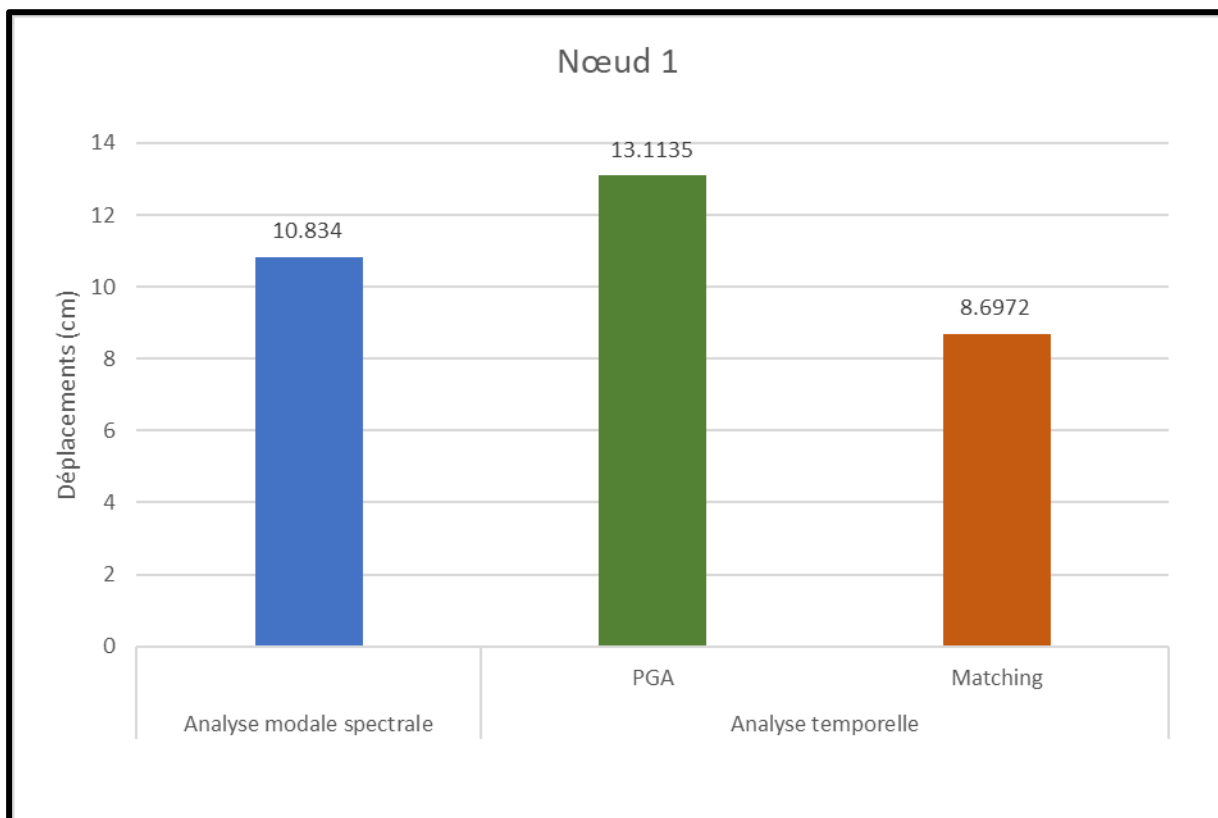


Fig III-19 – Les déplacements sur le nœud

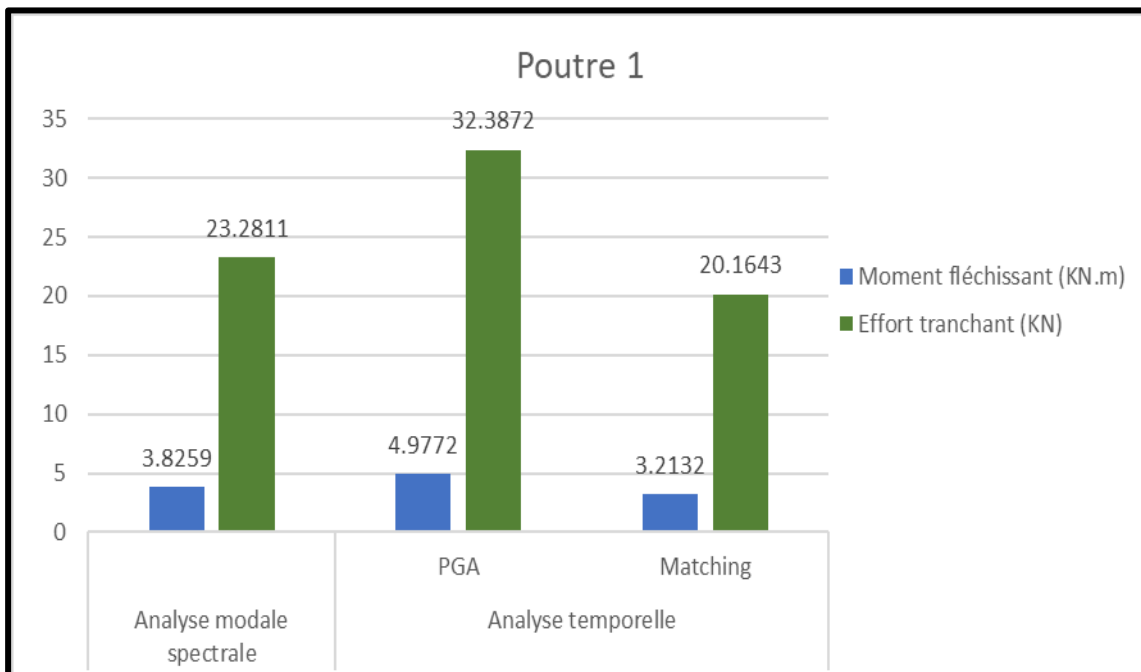


Fig III-20 – Les moments fléchissant et les efforts tranchant sur la poutre

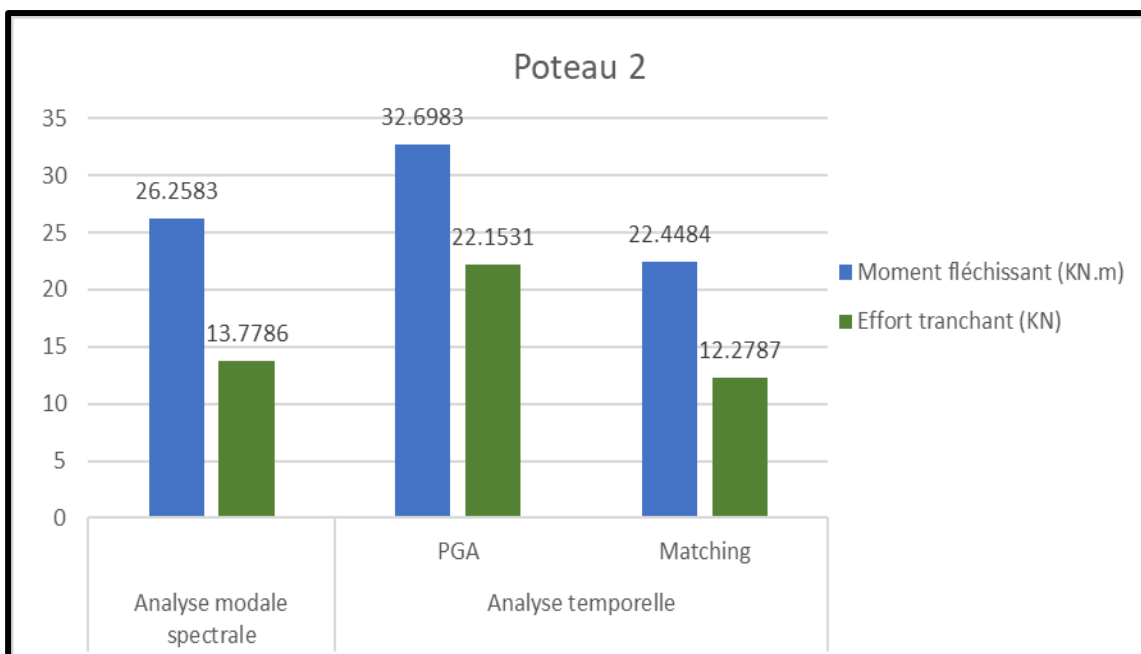


Fig III-21 – Les moments fléchissant et les efforts tranchant sur le poteau

Tableau III-10 – Déférence entre PGA et Matching

		Déférence
Nœud	Déplacement (m)	34 %
Poutre	Moment fléchissant (KN.m)	35 %
	Effort tranchant (KN)	38 %
Poteau	Moment fléchissant (KN.m)	39 %
	Effort tranchant (KN)	40 %
Pourcentage moyen		37 %

Tableau III-11 – Déférence entre PGA et l'analyse modale spectrale

		Déférence
Nœud	Déplacement (m)	17 %
Poutre	Moment fléchissant (KN.m)	23 %
	Effort tranchant (KN)	28 %
Poteau	Moment fléchissant (KN.m)	20 %
	Effort tranchant (KN)	38 %
Pourcentage moyen		25 %

Tableau III-12 – Déférence entre Matching et l'analyse modale spectrale

		Déférence
Nœud	Déplacement (m)	20 %
Poutre	Moment fléchissant (KN.m)	16 %
	Effort tranchant (KN)	13 %
Poteau	Moment fléchissant (KN.m)	15 %
	Effort tranchant (KN)	11 %
Pourcentage moyen		15 %

Suite à l'analyse des résultats obtenus grâce à l'intégration temporelle et spectrale, on conclut les points suivants :

- Les résultats obtenus par la méthode de l'analyse temporelle Matching sont plus faibles par rapport à ceux obtenus par la méthode de l'analyse temporelle PGA et la méthode modale spectrale.
- Lorsque nous examinons les résultats issus des analyses dynamiques temporelles effectuées sous des séismes étalonnés, il devient évident que leur dépendance vis-à-vis des méthodes d'étalonnage est significative.
- On remarque que les résultats des déplacements obtenus à partir de l'analyse temporelle PGA, sont élevés que ceux obtenus par la méthode modale spectrale.
- On observe que les résultats concernant le moment fléchissant dans la poutre la plus sollicitée, obtenus à partir de l'analyse temporelle PGA, sont plus élevés que ceux obtenus par l'analyse temporelle Matching et l'analyse modale spectrale, mais la différence reste relativement moindre par rapport les résultats du poteau le plus sollicité.

- Les résultats obtenus en termes de l'effort tranchant dans la poutre et le poteau pour l'analyse temporel PGA sont plus élevés que ceux obtenus par le analyses temporel Matching et l'analyse modale spectrale.

III.8 Conclusion

D'après les résultats obtenus de deux types d'analyses sismiques en termes de déplacement, effort tranchant et moment fléchissant nous pouvons conclure que la méthode de traitement à un effet considérable sur les résultats. On a observé que la méthode de l'analyse temporel PGA conduit à des résultats élevés par rapport à ceux trouvés par les deux autres méthodes.

La méthode Matching utilise une sélection spécifique d'enregistrements qui correspondent le mieux au spectre cible, ce qui peut conduire à des valeurs différentes par rapport au PGA qui est basé sur une mesure unique de l'accélération maximale.

L'analyse modale spectrale se concentre sur les modes de vibration fondamentaux de la structure. Bien que cette méthode puisse fournir des informations précieuses sur les déformations modales, les périodes de résonance et les déplacements dans ces modes dominants, elle peut ne pas capturer pleinement les effets transitoires dynamiques ce qui conduire à des valeurs différentes de déplacement et de moment fléchissant.

Par contre l'analyse temporelle permet de capturer les effets dynamiques transitoires tels que les oscillations et les déformations transitoires. Cette méthode prend en compte les variations temporelles précises des forces sismiques.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

Ce mémoire présente une analyse comparative entre deux différentes méthodes d'analyse dynamique des mouvements sismiques enregistrés. Ainsi qu'à l'effet de ces enregistrements sismiques sur la réponse dynamique d'une structure en béton armé.

Pour effectuer l'analyse dynamique dans le domaine temporel, on utilise généralement des accélérogrammes historiques, la sélection de ces derniers a été faite à travers la base des données PEER (Pacific Earthquake Engineering Research Center).

Les accélérogrammes caractérisés par plusieurs composantes, donc on a choisi deux techniques différentes à travers la littérature dans ce mémoire.

Ces méthodes sont : PGA ou Cette méthode consiste à multiplier l'accélérogrammes par un facteur permettant à l'accélération maximale de cette dernière d'être égale à l'accélération maximale cible, Matching ou Cette méthode consiste en l'ajout et la soustraction d'ondelettes à l'accélérogramme original. Si elles sont correctement sélectionnées, ces ondelettes permettent d'étalonner adéquatement les spectres sans ajouter de déplacement supplémentaire. Par la suite on a utilisé les résultats de comparaisons des deux différentes méthodes d'étalonnage permettent de conclure que la méthode Matching est plus efficace que la méthode PGA. Cette dernière ne produit pas les résultats attendus.

A partir de ce travail on a étudié la réponse sismique d'une structure en béton armé par les deux méthodes d'analyse (l'analyse modale spectrale et l'analyse temporel sous mouvements sismiques étalonnés. Le spectre de réponse élastique des règles parasismiques algériennes RPA99/2003 a été utilisé pour les deux analyses. Les analyses temporelles réalisées à l'aide des sollicitations ajustées selon les deux techniques

d'étalonnage préalablement choisies permettent de tirer plusieurs conclusions quant à la validité de ces techniques.

Premièrement, on remarque que les méthodes d'étalonnage "Matching" et "PGA" présentent des similitudes dans les résultats obtenus.

La méthode Matching utilise une sélection spécifique d'enregistrements qui correspondent le mieux au spectre cible, ce qui peut conduire à des valeurs différentes par rapport au PGA qui est basé sur une mesure unique de l'accélération maximale.

En outre, on observe que l'analyse modale spectrale donne des résultats plus déférents que ceux obtenus par les analyses temporelles. Voici quelques raisons qui peuvent expliquer ces écarts :

- L'analyse modale spectrale se concentre sur les modes de vibration fondamentaux de la structure et l'analyse temporelle permet de capturer les effets dynamiques transitoires tels que les oscillations et les déformations transitoires ce qui conduit à des résultats déférents que ceux obtenus avec l'analyse temporelle qui prend en compte les interactions complexes entre les différentes fréquences.
- L'analyse modale spectrale suppose généralement une réponse linéaire de la structure, ce qui peut ne pas refléter la réalité dans les situations où des effets non linéaires, tels que les non-linéarités géométriques, les non-linéarités matérielles ou les liaisons non linéaires, sont présents. L'analyse temporelle, qui résout les équations du mouvement complet, tient compte de ces effets non linéaires et peut donc donner des résultats plus précis.

L'analyse modale spectrale et l'analyse temporelle sont des approches complémentaires qui peuvent être utilisées ensemble pour obtenir une compréhension plus complète de la réponse dynamique d'une structure. Les écarts entre les résultats des deux méthodes

peuvent varier en fonction des caractéristiques spécifiques de la structure et des conditions d'excitation. Il est recommandé de réaliser les deux types d'analyses pour évaluer la réponse dynamique de manière plus précise et fiable.

En fin, j'étais beaucoup bénéficié de ce travail et j'espéré qu'il en aidera d'autres, Je suggère aux promotions futures d'examiner d'autres cas de structures afin d'obtenir des résultats plus généraux, d'explorer d'autres méthodes d'étalonnage et de tenir compte du comportement non linéaire des structures, car c'est dans ces situations que l'analyse temporelle devient essentielle.

BIBLIOGRAPHIE

Références Bibliographiques

- [1] Dominic, M. "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". (2012).
- [2] Fahjan, YM. "Selection and scaling of real earthquake accélérogrammes to fit the Turkish design spectra". (2008).
- [3] Aguilar, M., et al. "Seismograms Analyzer-e. Program for analysis of seismic records". (2018).
- [4] Habbi, D. "Mémoire de magister évaluation des mécanismes de ruine des structures auto stable sous les séismes proches et lointains". (2014).
- [5] Bouguettoucha, A., et Chaoui, I. "Sélection et étalonnage des accelogrammes pour l'analyse non linéaire". (2016).
- [6] Iervolino, I., et Cornell, CA. "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures ". (2005).
- [7] Abrahamson, NA., et Silva, WJ. "Empirical response spectral attenuation relations for shallow crustal earthquakes ". (1997).
- [8] Règles Parasismiques Algériennes, RPA 99 / Version 2003, Centre National De Recherche Appliquée En Génie Parasismique, Algérie.
- [9] Bommer, JJ., et Scott, SG. "Hazard-consistent earthquake scenarios ". (2000).
- [10] Iervolino, I., et al. "Ground motion duration effects on nonlinear seismic response ". (2006).
- [11] Anne, M et all. "détection des effets de site sismique : mise point de méthodes expérimentales à Nice". <https://hal.archives-ouvertes.fr>. [En ligne] (2013).
- [12] Kawaga, T., Irikura, K., et Somerville, GP. "Differences in ground motions and faultprocess between the surface and buried ruptures earthquakes". Earth Planets and Space. (2004).
- [13] Bolt, BA., et Abrahamson, NA. "Estimation of strong seismic ground motions ". (2003).
- [14] Bai Sarra, H., et Chernouh, H. "Effet de la sélection des mouvements sismiques sur l'analyse dynamique". (2019).
- [15] Jean, O. "Sélection, étalonnage et orientation critique des secousses sismiques bidirectionnelles pour l'analyse des bâtiments situés dans L'est du Canada". (2014).
- [16] Evangelos, I., et al. "Selection of earthquake ground motion motion record: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective ". (2009).
- [17] Leger, P., et Tremblay, R. "Earthquake ground motions for seismic damage assessment and re-evaluation of existing buildings and critical facilities ". (2009).
- [18] Mehanny, SSF. "Modeling and Assessment of Seismic Performance of Composite Moment Frames with Reinforced Concrete Columns and Steel Beams ". (1999).

- [19] Alavi, B., et Krawinkler, H. "Consideration of near-fault ground motion effects in seismic design ". (2000).
- [20] Kurama, YC., et Farrow, KT. "Ground motion scaling methods for different site conditions and structure characteristics ". (2003).
- [21] Rozon, J. "Étude du comportement des cadres à contreventement excentrique de faible et moyenne hauteur". (2008).
- [22] Somerville, PG., et al. "Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity ". (1997).
- [23] PEER-NGA database the pacific Earthquake Engineering Resarch Center. "peer_center@berkeley.edu ". [En ligne] University of California. (2006).
- [24] Kalkan, E., et Chopra, AK. "Practical guidelines to select and scale earthquake records for nonlinear response history analysis of structures ". (2010).
- [25] Seismosoft Earthquake Engineering software solutions. "https://www.seismosoft.com ". [En ligne] (2018).
- [26] Abrahamson, NA., Bommer, JJ., et al. "Improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets Journal of Earthquake Engineering ". (2006).
- [27] Besri, MR., et Loudjani, M. "Modélisation et analyse sismique d'une structure en béton armé avec la variation de type de contreventement". (2022).
- [28] BAEL91 modifié 99 : "Règles techniques de conception et de calcul des ouvrages et constructions en béton armé suivant la méthode des états limites".

Logiciels Utilisés:

Structural Software for Building Analysis and Design ETABS 21.0.0.

SEISMO-SELECT Academic version 2023.

SEISMO-MATCH Academic version 2023.