

République Algérienne Démocratique et Populaire

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



**Ecole Nationale Supérieure
des Travaux Publics**

المدرسة الوطنية العليا للأشغال العمومية

Code :

Mémoire

Pour l'Obtention du Diplôme de MASTER

Filière : Travaux Publics

Spécialité : Matériaux et Structures

Thème

*Vérification des facteurs de réduction du
spectre de réponse de grand amortissement
de RPOA-2008*

Encadré par :

- Dr. CHIKH Benazouz


Présenté par :

- Nasri Abderrahmene

-Promotion 2015-

Ecole Nationale Supérieure des Travaux Publics. Garidi. Kouba.

Remerciements

Tout d'abord, nous tenons à remercier dieu  de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.

Je cite nommément :

- A notre encadreur Mr CHIKH Benazouz pour avoir accepté de me prendre en charge.
- A tout le personnel de l'ENSTP, qui nous ont aidé et enrichi nos connaissances.
- Je tiens également à remercier l'ensemble des étudiants de l'ENSTP pour toutes les informations qu'ils ont apporté à notre travail. Durant les cinq ans de notre formation.
- Aux personnes de la bibliothèque.
- Nos remerciements s'adressent, également, aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre travail.

Enfin, Nos plus vifs remerciements s'adressent aussi à tous ceux qui nous ont aidés, encourager et nous ont soutenus.

NASRI Abderrahmane

DEDICACE

أحمدك ربي حمدا يليق بجلال وجهك و عظيم سلطانتك .

الى التي سنل عنها رسول الله صلى الله عليه وسلم فقيل له: يا رسول الله، من احق الناس بحسن صحابتي؟ قال (امك)، قال: ثم من؟ قال: (ثم امك) ، قال: ثم من؟ قال: (ثم امك) ، قال: ثم من؟ قال: (ثم ابوك). و سنل رجل عبد الله بن عمر رضي الله عنهما عنها فقال: حملت امي على رقبتي من خرسان حتى قضيت بها المناسك. اتراني جزيتها قال: (لا، ولا طلقة من طلقاتها) الوالدة العزيزة الغالية .

je dédie ce modeste travail :

À ceux que j'aime et que j'adore :

À mon père et a ma mère ;

À ma deuxième famille mon père Ahmed et ma mère Souad ;

À toute la famille BADAOUI ;

À mes yeux Asma et Hadil et à mes bras Yacine et Adame.

À mes frères.

À toutes mes amis d'ENSTP promotion2015 :

À tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de cette mémoire.

À vous... Enfin, à tous ceux qui m'aiment de près et de loin.

MERCI

Abderrahmene

Liste Des Figures

	Pages
Figure II.1 Système élastique à un degré de liberté et (b) relation force – déplacement	3
Figure II.2 Spectre de réponse ($\xi = 5\%$) pour le séisme d' El Centro 1940 (N/S)	6
Figure II.3 Force périodique, impulsion	7
Figure II.4 Figure. 2.4 Spectre de réponse pour des séismes enregistrés à Imperial Valley Irrigation District substation, El Centro (N/S), California	8
Figure IV.1 Figure 1. Epicentre du séisme de Boumerdès 2003 (Source : AFPS)	18
Figure IV.2 Spectres de réponse pour les accélérogrammes sélectionnés et le spectre moyen en noir 5%	20
Figure IV.3 Spectres de réponse pour les accélérogrammes sélectionnés et le spectre moyen en noir 10%	22
Figure IV.4 Coefficient de réduction d'amortissement déterminé pour l'ensemble d'accélérogrammes de Boumerdès	24
Figure IV.5 Comparaison des valeurs calculés	25

Liste Des Tableaux

	Pages
Tableau IV.1 Caractéristiques des enregistrements pour le séisme de Boumerdès 2003	18-19

Table de matière

	Pages
CHAPITRE I INTRODUCTION GENERALE	
I.1 Introduction Générale	1
CHAPITRE II Spectre de réponse : Notions théoriques – Domaine d’application	
II.1 Introduction	2
II.2 Réponse sismique des systèmes élastiques	3
II.2.1 Notion de spectre de réponse élastique	4
II.2.2 Construction du spectre de réponse	6
II.2.3 Spectre de réponse de conception	7
II.3 Evaluation numérique de la réponse dynamique	8
‘Méthode de Newmark’	
CHAPITRE III Coefficients de réduction d’amortissement	
III.1 Introduction	11
III.2 Revue de littérature des coefficients de réduction d’amortissement	11
III.3 Conclusion	15
CHAPITRE IV Evaluation de Coefficients de réduction d’amortissement	
IV.1 Introduction	16
IV.2 Paramètres du mouvement sismique	16
IV.3 Excitation sismique	17
IV.4 Construction des spectres	19
IV.5 Evaluation des coefficients d’amortissement	23
IV.5.1 Analyse de régression multiple	24
IV.6 Comparaison	25

CONCLUSION GENERAL

في العمل الحالي يتم معالجة معامل الحد من الاستهلاك عن طريق عمليات البحث ، ومساهمة صغيرة لجعله في سياق النشاط الزلزالي في الجزائر.

والغرض الرئيسي من هذا العمل هو أن المعامل المقدر لحد من استهلاك تحت خطة العمل ، للجسور ، وتوفير أدوات إضافية لضمان أمن أفضل في حين قدم ل الأداء المطلوبة في الاستجابة الهيكلية

وقد أجريت دراسة إحصائية لمتوسط الطيف على كل الزلازل 25 التي قدمت في هذه الدراسة

كلمات البحث: معامل التخفيض، للجسور.

Résumé

Dans le présent travail un coefficient de réduction d'amortissement est traité par des recherches bibliographiques, et une petite contribution de le formuler dans un contexte sismique Algérien.

Le but essentiel de cette thèse est l'estimation de coefficient de réduction d'amortissement dans le cadre de la construction du spectre de réponse de RPOA, pour les ponts, et fournir un complément d'outils garantissant une meilleure sécurité, tout en introduisant la performance nécessaire dans la réponse structurelle.

Une étude statistique pour avoir le spectre moyen a été réalisé sur ensemble de 25 séismes qu'on a présenté dans cette étude.

Mots clés : coefficient de réduction , spectre de réponse , RPOA .

Abstract

In the present work a coefficient of amortization reduction is processed by literature searches, and a small contribution to make in the Algerian seismic context.

The main purpose of this thesis is the estimation of depreciation reduced coefficient under construction RPOA response spectrum, for bridges, and provides additional tools to ensure better security while introducing the performance needed in the structural response.

A statistical study for the average spectrum was performed on all 25 earthquakes that presented in this study.

Keywords: reduction coefficient, response spectrum, RPOA.

Chapitre 1

Introduction Générale

A l'instar de beaucoup d'autre pays, l'Algérie du nord est une région à haut risque sismique. A cet effet, on rappelle les deux grands séismes mangeurs qui ont frappé la région d'El-Asnam le 10 octobre 1980, d'une magnitude de 7.3 et celle de Boumerdes le 21 mai 2003, d'une magnitude de 6.8. Cependant, l'estimation correcte des actions sismiques auxquelles les structures peuvent être soumises est une donnée essentielle dans tous les cas de projet de construction parasismique, d'évaluation de la vulnérabilité des ouvrages existants ou de définition de plans urbains d'exposition aux risques. L'expérience a montré que dans une zone donnée, les mouvements en des points distincts peuvent être extrêmement différents en terme d'amplitude, de durée et de contenu fréquentiel. Les signaux sont influencés par la distance épacentrale, par l'orientation par rapport au plan de rupture et par le chemin suivi par les ondes. Cependant, les éléments géométriques liés à la source ne sont pas suffisants pour expliquer les observations. Il est maintenant reconnu que les effets de conditions locales de site peuvent avoir une influence très forte sur les mouvements sismiques. Par définition, les effets de sites sont des phénomènes vibratoires spécifiques qui se développent en présence de formation géologique de caractéristiques mécaniques différentes. Le résultat direct de ce phénomène est l'amplification des mouvements sismiques.

Le spectre de réponse représente un élément très important dans l'évaluation des demandes sismiques et d'effectuer des investigations post-sismiques. Dans la conception et l'évaluation des demandes sismiques des structures, les spectres des réponses à amortissement élevé sont très utiles et pourrait avoir plusieurs applications importantes. Ces spectres ont déjà été utilisés pour la conception des structures isolées à la base par (Naeim et Kelly, 1999), et ou la dissipation de l'énergie (Constantinou et al, 1998). Autres applications se réfèrent à toutes ces conception / méthodes d'évaluation fondées sur le concept de structure de substitut (Gulkan et Sozen 1974; Shibata et Sozen 1976), dans lequel le comportement inélastique de la structure est décrite par un seul degré de liberté équivalent (SDOF) Système élastique, caractérisé par une rigidité réduite et une augmentation de l'amortissement visqueux.

Dans le présent travail un coefficient de réduction d'amortissement est traité par des recherches bibliographiques, et une petite contribution de le formuler dans un contexte sismique Algérien.

Chapitre 2

Spectre de réponse : Notions théoriques – Domaine d'application

2.1 Introduction

Lors d'une excitation sismique, la structure subit des déformations en phase post-élastique qui ont pour effet de diminuer les forces agissant sur la structure. Ces déformations interviennent de ce fait comme des limiteurs d'efforts. Les forces d'inertie qui apparaissent du fait des actions sismiques dans un élément structural résultent des actions transmises par les liaisons de cet élément avec les autres éléments de la structure. Les déformations correspondant à ces forces peuvent atteindre un niveau inacceptable pour lequel la ruine par instabilité de forme ou plastique est inévitable. Les analyses non linéaires peuvent se révéler particulièrement utiles lors de la réévaluation sismique d'un bâtiment. Ainsi, leur utilisation est envisagée dans les guides de génie sismique. En effet, ils permettent de mieux appréhender le comportement à la ruine de la structure en simulant la succession des phénomènes caractérisant la ruine de chaque élément de la structure. Dans le cas des structures irrégulières (en élévation, en plan,...), ou ayant des éléments de structure avec des rigidités et/ou des résistances peu homogènes, les limites des analyses linéaires sont rapidement atteintes. Il faut alors, avoir recours à des analyses non linéaires pour pouvoir estimer plus correctement les niveaux de séisme correspondant à la ruine de la structure, les éléments critiques et le mode de ruine le plus probable.

Des notions théoriques sur la réponse sismique des systèmes élastiques sont présentées dans cette partie. Ce chapitre vise essentiellement la définition du spectre de réponse élastique. Il a pour objectif d'exposer de manière simplifiée la formulation du spectre de réponse et les paramètres qui l'influent.

2.2 Réponse sismique des systèmes élastiques

Les demandes en forces sur chaque composante de la structure sont obtenues et comparées aux capacités à l'aide d'une analyse élastique linéaire statique ou dynamique. Ces méthodes supposent que les structures répondent élastiquement aux tremblements de terre. Plusieurs codes parasismiques ont recommandé des analyses statiques linéaires pour les ouvrages réguliers et moyennement réguliers. Le calcul statique a pour but de se substituer au calcul dynamique plus compliqué en s'intéressant à produire des effets identiques. Le calcul statique peut être considéré comme dérivant de l'analyse modale par les simplifications suivantes: Le mode fondamental seul est pris en compte.

L'étude dynamique linéaire élastique (réponse spectrale) fournit une réponse élastique donnant soit le déplacement relatif maximum de l'oscillateur permettant de calculer les contraintes dans la structure, soit la vitesse relative maximale de l'oscillateur permettant de déterminer l'énergie élastique disponible dans la structure, soit l'accélération absolue maximale du sol permettant de définir la force sismique développée, sans pour autant indiquer l'instant où s'est produit cet événement.

Dans une analyse linéaire, le comportement élastique d'une structure est schématisé par le modèle élastique linéaire montré sur la figure 2.1. Il est traduit par la relation suivante :

$$f = k_e x \quad (2.1)$$

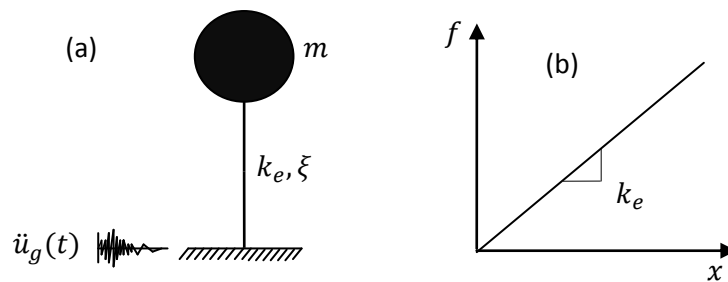


Figure. 2.1. (a) Système élastique à un degré de liberté et (b) relation force – déplacement.

Où

k_e Rigidité élastique.

ξ Taux d'amortissement.

m Masse.

L'équation différentielle du mouvement s'écrit comme suit :

$$\ddot{x}(t) + 2\xi\omega\dot{x}(t) + \omega^2x(t) = -\ddot{x}_g(t) \quad (2.2)$$

Il est clair que pour une valeur de $\ddot{x}_g(t)$, la réponse en déformation $x(t)$ du système dépend uniquement de la pulsation propre ω ou la période de vibration T du système et son taux d'amortissement ξ . Donc la fonction du déplacement spectral peut être écrite de la façon suivante : $x \equiv x(t, T, \xi)$.

2.2.1 Notion de spectre de réponse élastique

L'approche commune dans le dimensionnement parasismique courant est de caractériser les effets sismiques par des spectres de réponse, c'est à dire à définir le chargement sismique par une représentation non plus dans le domaine du temps (accélérogramme), mais dans le domaine des fréquences. Depuis son introduction par Housner dans les années cinquante (1959), le spectre de réponse est devenu un outil indispensable pour le dimensionnement parasismique. Il a été ensuite adapté pour l'analyse et le dimensionnement structurel non-linéaire. Il a été par ailleurs, reconnu que le comportement inélastique structurel réduit la demande de résistance d'une structure par rapport à ce qu'elle devrait être si le comportement était purement élastique. Ceci est pris en considération dans les règlements en introduisant un coefficient réducteur de force dépendant du niveau de ductilité de la réponse. Actuellement, le spectre de réponse forme la base dans le processus d'évaluation des forces sismiques dans la majorité des codes parasismiques.

Il existe différentes approches pour le calcul de ce spectre en fonction de la modélisation de ces caractéristiques et la nature de l'exploitation des résultats. Les spectres de réponse sont généralement divisés en deux catégories (élastique et inélastique), et c'est cette dernière catégorie qui est généralement adoptée par les codes parasismiques. Le spectre de réponse élastique reste indispensable même pour un dimensionnement inélastique où un système élastiquement équivalent à un degré de liberté peut être utilisé pour modéliser la réponse structurelle inélastique non-linéaire d'un système à plusieurs degrés de liberté.

Les spectres de réponse sont utilisés dans le contexte du dimensionnement en force, ou en déplacement dans le contexte de la conception en performance qui est en train de s'implanter progressivement dans les codes actuels.

Dans une zone géographique donnée où un accélérogramme $\ddot{x}_g(t)$ est connu représentatif des mouvements sismiques à la base de la structure étudiée, on peut faciliter les calculs des ingénieurs en considérant et en résolvant une fois pour toute l'ensemble des cas des divers oscillateurs simples possibles. A cette fin, on effectue n fois l'opération suivante.

On considère un oscillateur caractérisé par une période T . En résolvant l'équation (2.2), on établit une analyse dynamique élastique. L'amplitude du déplacement x de la masse par rapport à la base est influencée par l'amortissement du système ; on attribue à ce dernier pour la plupart des applications une valeur standard égale à 5% de l'amortissement critique.

On retient la valeur maximale en valeur absolue de $x(t)$ sur la durée du tremblement de terre, et en l'on l'associe à la période, Soit $x(T) = \max x(t)$. On reporte $x(T)$ sur un diagramme $(x(T), T)$.

En faisant varier les paramètres définissant le système à 1DDL de référence (masses m , rigidités k , qui correspondent à d'autres périodes fondamentales $T = T_1, T_2, \dots$), on établit un ensemble de paires de valeurs $[T_i, x(T_i)]$.

L'ensemble des points $[T_i, x(T_i)]$ constitue ce qu'on appelle le spectre de réponse élastique en déplacement correspondant à un accélérogramme de la zone étudiée, pour un amortissement ξ défini.

Plusieurs spectres de réponse peuvent être définis selon la qualité voulue de réponse. On considère les réponses maximales suivantes :

$$\begin{aligned} x_0(T, \xi) &\equiv \max |x(t, T, \xi)| \\ \dot{x}_0(T, \xi) &\equiv \max |\dot{x}(t, T, \xi)| \\ \ddot{x}_0(T, \xi) &\equiv \max |\ddot{x}(t, T, \xi)| \end{aligned} \quad (2.3)$$

Le spectre de réponse en déplacement est tracé pour x_0 en fonction de T pour une valeur fixée de ξ . La même représentation de \dot{x}_0 est le spectre de réponse en pseudo-vitesses relatives, et \ddot{x}_0 est le spectre de réponse en pseudo-accélération.

➤ Spectre de réponse en pseudo-vitesse

On considère une quantité de la vitesse V pour un système à 1DDL avec une pulsation propre ω liée à son déplacement maximum $D \equiv x_0$ due à un mouvement sismique :

$$V = \omega D = \frac{2\pi}{T_n} D \quad (2.4)$$

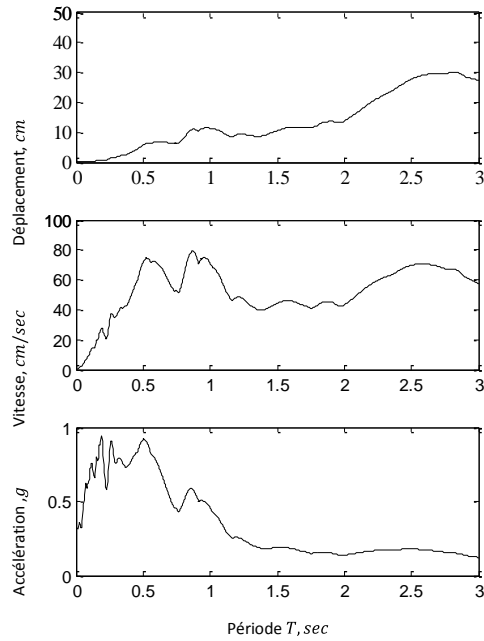


Figure. 2.2 Spectre de réponse ($\xi = 5\%$) pour le séisme d' El Centro 1940 (N/S) : (a) spectre de réponse en déplacement, (b) spectre de réponse en pseudo-vitesse et (c) spectre de réponse en pseudo-accélération.

➤ Spectre de réponse en pseudo-accélération

Considérons une quantité A d'un système à 1DDL avec ω la fréquence naturelle liée à sa déformation maximale $D \equiv x_0$ due à un mouvement sismique:

$$A = \omega^2 D = \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 D \quad (2.5)$$

La quantité A a l'unité d'une accélération, et elle est liée à la valeur maximale de V_{b0} effort tranchant à la base ou à la valeur maximale de la force statique équivalente f_{S0} .

$$V_{b0} = f_{S0} = m A \quad (2.6)$$

2.2.2 Construction du spectre de réponse

On considère une force $p(t)$ de forme quelconque, il s'agit d'une force périodique engendrée par une machine (Fig2.4), ou, d'une impulsion due à un choc.

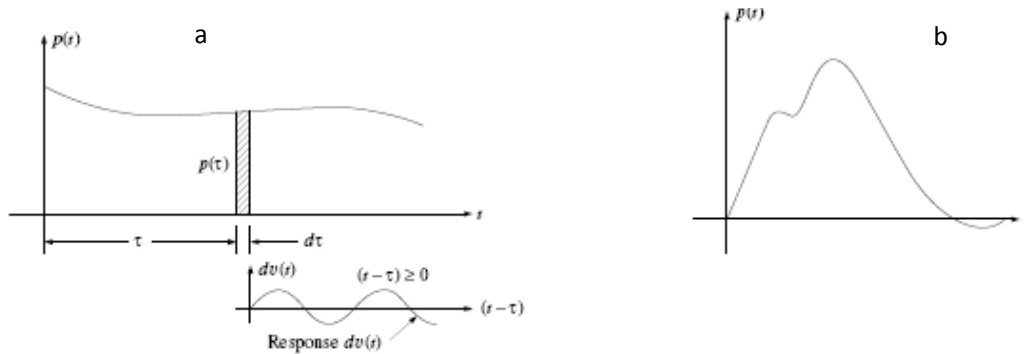


Fig. 2.3. a/ Force périodique, b/ impulsion

L'équation différentielle du mouvement s'écrit comme suit :

$$\ddot{u} + 2\xi\omega \dot{u} + \omega^2 u = \frac{p(t)}{m} \quad (2.7)$$

- **Oscillateur non amorti**

$$\ddot{u} + \omega^2 u = \frac{p(t)}{m} \quad (2.8)$$

La solution de l'équation du mouvement (2.8) est fournie par l'intégrale de Duhamel

$$u_p(t) = \frac{1}{m\omega} \int_0^t p(\tau) \sin \omega(t - \tau) d\tau \quad (2.9)$$

- **Oscillateur amorti**

$$\ddot{u} + 2\xi\omega \dot{u} + \omega^2 u = \frac{p(t)}{m} \quad (2.10)$$

Dans le cas d'un oscillateur amorti, l'intégrale de Duhamel prend la forme suivante.

$$u_p(t) = \frac{1}{m\omega_D} \int_0^t p(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin \omega_D(t - \tau) d\tau \quad (2.11)$$

Pendant le temps d'application de la force p(t) la masse est soumise à des oscillations forcées, auxquelles succèdent des oscillations libres amortis.

2.2.3 Spectre de réponse de conception

Des incertitudes affectent la connaissance de l'accélérogramme qui sera mesuré à un endroit donné lors du prochain tremblement de terre. Le "spectre de réponse en accélération" établi comme indiqué précédemment correspond à un seul accélérogramme et ne peut pas bien représenter la sismicité du site.

On couvre les incertitudes quant aux prochains séismes en établissant plusieurs spectres de réponse qui correspondent à plusieurs accélérogrammes et en retenant comme spectre pour le code parasismique une "moyenne" de tous ces spectres voir figure 2.4.

Le spectre "moyen" résulte d'une approche statistique, associée à un "jugement d'ingénieur" et au souci d'un confort d'utilisation du spectre normatif, de sorte que la forme du spectre de réponse de projet $A_S(T)$ est plus représentative que celle de chaque spectre de réponse.

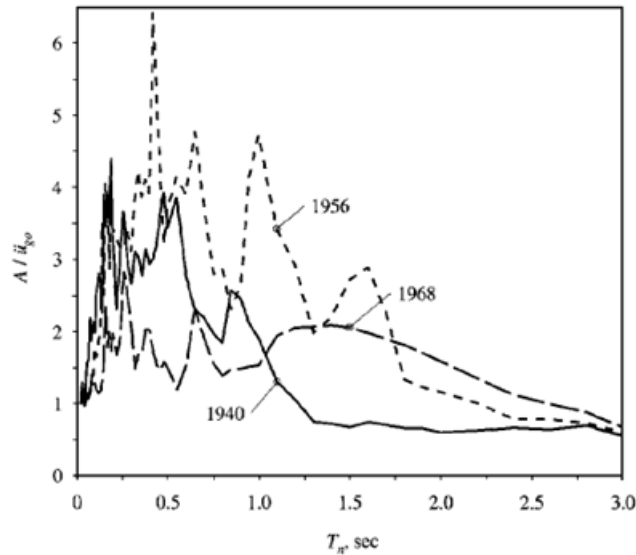


Figure. 2.4 Spectre de réponse pour des séismes enregistrés à Imperial Valley Irrigation District substation, El Centro (N/S), California, pendant le séisme de 18 Mai 1940, 09 Février 1956 et 8 Avril 1968, $\xi = 2\%$, (source, Chopra 2001).

2.3 Evaluation numérique de la réponse dynamique ‘Méthode de Newmark’

Lorsque $\tau = \Delta t$, nous obtenons la méthode de Newmark, et pour l'équation du mouvement à l'instant t et $t + \Delta t$, on obtient les quantités incrémentales suivantes :

$$\Delta u_t \equiv u_{t+\Delta t} - u_t \quad (2.12)$$

$$\Delta \dot{u}_t \equiv \dot{u}_{t+\Delta t} - \dot{u}_t \quad (2.13)$$

$$\Delta \ddot{u}_t \equiv \ddot{u}_{t+\Delta t} - \ddot{u}_t \quad (2.14)$$

$$\Delta p_t \equiv p_{t+\Delta t} - p_t \quad (2.15)$$

Pendant que les quantités incrémentales ne sont pas nécessaires pour l'analyse des systèmes linéaires, elles sont introduites, car elles fournissent une extension pratique pour les systèmes non linéaires. Les équations (2.12) et (2.13) peuvent être écrites comme suit :

$$\Delta \dot{u}_t = \Delta t \ddot{u}_t + (\gamma \Delta t) \Delta \ddot{u}_t \quad (2.16)$$

$$\Delta u_t = \Delta t \dot{u}_t + \frac{\Delta t^2}{2} \ddot{u}_t + \beta \Delta t^2 \Delta \ddot{u}_t \quad (2.17)$$

Ces équations peuvent être résolues pour

$$\Delta \ddot{u}_t = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_t - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_t - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_t \quad (2.18)$$

En substituant l'équation 2.18 dans l'équation 2.16, donne

$$\Delta \dot{u}_t = \frac{\gamma}{\beta \Delta t^2} \Delta u_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta}\right) \ddot{u}_t \quad (2.19)$$

Ensuite, les équations 2.17, 2.18 et 2.19 sont substitués dans l'équation incrémentale du mouvement :

$$m \Delta \ddot{u}_t + c \Delta \dot{u}_t + k \Delta u_t = \Delta p_t \quad (2.20)$$

En substituant les équations *** dans l'équation incrémentale du mouvement, on obtient :

$$\hat{k} \Delta u_t = \Delta \hat{p}_t \quad (2.21)$$

Où

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m \quad (2.22)$$

Et

$$\Delta \hat{p}_t = \Delta p_t + \left(\frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c\right) \dot{u}_t + \left[\frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1\right) c\right] \ddot{u}_t \quad (2.23)$$

La méthode de Newmark est inconditionnellement stable si :

$$\gamma \geq \frac{1}{2} ; \beta \geq \frac{1}{2} \left(\gamma + \frac{1}{2}\right)^2 \quad (2.24)$$

Méthode d'accélération moyenne $\left(\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{4}\right)$

Méthode d'accélération linéaire $\left(\gamma = \frac{1}{2}, \beta = \frac{1}{6}\right)$

Calcul initial

$$\ddot{u}_0 = \frac{p_0 - c\dot{u}_0 - k u_0}{m}$$

Sélectionner Δt

$$\hat{k} = k + \frac{\gamma}{\beta \Delta t} c + \frac{1}{\beta \Delta t^2} m$$

$$a = \frac{1}{\beta \Delta t} m + \frac{\gamma}{\beta} c$$

$$b = \frac{1}{2\beta} m + \Delta t \left(\frac{\gamma}{2\beta} - 1 \right) c$$

2.0 Calcul pour chaque i

$$\Delta \hat{p}_t = \Delta p_t + a \dot{u}_t + b \ddot{u}_t$$

$$\Delta u_t = \frac{\Delta \hat{p}_t}{\hat{k}}$$

$$\Delta \dot{u}_t = \frac{\gamma}{\beta \Delta t^2} \Delta u_t - \frac{\gamma}{\beta} \dot{u}_t + \Delta t \left(1 - \frac{\gamma}{2\beta} \right) \ddot{u}_t$$

$$\Delta \ddot{u}_t = \frac{1}{\beta \Delta t^2} \Delta u_t - \frac{1}{\beta \Delta t} \dot{u}_t - \frac{1}{2\beta} \ddot{u}_t$$

$$\Delta u_t \equiv u_{t+\Delta t} - u_t$$

$$\Delta \dot{u}_t \equiv \dot{u}_{t+\Delta t} - \dot{u}_t$$

$$\Delta \ddot{u}_t \equiv \ddot{u}_{t+\Delta t} - \ddot{u}_t$$

3.0 Répéter pour $t + \Delta t$.

Chapitre 3

Coefficients de réduction d'amortissement

1. Introduction

Dans le chapitre précédent, on a vu quelques notions de base sur les spectres de réponses, puis, les différentes formulations analytiques et numériques développées pour leurs constructions, sans oublier aussi leurs applications dans l'évaluation des demandes sismiques des ouvrages.

Maintenant, il nous semble très important d'éclairer une autre problématique qui est le souci actuel des chercheurs en génie parasismique. Il s'agit du coefficient de réduction d'amortissement. Plusieurs chercheurs ont tenté de valider expérimentalement et théoriquement ce coefficient et de cerner les paramètres qui le conditionnent.

2. Revue de littérature des coefficients de réduction d'amortissement

Les facteurs de réduction d'amortissement ont été introduits pour obtenir une estimation approximative de spectres de réponse élastique d'amortissement élevée à partir celui de 5% d'amortissement, en utilisant les équations suivantes:

$$S_d(T, \xi) = \eta S_d(T, 5\%) \quad (1)$$

$$PS_a(T, \xi) = \eta PS_a(T, 5\%) \quad (2)$$

Où

$S_d(T, 5\%)$ et $PS_a(T, 5\%)$ sont les spectres de réponses élastique de 5% d'amortissement en déplacement et en pseudo-accélération respectivement. $S_d(T, \xi)$ et $PS_a(T, \xi)$ sont les quantités correspondant à un amortissement ξ supérieure à 5%. T est la période naturelle du système à un degré de liberté 1DDL. Le même coefficient de réduction η est utilisé pour les spectres en déplacements et en pseudo-accélération, car ils sont mutuellement liés par la relation $PS_a(T, \xi) = \omega^2 S_d(T, \xi)$, $\omega = 2\pi/T$ représente la pulsation propre de vibration du système à 1DDL.

- **Newmark et Hall (1973)** UBC (1997) Uniform Building Code

Plusieurs formulations de facteurs de réduction d'amortissement ont été développées et disponibles. ce coefficient a été traité pour la première fois par [Newmark et Hall \(1973\)](#), par exemple, il est composé de trois relations:

$$\eta = \begin{cases} 1.514 - 0.321 \ln(\xi) & \text{for } 0 < T < 1s \\ 1.400 - 0.248 \ln(\xi) & \text{for } 1 < T < 3s \\ 1.309 - 0.194 \ln(\xi) & \text{for } 3 < T < 10s \end{cases} \quad (3)$$

Ces relations sont spécifiques pour la région sensible aux déplacement, aux vitesses et aux accélérations, respectivement. Elles ont été obtenues à partir des études statistiques des réponses des systèmes à 1DDL avec des taux d'amortissement inférieur à 20%.

Dans l'ATC-40 et FEMA-273, la procédure approximative de [Newmark et Hall \(1973\)](#) a été simplifiée en négligeant la relation dans la région sensible aux déplacements du spectre. Dans la FEMA-273, en outre, les valeurs les plus conservateurs sont adoptées pour des rapports égaux ou supérieurs à 30% d'amortissement. Dans l'UBC-97 et IBC 2000, les relations de Newmark-Hall sont réduites à une seule valeur de réduction d'amortissement, correspondant à celle adoptée par la FEMA-273 dans la région sensible aux vitesses.

- **Ashour (1987)**: Elastic seismic response of buildings with supplemental damping .

Le facteur de réduction d'amortissement proposé par [Ashour \(1987\)](#) peut être exprimé par :

$$\eta = \sqrt{\frac{0.05(1-e^{-\alpha\xi})}{\xi(1-e^{-0.05\alpha})}} \quad (4)$$

Où α est un coefficient varie de 18 à 65, en fonction des caractéristiques du tremblement de terre.

- **Wu et Hanson (1989)** :Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios.

Les études de [Wu et Hanson \(1989\)](#) ont donné lieu à l'expression suivante:

$$\eta = \frac{\lambda(\xi, T)}{\lambda(\xi=5\%, T)} \quad (5)$$

Tels que :

$$\begin{aligned} \lambda &= -0.349 \ln(0.095 \xi) & \text{for } T = 0.1s \\ \lambda &= -0.547 \ln(0.417 \xi) & \text{for } T = 0.5s \\ \lambda &= -0.471 \ln(0.524 \xi) & \text{for } 0.5 < T < 3s \\ \lambda &= -0.478 \ln(0.475 \xi) & \text{for } T = 3s \\ \lambda &= -0.291 \ln(0.0473 \xi) & \text{for } T = 10s \end{aligned} \quad (6)$$

- **Ramirez et al. (2002)** IUSS Press, Pavia (Italy).

Ramirez et al. (2002) ont fait des études qui donnent des valeurs numériques du facteur de réduction d'amortissement entre ceux suggérés par [Ashour \(1987\)](#) et [Wu et Hanson \(1989\)](#), pour $T = 0,1s$ (voir. Eq 6).

- **Lin et Chang (2003)** Earthq Spectra 18(3):531–547.

Récemment, Lin et Chang ont développé une expression du facteur de réduction d'amortissement dépendant de la période, en se basant sur l'évaluation de la réponse en déplacement des systèmes élastiques à 1DDL pour un taux rapport d'amortissement entre 2 et 50% et la période de vibration varie de 0,01 à 10s. mille (1000) enregistrements sismiques ont été utilisés pour effectuer cette étude, avec des magnitudes entre (5,5 - 7,5) et la distance épacentrale entre (0,1 et 180 km). La formule proposée par [Lin et Chang \(2003\)](#) peut être écrite comme:

$$\eta = 1 - \frac{\alpha T^{0.30}}{(T+1)^{0.65}} \quad (7)$$

Où

$$\alpha = 1.303 + 0.436 \ln(\xi) \quad (8)$$

Tous les facteurs de réduction d'amortissement présentés au dessus, dépendent de la période de vibration de la structure et leur taux d'amortissement.

En Europe, les études qui ont été faites par plusieurs chercheurs mènent à la même équation qui est indépendant de la période de vibration de la structure.

- **Bommer et al. (2000)** J Earthquake Eng 3:107–125 doi:[10.1142/ S1363246999000065](https://doi.org/10.1142/S1363246999000065)

Le facteur de réduction d'amortissement développé par [Bommer et al. \(2000\)](#) peut être exprimé par l'équation suivante :

$$\eta = \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \quad (9)$$

- **Eurocode 8**

Cette formulation a été adoptée dans le code sismique européen ([EC8 2004](#)), en remplacement l'équation adoptée dans la version précédente du même code ([Eurocode 8, 1994](#)):

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \quad (10)$$

- **Tolis et Faccioli (1999)**

Une autre variante des expressions précédentes a été proposée par [Tolis et Faccioli \(1999\)](#), basée sur la construction des spectres de réponse en déplacement à partir des enregistrements sismiques du Kobe 1995:

$$\eta = \sqrt{\frac{15}{10+\xi}} \quad (11)$$

- **(OPCM 2003, DM 2008)**

Dans les codes sismiques italiens récents (OPCM 2003, DM 2008), la même formulation que celle de l'EC8 (2004) a été adoptée, tandis que une équation différente a été recommandé dans le guide italien de la conception, la construction et les tests des structures isolées à la base (SSN 1998)

$$\eta = \sqrt[3]{\frac{7}{2+\xi}} \quad (12)$$

- **(Priestley, 2003)**

Récemment, Priestley a développé une version modifiée de la formule de l'EC8, pour tenir compte des effets des champs proches (Priestley, 2003):

$$\eta = \sqrt[4]{\frac{10}{5+\xi}} \quad (13)$$

- **Kawashima et Aizawa (1986)**

Il convient de mentionner également l'expression proposée par Kawashima et Aizawa (1986):

$$\eta = \left(\frac{1.5}{0.4 \xi + 1} \right) 0.5 \quad (14)$$

- **Guides chinois et japonais**

Parmi les autres codes sismiques, les guides chinois et japonais pour la conception parasismique des structures isolées à la base utilisent d'autres formulations du facteur de réduction d'amortissement, car elles fournissent des facteurs de réduction considérablement plus faibles que dans toutes les autres formulations. Les expressions suggérées par les guides Chinois (Zhou et al 2003) et les Japonais (JPN 2001) sont, respectivement:

$$\eta = 1 + \frac{0.05-\xi}{0.06+1.4 \xi} \quad (15)$$

$$\eta = \frac{1.5}{1+10 \xi} \quad (16)$$

- **RPOA 2008**

La formule décrite dans le RPOA 2008 est la même que de l'EC8, dans ce règlement le facteur de réduction d'amortissement s'écrit comme suit :

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \quad (17)$$

3. Conclusion

La difficulté de la détermination du coefficient de réduction d'amortissement et la complexité de la relation implicite existant entre ce coefficient et les autres paramètres peut expliquer les déférences de le déterminer d'un auteur à un autre. Autres chercheurs comptent sur des résultats expérimentaux (coefficient de réduction d'amortissement expérimental). qui ont déterminé d'après des analyses statistiques que ce coefficient dépend de la période propre de la structure et le taux d'amortissement, et sont suffisantes pour appréhender la valeur du coefficient de réduction d'amortissement, mais les autres paramètres (d'après ces chercheurs) n'ont pas un effet très significatif.

Chapitre 4

Evaluation de Coefficients de réduction d'amortissement

1. Introduction

Suite aux notions théoriques décrites dans les chapitres précédents, nous allons effectuer une analyse statistique des relations permettant d'évaluer le coefficient de réduction d'amortissement. Cette analyse statistique concernera la construction des spectres de réponses pour un contexte sismique Algérien.

2. Paramètres du mouvement sismique

Dans les conditions réelles, les mouvements sismiques (accélération, vitesse et déplacement) sont des mouvements qui se propagent au hasard dans les trois directions de l'espace. Toutefois, lorsque les appuis de l'ouvrage reposent sur des sols de nature très différente ou lorsque l'ouvrage franchit une faille active, les mouvements peuvent être importants.

Plutôt que de définir le mouvement du sol proprement dit, les règlements définissent l'effet de ces mouvements sur des structures élémentaires que sont des oscillateurs simples. Les mouvements du sol excitant la base d'un ouvrage courant assimilé à un oscillateur simple sont plus ou moins amplifiés dans la structure selon que la fréquence propre d'oscillation de celle-ci est proche ou non des fréquences prédominantes du mouvement sismique. Il s'agit du phénomène bien connu de résonance d'un oscillateur.

Les fréquences prédominantes du séisme dépendent étroitement de la nature du sol sur lequel repose l'ouvrage. En simplifiant, on peut dire que les couches superficielles du sol fonctionnent comme un oscillateur excité à sa base par les déplacements du rocher sous jacent: si le sol superficiel possède des caractéristiques mécaniques faibles, ou s'il est de grande épaisseur, il amplifiera les basses fréquences, tandis que si ses caractéristiques mécaniques sont élevées ou si le rocher est un affleurement, le signal sismique comportera plutôt les hautes fréquences.

On supposera que le séisme peut se produire à la verticale du bâtiment et que l'action sismique est constituée par un mouvement d'ensemble qui affecte « la fondation » de la

construction ; autrement dit, que le terrain se meut comme un bloc sous la structure. On entend ici par « fondation » l'ensemble des points d'appuis supposés rigidement liés les uns aux autres.

Pour un lieu donné, les caractéristiques du mouvement sismique sont influencées par de nombreux facteurs tels que :

- Magnitude du séisme.
- Profondeur du foyer.
- Mécanisme et direction de propagation des ondes sismiques.
- Propriétés physiques et configuration des différentes couches traversées par les ondes sismiques.

La prise en compte des effets observés en termes d'intensité macrosismique est insuffisante pour les besoins du génie parasismique. Il convient de rappeler que cette grandeur constitue seulement une mesure subjective des effets destructeurs d'un séisme. Il est donc essentiel de rattacher cette donnée descriptive à un paramètre physique.

Les mesures effectuées lors des séismes forts montrent que les paramètres du mouvement ont les ordres de grandeur suivants :

- Durée : 5 à 10s.
- Accélération : 0.10 à 1.00g ($g = 9.81 \text{ m/s}^2$).
- Vitesse : 5 à 50 cm/s.
- Déplacement : 5 à 50 cm.

Les valeurs des accélérations, des vitesses et des déplacements du sol varient considérablement au cours des séismes. Des ondes de haute fréquence ($f > 10 \text{ Hz}$) tendent à avoir une grande amplitude d'accélération mais de petites amplitudes de déplacements par rapport aux ondes à basses fréquences, qui ont de petites accélérations mais des vitesses ou des déplacements relativement forts.

3. Excitation sismique

L'Algérie est classée parmi les pays à haut risque sismique surtout la région du nord qui a subi des récents séismes (citons par exemple : Chlef : 1300 morts (1954), 3000 morts (1980), Chenoua : 100 morts (1989) ; Mascara : 180 morts (1994)).

La dernière catastrophe qu'a vécue l'Algérie est celle du séisme du 21 mai 2003 qui était violent et qui avait ravagé la région d'Alger, particulièrement la ville de Boumerdès et les

localités environnantes (Zemmouri, Théniaetc.) (Figure 6.1), le bilan était lourd, 2300 morts et 130000 sans abris. Il faut plusieurs années avant que les villes et les villages touchés puissent retrouver leurs paysages d'avant séisme. Voir figure (1).

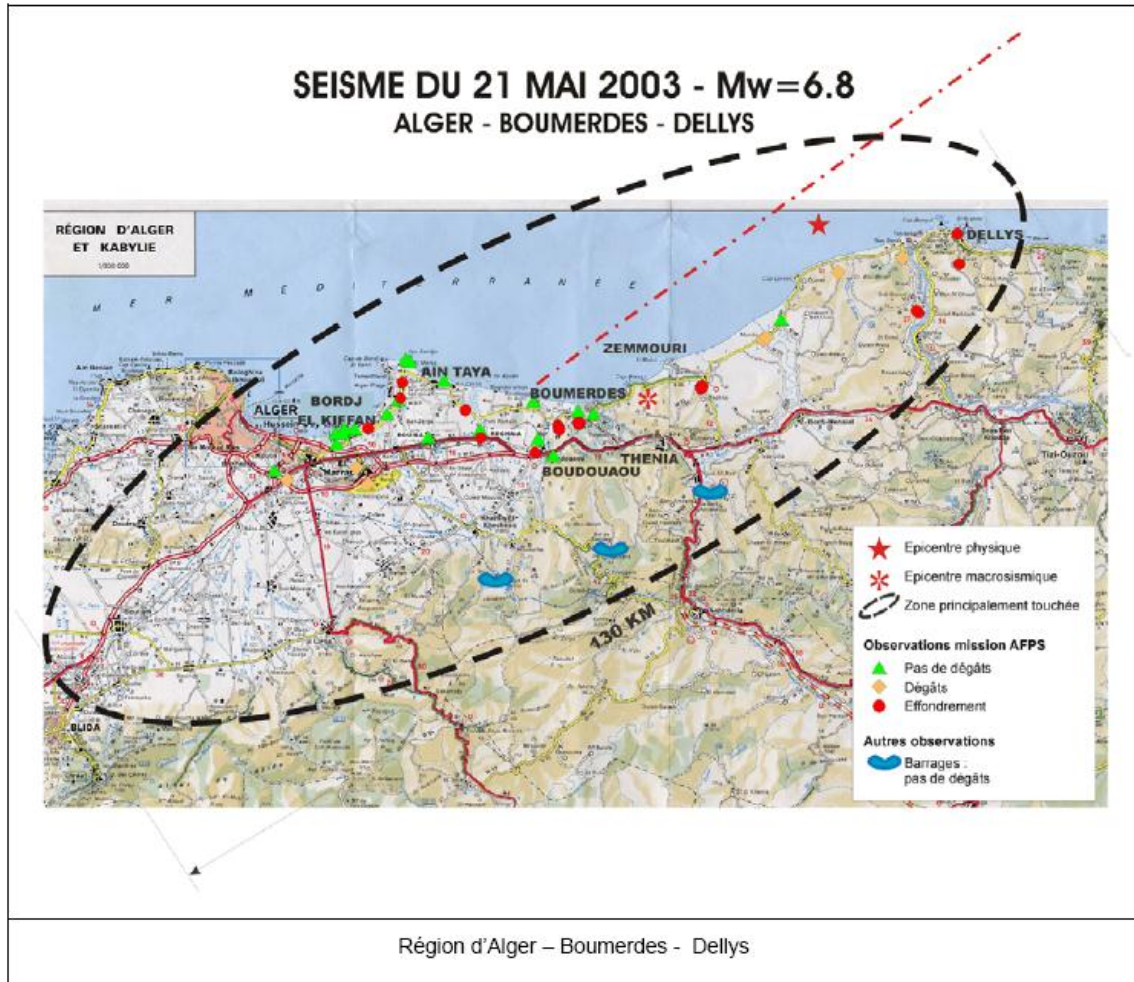


Figure 1. Epicentre du séisme de Boumerdès 2003 (Source : AFPS).

Le tableau (1) illustre les enregistrements de ce séisme dans les différentes stations.

Accélérogrammes	PGA (g)
Afrou_EW	0.16
Afrou_NS	0.092
Defla_EW	0.033
Defla_NS	0.024
Azazga_EW	0.12
Azazga_NS	0.087
Blida_EW	0.047
Blida_NS	0.039
Boumer_EW	0.402

Boumer_NS	0.295
Darbida_EW	0.547
Darbida_NS	0.51
Righa_EW	0.107
Righa_NS	0.074
Hdey_EW	0.274
Hdey_NS	0.236
Kedara_EW	0.337
Kedara_NS	0.265
kedar2_EW	0.588
Kedar2_NS	0.351
Meliana_EW	0.031
Meliana_NS	0.026
Tizi_EW	0.198
Tizi_NS	0.195

Tableau 1 Caractéristiques des enregistrements pour le séisme de Boumerdès 2003.

4. Construction des spectres

Lorsqu'il s'agit de déterminer le spectre de réponse associé aux ensembles des séismes présentés dans la partie précédente à prendre en compte pour le calcul de coefficient de la réduction d'amortissement qui doivent être caractérisées par les paramètres T et ξ , on ne peut alors utiliser un seul accélérogramme, même si par chance il a été enregistré au voisinage du site. Il convient donc de déterminer un spectre moyen qui sera la moyenne des spectres correspondant à l'ensemble d'accélérogrammes présentés pour cette étude. L'idéal serait de pouvoir choisir dans un catalogue de séismes enregistrés, ceux qui correspondent aux conditions de la magnitude et la distance épacentrale.

Les accélérogrammes utilisés résultent des séismes d'importances différentes et les spectres de réponse que l'on déduit ne sont pas directement comparables. Les spectres ainsi obtenus sont alors appelés spectres normalisés par l'accélération maximale d'ensemble. De ce traitement des accélérogrammes, découle un intérêt pratique évident muni du spectre de réponse.

La moyenne du spectre de réponse est réalisée en effectuant les étapes suivantes :

1. Sélectionner un intervalle des périodes T et un coefficient d'amortissement. Dans ce travail nous retiendrons des périodes allant de 0,02 à 3 secondes et deux valeurs pour ξ : {0.05 et 0.1}.
2. Construire le spectre de réponse en fonction de T et ξ .

3. Calculer le spectre normalisé moyen à partir de tous les séismes pour chaque valeur de T .

Les spectres moyens normalisés calculés pour tous les séismes des quatre ensembles sont présentés dans les figures de 2 et 3.

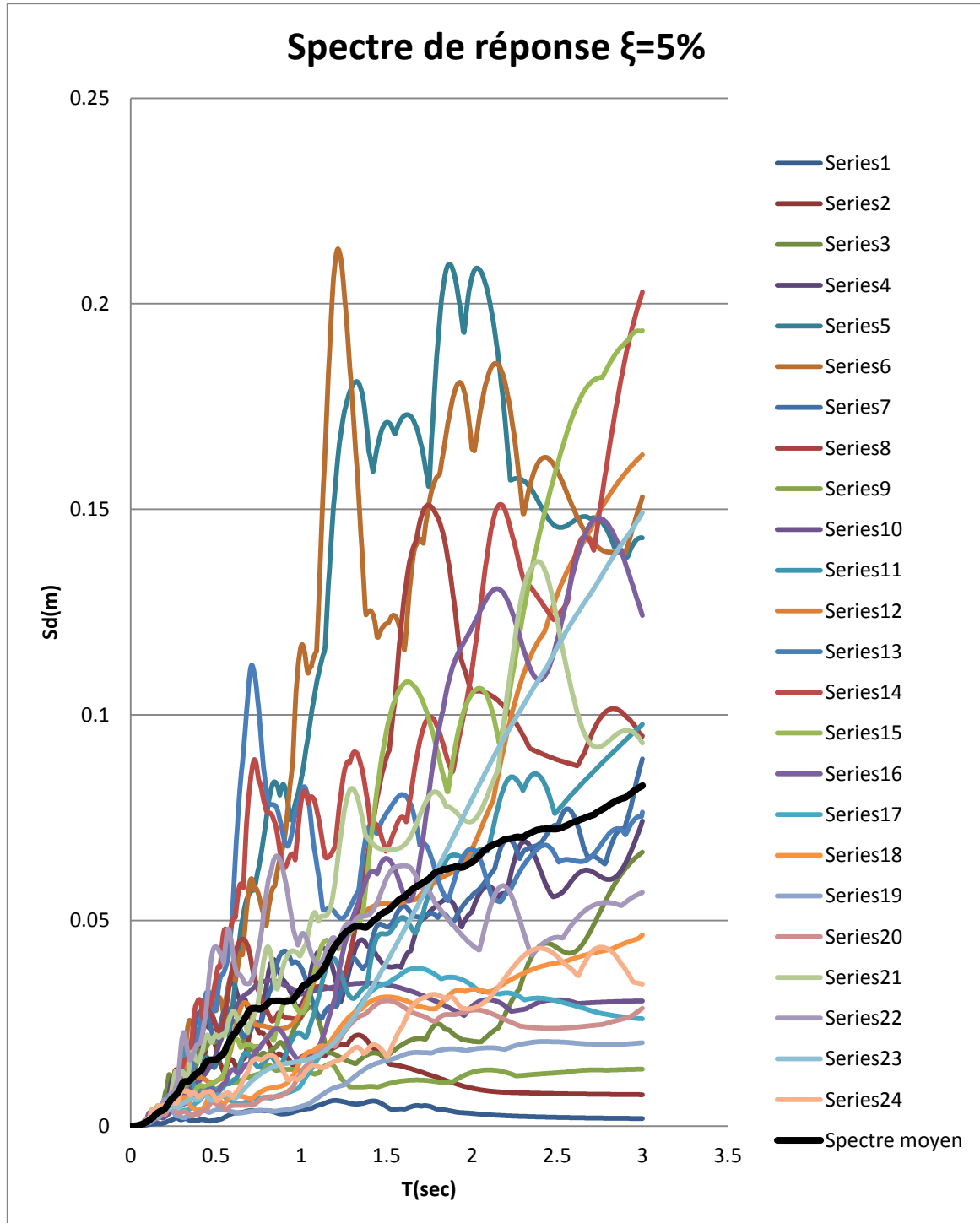


Figure 2. Spectres de réponse pour les accélérogrammes sélectionnés et le spectre moyen en noir.

La légende :

Accélérogrammes	Series
Afrou_EW	Series1
Afrou_NS	Series2
Defla_EW	Series 3
Defla_NS	Series 4
Azazga_EW	Series 5
Azazga_NS	Series 6
Blida_EW	Series8
Blida_NS	Series9
Boumer_EW	Series10
Boumer_NS	Series11
Darbida_EW	Series12
Darbida_NS	Series13
Righa_EW	Series14
Righa_NS	Series15
Hdey_EW	Series16
Hdey_NS	Series17
Kedara_EW	Series18
Kedara_NS	Series19
kedar2_EW	Series20
Kedar2_NS	Series21
Meliana_EW	Series22
Meliana_NS	Series23
Tizi_EW	Series24
Tizi_NS	Series25

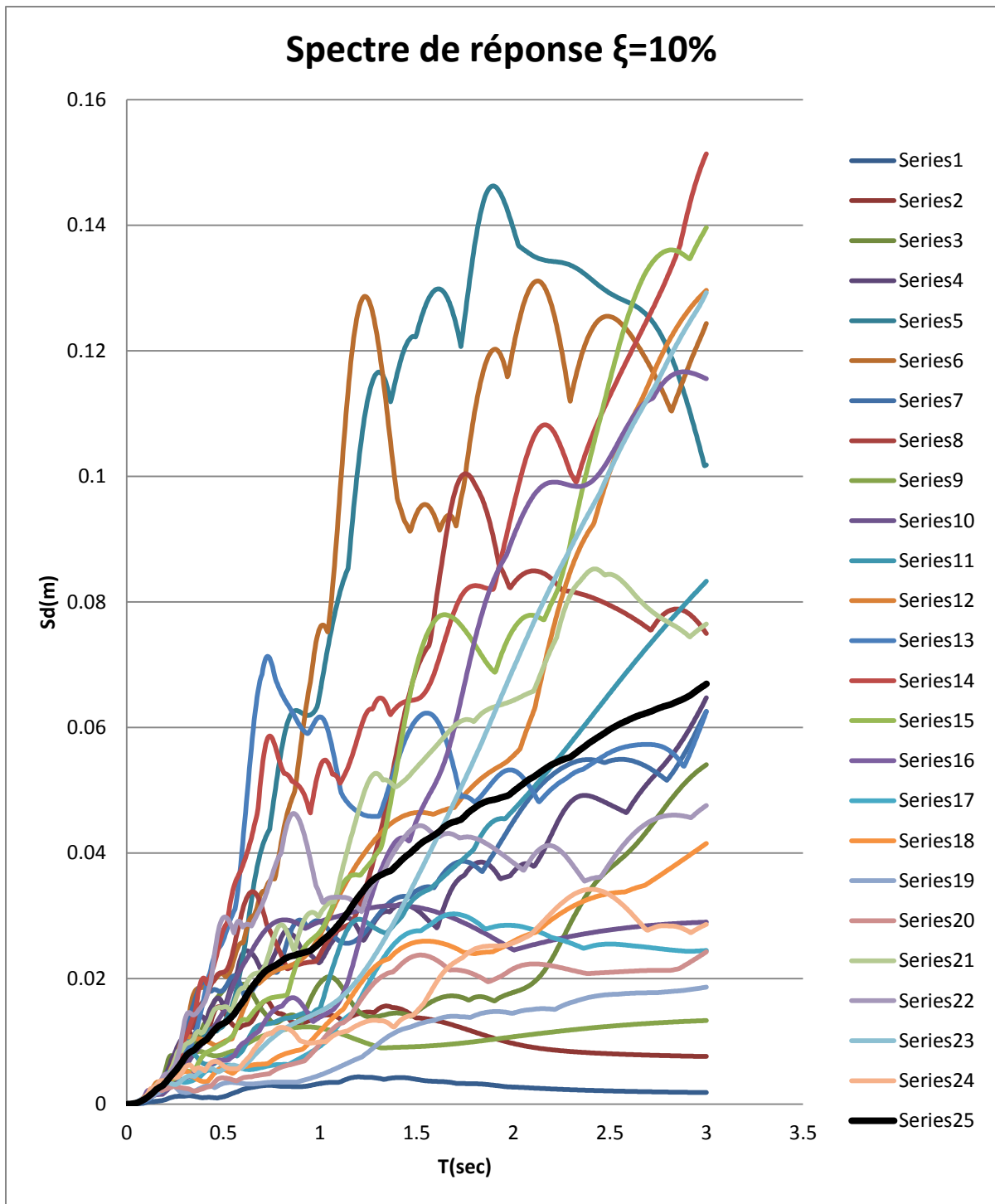


Figure 3. Spectres de réponse pour les accélérogrammes sélectionnés et le spectre moyen en noir.

La légende :

Accélérogrammes	Series
Afrou_EW	Series1
Afrou_NS	Series2
Defla_EW	Series 3
Defla_NS	Series 4
Azazga_EW	Series 5
Azazga_NS	Series 6
Blida_EW	Series 7
Blida_NS	Series8
Boumer_EW	Series9
Boumer_NS	Series10
Darbida_EW	Series11
Darbida_NS	Series12
Righa_EW	Series13
Righa_NS	Series14
Hdey_EW	Series15
Hdey_NS	Series16
Kedara_EW	Series17
Kedara_NS	Series18
kedar2_EW	Series19
Kedar2_NS	Series20
Meliana_EW	Series21
Meliana_NS	Series22
Tizi_EW	Series23
Tizi_NS	Series25

5. Evaluation des coefficients d'amortissement

Une des étapes importantes pour optimiser le coefficient de réduction d'amortissement est de déterminer efficacement le déplacement. Pour ce faire, nous utilisons une analyse de régression multiple pour avoir des formules simplifiées. Ceci constituera la présente phase de notre travail.

Les facteurs de réduction d'amortissement sont déterminées en utilisant les équations suivantes:

$$S_d(T, \xi) = \eta S_d(T, 5\%) \quad (1)$$

$$PS_a(T, \xi) = \eta PS_a(T, 5\%) \quad (2)$$

Où

$S_d(T, 5\%)$ et $PS_a(T, 5\%)$ sont les spectres de réponses élastique de 5% d'amortissement en déplacement et en pseudo-accélération respectivement. $S_d(T, \xi)$ et $PS_a(T, \xi)$ sont les quantités correspondant à un amortissement ξ supérieure à 5%. T est la période naturelle du système à un degré de liberté 1DDL.

5.1. Analyse de régression multiple

Nous avons établi le calcul des spectres dans notre travail pour la régression non linéaire simple (et multiple). Nous nous sommes surtout intéressés à la détermination des valeurs des coefficients de réduction d'amortissement.

Le programme DataFit v.8.2 (Oakdale Engineering, 2006) est un logiciel puissant pour l'analyse de la régression et donne des résultats précis pour un nombre quelconque d'inconnues. Il peut effectuer une régression linéaire et une analyse de régression non linéaire. Dans cette étude, ce logiciel est utilisé pour effectuer une analyse de régression non linéaire des données obtenues à partir du coefficients de réduction d'amortissement.

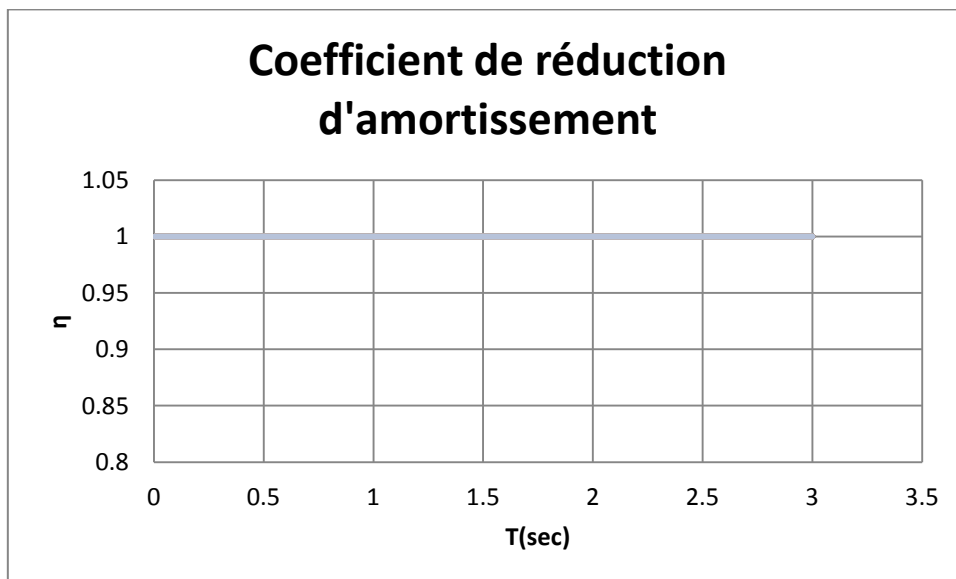


Figure 4. Coefficient de réduction d'amortissement déterminé pour l'ensemble d'accélérogrammes de Boumerdès .

6. Comparaison

Les coefficients déterminés sont comparés avec ceux de :

- **Newmark et Hall (1973)**

$$\eta = \begin{cases} 1.514 - 0.321 \ln(\xi) \\ 1.400 - 0.248 \ln(\xi) \\ 1.309 - 0.194 \ln(\xi) \end{cases}$$

- **Eurocode 8**

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$$

- **RPOA 2008**

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}}$$

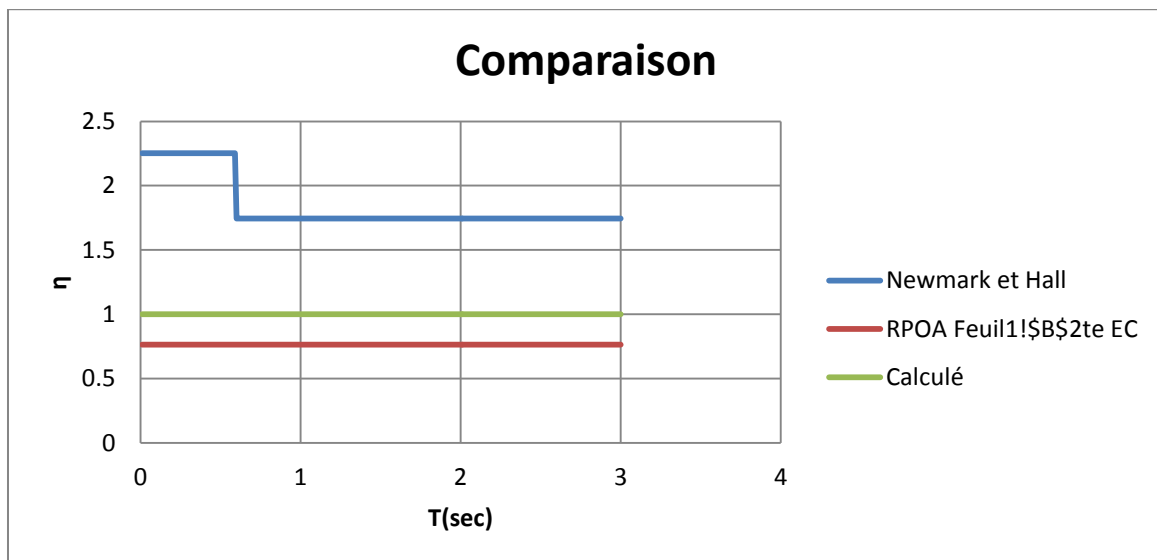


Figure 5. Comparaison des valeurs calculés

7. Conclusion

La médiane de η a montré des tendances simples à travers la période de vibration T , le coefficient d'amortissement et a permis d'obtenir une bonne évaluation par une analyse de régression, ce qui conduit à une valeur de (1) pour un taux d'amortissement de 10%.

Pour les systèmes ayant des périodes supérieures ou égales à 0.6 sec, l'équation de Newmark et Hall donne une valeur plus grande que celle de RPOA et EC.

Cette évaluation fournit une bonne estimation de coefficient de réduction d'amortissement des systèmes élastiques soumis à un mouvement sismique.