

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Civil  
Laboratoire de Génie Sismique et de  
Dynamique des Structures



# Thèse de Doctorat en Sciences en Génie Civil

Présentée par :  
**BENAHMED BAIZID**  
Magister en Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique

## Intitulé Réponse sismique des structures à amortissement incertain

Soutenue publiquement le 22/11/2017 devant le jury composé de :

<b>Président</b>	: B. TILIOUINE	Professeur	E. N. P.,	Alger
<b>Directeur de thèse</b>	: M. HAMMOUTENE	Professeur	E. N. P.,	Alger
<b>Examineurs</b>	: S. RECHAK	Professeur	E. N. P.,	Alger
	N. BOURAHLA	Professeur	U. S. D. B.,	Blida
	E. DJAKAB	M. C. A	U. S. T. H. B.,	Alger
	M. A. HAMADOUCHE	M. C. A	U. M. B. B.,	Boumerdes

**ENP 2017**



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Ecole Nationale Polytechnique  
Département de Génie Civil  
Laboratoire de Génie Sismique et de  
Dynamique des Structures



# Thèse de Doctorat en Sciences en Génie Civil

Présentée par :  
**BENAHMED BAIZID**  
Magister en Génie Civil, Ecole Nationale Polytechnique

## Intitulé Réponse sismique des structures à amortissement incertain

Soutenue publiquement le 22/11/2017 devant le jury composé de :

<b>Président</b>	: B. TILIOUINE	Professeur	E. N. P.,	Alger
<b>Directeur de thèse</b>	: M. HAMMOUTENE	Professeur	E. N. P.,	Alger
<b>Examineurs</b>	: S. RECHAK	Professeur	E. N. P.,	Alger
	N. BOURAHLA	Professeur	U. S. D. B.,	Blida
	E. DJAKAB	M. C. A	U. S. T. H. B.,	Alger
	M. A. HAMADOUCHE	M. C. A	U. M. B. B.,	Boumerdes

**ENP 2017**

## **DEDICACE**

**A ma famille**

## **REMERCIEMENTS**

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à mon directeur de thèse, Malek Hammoutene; professeur à l'Ecole Nationale Polytechnique, pour son suivi, ses conseils et orientations qui m'ont été d'une grande utilité ainsi que ses encouragements tout au long de ce travail.

Je me dois également de remercier chaudement le Professeur Donatello Cardone de l'universita degli studi di basilicata à Potenza (Italie), pour son accueil et sa précieuse collaboration au cours de mes fructueux séjours de recherche en Italie.

Il m'est particulièrement agréable d'adresser mes vifs remerciements au Professeur Tiliouine Boualem, pour l'honneur qu'il me fait de présider le jury.

Ma profonde reconnaissance va aussi à Monsieur Rechak Saïd, Professeur à l'ENP, Bourahla Nouredine, Professeur à l'université de Blida, Djakab Essaid, Maître de conférence à l'U.S.T.H.B et Hamadouche Mohamed Ameziane, Maître de conférence à l'U.M.M.B, d'avoir accepté de siéger dans le jury comme examinateurs.

J'adresse également mes remerciements à M. Badaoui, Maître de conférences à l'université de Djelfa, pour son précieux soutien tout au long de ce travail.

**ملخص :** الهدف الرئيسي من العمل المقدم في هذه الأطروحة هو تطوير إجراء للنظر في تأثير الارتياح في قيم معامل التخماد على قيم معامل انقاص التخماد DCF وبالتالي على استجابة الهياكل خاصة تلك التي تتميز بمستويات تخماد أكبر من 5 % .

في هذا السياق، تم اقتراح طريقة جديدة للتنبؤ بقيم DCF باستخدام الشبكات العصبية (RNA). وقد استخدمت هذه التقنية لتقدير القيم DCF المرتبطة بالقواعد الزلزالية الجزائرية (RPA) مع الأخذ في الاعتبار عدم اليقين في التخماد. تم استخدام تقنية مونت كارلو لتوليد التوزيعات الاحتمالية لقيم التخماد العشوائي حسب التوزيع الاحتمالي اللوغاريتمي الطبيعي وتم الاختيار على أساس النتائج التجريبية. تم استخدام الانحدار غير الخطي أيضا لاقتراح صيغة جديدة لتقدير قيم DCF مع الأخذ في الاعتبار الارتياحات المصاحبة ل  $\xi$ . تمت مقارنة النتائج التي تم الحصول عليها باستعمال الطريقتين المقترحتين. تمثل RNA طريقة جديدة لتقدير قيم دقيقة ل DCF والنتائج المرتبطة بها مثيرة للاهتمام واعدة. خصص جزء من العمل لتقدير DCF مع الأخذ بعين الاعتبار الارتياحات المصاحبة ل  $\xi$  للكود الأوروبي EC8 واقتراح صيغة تحليلية لحساب قيم DCF. وأخيرا، تم وضع استنتاجات ووجهات نظر في ضوء النتائج التي تم الحصول عليها. يمكن تمديد هذه الدراسة من أجل أن تأخذ في الاعتبار آثار الارتياحات المصاحبة للخصائص الديناميكية الأخرى ، وادخال مفهوم النجاعة في القوانين الخاصة بالبنى المقاومة للزلازل.

**الكلمات الدالة:** عامل الحد من التخماد DCF ، تقنية مونت كارلو ، الارتياحات المصاحبة للخصائص ، للقانون الجزائري للبنى المقاومة للزلازل EC8،RPA 99V2003 ، الشبكات العصبية الاصطناعية (RNA).

**Abstract:** The main objective of the work elaborated in this thesis is the development of a procedure for taking into account the effect of uncertainties related to the damping on DCF values and thus implicitly on the responses of structures, in particular those characterized by damping levels higher than 5%.

In this context, a new method for the prediction of DCF values has been proposed using neural networks (RNA). This technique was used to estimate the DCF values associated to the Algerian seismic code (RPA), taking into account the uncertainties inherent in the damping. The Monte Carlo technique is used to generate the probabilistic distributions of random damping values according to a Lognormal probability distribution, this choice has been made based on the empirical results. The Nonlinear regression was also used for the proposition of a new analytical formula capable of estimating DCF values with uncertainty on  $\xi$ . The results obtained by the two methods are compared. The RNA constitutes a new method for the estimating of the DCF values, the proposed approach is original and the associated results are interesting and promising. A Part of the work was devoted to estimating the DCF taking into account the uncertainty inherent in damping for EC8 and an analytical formulation has been proposed in this context. Finally, some conclusions and perspectives are drawn from the results obtained.

**Key Words:** Damping correction factor, Monte Carlo method, uncertain parameters, Algerian Seismic Regulation RPA, EC8, Artificial Neural Networks (RNA).

**Résumé :** L'objectif principal du travail élaboré dans cette thèse est le développement d'une procédure pour la prise en compte de l'effet des incertitudes liées à l'amortissement sur les valeurs de DCF et donc implicitement sur les réponses des structures notamment celle caractérisées par des niveaux d'amortissement supérieur à 5%.

Dans ce contexte, une nouvelle méthode pour la prédiction des valeurs de DCF a été proposée en utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA). Cette technique a été utilisée pour l'estimation des valeurs de DCF associées aux Règles Parasismiques Algériennes (RPA) avec la prise en compte des incertitudes inhérentes à l'amortissement. La technique de Monte Carlo a été utilisée pour générer les distributions probabilistes de valeurs d'amortissement aléatoires suivant une loi de probabilité log normale dont le choix a été fait sur la base des résultats empiriques. La régression non linéaire a été aussi utilisée pour la proposition d'une nouvelle formule analytique capable d'estimer les valeurs de DCF avec la prise en compte des incertitudes sur  $\xi$ . Les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparés. Le RNA constitue une nouvelle méthode d'estimation des valeurs précises de DCF, l'approche proposée est originale et les résultats associés sont intéressants et prometteurs. Une partie du travail était consacré à l'estimation du DCF en tenant compte de l'incertitude inhérente à l'amortissement pour l'EC8 et une formule analytique a été proposée dans ce cadre. Enfin, des conclusions et des perspectives sont tirées à lumière des résultats obtenues.

**Mots clés :** Facteur de correction de l'amortissement, méthode de Monte Carlo, paramètres incertains, Règles Parasismiques Algériennes RPA 99V2003, EC8, réseaux de neurones artificiels (RNA).

# TABLE DES MATIERES

<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	
<b>LISTE DES SIGLES</b> .....	
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	
<b>INTRODUCTION</b> .....	12
<b>CHAPITRE 1 ÉTAT DE L'ART SUR L'AMORTISSEMENT STRUCTURAL</b> .....	16
1.1 Introduction .....	16
1.2 Discussion sur l'amortissement.....	18
1.3 Les incertitudes inhérentes à l'amortissement .....	20
1.4 Sources des incertitudes inhérentes à l'amortissement .....	23
1.4.1 Effet de l'interaction sol-structures .....	24
1.4.2 Effet des sollicitations en vibration antécédentes .....	25
1.4.3 Effet des éléments non structurels.....	25
1.4.4 Effet de l'amplitude de vibration .....	25
1.4.5 Effet de la durée de mouvement.....	26
1.5 Méthodes de mesures des valeurs d'amortissements.....	26
1.5.1 La méthode de la demi-largeur : .....	26
1.5.2 Méthode d'affaiblissement:.....	27
1.5.3 Method d'amplification.....	27
1.6 Conclusion.....	28
<b>CHAPITRE 2 COEFFICIENT DE CORRECTION D'AMORTISSEMENT (DCF)</b> .....	30
2.1 Introduction .....	30
2.2 Revue des facteurs de correction actuellement utilisés .....	30
2.3 Facteurs influençant le facteur de correction d'amortissement.....	36
2.3.1 La période de vibration .....	36
2.3.2 La Magnitude, la durée et la distance épiscopale .....	37
2.3.3 Les conditions du site.....	37
2.3.4 La distance épiscopale .....	38

2.4	Sélection des enregistrements sismiques pour le calcul du DCF .....	38
2.5	Conclusion.....	39
<b>CHAPITRE 3 DÉVELOPPEMENT D'UNE FORMULATION DU DCF POUR LE RPA 41</b>		
3.1	Introduction .....	41
3.2	Sélection des enregistrements sismiques.....	41
3.2.1	Description de base de données des enregistrements sismiques PGMD .....	42
3.2.2	Présentation des enregistrements sélectionnés par catégorie de sol.....	44
3.3	Appréciation de l'effet des sols sur les valeurs du DCF .....	50
3.4	Formulation du DCF .....	53
3.4.1	Elaboration de la base de données pour l'évaluation du DCF .....	53
3.4.2	La formulation de DCF pour le RPA .....	53
3.4.3	Comparaison du modèle proposé avec les formulations de littérature.....	54
3.5	Conclusion.....	57
<b>CHAPITRE 4 SIMULATION DU DCF PAR RÉSEAU DE NEURONES ARTIFICIELS (RNA)..... 59</b>		
4.1	Introduction .....	59
4.2	Les méthodes de Monte Carlo.....	60
4.2.1	Présentation des méthodes de Monte Carlo .....	60
4.2.2	Description des méthodes de Monte Carlo .....	61
4.3	Conception du Réseau de Neurones Artificiels utilisé.....	63
4.3.1	Généralité sur le type de réseau utilisé.....	63
4.3.2	Topologie générale du réseau de neurones artificiels .....	64
4.4	Procédure de simulation .....	66
4.4.1	Base de données .....	66
4.4.2	Procédure d'analyse .....	67
4.4.3	Apprentissage du réseau de neurones.....	69
4.5	Analyse des résultats obtenus.....	70
4.5.1	Analyse de la corrélation.....	70
4.5.2	Analyse de l'erreur relative .....	72
4.5.3	Discussion sur l'effet de sols.....	74



4.5.4	Simulation sans distinction des classes de sols .....	76
4.6	Formulation du DCF intégrant les incertitudes pour le RPA .....	77
4.6.1	Analyse des résultats .....	78
4.7	Conclusion.....	81
<b>CHAPITRE 5 EFFETS DES INCERTITUDES INHÉRENTES À L'AMORTISSEMENT SUR LE DCF POUR L'EC8 .....</b>		<b>84</b>
5.1	Introduction .....	84
5.2	Sélection des enregistrements sismiques.....	85
5.3	Effets des incertitudes de l'amortissement sur le DCF .....	91
5.3.1	Nombre de simulations requises pour la Méthode de Monte Carlo .....	91
5.3.2	Comparaison entre différentes valeurs du coefficient de variation pour différentes conditions de sols .....	93
5.3.3	Comparaison des DCF obtenus avec les formulations de la littérature.....	94
5.3.4	Etude de l'effet du sol .....	96
5.4	Formulation du DCF proposée pour l'EC8.....	97
5.5	Conclusions .....	98
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE .....</b>		<b>100</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>		<b>103</b>

# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1:</b> Sources de dissipations dans une structure en béton armé.....	19
<b>Tableau 1.2 :</b> Valeurs de $\xi$ (%) dans les Règles Parasismiques Algériennes RPA ...	20
<b>Tableau 1.3 :</b> Résultats des essais sur 11 structures .....	24
<b>Tableau 1.4:</b> Valeurs de taux d'amortissement critique à différentes étapes de construction.....	25
<b>Tableau 3.1:</b> Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S1.....	46
<b>Tableau 3.2:</b> Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S2.....	47
<b>Tableau 3.3:</b> Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S3.....	47
<b>Tableau 3.4:</b> Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S4.....	47
<b>Tableau 3.5:</b> Erreur relative (%) entre les résultats exacts et la formule proposée et quelque formulation de la littérature.....	55
<b>Tableau 4.1:</b> Erreur relative de DCF obtenues de 2 méthodes pour quelques paires de T et $\xi$ .....	81
<b>Tableau 5.1 :</b> Enregistrements sismiques sélectionnés par REXEL pour le sol A.....	88
<b>Tableau 5.2 :</b> Enregistrements sismiques sélectionnés par REXEL pour le sol B.....	88
<b>Tableau 5.3 :</b> Enregistrements sismiques sélectionnés par REXEL pour le sol C.....	89

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1 :</b> Histogramme de valeurs de $\xi$ pour des structures en béton armé.....	22
<b>Figure 1.2 :</b> Histogramme de valeurs de $\xi$ pour des structures en acier.....	22
<b>Figure 1.3 :</b> Histogramme de valeurs de $\xi$ pour différents types des structures.....	23
<b>Figure 3.1:</b> Interface du PGMD-tool pour la sélection des enregistrements sismiques.....	45
<b>Figure 3.2:</b> Présentation des enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool.....	46
<b>Figure 3.3:</b> spectres de réponse des enregistrements obtenus par PGMD-tool pour le sol S1.....	48
<b>Figure 3.4:</b> spectres de réponse des enregistrements obtenus par PGMD-tool pour le sol S2.....	48
<b>Figure 3.5:</b> spectres de réponse des enregistrements obtenus par PGMD-tool pour le sol S3.....	49
<b>Figure 3.6:</b> spectres de réponse des enregistrements obtenus par PGMD-tool pour le sol S4.....	49
<b>Figure 3.7:</b> les valeurs obtenues de DCF pour les quatre types de sol .....	51
<b>Figure 3.8:</b> Erreur entre les valeurs du DCF pour différents sols et le $DCF_{moy}$ .....	52
<b>Figure 3.9:</b> Interface présentant les critères de sélection des formules de logiciel Eureka .....	54
<b>Figure 3.10:</b> Comparaison du modèle choisie avec quelques formulations de littérature.....	55
<b>Figure 4.1:</b> Modélisation du neurone (ou unité de traitement) artificiel .....	65
<b>Figure 4.2:</b> Architecture du réseau de neurones (avec une couche cachée) .....	65
<b>Figure 4.3:</b> Graphe de la fonction sigmoïde.....	66
<b>Figure 4.4:</b> Architecture du réseau de neurones utilisé (avec une couche cachée) .....	70
<b>Figure 4.5:</b> Sorties de RNA par rapport au DCF cible pour les quatre classes de sites.....	71
<b>Figure 4.6:</b> Erreur relative entre les résultats de RNA et les valeurs réelles de DCF pour les quatre types de sols et valeurs de $\xi$ (0.05, 0.10 et 0.20) .....	73
<b>Figure 4.7:</b> Valeurs de DCF pour différents sols pour $\xi = 0.05, 0.10, 0.15$ et $0.20$ .....	74
<b>Figure 4.8:</b> Erreurs relatives des valeurs de DCF en négligent l'effet de site.....	75
<b>Figure 4.9:</b> Sorties de RNA par rapport au DCF cible en négligent l'effet de site.....	77

<b>Figure 4.10:</b> Comparaison entre les DCF obtenue de 2 méthodes et les valeurs réelles de DCF en considérant un amortissement incertain.....	78
<b>Figure 4.11:</b> Erreurs entre les valeurs de DCF obtenues de 2 méthodes (modèle proposé, RNA) et les valeurs réelles de DCF en tenant compte les incertitudes sur $\xi$ .....	80
<b>Figure 5.1:</b> Interface de logiciel Rexel.....	87
<b>Figure 5.2:</b> Spectres de réponses des enregistrements sismiques pour le sol A.....	89
<b>Figure 5.3:</b> Spectres de reponses des enregistrements sismiques pour le sol B.....	90
<b>Figure 5.4:</b> Spectres de réponses des enregistrements sismiques pour le sol C.....	90
<b>Figure 5.5:</b> Histogrammes de valeurs de DCF pour T=2 sec pour différents nombres de simulations (N) .....	92
<b>Figure 5.6:</b> Comparaison des valeurs de DCF pour différentes valeurs de Cov ( $\xi = 20\%$ ).....	94
<b>Figure 5.7:</b> Comparaison entre les valeurs de DCF réelles et des formulations de littérature (Cov de $\xi=20\%$ ).....	95
<b>Figure 5.8:</b> Comparaison entre les valeurs de DCF pour les 3 types du sol.....	96
<b>Figure 5.9:</b> Comparaison entre la formule proposée du DCF et les valeurs du DCF réelles en considérant un amortissement incertain.....	97
<b>Figure 5.10:</b> Erreur relative entre les valeurs du DCF obtenue par les deux méthodes .....	98

## LISTE DES SIGLES

$\xi$	Taux d'amortissement critique
T	Période de vibration
$G(x)$	Fonction d'état limite
$P_s$	Probabilité de succès
$I_D$	Fonction indicatrice
$\overline{P}_s$	Estimateur de la probabilité de succès $P_s$

## LISTE DES ABREVIATIONS

DCF	Damping correction factor
USGS	U.S. Geological Survey
RPA	Règles Parasismiques Algériennes
EC8	Eurocode 8
RNA	Réseaux de Neurones Artificiels
PGMD	Peer Ground Motions Database
GMPE	Ground Motion Prediction Equations
MSE	Erreur quadratique moyenne
PGA	Peak Ground Acceleration

# INTRODUCTION

Dans la plupart des codes parasismiques de par le monde, les spectres de réponse sont donnés pour un taux d'amortissement  $\xi = 5\%$ . Néanmoins, les structures civiles peuvent être caractérisées par des valeurs d'amortissement différentes, notamment actuellement, avec l'incorporation de plus en plus importante de systèmes d'isolation et de dispositifs de dissipation d'énergie. Une des conséquences immédiates lors du calcul de telles structures se traduit par le besoin d'ajuster les spectres de réponse à 5% d'amortissement à d'autres niveaux d'amortissement. Dans ce cas, un facteur de correction est utilisé pour évaluer la réponse spectrale à n'importe quelle valeur. Nous adopterons dans cette étude le terme de Damping Correction Factor (DCF).

Le DCF a été étudié par plusieurs chercheurs et différentes expressions du DCF ont été proposées telles que celles fonctions du taux d'amortissement [(Tolis et Faccioli (1999); Bommer et al (2010); Priestley (2003); Ashour (1987)], du taux d'amortissement et de la période (Lin et Chang (2003 et 2004) ; Lin et al (2005); Wu et Hanson (1989) ; Naeim et Kircher (2001); Ramirez et al (2002), du taux d'amortissement et de la période et d'autres caractéristiques (ex. durée, conditions de site, distance épacentrale, magnitudes) [(Abrahamson et Silva (1996); Cameron et Green (2007), Hatzigeorgiou (2010); Anmin et al (2011); Lin et Chang (2004)].

Parmi tous les paramètres considérés, le DCF est principalement affecté par le taux d'amortissement, qui demeure l'une des caractéristiques structurales les plus importantes, et pourtant la moins bien comprise, qui caractérisent le comportement d'une structure sous l'action de charges dynamiques (séisme, vent, etc...). L'évaluation de l'amortissement dans les systèmes structuraux demeure un problème complexe du fait que des écarts significatifs dans son estimation pouvant être introduits du fait des différences dans le type des structures considérées, de la participation ou non d'éléments non structuraux, des variations sensibles des propriétés d'un même matériau utilisé et du niveau des secousses sismiques.

Par conséquent, l'erreur dans l'estimation de l'amortissement peut conduire à de fausses valeurs du DCF et subséquentement à des inexactitudes significatives dans l'estimation de la réponse dynamique. C'est la motivation principale pour la recherche d'une nouvelle formulation du DCF pouvant prendre en compte les incertitudes de l'amortissement dans les évaluations du DCF.

Dans ce contexte, L'objectif principal du travail développé dans cette thèse est l'élaboration d'une procédure pour la prise en compte de l'effet des incertitudes liées à l'amortissement sur les valeurs de DCF et donc implicitement sur les réponses des structures notamment celle caractérisées par des niveaux d'amortissement supérieurs à 5%.

Pour réaliser cet objectif, la thèse est décomposée en cinq chapitres commençant, dans le premier chapitre, par une recherche bibliographique sur les origines et les sources de l'amortissement, une description des incertitudes inhérentes à l'amortissement et une présentation des différentes sources de ces incertitudes. Le deuxième chapitre est consacré à la définition du facteur de correction d'amortissement (DCF) et à la présentation de ses différentes formulations recensées dans la littérature scientifique. Une description des différents facteurs influençant les valeurs de DCF est présentée à la fin de ce chapitre

Le troisième chapitre décrit la procédure d'établissement d'une formulation déterministe du DCF compatible avec le Règlement Parasismique Algérien (RPA99 version 2003). La formulation proposée tient compte des spécificités du code algérien en termes de classification des sols et de spectre de réponse de calcul. L'élaboration de la base de données utilisée dans cette procédure, est faite en sorte reliée de manière rationnelle les mouvements sismiques à l'aléa sismique du site et aux critères de sélection tel que décrit par le règlement. Un programme informatique puissant utilisant des algorithmes de calcul évolutif est utilisé pour déterminer les formulations mathématiques les plus simples décrivant de manière la plus exacte possible les séries de données proposées.

Dans le quatrième chapitre, une nouvelle méthode pour la prédiction des valeurs de DCF est développée sur la base de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA). L'architecture du réseau de neurone développé est conçue de manière compatible avec le problème à traiter en termes de paramètres à présenter en entrée, de définition du nombre de neurones et du nombre de couches cachées ainsi que du nombre de neurones en couche de sortie. Cette technique, qui intègre de manière explicite les incertitudes inhérentes à l'amortissement, permet de générer des valeurs du DCF de manière compatible avec les spécificités du règlement parasismique algérien et en utilisant une banque de données accélérométriques réelles.

L'incertitude est représentée par une distribution de probabilité log normale de l'amortissement (considéré comme une variable aléatoire dont la moyenne est la valeur déterministe du taux

d'amortissement choisi (10 valeurs sont considérées dans ce travail) alors que sa variation est décrite par un coefficient de variation dont les valeurs sont considérées sur la base d'études empiriques [Haviland (1976)]. La technique de Monte Carlo est utilisée pour générer les valeurs d'amortissement autour de valeurs moyennes considérées pour le calcul de DCF. Le RNA constitue une nouvelle méthode d'estimation des valeurs précises de DCF, l'approche proposée est analysée et des résultats sont présentés et discutés. Une nouvelle formulation pour le RPA est ensuite développée en utilisant la même base des données utilisée comme entrée pour l'approche RNA. Cette deuxième formulation, à l'inverse de la première, est capable d'estimer les valeurs de DCF avec la prise en compte de manière implicite des incertitudes caractérisant l'amortissement. Les résultats obtenus par les deux méthodes sont comparés à la fin du chapitre.

Le cinquième chapitre est consacré à l'estimation du DCF pour l'Eurocode 8 (EC8) en intégrant de manière explicite les incertitudes inhérentes à l'amortissement. Une banque de données est élaborée sur la base des critères édictés dans le chapitre 3, de sorte à sélectionner des enregistrements accélérométriques réels compatibles avec les formes spectrales proposées par l'EC8. Le même algorithme génétique que celui utilisé au chapitre 3 permet de sélectionner des équations mathématiques qui dans leurs formes les plus simples, permettent de décrire les séries de données présentées en entrée. L'effet du type de sol sur la variabilité des valeurs de DCF a été analysé et discuté.

Enfin, des conclusions sont tirées à la lumière des résultats obtenues et des perspectives sont formulées.



# **Chapitre 1**

## **État de l'art sur l'amortissement structural**

# État de l'art sur l'amortissement structural

---

## 1.1 Introduction

Une des caractéristiques structurales les plus importantes et pourtant les moins bien comprises est le phénomène de dissipation d'énergie, communément appelé amortissement. L'évaluation de l'amortissement dans les systèmes structuraux est un problème relativement difficile en dynamique des structures, car il ne dépend pas d'un phénomène physique unique comme les autres caractéristiques des systèmes structuraux « la masse et la rigidité ». L'importance de l'amortissement devient de plus en plus significative quand les bâtiments deviennent de plus en plus grands et relativement plus flexibles, comme c'est, par exemple, le cas des gratte-ciels qui peuvent osciller excessivement pendant les tempêtes de vent. Le niveau de ces oscillations peut ne pas être assez significatif pour endommager la structure, mais peut néanmoins causer des malaises aux occupants du bâtiment. N'importe quelle information précise au sujet des valeurs d'amortissement, lors de l'étape de conception, peut certainement alléger cette source importante d'incertitudes habituellement rencontrée par les concepteurs des structures.

La complexité de la situation est encore augmentée par le simple fait que les propriétés matérielles diffèrent souvent d'un échantillon à un autre, et cela entraîne des variations significatives lors de l'estimation des valeurs d'amortissement. Dans une structure, la contribution de l'amortissement matériel prend origine dans de nombreux mécanismes. Sa valeur dépend, entre autres caractéristiques, du type de structure, des matériaux de construction utilisés, de la participation des éléments non structuraux et du niveau des secousses. Par exemple, les structures avec systèmes d'isolation et les structures avec des dispositifs de dissipation d'énergie peuvent avoir des valeurs de coefficients d'amortissement largement supérieures à 5%. En règle générale, un taux d'amortissement inférieur est attendu si la structure reste élastique ; d'autre part, si le tremblement de terre est suffisamment important pour provoquer des dommages aux composantes structurelles et non structurelles, le coefficient d'amortissement pourrait augmenter considérablement.

L'évaluation du taux d'amortissement pour différents types de structures reste un sujet ouvert qui peut encore conduire à l'amélioration du calcul des réponses structurales et rendre les résultats plus réalistes.

L'effet primaire de l'amortissement est d'atténuer la réponse d'un système vibrant. L'amortissement affecte également la fréquence naturelle d'un système, mais avec une quantité bien moindre que cela affecte l'amplitude de réponse faisant qu'en pratique ses effets sur la fréquence soient généralement négligés [Coats (1982)].

Dans la dynamique des structures, Certains mécanismes d'amortissement produisent des pertes constantes d'énergie pendant le mouvement ou proportionnelle à la vitesse, tandis que d'autres dépendent des amplitudes de déplacement et la fréquence de vibration. L'amortissement peut être décrit comme visqueux, hystérétique ou de Coulomb. L'amortissement visqueux se produit lorsque la force d'amortissement est proportionnelle à la vitesse. L'amortissement hystérétique est associé à la boucle d'hystérésis. Il est dépendant de la fréquence et agit avec une force qui est proportionnelle au déplacement. L'amortissement de Coulomb, provoqué par le frottement, est opposé à la direction du mouvement.

En pratique courante, il est d'usage de les regrouper en un seul paramètre d'amortissement équivalent vu de la complexité et la difficulté de la description mathématiquement du problème. Le procédé le plus couramment utilisé consiste à supposer que l'énergie vibratoire dissipée est équivalente à celle dissipée par tous les mécanismes d'amortissement combinés dans la structure réelle. Cette idéalisation est alors appelée amortissement visqueux équivalent.

Par conséquent, du point de vue pratique, l'amortissement visqueux équivalent, qui modélise le comportement amorti global des systèmes structuraux comme étant visqueux, est souvent adoptée dans la dynamique des structures, même si, la modélisation analytique de l'amortissement reste encore difficile, voire impossible, pour les structures réelles de l'ingénierie. Par conséquent l'estimation de l'amortissement par l'intermédiaire d'essais dynamiques et sa mesure devient extrêmement importante dans la dynamique des structures, en particulier dans le but de la prédiction de la réponse et du contrôle des vibrations.

## 1.2 Discussion sur l'amortissement

Lors d'un séisme, une énergie mécanique est injectée à la base de la structure par le biais d'un mouvement sismique. Cette énergie provoquera des déplacements de la structure. Cependant, une partie de cette énergie sera utilisée par d'autres mécanismes, ce qui aura comme conséquence de limiter les déplacements. Cette part d'énergie dissipée dépendra en général de la fréquence d'excitation [Crandall (1970)] et du niveau de sollicitation [Stevenson (1980)] sauf dans le cas de bâtiments de grandes hauteurs où l'amortissement n'est pas proportionnel au niveau de sollicitation jusqu'à la plastification des aciers [Crambuer (2013)].

L'amortissement est utilisé pour caractériser la capacité des structures à dissiper de l'énergie lors de mouvement dynamique. Contrairement à la masse et la rigidité d'une structure, l'amortissement ne se rapporte pas à un processus physique unique, mais plutôt à un certain nombre de phénomènes. Les valeurs d'amortissement dépendent de plusieurs facteurs, parmi ceux-ci sont : la fissuration du béton, la plastification des aciers, l'amplitude des vibrations, la nature des matériaux de construction, les périodes fondamentales de vibrations.

Du point de vue pratique, l'amortissement d'une structure se compose de [Davidovici (1999)] :

**L'amortissement interne ou structural :** Il se produit dans les matériaux à l'occasion des déformations qu'ils subissent et représente la principale cause de dissipation d'énergie. Il est dû à la dissipation d'énergie dans les matériaux de construction, des composants structuraux et leurs liaisons, en fonction de la température, de l'amplitude ou de la fréquence de vibration. Il comporte essentiellement deux termes :

- L'amortissement visqueux : lié à la viscoélasticité des matériaux et dépendant de la fréquence ; il caractérise la capacité d'absorption d'énergie dans le domaine élastique.
- L'amortissement d'hystérésis : indépendant de la fréquence et ayant son origine dans la non linéarité du comportement des éléments structuraux. Il est bien évident que, tant que la structure reste dans le domaine élastique. Cet amortissement tend vers zéro.

**L'amortissement externe :** Il correspond à des frottements divers et se résumant essentiellement à ceux qui interviennent le long des surfaces de contact entre la structure et les éléments non structuraux, lorsqu'ils existent. La contribution des éléments non structuraux à l'amortissement total est assez importante aux fortes amplitudes d'oscillation. On classe dans cette famille le

frottement entre les fondations et le sol, appelé aussi amortissement géométrique, pris en compte dans les modèles de l'interaction sol-structures. L'amortissement externe peut aussi être aérodynamique et hydrodynamique causé par l'interaction entre la structure et l'air ambiant et de l'eau, respectivement. Les derniers mécanismes sont généralement négligeables par rapport à d'autres types d'amortissement [Elnashai (2008)].

L'ensemble des sources de dissipations qui peuvent intervenir dans le cadre d'une structure en béton armé sont présentées dans le tableau 1.1 [Crambuer (2013)].

Sources externes	Sources internes
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Amortissement radiatif qui dépend d'effets de site et du type de fondation [Gueguen and Bard (2005)]</li> <li>- Eléments non structuraux [Elmenschawi et al (2010)]</li> <li>- Interaction avec les structures voisines (chocs, fondations communes) [Polycarpou et Komodromos (2012)]</li> <li>- Résistance de l'air environnant, principalement dans le cadre de structures de grandes hauteurs [Satake et al (2003)]</li> <li>- Interaction fluide structures [Seghir et al (2009)]</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Béton</li> <li>- Acier</li> <li>- Interface acier-béton.</li> </ul>

**Tableau 1.1:** Sources de dissipations dans une structure en béton armé

Il faut noter que l'amortissement issu des sources externes ne modifié pas les propriétés mécaniques de la structure et que les dissipations d'énergie internes sont accompagnées de modifications des propriétés mécaniques de la structure.

Au niveau de l'acier la dissipation se fait sous la forme de boucle d'hystérésis. Ce mécanisme provoque des dissipations d'énergie importantes mais ne se produit que lorsque les aciers sont plastifiés. Ceci ne se produit que pour des niveaux de contraintes importants (au-delà de 500 MPa). Enfin, des glissements peuvent se produire au niveau de l'interface entre l'acier et le béton, dissipant ainsi une partie de l'énergie [Richard (2010)]. Des essais ont montré que l'amortissement interne dépend principalement du niveau de sollicitation [Ting et Crawley (1992)].

Dans la pratique, les phénomènes de dissipation d'énergie sont donc caractérisés de façon très simplifiée en supposant qu'ils sont produits par un amortisseur visqueux linéaire donnant lieu globalement à la même dissipation d'énergie. Par la suite l'amortissement totale est exprimé en termes d'amortissement effectif  $\xi$ .

Il est caractérisé par une relation linéaire entre la force développée dans l'amortisseur et la vitesse relative des deux extrémités de celui-ci :

$$F = c \dot{u} \quad (1.1)$$

Le tableau 1.2 présente les valeurs de taux d'amortissement critique rapportées dans le RPA, en fonction du matériau constitutif, du type de structure et de l'importance des remplissages.

Remplissage	Portiques		Voiles ou murs
	Béton armé	Acier	Béton armé/maçonnerie
<b>Léger</b>	6	4	10
<b>Dense</b>	7	5	

**Tableau 1.2 :** Valeurs de  $\xi$  (%) dans les Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99 V2003)

### 1.3 Les incertitudes inhérentes à l'amortissement

La sélection d'une valeur appropriée de l'amortissement est un sujet à polémique dans la pratique en matière de conception. Les incertitudes inhérentes à l'amortissement structural découlent principalement du manque de compréhension des mécanismes de l'amortissement structurel. La connaissance de ces incertitudes est nécessaire pour évaluer l'efficacité du processus de conception des structures vis à vis des sollicitations sismiques, ce qui justifie la nécessité d'études approfondies pour identifier et quantifier ces incertitudes.

Dans ce cadre, plusieurs travaux de recherche ont été entrepris pour l'estimation des valeurs d'amortissement sur la base de la connaissance glanée des bâtiments existants pour différentes structures (type, matériaux de construction, hauteur des structures). Bien qu'on convienne généralement que les valeurs de l'amortissement changent avec l'amplitude du mouvement, sa

description fondamentale est plutôt incertaine et limitée, sans parler de la nature complexe des mécanismes d'amortissement, des méthodes utilisées pour trouver les valeurs de l'amortissement des structures et de l'analyse et l'interprétation des données qui elles aussi présentent des incertitudes additionnelles. L'évaluation de l'amortissement dans les structures a été entreprise par plusieurs investigateurs. Un prélèvement de telles études peut être trouvé dans Jeary et Ellis (1981), Yokoo et Akiyama (1972), Hudson (1977), Hart et Vasudevan (1975), Taoka et autres (1975), Raggett (1975), Celebi et Safak (1991) et Trifunac (1972). L'information fournie par des expériences complètes a été assemblée par Haviland (1976), Jeary et Ellis (1981), Yokoo et Akiyama (1972), Davenport et Hill-Carroll (1986), Jeary (1986), Lagomarsino (1993) et Tamura et al (1994), entre d'autres [kareem (1996)].

Haviland (1976) a rapporté un éventail de données pour les niveaux différents d'amplitudes de réponses, des classes larges de systèmes structuraux et de tailles de bâtiments. Cette étude a prouvé que les distributions Log-normal et Gamma fournissent le meilleur ajustement aux variations de l'amortissement et que le coefficient de variation (COV) des estimations de l'amortissement change dans l'intervalle [42-87%]. Davenport et Carroll (1986) ont réexaminé la base de données et ont noté que le COV s'étend de 33% à 78% et ont suggéré une valeur de 40%. Basé sur des données mesurées, ESDU (1983), Jeary (1986), Logomarsino (1993) et Tamura et al (1995) ont établi des expressions pour la variation du coefficient d'amortissement en fonction du niveau de déplacement structural. Il est important de noter que la plupart des bases de données ont un grand chevauchement d'information puisqu'elles ont beaucoup de bâtiments en commun. [kareem (1996)]. Les sources de ces incertitudes comprennent : l'interaction sol-structure, l'histoire précédente des vibrations, des éléments non structurels, l'amplitude des vibrations, la durée du mouvement et les incertitudes découlant des techniques de mesure d'amortissement elles-mêmes.

Les figures 1.1, 1.2 et 1.3, représentent la variabilité de l'amortissement, tel que déterminé à partir de l'essai de vibration de bâtiments réels. Le regroupement des données dans trois catégories sur la base de types des constructions (béton armé, acier et une troisième catégorie représente les trois types (béton armé, acier et mixte) a été initialement motivé par les insuffisances de l'information disponible, permet de larges applications des résultats sur la base d'une similitude dans les matériaux de construction.

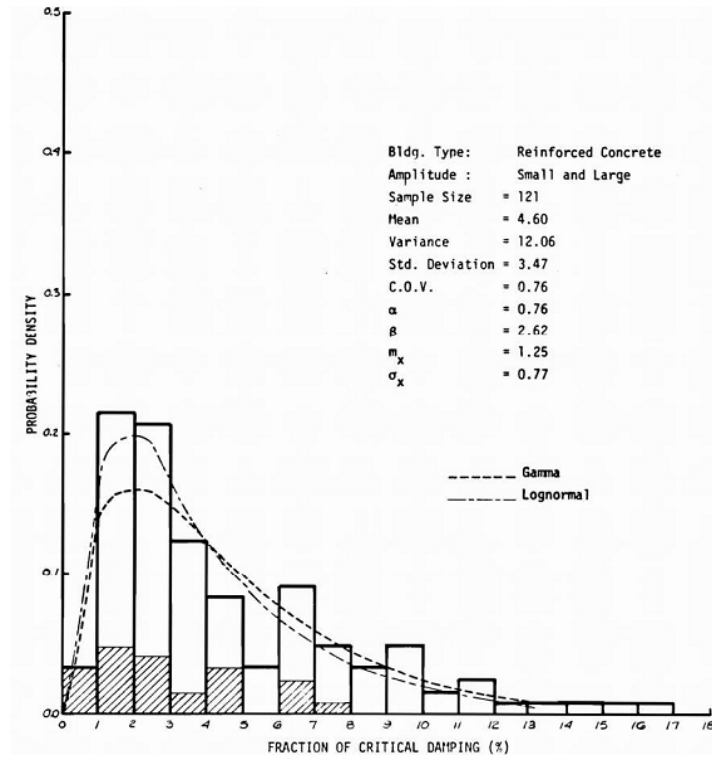


Figure 1.1 : Histogramme de valeurs de  $\xi$  pour des structures en béton armé [Haviland (1976)]

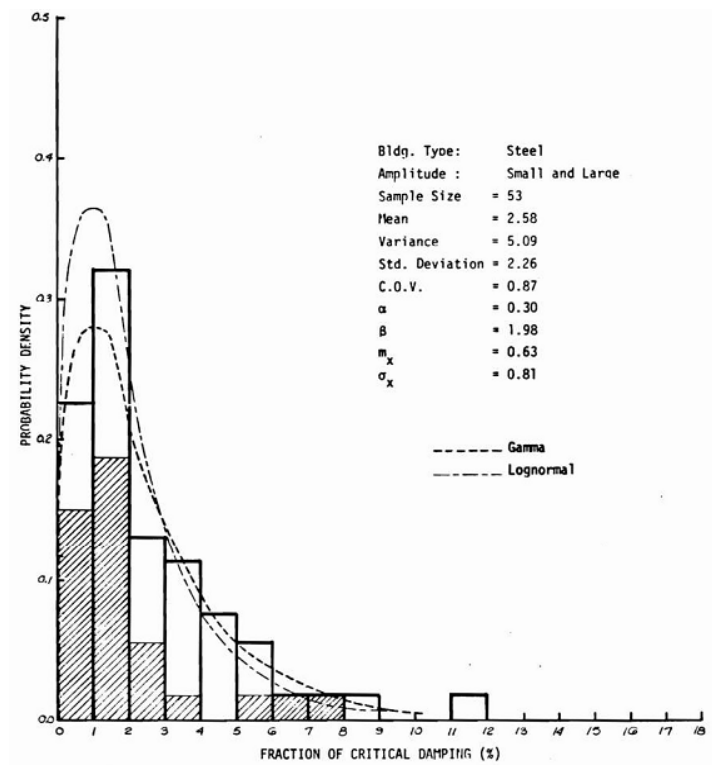
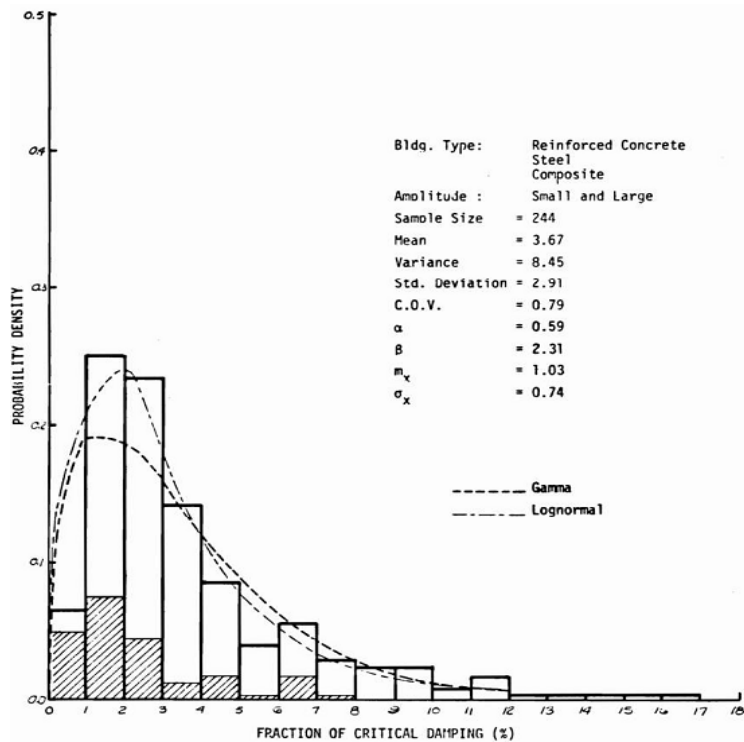


Figure 1.2 : Histogramme de valeurs de  $\xi$  pour des structures en acier [Haviland (1976)]





**Figure 1.3 :** Histogramme de valeurs de  $\xi$  pour différents types de structures [Haviland (1976)]

#### 1.4 Sources des incertitudes inhérentes à l'amortissement

La dissipation de l'énergie au sein des structures est un phénomène complexe et est due à un grand nombre de facteurs tels que le glissement et le frottement au niveau des articulations, l'élasticité imparfaite des matériaux, la résistance du milieu environnant au mouvement et des effets d'interaction d'éléments non structurels. Même si une estimation raisonnable de la valeur d'amortissement associé à un type de structure particulière peut être faite, des incertitudes supplémentaires sont toujours présentes. Plusieurs sources d'incertitudes sont décrites ci-dessous.

Des descriptions précises et quantitatives de mécanismes d'amortissement dans les structures ne sont pas encore disponibles. Bien que l'information fiable existe sur la dissipation d'énergie dans les éléments de structure individuels, il n'y a aucune méthode reconnue pour combiner les effets en une valeur pour l'ensemble du système [Haviland (1976)].

### 1.4.1 Effet de l'interaction sol-structures

L'interaction sol-structure peut avoir un effet significatif sur la valeur de l'amortissement critique pour une structure, l'augmentation du rapport de la rigidité de la structure sur la rigidité du sol conduit à une augmentation de valeurs de taux d'amortissement.

Des essais de vibrations forcées menées par Takeuchi et Nakagawa (1960) sur 11 bâtiments de quatre étages en béton armé avec conception similaire, construits sur différents types de sols, démontrent l'influence de l'interaction-sol structure. Dans ces essais, les 11 bâtiments ont été soumis à des tests de vibrations forcées avec des valeurs d'amortissement et des fréquences déterminées à partir des enregistrements des réponses des structures. Ces structures, de conception et de construction similaire, étaient situées sur différents sites classés soit dur ou meuble.

Le tableau 1.3, tiré de [Takeuchi et al (1690)], résume les données de ces essais pour deux types de sol dur et meuble que permet d'évaluer l'effet de l'interaction sol-structure sur les valeurs d'amortissement. Lorsque cela est fait, la valeur moyenne de l'amortissement pour les sites durs est de 5,15%, tandis que pour les sites meubles la moyenne est 8,01%, une différence de 56%. La fraction de l'amortissement critique (observée) varie de 3,7% à 11,5%, un changement de 7.8 %.

Structure	Sol	T (Sec)	$\xi$
Takemaru	Dur	0.204	0.0926
Takemaru	Dur	0.225	0.0572
Nishinomiya	meuble	0.268	0.115
Komagome	Dur	0.324	0.037
Senjyu	meuble	0.324	0.0691
Totsuka	Dur	0.332	0.0480
Honmuracho	meuble	0.231	0.0948
Ishikawacho	meuble	0.229	0.0504
Gotokuji	Dur	0.346	0.0380
Taishido	Dur	0.363	0.0360
Kyodo	meuble	0.385	0.0713

**Tableau 1.3 :** Résultats des essais sur 11 structures [Takeuchi et al (1690)]

### 1.4.2 Effet des sollicitations en vibration antécédentes

La comparaison des mesures avant et après un tremblement de terre peut être utilisée pour étudier le degré de participation, à un instant donné, de l'historique des vibrations précédemment subies par une structure, sur sa capacité d'amortissement. En effet, selon les seuils d'amplitudes plus ou moins importants de ces vibrations, Elles peuvent affecter cette structure en changeant son état initial par création des fissures et par conséquent, affecter la valeur de son taux d'amortissement.

### 1.4.3 Effet des éléments non structurels

L'influence des éléments non structurels sur l'amortissement global associé à la réponse structurelle a été observée par des tests de vibration des structures à différents stades de construction. Alors que les résultats de ces tests ne sont pas toujours concluants, la tendance générale a été une augmentation constante d'amortissement avec l'ajout de revêtement non structurel et cloisons. L'ampleur de l'effet d'amortissement accrue à partir des éléments non structurels, comme observé dans les essais de vibration forcée, est généralement faible (1% ou moins de  $\xi$ ) [Coats (1982)].

La participation des éléments non structurels est obtenue par des essais de vibration d'une structure à différentes étapes de construction. Les résultats suivants [Otsuki et al (1969)] ont été obtenus pour un bâtiment en béton armé renforcé par acier de 18 étages testés un mois après l'achèvement de l'ossature de structure, et à nouveau, après la finalisation de la structure presque finalisation

	ossature seulement	Presque finalisation
Direction longitudinale	3.5	4.3
Direction transversale	3.0	2.2

**Tableau 1.4:** Valeurs de taux d'amortissement critique à différentes étapes de construction

### 1.4.4 Effet de l'amplitude de vibration

La dépendance de l'amortissement à l'amplitude de vibration a été bien établie dans des essais de vibration forcée. Vu que l'intensité des secousses d'une structure pendant l'événement sismique est variable, la sélection d'une valeur de l'amortissement appropriée devient encore plus incertaine. Les résultats tirés de tests de vibrations forcées effectués sur deux structures, la première est la bibliothèque de Millikan, c'est une structure de neuf étages en béton armé à l'Institut de

Technologie de Californie et une deuxième structure de 5 étages en béton armé [Coats (1982)]. Les résultats montrent une tendance à l'augmentation de l'amortissement avec l'augmentation des niveaux de réponse vibratoire.

Les essais indiquent une augmentation de l'amortissement critique d'environ de 1% sur toute la plage d'amplitudes de vibrations forcées obtenus dans les tests. Ceci est un changement relativement important si l'on considère que les amplitudes maximales de test étaient seulement d'environ un dixième de ce qu'on pourrait attendre dans un fort tremblement de terre. Ces résultats démontrent clairement qu'il est impossible de prédire les niveaux d'amortissement qui peuvent exister lors de forts tremblements de terre, basés sur les résultats d'essais de vibrations de faible amplitude.

#### **1.4.5 Effet de la durée de mouvement**

L'effet de la durée de mouvement sur les valeurs de l'amortissement a eu peu d'investigation en raison de la nature complexe du problème. Il est généralement admis que les valeurs d'amortissement augmentent à mesure que les fissures donnent lieu à l'intérieur de la structure, qui sont fonctions de la durée. Le test à l'échec d'une structure en charpente d'acier de 7 étages, entourée du béton, montre une augmentation de l'amortissement de plus de 9% après que le mécanisme d'effondrement final a été atteint [Funahashi et al (1969)].

### **1.5 Méthodes de mesures des valeurs d'amortissements**

L'un des principaux problèmes dans l'analyse structurelle pour la conception est la disponibilité de propriétés structurelles dynamiques fiables (par exemple la masse, la rigidité, l'amortissement). Dans ce contexte, l'identification de l'amortissement fait l'objet d'une attention particulière dans le cadre des essais dynamiques.

Dans ce qui suit, les méthodes d'identification d'amortissement les plus importantes sont brièvement décrites :

#### **1.5.1 La méthode de la demi-largeur :**

La méthode est introduite par Clough & Penzien (1993). Elle permet d'estimer la fréquence de résonance et l'amortissement associé. Cette méthode consiste à évaluer la forme du pic de résonance. Dans sa plus simple forme, des mesures de la largeur de pic de résonance à la  $1/\sqrt{2}$  du

niveau d'amplitude maximale, avec la connaissance de la fréquence, peut être utilisée pour évaluer la valeur d'amortissement correspondant. En fait, cette approche est une évaluation des équations dans le domaine fréquentiel de la réponse à deux fréquences discrètes. Cette approche conduit à une amélioration de la précision.

### 1.5.2 Méthode d'affaiblissement:

Cette méthode est basée sur la mesure du décrétement logarithmique. On procède à un essai par lâcher. On mesure le déplacement  $u_n$  à un temps quelconque et l'amplitude  $u_{n+m}$  à  $m$  cycles plus tard. On calcule le décrétement logarithmique  $\delta_m$  qui est défini par l'équation

$$\delta_m = \frac{1}{m} \ln \frac{u_n}{u_{n+m}} \quad (1.2)$$

le décrétement logarithmique  $\delta_m$  s'écrit sous la forme suivante pour les faibles valeurs d'amortissement

$$\xi \approx \frac{\delta_m}{2\pi} = \frac{1}{2\pi m} \ln \frac{u_n}{u_{n+m}} \quad (1.3)$$

### 1.5.3 Method d'amplification

On applique à la structure des excitations harmoniques à des fréquences  $\bar{\omega}$  et des amplitudes préétablies et on trace la courbe de la réponse de la structure en fonction de pulsation relative  $\beta = \bar{\omega} / \omega$ , ou  $\omega$  est la fréquence naturelle de la structure. Si  $\xi \ll 1$ , on mesure l'amplitude à la résonance, c'est-à-dire à  $\bar{\omega} = \omega$ . Or, à la résonance, le facteur d'amplification dynamique vaut [Paultre (2005)].

$$(R_d)_{\beta=1} = \frac{1}{2\xi} = \frac{(u_0)_{\beta=1}}{(u_{st})_{\beta=0}} = \frac{(u_0)_{\beta=1}}{u_{st0}} \quad (1.4)$$

Où  $u_{st0} = P_0/k$  est le déplacement statique maximum. Le taux d'amortissement est donc

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{u_{st0}}{(u_0)_{\beta=1}} \quad (1.5)$$

En général, on mesure l'amplitude de l'accélération et on déduit l'amplitude de déplacement selon

$$u_0 = \frac{\ddot{u}_{\max}}{\omega^2},$$

la difficulté avec cette méthode est qu'on ne connaît pas la fréquence naturelle de vibration  $\omega$ . On sait, cependant, que le retard de phase entre l'excitation et la réponse est  $\pi/2$

quand  $\bar{\omega} / \omega$ . La conduite de l'essai consiste donc à appliquer à la structure une excitation harmonique de fréquence  $\bar{\omega}$  et à mesurer l'angle de phase. On fait varier progressivement la

fréquence jusqu'à obtenir un angle de phase de  $\pi/2$ . Si l'amortissement est important, ou si on

n'arrive pas à appliquer exactement la fréquence de résonance; on mesure l'amplitude maximum,

$(u_0)_{\max}$ , qui s'obtient pour une valeur donnée de la pulsation relative  $\beta$  par l'équation :

$$\beta = \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.6)$$

## 1.6 Conclusion

Ce chapitre constitue un état de l'art sur l'amortissement et les différents paramètres qui les influencent en se basant sur quelques recherches faites dans ce domaine. Il est important de signaler l'insuffisance des documents sur ce domaine malgré la grande importance du phénomène d'absorption d'énergie dans les domaines de physique et essentiellement le domaine de génie civil. Une présentation de l'incertitude inhérente aux valeurs d'amortissement a été aussi établie dans ce chapitre en détaillant les différentes sources de ces incertitudes. Cette étude a été renforcée par quelques résultats issus de l'expérimental qui montrent la grande différence entre les valeurs trouvées pour des structures similaires, cela justifie la nécessité des études concernant l'amortissement et leurs incertitudes.

## **Chapitre 2**

### **Coefficient de correction d'amortissement (DCF)**

# Coefficient de correction d'amortissement (DCF)

---

## 2.1 Introduction

Les spectres de réponses ont une grande importance pour les calculs de risques sismiques ainsi que pour la conception et l'analyse des structures. Ces spectres sont développés dans les codes parasismiques pour une valeur du taux d'amortissement critiques de 5%. Les spectres de réponses avec des taux d'amortissement différents de 5% sont généralement dérivés du spectre de référence avec  $\xi=5\%$  par l'application d'un facteur qui est généralement appelé facteur de correction d'amortissement (DCF).

Ces facteurs sont aussi souvent utilisés pour l'analyse et la conception de structures avec systèmes de dissipation d'énergie ou d'isolation sismique. De nombreuses formulations de facteurs de correction ont été proposées et intégrées dans les codes sismiques pour évaluer les spectres de réponses aux valeurs d'amortissement plus grand de 5%. Elles sont examinées dans le présent chapitre. La précision de chacune d'elles pour l'estimation de la réponse élastique maximale des structures avec des rapports d'amortissement visqueux de plus de 5% est évaluée en comparant les spectres exacts et les spectres approximatifs de réponse.

## 2.2 Revue des facteurs de correction actuellement utilisés

Les spectres de réponse pour des taux d'amortissement différents de 5% sont généralement dérivé du spectre de référence à  $\xi=5\%$  par l'application d'un facteur qui est généralement appelé facteur de correction d'amortissement (DCF). Nombreuses équations différentes ont été proposées pour le DCF, et certains d'entre elles ont été également adoptées dans les dispositions et les directives de codes sismiques [Lin et Chang (2003), Bommer et al (2000)]. Souvent, le DCF est représenté dans les codes en fonction du taux d'amortissement seulement. Cependant, diverses études ont montré



que différents paramètres, par exemple, la période de vibration, la magnitude du tremblement de terre, les conditions du site et la distance épacentrale, peuvent affecter, à des degrés divers, le DCF.

Dans les deux dernières décennies, un grand nombre d'études a été mené sur ce sujet pour le développement de différents modèles de facteurs d'ajustement d'amortissement en fonction de divers facteurs (coefficient d'amortissement, période spectrale, durée et magnitude de séisme, distance épacentrale et caractéristiques du site).

Dans la littérature, différentes terminologies et symboles sont utilisés pour le facteur d'ajustement d'amortissement, par exemple :

- ✓ DCF, « facteur de correction d'amortissement, » est utilisé par Cameron et Green (2007) ainsi que dans l'Eurocode 8 (2004) ;
- ✓  $DR_{x\%}$  signifie " ratio d'amortissement " avec x désignant une autre valeur de 5% et est utilisé par Atkinson et Pierre (2004) ;
- ✓ B est utilisé par Stafford et al (2008), Lin et al (2005), Lin et Chang (2003 ; 2004), NEHRP (2003), et plusieurs autres chercheurs ;

D'autres terminologies vues dans la littérature comprennent : " facteur de réduction d'amortissement ", "facteur d'ajustement d'amortissement" et " le facteur d'amplification de spectre de réponse".

Dans cette étude, nous utilisons le terme : facteur de correction d'amortissement (Damping Correction Factor : DCF).

Le travail classique de Newmark et Hall (1982), a été largement utilisé dans le monde entier pour l'ajustement du spectre de dimensionnement pour différents taux d'amortissement. Il est à noter que le travail pionnier de Newmark et Hall a été basé sur seulement 28 enregistrements sismiques à partir de 9 tremblements de terre avant 1973 et que la majorité des modèles existants ont basé sur leur travail. Un examen des formulations de DCF a été fourni par Bozorgnia et Campbell (2004) et Naeim et Kircher (2001). Des évaluations des modèles existants et les lignes directrices du code du bâtiment sont présentés dans Stafford et al (2008), Cameron et Green (2007), Bommer et Mendis (2005), Lin et al (2005), Bozorgnia et Campbell (2004), et Naeim Kircher (2001), ces travaux fournissent un historique des lignes directrices pour les DCF dans les codes sismiques aux Etats-Unis.

Jusqu'à présent, plusieurs expressions de DCF ont été proposées et ont ensuite été adoptées, sous une forme quelque peu différente, dans divers codes sismiques. La plupart des DCF actuellement utilisés ont été dérivés à partir de l'observation des effets d'amortissement visqueux sur la réponse de déplacement maximal des systèmes de SDOF élastiques soumis à des tremblements de terre, soit artificiels ou naturels.

Les facteurs de correction d'amortissement ont été introduits pour obtenir une estimation approximative des spectres de réponses élastiques pour des valeurs de  $\xi$  supérieur à 5% à partir des spectres conçus pour des  $\xi = 5\%$ , en utilisant l'équation suivante:

$$DCF = \frac{SD(\xi, T)}{SD(5\%, T)} = \frac{PSA(\xi, T)}{PSA(5\%, T)} \quad (2.1)$$

Dans laquelle  $SD(\xi, T)$  et  $PSA(\xi, T)$  sont le déplacement spectral et la pseudo-accélération spectrale pour un coefficient d'amortissement  $\xi$ , alors que  $SD(5\%, T)$  et  $PSA(5\%, T)$  sont le déplacement spectral et la pseudo-accélération spectrale pour un coefficient d'amortissement  $\xi=5\%$ .  $T$  est la période naturelle de vibration du système SDOF. La même valeur de DCF est utilisée pour les spectres de réponse de déplacement et de pseudo-accélération, car ils sont mutuellement liés par la relation approximative bien connue

$$PSA = \omega^2 \times SD \quad (2.2)$$

$\omega$  étant la fréquence naturelle circulaire de vibration du système SDOF.

Le DCF a été étudié par de nombreux chercheurs et différentes expressions de DCF ont été proposées. Une des premières formulations du DCF est proposée par Newmark et Hall [1973,1982], cette formule constituée de trois relations tenant respectivement les régions de la vitesse constante, l'accélération constante et de déplacement constant du spectre. Leurs résultats ont inspiré de nombreux codes et normes sismiques. Les expressions proposées sont exprimées comme suit:

$$DCF = \begin{cases} 1.514 - 0.321 \times \ln(\xi) & \text{pour zone d'accélération constante} \\ 1.400 - 0.248 \times \ln(\xi) & \text{pour zone de vitesse constante} \\ 1.309 - 0.194 \times \ln(\xi) & \text{pour zone de déplacement constant} \end{cases} \quad (2.3)$$

Elles ont été obtenues à partir des estimations médianes de la réponse de déplacement maximal des systèmes de SDOF avec des taux d'amortissement inférieur à 20%. Dans l'ATC-40 et la FEMA-

273, le procédé approximatif par Newmark et Hall (1973) est en outre simplifié en négligeant la relation valable dans la région constante de déplacement du spectre. Dans la FEMA-273, en outre, les valeurs les plus conservatrices sont adoptées pour des taux d'amortissement égaux ou supérieurs à 30%. Dans l'UBC-97 et IBC 2000. Enfin, les relations de Newmark- Hall sont réduites à une seule valeur de DCF, correspondant à celle adoptée par la FEMA-273 dans la région à vitesse constante du spectre.

Le facteur de correction d'amortissement proposée par Ashour (1987) est exprimé comme suit:

$$DCF = \sqrt{\frac{0.05 \times (1 - e^{-\alpha \times \xi})}{\xi \times (1 - e^{-0.05 \times \alpha})}} \quad (2.4)$$

où  $\alpha$  est un coefficient allant de 18 à 65, selon les caractéristiques sismiques. Ces résultats ont été adoptés dans les UBC-94 et NEHRP-94 pour la conception de bâtiments avec systèmes de dissipation d'énergie passive.

Un autre travail de pionnier est l'étude réalisée par Wu et Hanson (1989), ils ont présenté un ensemble de DCF à partir d'une étude statistique des spectres de réponse inélastique avec des ratios d'amortissement élevé. Dix enregistrements sismiques ont été utilisés comme mouvements au sol pour les systèmes élastoplastiques SDOF avec des rapports d'amortissement entre 10 et 50%. Les résultats du travail de Wu et Hanson ont été adoptés à UBC (ICBO 1994) et NEHRP (1994). En outre, ils ont proposé l'expression suivante de DCF:

$$DCF = \frac{\lambda(\xi, T)}{\lambda(5\%, T)} \quad (2.5)$$

Dans lequel:  $\lambda(\xi, T)$  est représenté par une relation logarithmique :

$$\begin{aligned} \lambda &= -0.349 \times \ln(0.095 \times \xi) & \text{for } T= 0.1\text{s} \\ \lambda &= -0.547 \times \ln(0.417 \times \xi) & \text{for } T= 0.5\text{s} \\ \lambda &= -0.471 \times \ln(0.524 \times \xi) & \text{for } 0.5 < T < 3\text{s} \\ \lambda &= -0.478 \times \ln(0.475 \times \xi) & \text{for } T= 3\text{s} \\ \lambda &= -0.291 \times \ln(0.0473 \times \xi) & \text{for } T= 10\text{s} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Dans le document de EC8 (2004), Bommer et Elnashai (2000) ont proposé une formule simple pour remplacer la formulation antérieure (Eq. 2.8) Version normale du code (EC8, 1994)

$$DCF = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (2.7)$$

$$DCF = \sqrt{\frac{7}{5 + \xi}} \quad (2.8)$$

Plus tard, Priestley a proposé une version modifiée de la formule EC8, pour tenir compte des effets des séismes proches :

$$DCF = \sqrt[4]{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (2.9)$$

Une variante des expressions précédentes a été proposée par Tolis et Faccioli (1999), sur la base de l'examen des spectres de réponse de déplacement dérivés des enregistrements sismiques du tremblement de terre de Kobe en 1995:

$$DCF = \sqrt{\frac{15}{10 + \xi}} \quad (2.10)$$

L'expression proposée par Kawashima et Aizawa (1986) a été adoptée dans les Spécifications standards du Département de transport de Californie pour la conception sismique des ponts (Caltrans 2006) :

$$DCF = \frac{1.5}{0.4 \times \xi + 1} + 0.5 \quad (2.11)$$

Les expressions proposées par Zhou et al (2003) ont été adoptées dans le code chinois pour la conception sismique des bâtiments :

$$DCF = 1 + \frac{0.5 - \xi}{0.06 + 1.4 \times \xi} \quad (2.12)$$

Le code japonais de conception sismique a adopté l'expression proposée par Otani et Kanai (2002):

$$DCF = \frac{1.5}{1 + 10 \times \xi} \quad (2.13)$$

Les études menées par Ramirez et al (2002) ont conduit à des valeurs numériques du facteur de correction d'amortissement entre ceux suggérés par Ashour et Wu-Hanson,  $T = 0,1$  s.

Lin et al (2005) et Lin (2007), ont réalisé une série d'études sur le DCF. Ces études ont été axées sur la différenciation de l'effet d'amortissement sur les spectres en déplacements et en accélération, dans ces études, l'effet du site sur les valeurs de DCF a été également étudié. Dans une étude antérieure de Lin et Chang (2003), une analyse statistique des valeurs de DCF compte tenu des

effets des conditions du site, a été effectuée en utilisant 1037 mouvements de sol enregistrés sur trois classes différentes de sites (roches, sols très denses et raides). Les expressions obtenues à partir d'une analyse de régression non linéaire utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt sont présentées afin d'estimer la DCF dérivée des réponses en déplacement et en accélération. La formule proposée peut s'écrire:

$$DCF = 1 + \frac{\alpha T^{0.80}}{(T+1)^{0.65}} \quad (2.14)$$

Où  $\alpha = 1.303 + 0.436 \ln(\xi)$

Cardone et al (2008) ont examiné la précision des principales formulations de DCF incluses dans les codes de conception réels, soulignant que, pour les séismes uniques, les formulations actuelles peuvent être considérées comme raisonnablement exactes seulement pour des ratios d'amortissement inférieurs à 10%. Pour les spectres de réponse représentant des groupes de tremblements de terre, la précision de l'estimation dépend fortement de la formulation du facteur de correction d'amortissement sélectionnée et de la période considérée.

Hatzigeorgiou (2010) a proposé une nouvelle méthode d'évaluation de DCF prenant en compte l'influence des conditions du sol et du type de mouvement du sol (utilisation d'accélérogrammes naturels ou artificiels, tremblements de terre proches ou lointains), outre le rapport d'amortissement visqueux et la période de vibration:

$$DCF(\xi, T) = 1 + (\xi - 5) \cdot \left[ 1 + c_1 \cdot \ln(\xi) + c_2 \cdot (\ln(\xi))^2 \right] \cdot \left[ c_3 + c_4 \cdot \ln(T) + c_5 \cdot (\ln(T))^2 \right] \quad (2.15)$$

Les valeurs des coefficients  $c_i$  sont données en référence [Hatzigeorgiou (2010)] en fonction du type de sol et du type de mouvement sismique.

Récemment, Palermo et al (2016) ont présenté dans leur étude des formulations du DCF basées sur les fonctions de densité spectrale de puissance, les DCF sont dérivées et comparées aux principales formules disponibles dans la littérature scientifique. Le mouvement du sol de surface est modélisé avec la densité spectrale de puissance de Kanai-Tajimi, c'est-à-dire comme un "bruit blanc idéal" au niveau du substrat rocheux filtré à travers le dépôt de sol. Enfin, des formules simples pour l'estimation du DCF pour le rapport entre la période prédominante au sol et la période fondamentale de la structure ont été proposées:

$$DCF = \left( \frac{10}{5 + \xi} \right)^\chi \quad (2.16)$$

Où  $\chi$  est une constante dépendant du rapport  $k$ . Par exemple, les courbes proposées pour DCF pour 13 valeurs de  $\chi$  de 0,2 à 0,8 sont présentées dans son travail.

## 2.3 Facteurs influençant le facteur de correction d'amortissement

La réduction des ordonnées spectrales en raison de l'amortissement est influencée par divers facteurs. Dans cette section, un état de l'examen de l'art sur les principaux paramètres qui ont affecté le DCF est rapporté.

### 2.3.1 La période de vibration

En raison des propriétés spécifiques des spectres de réponse élastique, pour un oscillateur infiniment raide, la période est nulle et le déplacement relatif de la masse par rapport au sol est nul. La valeur de la pseudo-accélération lue sur le spectre pour  $T = 0$  est donc égale à la valeur maximale de l'accélération absolue du sol (PGA). Pour un oscillateur infiniment souple, au contraire, la période  $T$  est infinie et la masse ne se déplace pas dans le repère absolu. Le spectre de déplacement a donc pour valeur asymptotique la valeur maximale du déplacement absolu du sol.

Par conséquent, il est attendu que dans la plage de périodes très courtes et très longues le DCF a une valeur qui tende vers l'unité. Au contraire, l'influence la plus importante d'amortissement est dans l'intervalle de période intermédiaire.

Plusieurs études, par exemple [Bommer et Mendis (2005)] rapportent que pour des périodes allant de 1 à environ 3 secondes, le DCF varie légèrement. Cameron et Green (2007) ont estimé que pour les sites rocheux, une magnitude de l'ordre de 5 à 6 et une période de vibration égale à 0.5 secondes, la valeur moyenne du DCF est égale à 0.961 et 0.808 pour  $\xi = 7\%$  et  $30\%$ , respectivement, alors qu'elle est égale à 0.935 et 0.643 pour une période de 1,5 s. Cette constatation indique que pour les petites et moyennes magnitudes, l'influence de la période sur le DCF devrait être prise en compte, au moins pour les valeurs d'amortissements élevées. Pour les plus grandes magnitudes, l'effet de la période est moins marqué en particulier dans la gamme de la période intermédiaire [Mollaioli et al (2014)]

### 2.3.2 La Magnitude, la durée et la distance épacentrale

La forte influence de la magnitude sur le DCF a été reconnue par différents chercheurs. En général, l'effet d'amortissement est plus prononcé pour les grands tremblements de terre [Bommer et Mendis (2005)]. Toutefois, cette tendance est bien définie que pour les périodes supérieures à 0,5 s, tandis que pour des périodes plus courtes le contraire peut se produire [Cameron et Green (2007)]. Une corrélation indirecte entre le DCF, la magnitude et la distance focale est donnée par l'équation suivante proposée par Rosenblueth (1980):

$$DCF(\xi, T, D) = \frac{(1 + 4.93\xi \frac{D}{T})^{-0.41}}{(1 + 4.93 \times 0.05 \frac{D}{T})^{-0.41}} \quad (2.17)$$

Où D est la durée en secondes estimée en fonction de la magnitude et de la distance focale.

Plus récemment Bommer et Mendis (2005) ont observé que l'influence de la magnitude et de la distance peut être prise en compte par la considération de l'effet de la durée (ou du nombre de cycles). Ce basant sur des observations Stafford et al (2008), ont développé le modèle suivant pour évaluer le DCF dans la gamme des périodes 1,5-3,0 s en fonction de la durée ou le nombre de cycles: [Mollaioli et al (2014)]

$$DCF(\xi, \chi) = 1 - \frac{\beta_1 + \beta_2 \ln(\xi) + \beta_3 \ln(\xi)^2}{1 + \exp\left[-\frac{\ln(\chi) + \beta_4}{\beta_5}\right]} \quad (2.18)$$

La variable  $\chi$  est la durée significative ou le nombre de cycles, et  $\beta_i$  sont des coefficients dépendant de la variable de prédiction utilisée.

Comme observé par Stafford et al (2008), la durée de mouvement (ou le nombre de cycles) est un paramètre important qui affecte le DCF. Toutefois, l'inclusion directe de la durée dans un modèle de prédiction n'est pas pratique parce la durée n'est généralement pas spécifiée dans la conception sismique. Il semble donc plus commode à saisir l'effet de la durée implicitement, par l'utilisation d'autres variables prédictives telles que la magnitude et la distance [Rezaeian et al (2010)].

### 2.3.3 Les conditions du site

Selon Hatzigeorgiou (2010), les valeurs du DCF pour les types de sol B, C et D (correspondant à très dense, raide et sol mou, respectivement, en conformité avec le système de classification de site USGS) sont très similaires, avec une différence remarquable pour le sol rocheux. Plus précisément,

dans l'intervalle des courtes périodes, la valeur du DCF pour le sol rocheux est plus faible par rapport à celle observée pour les autres types de sol, en grande périodes, la tendance est inversée. Différents résultats ont été obtenus par Lin et Chang (2004). En utilisant une base de données de 1037 accélérogrammes classée conformément à NEHRP [FEMA (2000)] pour les conditions du sol, ils ont constaté que le DCF pour le site des classes AB (sol rocheux) et D (sol raide) sont très similaires, tandis que les valeurs du DCF pour le site classe C (sol très dense) sont généralement un peu plus élevées. Une dépendance négligeable sur les conditions du site a été trouvée par Rezaeian et al (2010) pour  $T = 1$  s. Les différences entre les résultats des études mentionnées peuvent être probablement expliquées par les différentes classifications de sites et les différents critères utilisés pour la sélection des enregistrements sismiques. Enfin, sur la base des valeurs de DCF rapportées dans Lin et Chang (2004), il semble que l'effet des conditions du site est moins important que celle de la magnitude et la période de vibration lorsque le DCF est calculé pour les spectres déplacement [Mollaioli et al(2014)].

#### **2.3.4 La distance épacentrale**

Récemment, Hatzigeorgiou (2010) a concentrée son travail sur le DCF pour les systèmes SDOF soumis aux séismes proches. L'équation de prédiction pour le DCF dans les régions des séismes proches proposés dans Hatzigeorgiou (2010) est dérivée d'une base de données de 110 accélérogrammes avec des distances épacentrales inférieure ou égale à 10 km enregistrées lors des séismes de magnitude comprise entre 5,5 et 7,8. Dans une telle équation, le DCF est défini comme une fonction à la fois du taux d'amortissement et de la période de vibration. Pour les coefficients de l'équation, différents ensembles de valeurs correspondant à différents types de sol sont signalés.

### **2.4 Sélection des enregistrements sismiques pour le calcul du DCF**

La section 3.2.3.1.2 de l'EC8 permet l'utilisation de toute forme d'accélérogrammes pour le calcul de structures. Pour se conformer à l'EC 8, l'ensemble des accélérogrammes, quel que soit son type (enregistrés, simulés ou artificiels), doit essentiellement répondre aux critères suivants:

- a) Il convient d'utiliser un minimum de 3 accélérogrammes.
- b) Il convient que la moyenne des valeurs de l'accélération spectrale à période nulle (calculée à partir des accélérogrammes) ne soit pas inférieure à la valeur de  $a_{gs}$  pour le site en question.
- c) Dans le domaine des périodes comprises entre  $0,2 T_1$  et  $2 T_1$ , où  $T_1$  est la période fondamentale



de la structure dans la direction suivant laquelle l'accélérogramme va être appliqué, il convient qu'aucune valeur du spectre de réponse élastique moyen avec 5 % d'amortissement, calculé à partir de tous les accélérogrammes, ne soit inférieure à 90 % de la valeur correspondante du spectre de réponse élastique avec 5 % d'amortissement.

Dans la section 4.3.3.4.3, si la réponse est obtenue à partir d'au moins 7 analyses chronologiques non linéaires avec des mouvements du sol conformément à **3.2.3.1**, il convient d'utiliser la moyenne des valeurs obtenues par toutes ces analyses comme la valeur de calcul de l'effet des actions. Dans le cas contraire, il convient d'utiliser la valeur la plus défavorable des valeurs de la réponse parmi les analyses effectuées.

En guise de conclusion générale, il a été constaté que les dispositions ne permettent pas de sélectionner facilement des enregistrements réels appropriés, favorisant les faits d'utilisation des accélérogrammes obtenus soit par des techniques informatiques ou la manipulation d'enregistrements réels à avoir une forme qui coïncide avec celui du spectre de référence, dans une large gamme de périodes. Cela est dû principalement [Iervolino et al (2010)] qui il est presque impossible pour les praticiens de rechercher dans les grandes bases de données pour trouver des suites de sept records réels (éventuellement multi-composants) dont leurs moyennes correspondent étroitement au spectre de référence sans l'utilisation de logiciel spécifique.

## **2.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, un état de l'art sur les coefficients de correction d'amortissement a été présenté. Une discussion sur les différentes formulations qui existent sur la littérature avec différents paramètres dont ils dépendent. Les paramètres qu'influence le DCF sont aussi discutés. A la fin, une description de critères de sélection des enregistrements sismiques pour une étude dynamique temporelle donnée a été présentée. Ces critères seront utilisés par la suite pour la sélection des enregistrements sismiques pour le calcul des valeurs du DCF.

## **Chapitre 3**

# **Développement d'une formulation du DCF pour le RPA**

# Développement d'une formulation du DCF pour le RPA

---

### 3.1 Introduction

Le spectre de réponse est l'un des concepts les plus utilisés dans l'analyse des structures sous excitations sismiques. Il caractérise les effets du séisme sur les structures et est généralement représenté dans les codes de calculs sismiques sous la forme de spectre de réponse en accélération pour un taux d'amortissement critique  $\xi$  égal à 5 %. Cependant, en pratique, les structures civiles peuvent avoir des valeurs d'amortissement plus grandes que 5 %. Dans ce cas, les spectres de réponse à 5 % d'amortissement doivent être ajustés aux niveaux de l'amortissement requis.

Jusqu'à présent, plusieurs expressions du facteur de correction d'amortissement ont été proposées et ont été ensuite adoptées, sous des formes quelque peu différentes, dans divers codes sismiques. La plupart des facteurs de correction d'amortissement actuellement utilisés ont été dérivés de l'observation des effets de l'amortissement sur la réponse maximale de systèmes SDOF élastiques soumis à des mouvements sismiques à la base.

L'objectif de la présente partie de thèse est le développement d'une formulation du DCF pour le cas spécifique du code parasismique algérien. Ce code utilise actuellement l'ancienne formule de l'EC8 (1994) qui a été remplacée en EC8 (2004) par la formule proposée par Bommer et al (2000).

### 3.2 Sélection des enregistrements sismiques

Dans les règlements parasismiques, l'action sismique est définie d'après le spectre de réponse élastique en accélération. Dans les parties applicables aux structures, les formes spectrales, données pour les composantes horizontales et verticales, dépendent de la classe du sol, d'une valeur unique  $A$  reliant le spectre à la sismicité du site. La valeur  $A$  est reliée au hasard sismique du site en termes de valeur maximale de l'accélération sismique (PGA). Une fois le spectre défini, les codes permettent l'utilisation de n'importe quelle forme d'accélérogramme pour le calcul de la réponse

sismique d'une structure à savoir : réel, artificiel ou obtenu par simulation intégrant les caractéristiques de la source sismique, la propagation et des effets de site.

Les règlements parasismiques offrent la possibilité de considérer des effets moyens sur les structures plutôt que les maximas si au moins 7 analyses nonlinéaires sont effectuées. Pour les accélérogrammes réels ou simulés : ils doivent être conformes aux propriétés sismogénétiques de source et de conditions de sol au site donné.

Il y a des difficultés à utiliser des accélérogrammes réels et cela est dû à la difficulté de lier de manière rationnelle les mouvements sismiques au hasard du site et aux critères de sélection ; ce qui ne favorise pas l'utilisation d'accélérogrammes réels mais plutôt divers types de signaux compatibles à des spectres donnés. Pour surmonter ces obstacles, nous utiliserons, pour la sélection des enregistrements réels, un outil informatique (que l'on désignera par "PGMD-Tool") qui a été développé par le Pacific Earthquake Engineering Research Centre et qui est disponible gratuitement sur le Net.

Pour se conformer aux critères édictés ci-dessus pour la sélection des accélérogrammes, les ensembles d'enregistrements sismiques réels sélectionnés seront composés chacun de 7 accélérogrammes de sorte à pouvoir utiliser les moyennes des valeurs obtenues des spectres de réponse pour l'estimation des valeurs de DCF.

### **3.2.1 Description de base de données des enregistrements sismiques PGMD**

L'une des questions clés de l'analyse dynamique non linéaire des structures est la sélection des enregistrements sismiques appropriés. Des études montrent comment la plupart des praticiens peuvent éprouver des difficultés pour la sélection d'enregistrements pour une étude donnée, laquelle exige toujours des compétences sismologiques au-delà de leurs études. En outre, si on est concernés par les séismes réels, pour sélectionner une suite de séismes correspondants à un spectre de conception donné, cela peut être difficile ou pratiquement impossible si des outils appropriés ne sont pas disponibles [Iervolino et al (2010-b)]. Ces questions favorisent traditionnellement l'utilisation d'accélérogrammes associés aux spectres, soit artificiels ou obtenus par la manipulation des enregistrements réels. D'autre part, les séismes réels sont la meilleure représentation de l'action sismique pour l'évaluation et la conception des structures. Plusieurs bases de données pour les enregistrements sismiques sont disponibles sur internet, on peut citer parmi celles-ci, la base Européenne, la base Californienne, et la base japonaise qui peuvent être consultées en ligne sur les

sites Internet suivants : [www.isesd.hi.is](http://www.isesd.hi.is), [www.quake.ca.gov](http://www.quake.ca.gov), [ngawest2.berkeley.edu](http://ngawest2.berkeley.edu) et [www.kik.bosai.go.jp](http://www.kik.bosai.go.jp) .

Parmi ces bases de données des enregistrements sismiques, la base de PGMD (Peer Ground Motions Database) est l'une des bases les plus grandes et les plus utilisées dans les travaux de recherche [(Cardone et al (2008), Hatzigeorgiou et al (2010), Mollaioli et al (2014)]. Cette base a été utilisée dans cette partie de la thèse pour la sélection des enregistrements sismiques.

NGA-West2 est un programme de recherche soutenu par le Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER) de mettre à jour l'édition de 2008. Une nouvelle base de données de plus de 8000 enregistrements à trois composants pour plus de 300 tremblements de terre dans le monde entier avec différents niveaux de magnitudes a été développée pour le projet NGA- West2 (voir Ancheta et al (2012a et 2012b), et Bozorgnia et al (2012). Dans la base de données NGA- West2, les enregistrements sismiques relatifs à de nombreux événements depuis 2003 ont été ajoutés ; Ainsi, la nouvelle base de données est plus fournie que celle dans NGA par un facteur de près de 2,2. [Rezaeian et al (2014).

PGMD présente une application sur internet qui permet à l'utilisateur de sélectionner des suites d'enregistrements sismiques compatibles à un spectre de réponse donné. L'utilisateur spécifie le spectre de réponse cible et les caractéristiques souhaitées des enregistrements sismiques en termes de magnitude, distance épacentrale, vitesse des ondes sismiques  $V_{s30}$  et d'autres caractéristiques générales, l'application permet alors de sélectionner les enregistrements sismiques qui satisfont aux critères de sélection définis par l'utilisateur et fournissent le meilleur ajustement au spectre de réponse cible. Dans la suite du travail, nous désignons par PGMD-tool cette application.

Un critère de base utilisé par le PGMD-tool pour sélectionner une suite représentative d'accélération sismiques du sol est que les spectres de ces accélérations fournissent un bon ajustement au spectre cible de l'utilisateur sur la plage de périodes d'intérêt définie par l'utilisateur. La mesure quantitative utilisée pour évaluer dans quelle mesure cette suite d'enregistrements sismiques est conforme au spectre de cible est l'erreur quadratique moyenne (MSE) de la différence entre les accélérations spectrales de l'enregistrement et du spectre cible, calculée en utilisant les logarithmes de période spectrale et l'accélération spectrale. Le PGMD-tool recherche dans la base de données les enregistrements sismiques qui satisfont aux critères d'acceptations générales fournies par l'utilisateur, puis classe les enregistrements sismiques en ordre croissant des valeurs

de la MSE. Les meilleurs enregistrements correspondent bien entendu aux valeurs de la MSE les plus basses.

Contrôler ce paramètre permet de choisir des combinaisons caractérisées par des enregistrements ayant des spectres individuels relativement proche du spectre cible, et donc étant étroitement distribués autour de ce spectre cible. Le critère de valeur MSE minimale pour tous les enregistrements permet d'obtenir à partir de ces derniers un spectre moyen qui a la tendance d'être aussi proche que possible du spectre cible.

### **3.2.2 Présentation des enregistrements sélectionnés par catégorie de sol**

La recherche de suites d'enregistrements sismiques pour une gamme variée d'applications structurelles constitue un problème complexe compte tenu de l'insuffisance de données appropriées au spectre choisi (cible) et du nombre important des critères de sélection des séismes (Magnitude, distance péricentrale, durée, PGA...). Les interfaces utilisées pour la procédure de sélection d'enregistrements sismiques présentées par le PGMD-tool sont prescrites par les figures 3.1 et 3.2. Des suites de sept enregistrements sismiques qui présentent des spectres moyens aussi près que possible des spectres associés aux quatre classes de site des Règles Parasismiques Algériennes (RPA 99 V2003) sont présentées dans les tableaux 3.1 à 3.4.

Sur la base de chacun des spectres de réponse cible associé à chaque classe de sol du RPA. PGMD-tool sélectionne les enregistrements sismiques à partir de la base de données interne d'enregistrements sismiques qui répondent le mieux aux critères de sélection spécifiés par l'utilisateur et fournit les meilleurs ajustements au spectre de réponse cible. La sélection est basée sur la vitesse des ondes de cisaillement  $V_{S30}$  qui est le seul paramètre pour la classification des sols dans le RPA. Les ensembles d'enregistrements sélectionnés n'appartiennent pas au même événement. Néanmoins, trois enregistrements au maximum appartiennent au même événement sismique éventuellement.

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

[HOME](#)    [DOCUMENTATION](#)    [HELP](#)    [FEEDBACK](#)    [PEER](#)  
[BENAHMED.TP@GMAIL.COM](mailto:BENAHMED.TP@GMAIL.COM)    [SIGN\\_OUT](#)

Search was successfully created. Please allow time to render the graphics.

### 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) :  RSN1,...,RSNn

Event Name :

Station Name :

**Search Parameters:**

Fault Type :

Magnitude :  min,max

R\_JB(km) :  min,max

R\_rup(km) :  min,max

Vs30(m/s) :  min,max

D5-95(sec) :  min,max

Pulse :

**Additional Characteristics:**

Max No. Records :  (<=100)

Initial ScaleFactor :  min,max

Suite

Spectral Ordinate :

Damping Ratio :

Suite Average :

Scaling

Scaling Method :

**Figure 3.1:** Interface du PGMD-tool pour la sélection des enregistrements sismiques

Une liste complète des enregistrements sélectionnés pour chaque classe de sol avec leurs caractéristiques est présentée dans les tableaux 3.1 à 3.4. Les spectres de réponse des enregistrements sélectionnés sont représentés dans les figures 3.3 à 3.6, avec leurs spectres de réponse moyens et cibles respectifs.

Search Results – Response Spectra

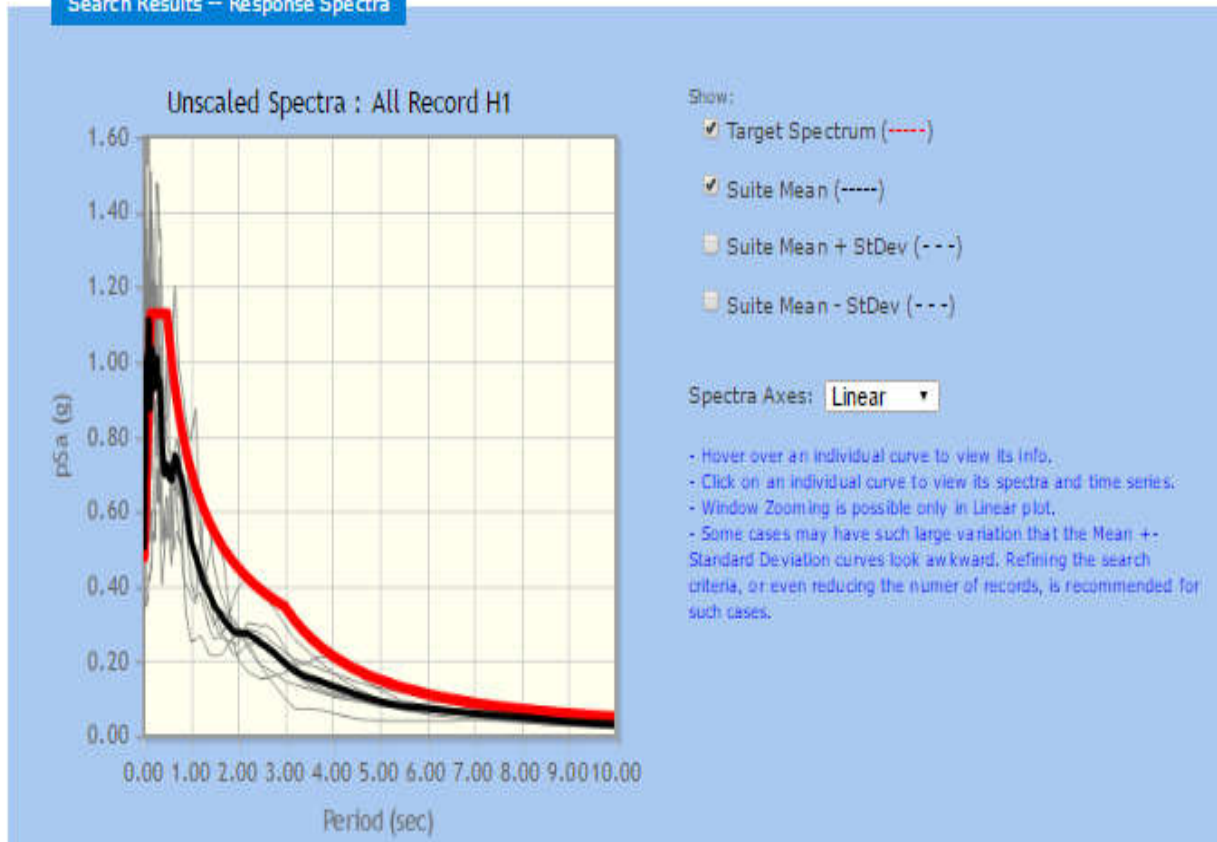


Figure 3.2: Présentation des enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool.

Result ID	Comp .	Record Seq. #	MSE	Event	Year	Station	Ma g	Mechanism	Vs30(m/s )
11	H2	3548	0,234 5	Loma Prieta	198 9	Los Gatos - Lexington Dam	6,93	Reverse Oblique	1070,34
12	H1	3548	0,326 3	Loma Prieta	198 9	Los Gatos - Lexington Dam	6,93	Reverse Oblique	1070,34
1	H1	879	0,366	Landers	199 2	Lucerne	7,28	strike slip	1369
2	H2	1165	0,516 8	Kocaeli, Turkey	199 9	Izmit	7,51	strike slip	811
1	H2	879	0,579 3	Landers	199 2	Lucerne	7,28	strike slip	1369
10	H1	1108	0,587 5	Kobe, Japan	199 5	Kobe University	6,9	strike slip	1043
16	H2	5618	0,750 3	Iwate, Japan	200 8	IWT010	6,9	Reverse	825,83

Tableau 3.1: Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S1



Result ID	Comp.	Record Seq. #	MSE	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Vs30(m/s)
67	H1	1504	0,0941	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU067	7,62	Reverse Oblique	433,63
71	H2	1511	0,1389	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU076	7,62	Reverse Oblique	614,98
75	H2	1517	0,1426	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU084	7,62	Reverse Oblique	665,2
25	H2	1633	0,1537	Manjil, Iran	1990	Abbar	7,37	strike slip	723,95
3	H2	828	0,1912	Cape Mendocino	1992	Petrolia	7,01	Reverse	422,17
4	H1	143	0,2512	Tabas, Iran	1978	Tabas	7,35	Reverse	766,77
7	H2	3746	0,2965	Cape Mendocino	1992	Centerville Beach, Naval Fac	7,01	Reverse	459,04

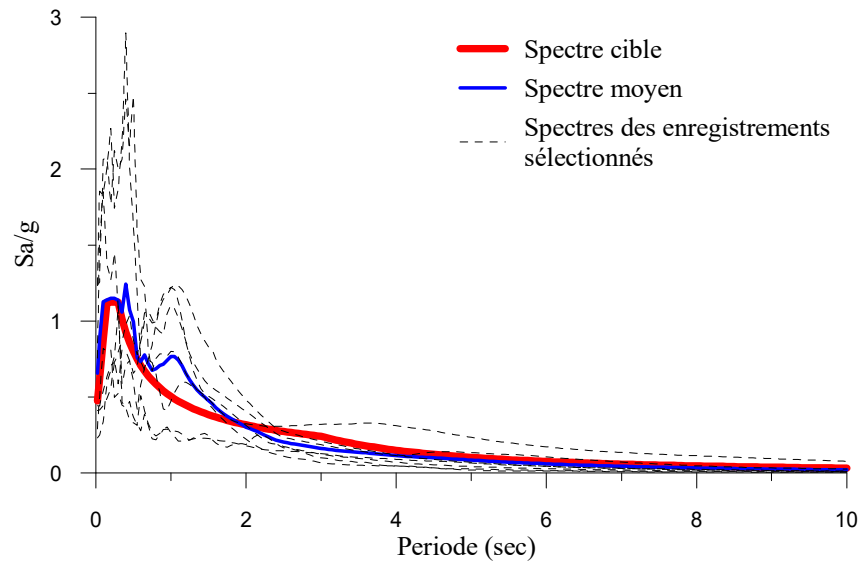
**Tableau 3.2:** Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S2

Result ID	Comp.	Record Seq. #	MSE	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Vs30(m/s)
86	H1	6911	0,0507	Darfield, New Zealand	2010	HORC	7	strike slip	326,01
44	H2	1605	0,0712	Duzce, Turkey	1999	Duzce	7,14	strike slip	281,86
38	H2	1503	0,0755	Chi-Chi, Taiwan	1999	TCU065	7,62	Reverse Oblique	305,85
79	H2	180	0,0892	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #5	6,53	strike slip	205,63
68	H1	5827	0,0974	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	MICHOACAN DE OCAMPO	7,2	strike slip	242,05
81	H2	182	0,103	Imperial Valley-06	1979	El Centro Array #7	6,53	strike slip	210,51
86	H2	6911	0,1179	Darfield, New Zealand	2010	HORC	7	strike slip	326,01

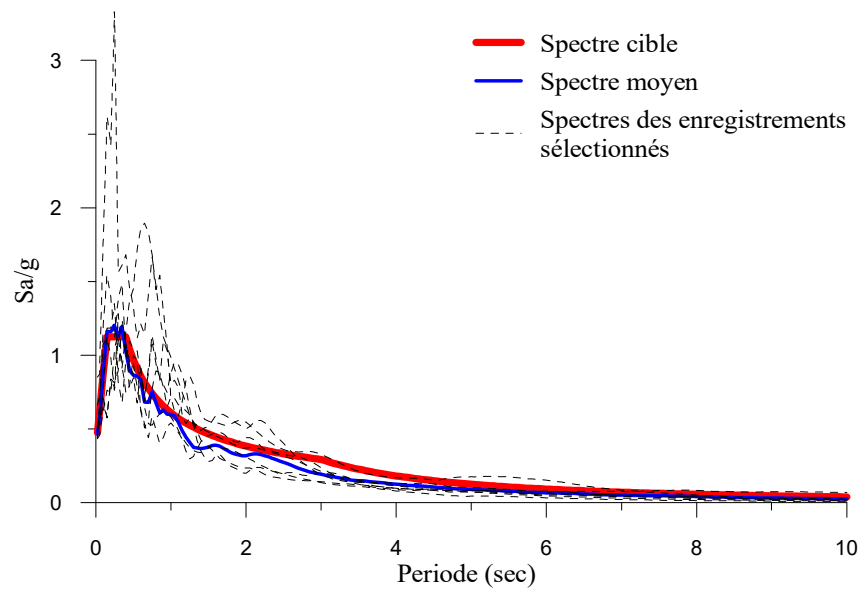
**Tableau 3.3:** Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S3

Result ID	Comp.	Record Seq. #	MSE	Event	Year	Station	Mag	Mechanism	Vs30(m/s)
84	H1	5264	0,1055	Chuetsu-oki, Japan	2007	NIG018	6,8	Reverse	198,26
100	H2	8123	0,1793	Christchurch, New Zealand	2011	Christchurch Resthaven	6,2	Reverse Oblique	141
97	H1	8063	0,1917	Christchurch, New Zealand	2011	Christchurch Botanical Gardens	6,2	Reverse Oblique	187
81	H2	5264	0,2558	Chuetsu-oki, Japan	2007	NIG018	6,8	Reverse	198,26
42	H2	5992	0,2952	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	El Centro Array #11	7,2	strike slip	196,25
47	H2	8161	0,2994	El Mayor-Cucapah, Mexico	2010	El Centro Array #12	7,2	strike slip	196,88
99	H2	8066	0,2984	Christchurch, New Zealand	2011	Christchurch Hospital	6,2	Reverse Oblique	194

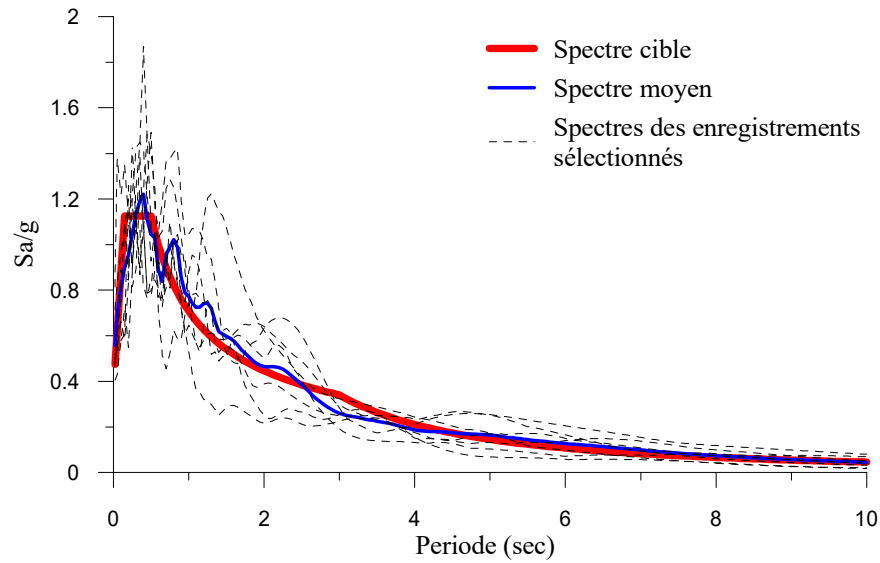
**Tableau 3.4:** Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S4



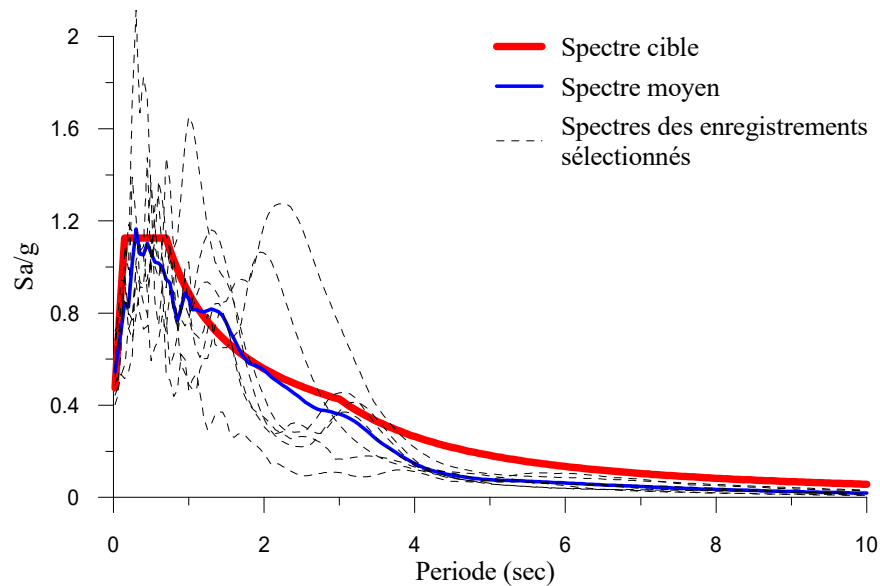
**Figure 3.3:** Spectres de réponse des enregistrements sismiques obtenus par PGMD pour le sol S1



**Figure 3.4:** Spectres de réponse des enregistrements sismiques obtenus par PGMD pour le sol S2



**Figure 3.5:** Spectres de réponse des enregistrements sismiques obtenus par PGMD pour le sol S3



**Figure 3.6:** Spectres de réponse des enregistrements sismiques obtenus par PGMD pour le sol S4

Des difficultés sont rencontrées lors du choix des enregistrements sismiques surtout pour le sol S4. Cela vient de la forme et des valeurs de réponses spectrales, (surtout le plateau des valeurs maximales de spectre qui est plus large pour le sol S4), qui sont plus grand que la majorité des séismes enregistrés sur de tels sols.

Les figures 3.3-3.6 montrent que les courbes des moyennes des spectres de réponse des enregistrements sélectionnés et les courbes des spectres de réponses cibles sont très proches, ce qui montre que les séismes sélectionnés présentent un bon ajustement aux spectres cibles. Les enregistrements sismiques sélectionnés dans cette étape seront utilisés pour l'estimation des valeurs du DCF en utilisant l'équation 2.1.

### 3.3 Appréciation de l'effet des sols sur les valeurs du DCF

La procédure utilisée précédemment pour le calcul des spectres de réponse moyen pour un taux d'amortissement  $\xi_1 = 5\%$  est maintenant utilisée pour chaque classe de sol  $S_i$  ( $i = 1$  à  $4$ ) afin de calculer une série de 9 autres spectres de réponse moyens associés respectivement à chacune des 9 autres valeurs du taux d'amortissement suivantes :  $\xi_2 = 6\%$ ,  $\xi_3 = 7.5\%$ ,  $\xi_4 = 8\%$ ,  $\xi_5 = 9\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$ ,  $\xi_7 = 12.5\%$ ,  $\xi_8 = 15\%$ ,  $\xi_9 = 17.5\%$  et  $\xi_{10} = 20\%$ .

Pour chacun des spectres de réponse moyens évalués ci-dessus, pour chaque classe de sol  $S_i$ , on calcule à l'aide de l'Eq. (2.1) les valeurs  $DCF^{S_i}(\xi_k, T)$  du facteur de correction d'amortissement pour chacune des valeurs  $\xi_k$  ( $k = 1$  à  $10$ ) sélectionnées. Les résultats obtenus sont représentés sur la Fig. 3.7 pour les valeurs  $\xi_3 = 7.5\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$ ,  $\xi_8 = 15\%$  et  $\xi_{10} = 20\%$ , respectivement.

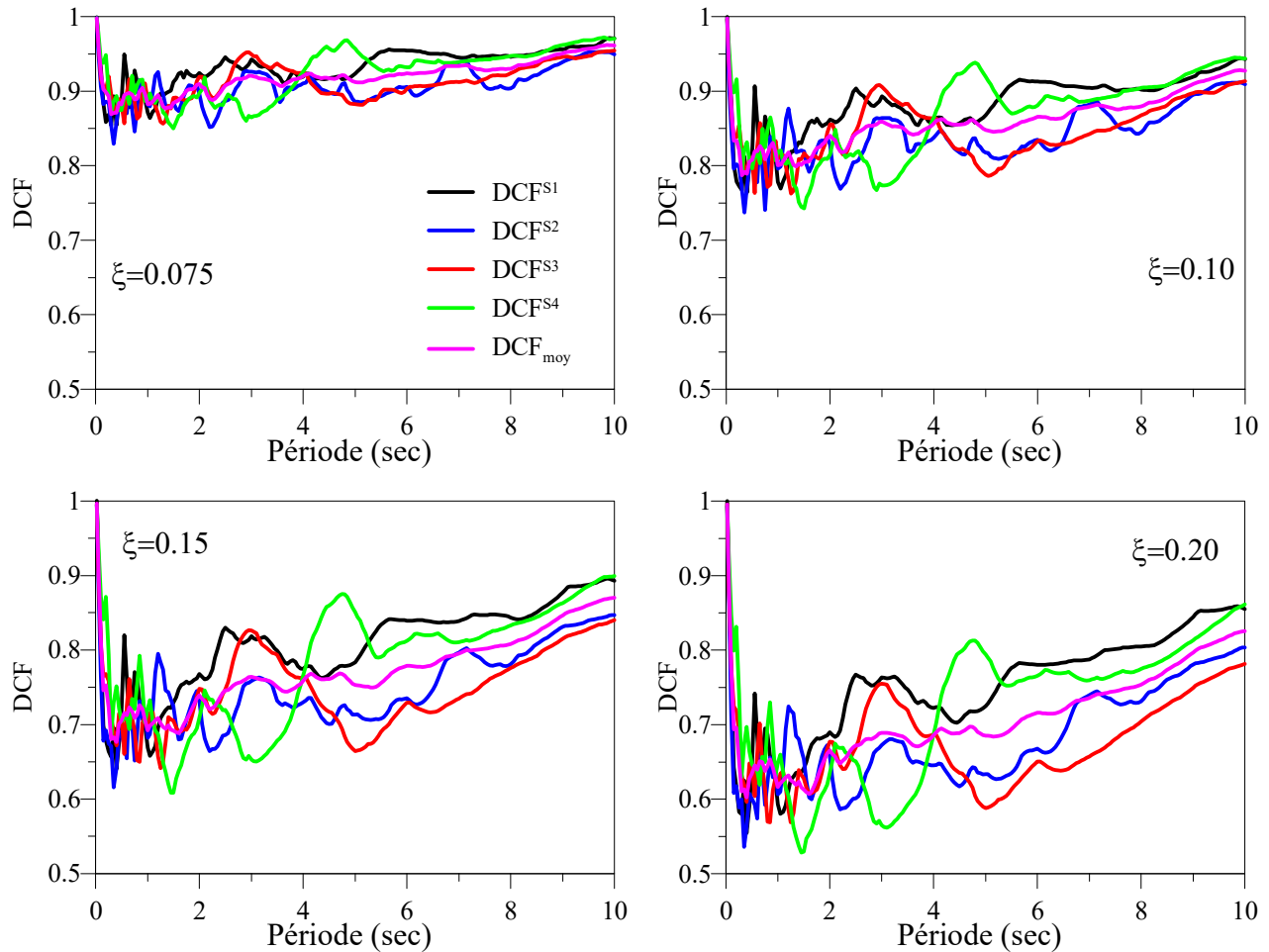
Aux fins d'apprécier les effets du sol, on a représenté sur la même figure (Fig.3.7) et pour chaque  $\xi_k$ , la courbe de variation respective, des valeurs moyennes  $DCF_{moy}(\xi_k, T)$  données par :

$$DCF_{moy}(\xi_k, T) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 DCF^{S_i}(\xi_k, T) \quad (3.1)$$

laquelle représente, pour chaque valeur de la période  $T$ , une valeur du DCF qui néglige l'effet des 4 classes de sols.

Il est clairement observé à partir de cette figure, que l'influence du type de sol sur le facteur de correction d'amortissement augmente lorsque la valeur du taux d'amortissement croît.

L'erreur maximale, en valeur absolue, entre les  $DCF_{moy}$  et les  $DCF^{S_i}$  estimés pour chaque site reste inférieure à 10% pour le taux d'amortissement critique  $\xi = 20\%$  et elle ne dépasse les 10 % que pour quelques valeurs de la période  $T$  seulement, ne pouvant rarement atteindre 19 % que pour le sol  $S_4$ . L'erreur maximale est de 14% pour les sites  $S_1$ ,  $S_2$  et  $S_3$ . La valeur moyenne de cette erreur pour l'ensemble des périodes de spectre n'excède pas 7 % quel que soit le type de sol considéré.

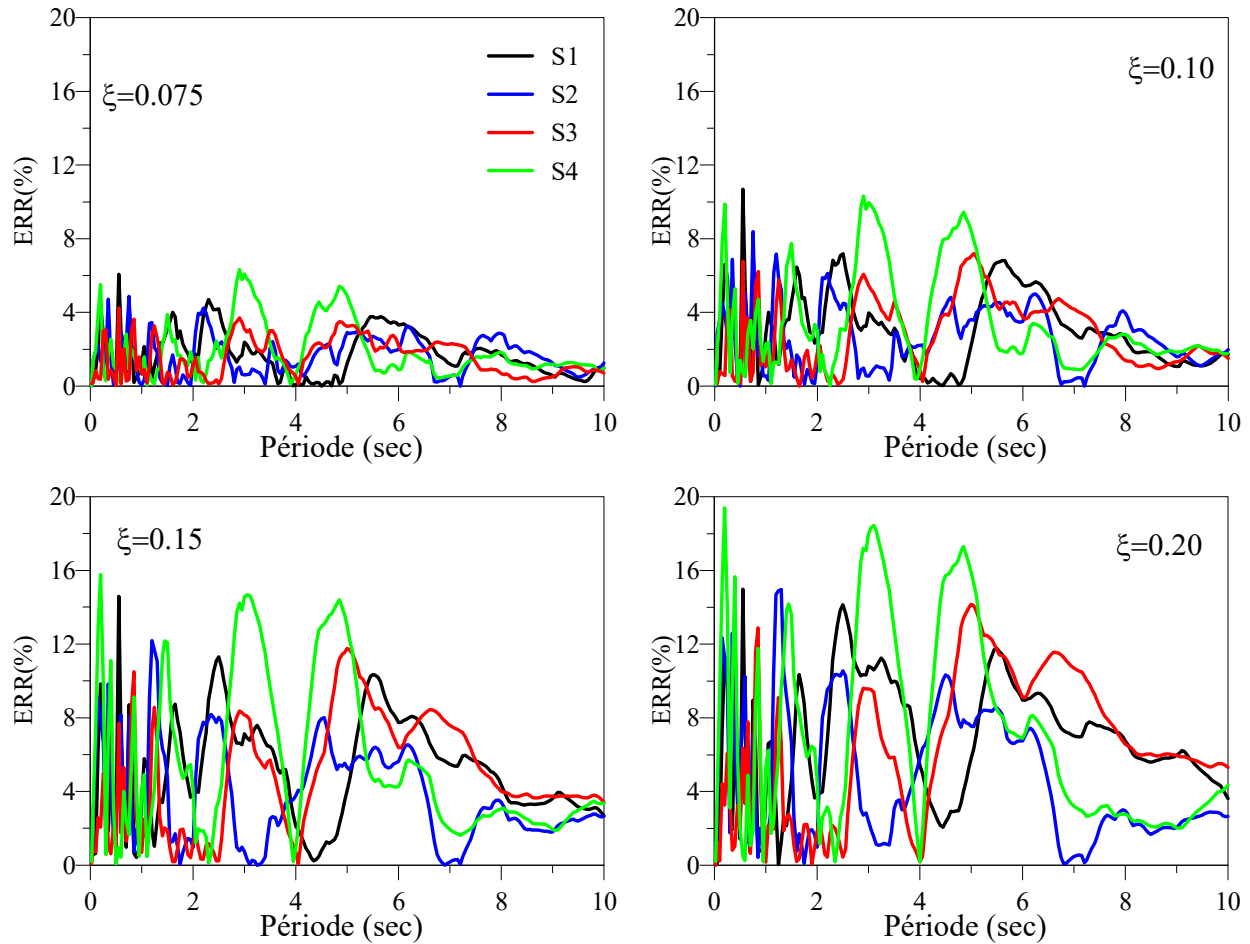


**Figure 3.7:** Les valeurs obtenues de DCF pour les quatre types de sol.

Ces résultats sont confirmés par les résultats trouvés sur la littérature. En effet, Lin et Chang (2004) ont constaté que le DCF pour le site des classes AB (sol rocheux) et D (sol raide) sont très similaires, tandis que les valeurs de DCF pour le site classe C (sol très dense) sont généralement un peu plus élevées. Une dépendance négligeable vis-à-vis des conditions du site a été trouvée par Rezaeian et al (2010) pour  $T = 1$  s.

Les différences entre les résultats des études mentionnées peuvent être probablement expliquées par les différentes classifications de sites et les différents critères utilisés pour la sélection des enregistrements sismiques. Enfin, sur la base des valeurs de DCF rapportées dans Lin et Chang (2004), il semble que l'effet des conditions du site soit moins important que celle de magnitude et de période de vibration lorsque le DCF est calculé pour les spectres en déplacement.

En plus de l'effet de site, une autre source d'erreur provient de la qualité des enregistrements sismiques sélectionnés pour chaque site en particulier pour le sol S4 dont la forme de spectre de réponse issue du RPA présente déjà des valeurs d'accélération élevées, ce qui a rendu la sélection de la série d'enregistrements réels et l'ajustement au spectre cible relativement difficile pour ce site. Cette erreur sera discutée en utilisant plus tard la formulation qui sera proposée pour le RPA.



**Figure 3.8:** Erreur entre les valeurs du DCF pour différents sols et le  $DCF_{moy}$

L'effet du sol sur les valeurs du DCF conduisant à des erreurs relativement faibles, il est recommandé d'utiliser les valeurs du  $DCF_{moy}$  pour le développement de la formulation du DCF pour le RPA. Il sera pratique de proposer une seule formule pour l'ensemble des sols (comme c'est le cas généralement dans les codes sismiques), au lieu de proposer une formulation pour chaque sol.

## 3.4 Formulation du DCF

### 3.4.1 Elaboration de la base de données pour l'évaluation du DCF

Sur la base de ce qui a été dit précédemment, nous allons utiliser les valeurs du  $DCF_{moy}$  pour la proposition d'une formulation pour le RPA, ces valeurs de  $DCF_{moy}$  calculées en considérant, sans distinction de classes de sol, les 28 accélérogrammes précédemment sélectionnés (7 pour chacune de 4 class de sol). C'est ainsi que pour chacune des 200 valeurs retenues de la période T dans l'intervalle [0.1-10 sec] en calculer 28 amplitudes spectrales pour chacun de 10 niveaux d'amortissement considérés compris entre 5 % et 20%. Soit 28 valeurs de DCF pour chaque période fondamentale T.

### 3.4.2 La formulation de DCF pour le RPA

Le logiciel Eureqa, parfois appelé le robot scientifique, a été développé au laboratoire de synthèse informatique à l'Université de Cornell par le Dr Hod Lipson [Schmidt et Lipson (2009)]. Il utilise une régression symbolique pour détecter des équations et des relations mathématiques cachées dans sa base de données interne [Dubčáková (2011)].

Les trois vecteurs dans lesquelles sont consignés les différentes valeurs de T,  $\xi$  et  $DCF_{moy}$  sont introduits comme données dans l'algorithme du logiciel Eureqa, lequel sélectionné un nombre donné de formulations parmi lesquelles on retient celle qui est la mieux ajustée (Goodness fit) et la mieux corrélée (corrélacion coefficient) par rapport aux valeurs d'entrée du  $DCF_{moy}$ . La figure 3.9 illustre l'interface du logiciel tel qu'elle a été conçu pour présenter les diverses formulations analytiques obtenues (cadran haut du côté gauche), et leurs détails respectifs calculés sur les données de validation (le coefficient de régression R, la moyenne de l'erreur absolue MAE et l'erreur maximale), ainsi que le tracé de la courbe type représentant la corrélation entre les valeurs prédites et les valeurs observées du  $DCF_{moy}$  (cadran haut du côté droite), de même que le graphe montrant la convergence de l'erreur en fonction de la taille de complexité (size of complexity) des formulations (solutions) proposées par le logiciel .

La formulation (solution) retenue sur la base de données de validation introduite par le présent cas d'étude est formulée comme suit :

$$DCF = 0.582 + 0.418 \times (12.279 - T)^{(-3.9 \times (\xi - 0.05))} \quad (3.2)$$

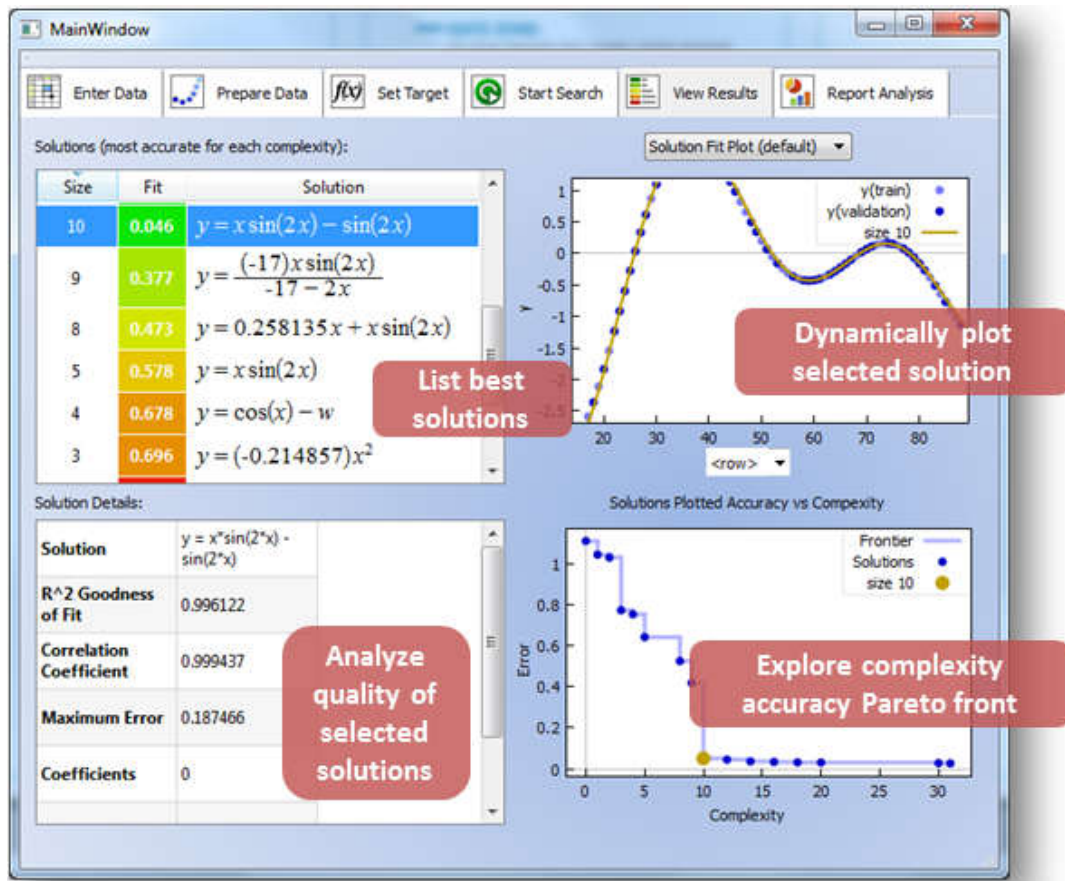


Figure 3.9: Interface présentant les critères de sélection des formules de logiciel Eureka

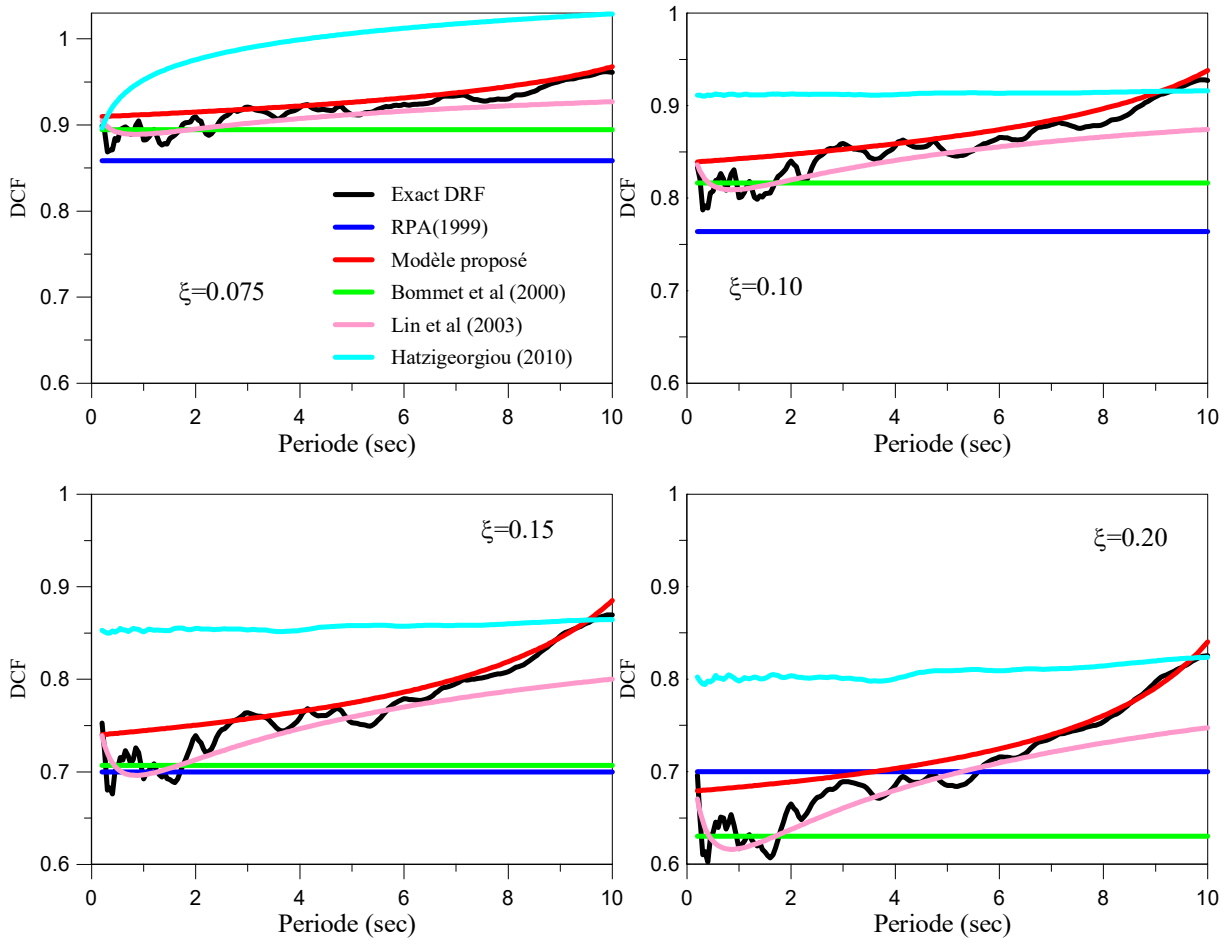
### 3.4.3 Comparaison du modèle proposé avec les formulations de littérature

Aux fins d'apprécier la qualité de la formulation obtenue précédemment, il est mené une étude comparative entre les valeurs du DCF obtenues à partir des données (que nous désignerons par le vocable "DCF exact") et celles obtenues en utilisant respectivement la formulation proposée, certaines formulations proposées dans la littérature et celle proposée par le RPA99/version 2003. Les formulations du DCF issus de la littérature, retenues pour cette étude comparative, sont ceux proposés par (i) Bommer et al (2000), (ii) Lin et Chang (2003) et (iii) Hatzigeorgiou (2010). Pour des raisons de clarté, les résultats sont présentés sur la figure 3.10 pour quatre valeurs de  $\xi$  (7,5%, 10%, 15% et 20%, respectivement).

Dans le Tableau 3.5 sont consignées les valeurs des erreurs relatives des valeurs obtenues par les diverses formulations du DCF (proposée, littérature et RPA) en utilisant les valeurs respectives du



DCF exact comme référence. Les résultats sont présentés pour six valeurs de la période T (0.5 sec, 1 sec, 2 sec, 3 sec, 6 sec, et 10 sec.) et pour deux valeurs de  $\xi$  (10% et 20%).



**Figure 3.10:** Comparaison du modèle choisi avec quelques formulations de littérature

T	RPA 99		Le modèle proposé		Bommer et al (2000)		Lin et al (2003)		Hatzigeorgiou (2010)	
	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$
<b>0.5</b>	5.43	-10.32	-4.06	-7.29	-1.10	0.71	-0.71	1.54	-12.86	-25.99
<b>1</b>	4.58	-13.56	-5.27	-10.85	-2.00	-2.21	-1.12	-0.07	-13.82	-29.43
<b>2</b>	9.09	-5.22	-0.86	-3.56	2.81	5.30	2.43	4.16	-8.64	-20.81
<b>3</b>	11.11	-1.61	0.76	-0.96	4.97	8.55	3.27	4.13	-6.14	-16.22
<b>6</b>	11.75	2.24	-1.00	-1.20	5.66	12.02	1.16	0.92	-5.54	-12.98
<b>10</b>	17.64	15.19	-1.15	-1.80	11.95	23.67	5.70	9.43	1.21	0.21

**Tableau 3.5:** Erreur relative (%) entre les résultats exacts et la formule proposée et quelques formulations de la littérature.

Les conclusions suivantes peuvent être tirées de résultats de cette comparaison:

1. Selon la figure, les valeurs les plus importantes du DCF, c.-à-d., les plus conservatives, sont celles obtenues à partir de la formulation de Hatzigeorgiou, alors que celles obtenues pour le RPA sont les plus basses, c.-à-d., plus Non-conservatives, pour  $\xi < 12,2\%$ . Pour  $\xi > 12,2\%$ , la valeur du DCF obtenue pour le RPA devient indépendante de  $\xi$  et a une valeur constante égale à 0,7, alors que le DCF pour Bommer et al (utilisée par l'EC 8) devient le modèle le plus Non-conservatif.

2. Les valeurs obtenues par le modèle que nous avons proposé est celui qui est en concordance parfaite avec les valeurs du DCF exact tout en restant conservatif pour l'ensemble des couples de valeurs ( $\xi$ , T) étudiés.

3. Les observations faites ci-dessus sont appuyées par le Tableau 3.5 qui montre que l'erreur entre la formule du RPA et des résultats exacts peut atteindre 17,64 % pour T = 10 s, pour T = 3 s, cette erreur atteint 11,11 % pour  $\xi < 10\%$ . Ainsi, dans le cas considéré, le RPA sous-estime les amplitudes du spectre de réponse les amplitudes du spectre de réponse ce qui a pour conséquence de mettre en danger vis – à – vis du séisme les structures conçues en utilisant ces valeurs. Le modèle proposé présente des valeurs du DCF supérieures aux résultats exacts pour la majorité des périodes et l'erreur relative atteint 13 %. Dans le cas contraire, ou le modèle proposé présente des valeurs du DCF inférieures aux valeurs exactes, l'erreur ne dépasse pas 2 %. Ce modèle est en bonne adéquation avec les valeurs du DCF exact. Le modèle de Lin et al. présente un bon prédicteur du DCF pour T < 6 sec, mais néanmoins, il sous-estime le spectre de réponse pour les valeurs de périodes T > 6 s. La formulation de Bommer et al. présente des valeurs DCF plus étroitement aux résultats exactes que la formule de RPA (ancienne formule EC8). Cette bonne approximation est perdue pour  $\xi$  supérieure à 15 %, le modèle conduit à une grande sous-estimation du spectre de réponse (modèle non-conservatif), cette erreur a des valeurs supérieures à 10 % et peut atteindre 23 % pour T = 10s. la formulation de Hatzigeorgiou présente des valeurs d'erreurs qui peuvent atteindre 30 % pour T = 1s, cette erreur est réduite lorsque T est proche à T= 10 s. les différences importantes entre les différentes formulations examinées montrent l'importance du problème.

Il ressort des observations faites ci-dessus que la formulation proposée ci-dessus pour le RPA est celle qui semble être en bon accord avec les valeurs exactes du DCF tout en restant conservatives assurant ainsi une bonne sécurité aux structures conçues avec cette approche.

### 3.5 Conclusion

L'objectif de cette partie du travail est de proposer une formulation du DCF pour les Règles Parasismiques Algériennes (RPA) qui, actuellement, proposent l'ancienne formule de l'EC8 (1994). Les enregistrements sismiques utilisés dans cette étude ont été sélectionnés à partir de bases de données mondiale PGMD compte tenu de la classification des sols proposés par le RPA.

L'influence du type de sol sur les facteurs de correction de l'amortissement augmente avec la croissance du taux d'amortissement. L'erreur maximale entre les valeurs du  $DCF_{moy}$  et du DCF estimé pour les différentes classes de sol reste inférieure à 10% pour un taux d'amortissement critique  $\xi = 20\%$  et elle ne dépasse les 10 % que pour quelques valeurs de la période T seulement. La valeur moyenne de cette erreur pour l'ensemble des périodes de spectre n'excède pas 7 % quel que soit le type de sol considéré. Sur la base des résultats présentés, on peut conclure qu'il existe une faible dépendance entre les valeurs DCF trouvées et le type de sol, ce dernier pouvant, par conséquent, être négligé.

Sur cette base, une formulation du DCF a été proposée en utilisant comme données les valeurs  $DCF_{moy}$  obtenus sans distinction des classes. La formulation a été sélectionnée, à l'aide d'un robot scientifique utilisant une technique de régression nonlinéaire, sur la base d'un ajustement avec les données et d'une corrélation, les meilleurs possibles.

Une étude comparative entre la formulation proposée, certaines approches proposées par la littérature et la réglementation RPA a été présentée. Les résultats ont été discutés en termes d'erreurs entre les résultats de chaque formulation et les résultats exacts. Il a été montré que l'approche proposée est celle qui s'accorde le mieux avec les valeurs exactes (prises comme références) tout en garantissant le meilleur degré de sécurité par rapport aux autres approches.

## **Chapitre 4**

# **Simulation du DCF par Réseau de Neurones Artificiels (RNA)**

# Simulation du DCF par Réseau de Neurones Artificiels (RNA)

---

## 4.1 Introduction

Dans le chapitre précédent, nous avons développé une formulation déterministe du DCF pour le code parasismique algérien (RPA99, version 2003) qui permet d'estimer, à chaque période de vibration  $T$  de l'oscillateur à un degré de liberté, les amplitudes du spectre de réponse pour différentes valeurs de  $\xi$  par un ajustement des amplitudes à 5% du spectre de réponse réglementaire.

Dans ce contexte, Stafford et al (2008) a souligné, qu'en plus de l'approche développée dans le chapitre précédent, il existe une deuxième approche s'inspirant du développement d'équations prédictives dénommées "Ground-Motion Prediction Equations : GMPE" (ex. Akkar and Bommer (2007) et Faccioli et al (2004)). Une analyse critique de quelques une des méthodes de ce type [ex. Berge-Thierry et al (2003), Bommer et al (1998), Boore et al (1993) et Trifunac et Lee (1989)] est fournie dans Bommer et Mendis (2005).

Cette deuxième approche, néanmoins beaucoup plus laborieuse que la précédente, propose des formulations d'équations prédictives spécifiques à chacune des valeurs du taux d'amortissement lesquelles incluent également le type de faille et la classe de site en tant que variables explicatives.

Dans le présent chapitre, l'intérêt est accordé, dans une première étape, à l'élaboration d'une nouvelle méthode pour l'estimation des valeurs du DCF sans avoir recours à l'utilisation d'une quelconque formulation comme spécifié ci-dessus, mais en faisant usage du concept de Réseaux de Neurones Artificiels (RNA).

Cette méthode sera utilisée pour la génération artificielle des valeurs du facteur de correction d'amortissement (DCF) en intégrant de manière explicite les incertitudes inhérentes aux valeurs de l'amortissement, car en effet, les formulations du DCF comme celle développée au chapitre 3 ou citées précédemment dans la littérature, n'incluent pas la prise en charge de ces incertitudes.

C'est ainsi qu'une base de données contenant les valeurs du DCF sera d'abord élaborée pour chacune des quatre classes sols spécifiées et explicitées par les règles parasismiques algériennes. Ces valeurs seront estimées en utilisant une méthode stochastique permettant l'intégration des incertitudes inhérentes à l'amortissement. Cette base de données est ensuite utilisée pour l'entraînement d'un Réseau de Neurones Artificiels en vue de la génération des valeurs du DCF en fonction de deux caractéristiques dynamiques des structures, à savoir, le taux d'amortissement critique  $\xi$  et la période fondamentale de vibration  $T$ .

Dans une deuxième étape, les valeurs de DCF utilisées comme des entrées de réseau de neurones sont elles – mêmes utilisées comme données pour l'élaboration d'une deuxième formulation (Cf. chapitre 3 pour la première formulation) du DCF pour les Règles Parasismiques Algériennes (RPA).

Les résultats obtenus par ces approches sont par la suite comparés et analysés en fin de chapitre et des conclusions sont dégagées à lumière de ceux-ci.

## **4.2 Les méthodes de Monte Carlo**

### **4.2.1 Présentation des méthodes de Monte Carlo**

On appelle méthodes de Monte-Carlo toutes méthodes algorithmiques visant à calculer une valeur numérique approchée par des procédés aléatoires, c'est-à-dire des techniques probabilistes. Le nom de ces méthodes, qui fait allusion aux jeux de hasard pratiqués à Monte-Carlo, a été inventé en 1947 par Metropolis (1987), et publié pour la première fois en 1949 Metropolis et Ulam (1949).

Ces méthodes sont moins exigeantes en termes d'hypothèses sur le modèle. Il n'y a pas un consensus absolu sur une définition précise de ce qu'est une technique de type Monte Carlo, mais la description la plus habituelle des méthodes de Monte Carlo consiste à dire que ces méthodes se caractérisent par l'utilisation du hasard pour résoudre des problèmes sur un calcul donné. Elles sont en général applicables à des problèmes de type numérique, ou bien à des problèmes de nature elle-même probabiliste.

Du point de vue des applications, les méthodes de Monte Carlo sont aujourd'hui indispensables dans des domaines aussi variés et différents que la finance, la sismologie, les télécommunications, en ingénierie ou en physique, mais aussi en biologie, en sciences sociales, etc. Par exemple, en

chimie, en physique, ou même en biologie, de nombreux problèmes exigent l'analyse des propriétés dynamiques d'un nombre tellement grand d'objets (particules atomiques, atomes, molécules ou macromolécules), que ceci ne peut se faire que par des techniques de type Monte Carlo. Ces méthodes peuvent en revanche être gourmandes en temps de calcul si elles ne sont pas correctement utilisées. [Rubino et Tuffin (2001)].

#### 4.2.2 Description des méthodes de Monte Carlo

La simulation de Monte Carlo implique l'échantillonnage aléatoirement pour simuler artificiellement un grand nombre d'expériences et d'observer les résultats, par exemple, pour le cas d'analyse de fiabilité des structures, chaque valeur simulée aléatoirement de  $X$  donne une valeur d'une expérience  $x$ . La fonction d'état limite  $G(x)$  est évaluée pour conclure si la configuration tirée est dans le domaine du succès ou bien de l'échec.

On définit la fonction d'état limite comme :

$$G(x) = \begin{cases} G(x) \leq 0 & \text{pour les valeurs de DCF hors } DCF_{\text{moy}} \pm \text{ecart type} \quad \text{succès} \\ G(x) > 0 & \text{pour les valeurs de DCF dans } DCF_{\text{moy}} \pm \text{ecart type} \quad \text{échec} \end{cases} \quad (4.1)$$

Si on répète l'opération précédente  $n$  fois, la probabilité de succès  $I_s$  est donnée approximativement par :

$$P_s = \frac{n(G(x) \leq 0)}{N} \quad (4.2)$$

Où  $n(G(x) \leq 0)$  est le nombre d'essai où  $G(x) \leq 0$ , et  $N$  est le nombre total d'essai. Évidemment le nombre  $N$  requis est en fonction d'exactitude souhaitée pour  $I_s$ .

La fonction indicatrice est définie comme suit :

$$I_D = \begin{cases} 1 & \text{pour } G(x) \leq 0 \\ 0 & \text{pour } G(x) > 0 \end{cases} \quad (4.3)$$

Une estimation de nombre de simulations requises pour donner un intervalle de confiance de  $I_s$  souhaité est indispensable pour l'utilisation des méthodes de Monte Carlo.

Puisque  $G(x)$  est une variable aléatoire, la fonction indicatrice  $I_D$  est aussi une variable aléatoire, qui prend seulement une des deux valeurs 0 ou 1. Il est issu du théorème de central limite que la distribution de  $\bar{P}_s$  donné par la somme des fonctions d'échantillons indépendants approche une distribution normal quand le nombre d'échantillons  $N$  tend vers l'infini.

Où  $\bar{P}_s$  est l'estimateur de la probabilité de succès  $P_s$ .

La moyenne  $E(\bar{P}_s)$  de la distribution de  $\bar{P}_s$  est donnée par [Melchers (1987)] :

$$E(\bar{P}_s) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{N} E[I(\text{vérifiée})] \quad (4.4)$$

Et la variance de l'estimateur de probabilité de succès est :

$$\sigma^2 = \left( \frac{1}{N-1} \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I^2[G \text{ vérifiée}] \right\} - \left\{ \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N I[G \text{ vérifiée}] \right\}^2 \right) \quad (4.5)$$

Le grand avantage de cette méthode est sa simplicité. Elle est facile à mettre en œuvre, en particulier pour des fonctions de base explicites. Elle est très puissante car elle s'appuie sur des bases mathématiques très solides et peut être appliquée dans divers domaines. L'inconvénient majeur de la méthode de Monte Carlo est le nombre nécessaire de simulations pour obtenir une estimation correcte de la probabilité. La précision obtenue est proportionnelle à la racine carrée du nombre d'itérations; si la probabilité est très petite un très grand nombre de simulations est alors nécessaire pour obtenir une précision adéquate.

La méthode de Monte Carlo est utilisée pour générer les valeurs de taux d'amortissement  $\xi$  sur les chapitres 4 et 5. Ces valeurs sont générées suivant la distribution de probabilité Lognormale sur la base de rapports expérimentaux.

Les étapes impliquées dans ces calculs peuvent être résumés comme suit:

1. Définir le problème en termes de toutes les variables aléatoires.
2. Quantifier les caractéristiques probabilistes de toutes les variables aléatoires.
3. Générer des valeurs de ces variables.
4. Évaluer le problème d'une manière déterministe pour chaque série de réalisation de l'ensemble des variables aléatoires;



5. Extraire des informations pour N variables.
6. Déterminer l'efficacité et la précision de la méthode.

## **4.3 Conception du Réseau de Neurones Artificiels utilisé**

### **4.3.1 Généralité sur le type de réseau utilisé**

Les réseaux de neurones artificiels, dont le développement a commencé dans les années 1940, constituent une branche de l'intelligence artificielle qui a récemment subi une évolution et une amélioration rapide. Pour ce qui est de notre étude, le réseau de neurones est développé en se basant sur la démarche désignée sous le nom de “connexionnisme” qui consiste à vouloir rendre compte de la cognition humaine par des réseaux de neurones. Ceci a conduit à l'étude de réseaux de neurones formels qui sont des réseaux complexes d'unités de calcul élémentaires interconnectées.

Les réseaux de neurones formels, tels que définis dans cette étude, font partie du courant de recherche motivé par l'obtention d'algorithmes efficaces sans se préoccuper de la pertinence biologique qui pourtant a aidé à les définir. La connectique du cerveau n'étant pas codée dans un quelconque "document biologique" tel l'ADN, la structure du cerveau (100 milliards de neurones pour un total d'environ  $10^{15}$  contacts synaptiques) provient donc en partie des contacts avec l'environnement. L'apprentissage est donc indispensable à son développement

Ainsi, un réseau de neurones artificiels (RNA) est un paradigme de traitement de l'information qui est inspiré par le processus d'apprentissage du cerveau humain, l'élément clé de ce paradigme est la nouvelle structure du système de traitement de l'information. Cette technique cohérente de calcul, qui est en mesure de traiter des informations empiriques, a une architecture conçue sur la base du cerveau humain, capable de reconnaître, de capturer et de cartographier les caractéristiques connues comme motifs contenues dans un ensemble de données principalement grâce aux interconnexions élevées de neurones qui traitent l'information en parallèle. Un réseau qui a appris des modèles définissant la relation entre l'entrée et la sortie d'un certain essai ou processus peut ensuite être utilisé pour prédire les résultats (output) pour de nouvelles conditions.

Les réseaux de neurones sont constitués de trois couches (layers) successives, la première représentant la couche des entrées (input layer), la dernière étant la couche des sorties (output layer), Une ou plusieurs couches dites couches cachées (hidden layers) sont placées entre les

couches d'entrée et de sortie. Ces couches sont dites cachées car de l'extérieur du réseau, on ne peut analyser clairement leur fonctionnement.

### 4.3.2 Topologie générale du réseau de neurones artificiels

Dans cette étude, la technique d'analyse de données par réseaux de neurones artificiels "Artificial Neural Network Analysis", est utilisée pour l'estimation des valeurs du facteur de correction d'amortissement (DCF). Cette estimation est faite en adéquation avec les valeurs du taux d'amortissement  $\xi$  et de la période fondamentale T de vibration structurale prises en considération.

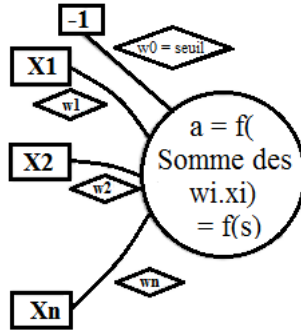
Nous utilisons un réseau de neurones artificiels de type Feed Forward (non bouclés) dans lequel les neurones sont répartis en couches de manière à ce que deux couches successives soient entièrement reliées, c'est-à-dire que chacun des neurones d'une couche reçoit en entrée les informations sorties de tous les neurones de la couche précédente. Dans notre cas, les informations se déplacent à partir de la couche d'entrée à la couche de sortie à travers une seule couche cachée.

Pour chaque ensemble  $\mathbf{X} = (x_i)_{(i=1,2, \dots, n)}$  d'informations d'entrée, le neurone ne considérera pas séparément chacune des informations mais il en fera une somme pondérée définissant ainsi une nouvelle donnée "s" telle que :

$$s = \sum_{i=0}^n w_i x_i = \left( \sum_{i=1}^n w_i x_i \right) + w_0 \quad (4.6)$$

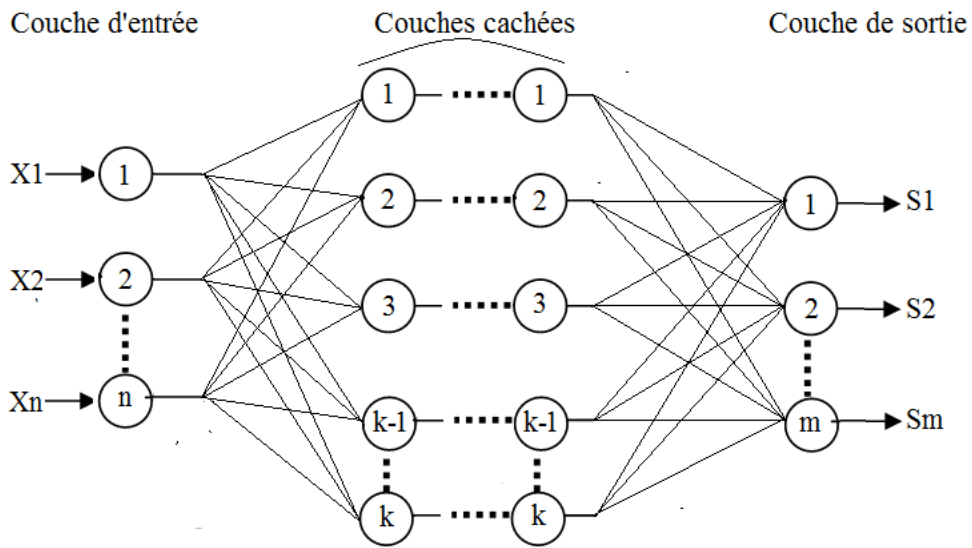
Où  $w_i$  est le poids qui valorisera, plus ou moins, la  $i^{\text{ème}}$  information  $x_i$  vis à vis du neurone. On notera  $\mathbf{W} = (w_i)_{(i=1,2, \dots, n)}$  le vecteur dont les composantes sont les poids. Le coefficient  $w_0$ , que l'on appellera le "coefficient de biais", est un "poids" supplémentaire qui sera lié à une information  $x_0 = -1$ .

C'est en fait cette donnée "s" que le neurone va traiter en la faisant passer comme argument à une fonction d'activation "a(s)" appelée aussi fonction de transfert. C'est d'ailleurs pour ça que l'on peut parfois appeler un neurone une "unité de traitement" dont la modélisation est illustrée sur la figure 4.1.



**Figure 4.1:** Modélisation du neurone (ou unité de traitement) artificiel

Cette dernière information est alors transmise à chacun des neurones de la couche suivante. Le nombre de couches cachées, le nombre de cellules par couche et leurs connexions permettent de définir l'architecture du réseau de neurones (Fig. 4.2).



**Figure 4.2:** Architecture du réseau de neurones (avec une couche cachée).

La fonction de transfert qui permet de calculer le rendement de la cellule est une fonction sigmoïde (Fig. 4.3) possédant un seuil qui vaut  $1/2$  lorsque l'argument vaut  $0$ , c'est-à-dire lorsque la somme pondérée des  $n$  informations d'entrée vaut  $w_0$ . Nous voyons donc que l'on atteint le seuil de la fonction d'activation lorsque la somme pondérée des informations d'entrée vaut le "coefficient de biais".

$$\sum_{i=0}^n w_i x_i = 0 \Leftrightarrow (\sum_{i=1}^n w_i x_i) - w_0 = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^n w_i x_i = w_0 \quad (4.7)$$

Ceci explique la topologie générale du réseau neuronal feed forward multicouche. Les neurones de chaque couche se connectent les uns aux autres en pondérant l'information. Il y a ensuite une fonction de transfert qui change les données d'entrée pour produire l'information en sortie.

Avant d'utiliser un réseau neuronal artificiel, il est nécessaire de le former. L'apprentissage des neurones est une méthode utilisée pour estimer les poids synaptiques de façon itérative jusqu'à ce que les informations en sortie soient compatibles avec les éléments de la base de données réelles.

Au début du processus d'apprentissage, les poids initiaux sont tirés aléatoirement au niveau des connexions, puis les entrées sont insérées la première couche et ensuite avancées à travers la couche cachée vers la couche de neurones de sortie. À la fin, les sorties seront comparées aux données réelles.

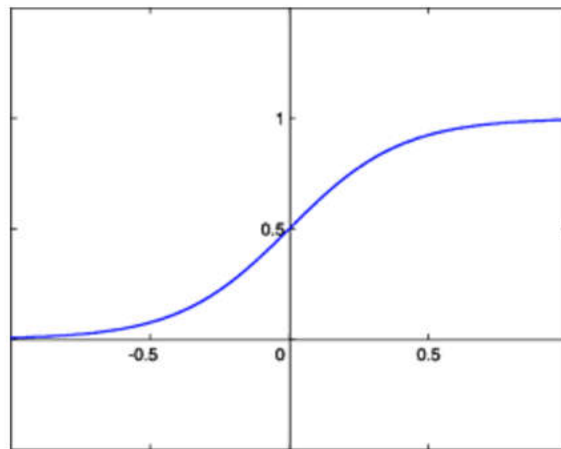


Figure 4.3: Graphe de la fonction sigmoïde

## 4.4 Procédure de simulation

### 4.4.1 Base de données

Nous avons pris comme base de données de valeurs du DCF, à comparer avec celles obtenues en sortie du réseau de neurones, des valeurs cibles, notées  $DCF_{\text{reel}}$ , associées à la réponse linéaire d'un oscillateur SDOF de période fondamentale  $T$  et de taux d'amortissement  $\xi$  considéré aléatoire, soumis à une série de 7 enregistrements sismiques réels représentative de la classe de sol  $S_i$  ( $i = 1$  à 4) considérée. Pour chaque enregistrement sismique, les valeurs cibles  $DCF_{\text{reel}}$  sont calculées

pour 62 valeurs de la période naturelle  $T$  comprises dans l'intervalle  $[0,05- 4 \text{ sec}]$ , représentant les périodes d'intérêt des structures civiles.

Ainsi, pour chaque classe de sol, 7 enregistrements de mouvements sismiques sont considérés, et pour chaque valeur  $\xi_k$  ( $k = 1$  à  $10$ ) du taux d'amortissement considéré, le DCF est estimé pour un ensemble de  $M = 200$  valeurs aléatoires  $\xi_k^m$  ( $m = 1, 2, \dots, M$ ) générées artificiellement autour d'une valeur moyenne sélectionnée  $\xi$  pour chacune des 62 valeurs  $T$  de la période. Ainsi, 1 400 valeurs aléatoires de  $\xi$  sont estimées aléatoirement pour  $T$  donnée.

Les spectres de réponses sont calculés pour une série de 10 valeurs du taux d'amortissement  $\xi$ , contenues dans l'intervalle  $[5\% \text{ à } 20\%]$  ce qui conduit à l'estimation de 14 000 valeurs du DCF pour une période donnée soit un total de 868 000 ( $62 \times 14000$ ) valeurs du DCF associées à l'ensemble des 10 spectres de réponses évalués pour chaque classe de sol. En considérant l'ensemble des 4 classes répertoriées par le RPA, c'est ainsi 3 472 000 ( $4 \times 868\,000$ ) valeurs du DCF qui sont estimées pour faire cette étude.

#### 4.4.2 Procédure d'analyse

L'objectif de cette analyse est l'estimation des valeurs de DCF, avec la prise en considération des incertitudes inhérentes à  $\xi$ , sans recourir à l'utilisation des formulations analytiques.

Pour réaliser cet objectif nous avons procédé comme suit :

(1) Sélection des enregistrements sismiques compatibles avec les spectres de calcul de RPA. Cette sélection est faite en utilisant l'application de la "PGMD" (PEER Ground Motion Database). Cette application a été explicitée au chapitre 03. Ainsi pour chaque type de sol on sélectionne un ensemble de 07 enregistrements accélérométriques réels compatibles avec le spectre réglementaire associé à chacun des 4 types de sols, soit un total de 28 accélérogrammes réels (7 accélérogrammes x 4 classes de sols) sélectionnés

(2) Sélection de 10 valeurs du taux d'amortissement [ $\xi_1 = 5\%$ ,  $\xi_2 = 6\%$ ,  $\xi_3 = 7.5\%$ ,  $\xi_4 = 8\%$ ,  $\xi_5 = 9\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$ ,  $\xi_7 = 12.5\%$ ,  $\xi_8 = 15\%$ ,  $\xi_9 = 17.5\%$  et  $\xi_{10} = 20\%$ ] chacune d'elles étant considérées comme valeur cible autour de laquelle seront générées, en utilisant la méthode de Monte Carlo, les valeurs aléatoires  $\xi_k^m$  ( $m = 1$  à  $200$ ) compatibles avec la distribution de probabilité lognormale décrivant les incertitudes inhérentes à l'amortissement. Le nombre optimal  $M = 200$  de valeurs générées avec la méthode de Monte Carlo a été obtenu en procédant au "test d'échantillonnage". La génération

autour de la valeur cible s'est faite en considérant un coefficient de variation  $Cov = 20\%$  choisi sur la base d'estimations empiriques (Haviland 1979).

(3) Calcul, pour chaque classe  $S_i$  ( $i=1$  à  $4$ ) de sol et pour chaque couple de valeurs  $(\xi_k, T_j)$  ( $k=1$  à  $10$  et  $j = 1$  à  $62$ ) présenté en entrée du réseau de neurones, de 1400 valeurs du DCF (200 valeurs aléatoires de l'amortissement pour 7 accélérogrammes réels). Il est important de remarquer que, quelque soit la classe de sol considérée, les valeurs du DCF estimées pour la valeur cible  $\xi_1 = 5\%$ , sera différente de 1 car ayant été calculée en considérant des valeurs  $\xi_1^m \neq 5\%$  générées aléatoirement autour de  $\xi_1$ .

(4) Elaboration de la banque de données composées des valeurs cibles du DCF, notées  $DCF_{réel}$  prenant ainsi en considération les effets des incertitudes sur  $\xi$ . Pour chacun des couples de valeurs  $(\xi_k, T_j)$ , on estime la valeur cible  $DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T_j) = \mu_{DCF}^{S_i}(\xi_k, T_j) + \sigma_{DCF}^{S_i}(\xi_k, T_j)$  où  $\mu_{DCF}^{S_i}(\xi_k, T_j)$  représente, pour chaque couple de valeurs  $(\xi_k, T_j)$  la moyenne des 1400 valeurs estimées du DCF formulée comme suit pour chaque site  $S_i$  :

$$\mu_{DCF}^{S_i}(T_j, \xi_k) = \frac{1}{1400} \sum_{l=1}^7 \sum_{m=1}^{200} DCF_{réel,l}^{S_i}(T_j, \xi_k^m) \text{ avec } i = 1 \text{ à } 4 \quad (4.8)$$

Où  $l$  et  $m$  sont les indices associés respectivement, au  $l^{\text{ème}}$  enregistrement réel considéré parmi les 7 sélectionnés pour la classe de sol  $S_i$  considérée et à la  $m^{\text{ème}}$  valeur  $\xi_k^m$  du taux d'amortissement parmi les 200 valeurs générées autour de la valeur cible  $\xi_k$  ( $k = 1$  à  $10$ ) en utilisant la méthode de Monte Carlo. Le paramètre  $\sigma_{DCF}^{S_i}(\xi_k, T_j)$  représente l'écart – type des 1400 valeurs du DCF autour de  $\xi_k$ .

Pour chacun des couples de valeurs  $(\xi_k, T_j)$ , la valeur  $DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T_j)$  traduit l'effet de la classe de sol  $S_i$  ( $i = 1$  à  $4$ ) sur l'estimation du DCF.

(5) Pour chaque type de sol  $S_i$ , on introduira en entrée du RNA le couple de valeurs  $(\xi_k, T_j)$  pour obtenir en sortie la valeur associée  $DCF_{RNA}^{S_i}(\xi_k, T_j)$ , estimée par le réseau de neurones. Ces dernières valeurs du DCF sont comparées aux valeurs respectives  $DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T_j)$  estimées précédemment à partir des spectres de réponses associés à chacun des 7 accélérogrammes réels sélectionnés pour la classe de sol considérée.

### 4.4.3 Apprentissage du réseau de neurones

Dans cette étude le logiciel MATLAB (Neural Network Toolbox) a été utilisé. pour chacune des 4 classes de sol  $S_i$ , la banque de donnée a produit 620 valeurs cibles  $DCF_{réel}^{S_i}$  associées respectivement à chacune des 620 couples de valeurs  $(\xi_k, T_j)$  ( $k = 1$  à  $10$  et  $j = 1$  à  $62$ ).

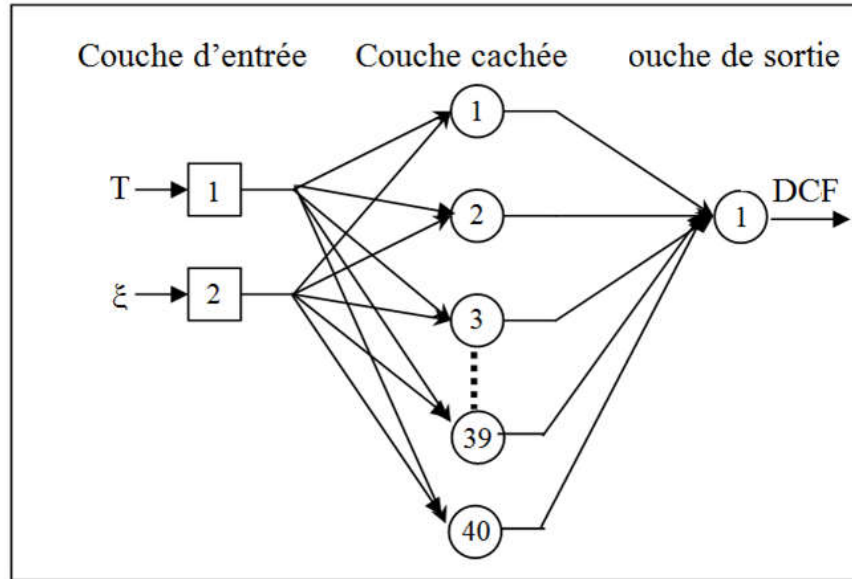
La phase d'apprentissage est réalisée en utilisant l'algorithme de retro-propagation de Levenberg-Marquardt [(Bahram et al (2005), Yu et Wilamowski (2011)]. Pour l'apprentissage du réseau de neurones, on a utilisé, pour chacune des 4 classes de sol, 50% des données soit un ensemble de 310 valeurs du  $DCF_{réel}^{S_i}$ .

La fonction de performance utilisée pour l'apprentissage du réseau de neurones est la moyenne des sommes des carrés des erreurs du réseau (Mean Sum of squares of the network Errors) (MSE) entre les sorties estimées  $(DCF_{RNA}^{S_i})_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N = 310$ ) par le réseau et les valeurs cibles  $(DCF_{réel}^{S_i})_n$  ( $n = 1, 2, \dots, N = 310$ ), soit :

$$MSE^{S_i} = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N [((DCF_{réel}^{S_i})_n - (DCF_{RNA}^{S_i})_n)]^2 \quad (4.9)$$

Pour chacune des 4 classes de sols, les  $N$  données ( $N = 620$ ), sont introduites simultanément (mode batch). Afin d'éviter le sur-apprentissage du réseau, la méthode de "early stopping" est utilisée [Demuth et al (2014), Benahmed et Hammoutene (2017), Badaoui (2014)]. En plus de la moitié des données qui a été réservée pour l'apprentissage pour entraîner le réseau nous avons divisé le reste des données en deux autres ensembles. Ainsi, une moitié (soit le quart des données) constitue l'ensemble de validation qui sert à une mesure de la généralisation du réseau et nous interrompons l'apprentissage quand la généralisation arrête de s'améliorer et l'autre moitié, l'ensemble de test qui sert à vérifier que la généralisation est correcte (données non utilisées dans l'apprentissage).

Le choix de l'architecture de réseau est très important, car elle affecte à la fois la précision du modèle et le temps de calcul. Afin de déterminer l'architecture optimale, nous avons examiné divers nombres de neurones dans la couche cachée. L'apprentissage est effectué sur les différentes architectures tout en gardant inchangé les données d'entrée. A cet effet, nous avons examiné le nombre de neurones dans la couche cachée pour qu'elle soit égale à 40. La configuration du RNA utilisé est alors est 2-40-1 (Cf. Fig. 4.4), elle décrit un réseau avec 2 neurones dans la couche d'entrée, 40 neurones dans la couche cachée et un neurone dans la couche de sortie.



**Figure 4.4:** Architecture du réseau de neurones utilisé (avec une couche cachée).

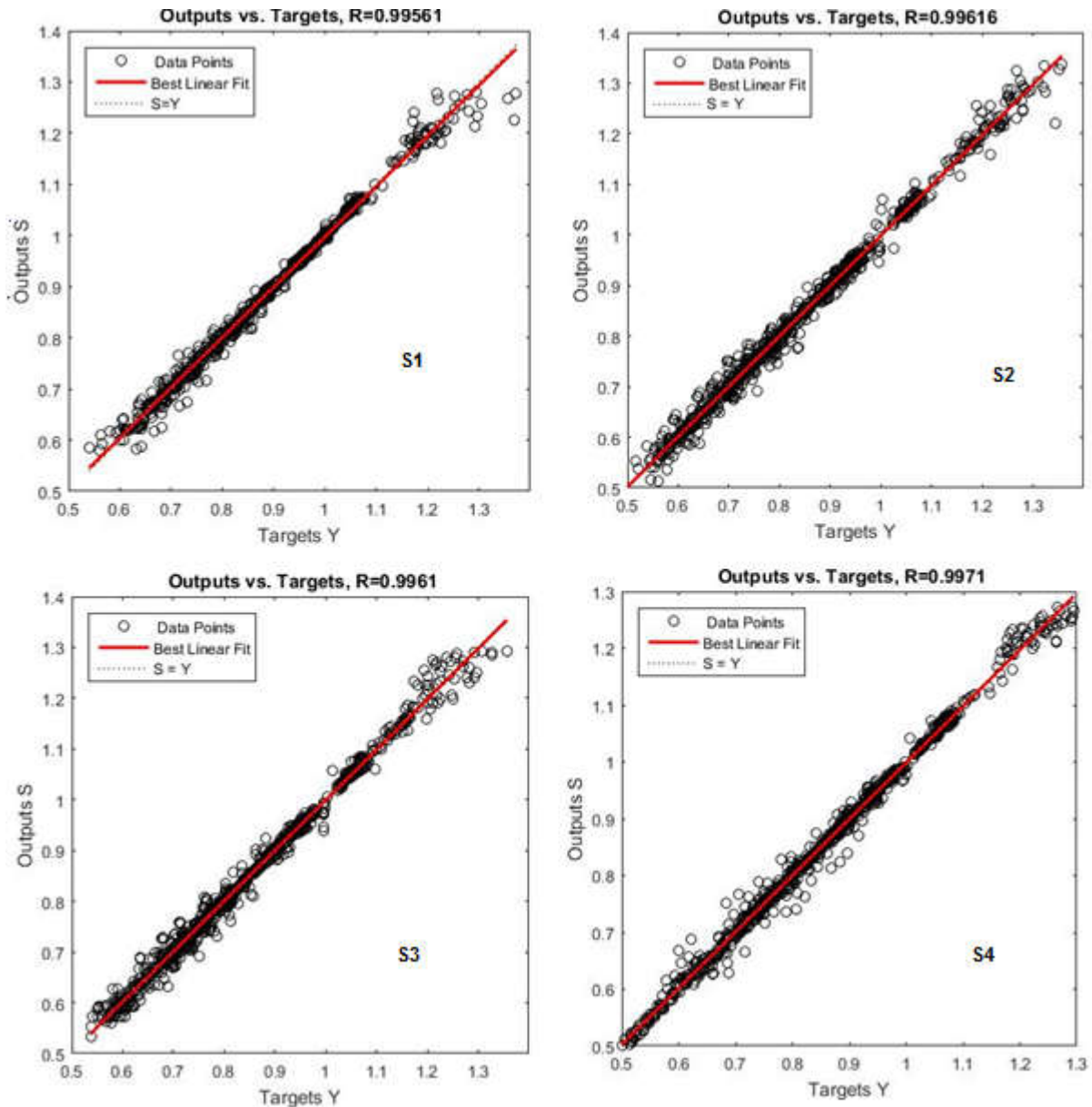
## 4.5 Analyse des résultats obtenus

Pour quantifier la qualité du réseau retenu pour chaque structure, en plus des mesures de l'erreur effectuées, l'ensemble entier des données (i.e, données utilisées pour l'apprentissage, validation et test) est passé par le RNA et une régression linéaire est effectuée entre les sorties du RNA et les cibles correspondantes.

### 4.5.1 Analyse de la corrélation

Afin de quantifier la qualité de la prédiction du DCF par le réseau de neurones artificiels développé (avec 40 cellules dans la couche cachée), une analyse de corrélations est effectuée entre l'ensemble des valeurs  $DCF_{RNA}^{S_i}(S)$  du DCF obtenues en sortie et les valeurs cibles  $DCF_{réel}^{S_i}(Y)$  correspondantes.





**Figure 4.5:** Sorties de RNA par rapport au DCF cible pour les quatre classes de sites.

La totalité des données (50% utilisées pour l'apprentissage, 25% pour la validation et 25% pour le test) est utilisée pour cette analyse et les courbes de meilleur ajustement (best fit) de toutes les paires de valeurs ( $DCF_{RNA}^{S_i}$ ,  $DCF_{réel}^{S_i}$ ) sont tracées pour chaque type de sol et un coefficient de corrélation R est ensuite calculé. Une prédiction parfaite suggère que tous les points soient alignés le long de la diagonale  $S = Y$  et que le coefficient de corrélation R soit égal à 1.

La figure 4.5 représente la régression linéaire entre les sorties du réseau  $DCF_{RNA}^{S_i}$  et les valeurs cibles  $DCF_{réel}^{S_i}$  correspondants aux valeurs réelles de DCF pour les quatre classes de sols. Il a été remarqué que les droites de régression sont pratiquement superposées à la diagonale, et que le coefficient de corrélation est très proche de 1, ce qui signifie que les valeurs du DCF obtenues en sortie avec le RNA sont en très bonne correspondance avec les valeurs cibles de la base de données.

#### 4.5.2 Analyse de l'erreur relative

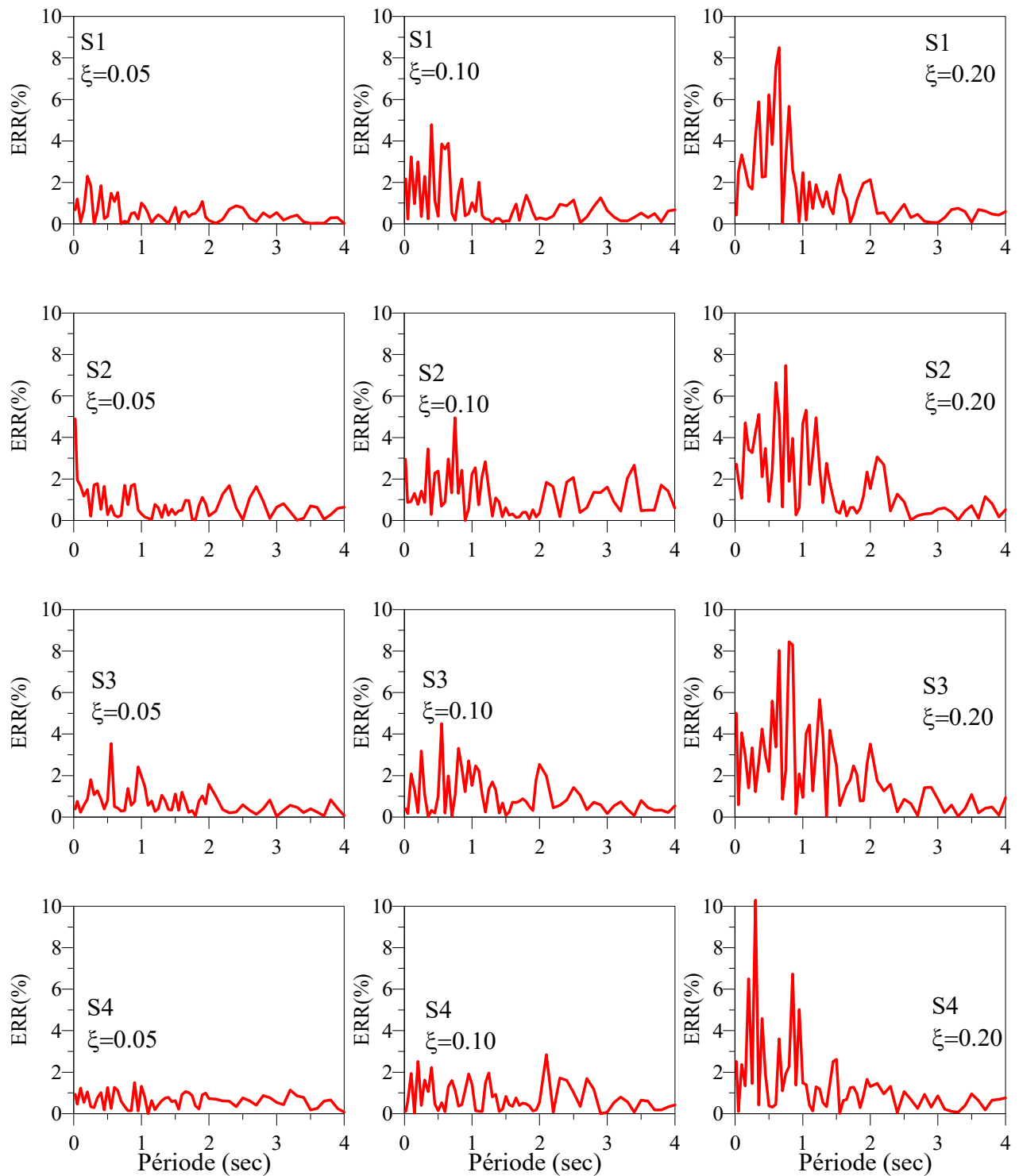
Un autre moyen d'apprécier l'efficacité de la méthode proposée consiste à évaluer les erreurs relatives  $ERR^{S_i}(\xi_k, T)$  entre les valeurs réelles  $DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T)$  (résultant de calcul présenté au paragraphe 4.3.2) et  $DCF_{RNA}^{S_i}(\xi_k, T)$  résultants de la simulation faite à l'aide du RNA pour différentes paires de valeurs  $(T, \xi_k)$  :

$$ERR^{S_i}(\xi_k, T) = \left| \frac{DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T) - DCF_{RNA}^{S_i}(\xi_k, T)}{DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T)} \right| \quad (4.10)$$

où  $N = 620$  est le nombre de valeurs estimées à chacune des 62 périodes  $T$  pour chacune des 4 classes de sol  $S_i$  ( $i=1,2, 3$  et  $4$ ) et chacune des 10 valeurs sélectionnées de l'amortissement  $\xi$ .

Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 4.6, pour chacune des quatre classes considérées et pour trois valeurs  $\xi_1 = 5\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$  et  $\xi_{10} = 20\%$  du taux d'amortissement. On observe que cette erreur augmente avec les valeurs croissantes de l'amortissement sans toutefois être supérieure à 10%. En effet, le niveau maximum de l'erreur relatives ne dépasse pas 5% pour  $\xi < 10\%$ , cette erreur atteint 10% pour des valeurs de  $\xi = 20\%$ .

On peut conclure, à partir des observations ci-dessus, que la procédure RNA, développée dans le cadre de ce travail, constitue un outil efficace pour la prédiction des valeurs du DCF.



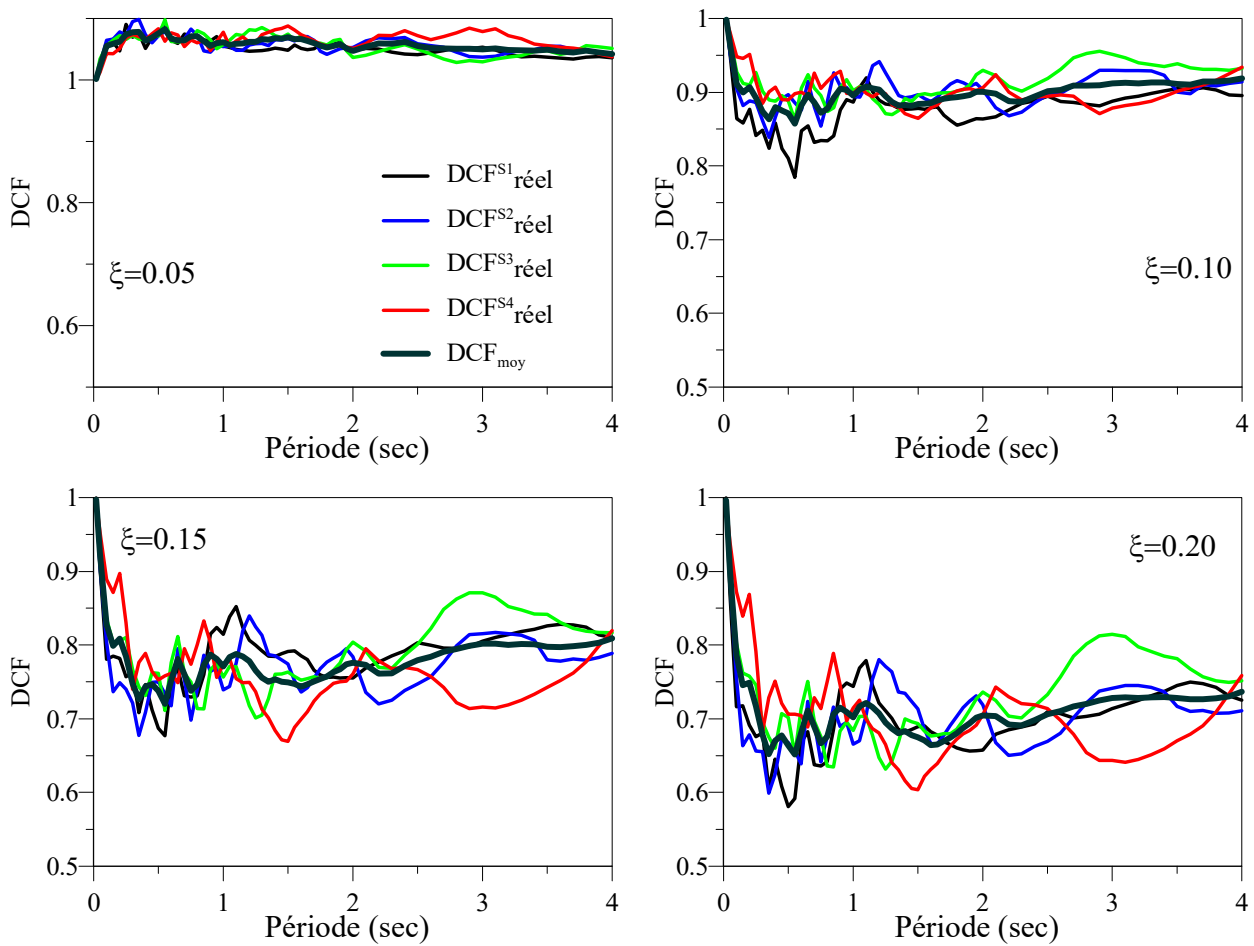
**Figure 4.6:** Erreur relative entre les résultats de RNA et les valeurs réelles de DCF pour les quatre types de sols et valeurs de  $\xi$  (0.05, 0.10 et 0.20).

### 4.5.3 Discussion sur l'effet de sols

Pour apprécier les effets du sol, on compare comme fait précédemment (Cf. chapitre 3), les valeurs  $DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T_j)$  ( $j = 1$  à 62 et  $k = 1$  à 10), associées respectivement à chacune des 4 classes de sols  $S_i$  ( $i=1$  à 4), aux valeurs moyennes respectives  $DCF_{moy}(\xi_k, T_j)$  données par :

$$DCF_{moy}(\xi_k, T_j) = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 DCF_{réel}^{S_i}(\xi_k, T_j) \quad (4.11)$$

Lesquelles représentent pour chaque couple de valeurs  $(\xi_k, T_j)$  une valeur du DCF qui néglige l'effet des 4 classes de sols. On a représenté sur la Fig. 4.7 les résultats obtenus pour les 4 valeurs  $\xi_1 = 5\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$ ,  $\xi_8 = 15\%$  et  $\xi_{10} = 20\%$ .



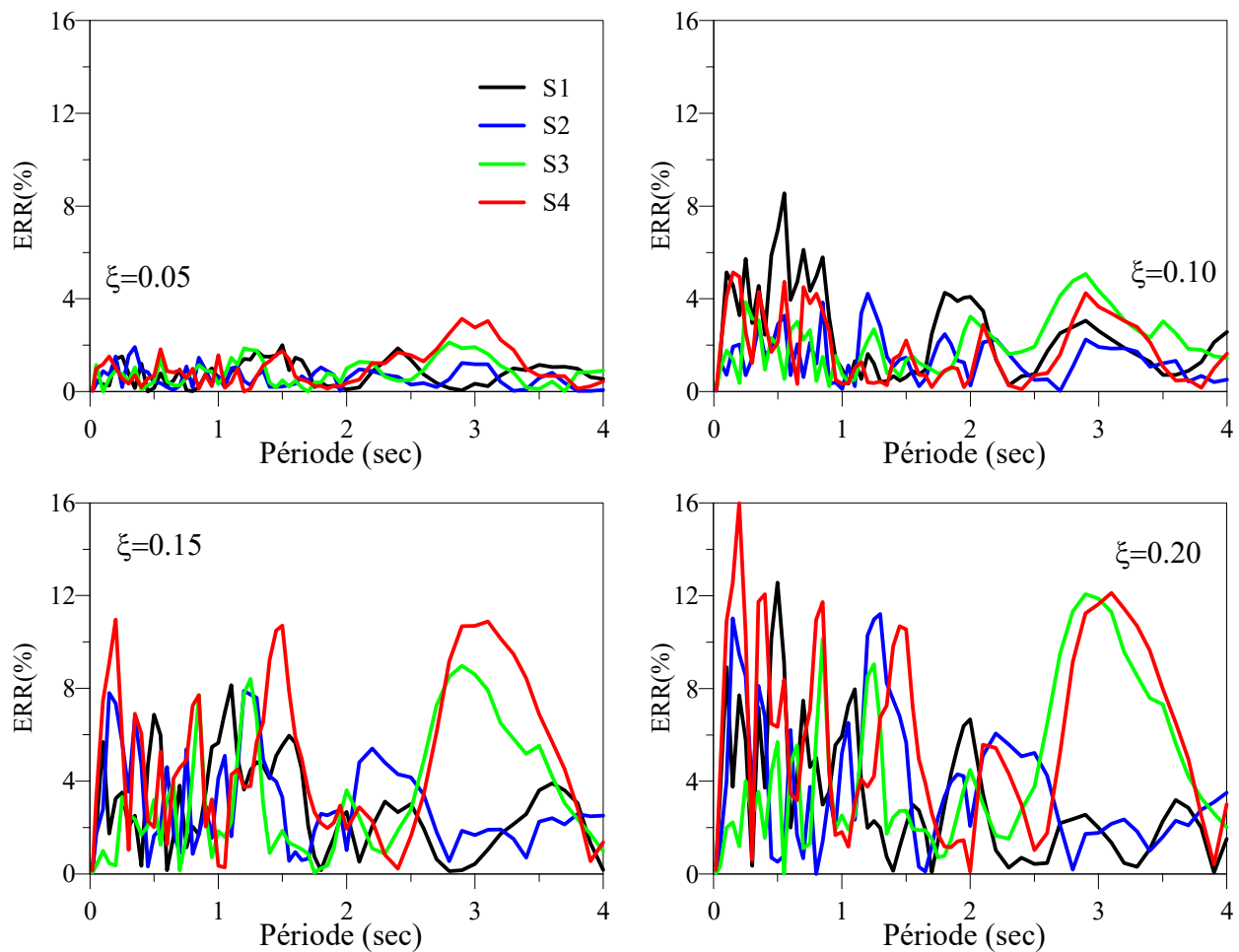
**Figure 4.7:** Valeurs de DCF pour différents sols pour  $\xi = 0.05, 0.10, 0.15$  et  $0.20$

Il peut être observé à partir de cette figure que, comme attendu, les fluctuations des courbes représentatives de  $DCF_{réel}^{S_i}(\xi, T)$  pour les différentes classes oscillent autour de la valeur moyenne  $DCF_{moy}(\xi, T)$  et ce quelque soit la valeur du taux d'amortissement  $\xi$ . Les fluctuations des courbes des facteurs de correction d'amortissement pour toutes les classes de sols restent néanmoins très proches les unes des autres et ce, indépendamment des valeurs du taux d'amortissement.

Afin de mieux quantifier les effets du sol sur les valeurs du DCF, on évalue l'erreur relative des estimations du DCF comme suit :

$$ERR^{S_i}(T, \xi) = \left| \frac{DCF_{moy}(T, \xi) - DCF_{réel}^{S_i}(T, \xi)}{DCF_{moy}(T, \xi)} \right| \quad (4.12)$$

Pour l'ensemble des 10 valeurs du taux d'amortissement  $\xi$ . On a représenté sur la Fig. 4.8 les résultats obtenus pour 4 valeurs précédemment retenues, à savoir :  $\xi = 5\%$ ,  $10\%$ ,  $15\%$  et  $20\%$ .



**Figure 4.8:** Erreurs relatives des valeurs de DCF en négligeant l'effet de site

L'erreur de maximale entre  $DCF_{moy}(T, \xi)$  et les  $DCF_{r\acute{e}el}^{S_i}(T, \xi)$  estimés pour chaque type de site  $S_i$  reste néanmoins inférieure à 16% pour un taux d'amortissement  $\xi = 20\%$ , cette valeur d'erreur étant obtenue que pour quelques valeurs de période seulement. D'autre part, la valeur moyenne de cette erreur estimée sur l'ensemble du spectre n'excède pas 6 % pour  $\xi = 20\%$ , l'erreur maximale est 12% pour les sites S1, S2 et S3 et 16 % pour S4.

En plus de l'effet de site, une autre source de cette erreur se trouve être la qualité des enregistrements sismiques sélectionnés pour chaque site surtout pour le sol S4 dont le spectre de réponse RPA donne déjà des grandes valeurs d'accélération et qu'il est difficile de trouver pour un ensemble des séismes enregistrés sur les mêmes conditions de site et avec la même forme en fonction de la période. Cette erreur sera discutée en utilisant la formulation qui sera proposée pour RPA.

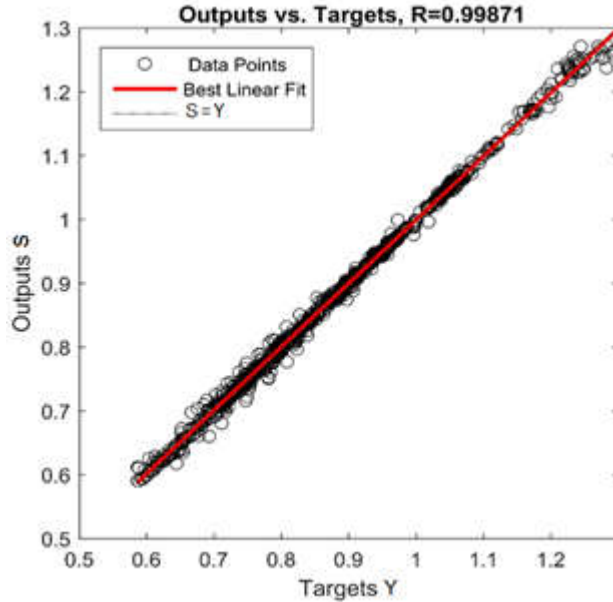
En se basant sur les résultats présentés sur la Fig. 4.8, on peut conclure qu'il y a une faible dépendance entre les valeurs des DCF trouvées et le type de sol, ce dernier pouvant alors être négligé.

#### **4.5.4 Simulation sans distinction des classes de sols**

Sur la base de résultats trouvés dans la partie précédente, les valeurs de  $DCF_{moy}$  sont utilisées comme entrée au réseau de neurones artificiels.

Afin d'apprécier l'efficacité du réseau sélectionné (avec 40 cellules dans la couche cachée), l'ensemble des données (les données utilisées pour l'apprentissage, la validation et l'essai) a été transmis à travers le réseau pour effectuer une régression linéaire entre les valeurs S de sortie du réseau et ceux de cibles correspondant Y.

La figure 4.9 représente la régression linéaire entre les sorties du réseau S et les valeurs cibles correspondants aux valeurs réelles de  $DCF_{moy}$  pour les quatre classes de sols. Il a été remarqué que les droites de régression sont pratiquement superposées à la diagonale, et le coefficient de corrélation est très proche de 1, ce qui signifie que les valeurs de DCF obtenues de RNA sont presque confondues avec les valeurs réelles.



**Figure 4.9:** Sorties de RNA par rapport au DCF cible en négligeant l'effet de site.

#### 4.6 Formulation du DCF intégrant les incertitudes pour le RPA

Au chapitre 3, nous avons proposé une formulation déterministe du DCF pour le règlement parasismique algérien RPA qui comme nous l'avons fait remarqué précédemment, et au même titre que les formulations du DCF actuellement disponibles dans la littérature, n'inclue pas les incertitudes inhérentes à l'amortissement. Il est donc nécessaire de développer une nouvelle formulation pour combler cette lacune.

Dans ce cadre, nous utiliserons la même procédure que celle développée au Chapitre 3 qui, compte tenu des conclusions déduites au § (4.4.3) concernant la faible dépendance des estimations du DCF vis à vis des classes de sols, se fera sans distinction entre ces dernières.

La même base de données utilisée pour le développement de réseaux de neurones dans la partie 4.4.4 a été utilisée pour le développement de cette formule. Ainsi, nous obtiendrons 620 valeurs de  $DCF_{moy}$  associées respectivement à 620 couples  $(\xi, T)$  que nous utiliserons comme valeurs d'entrées (inputs) pour le programme "Eureqa" afin de détecter l'équation ou la relation mathématique cachée dans ces données brutes.

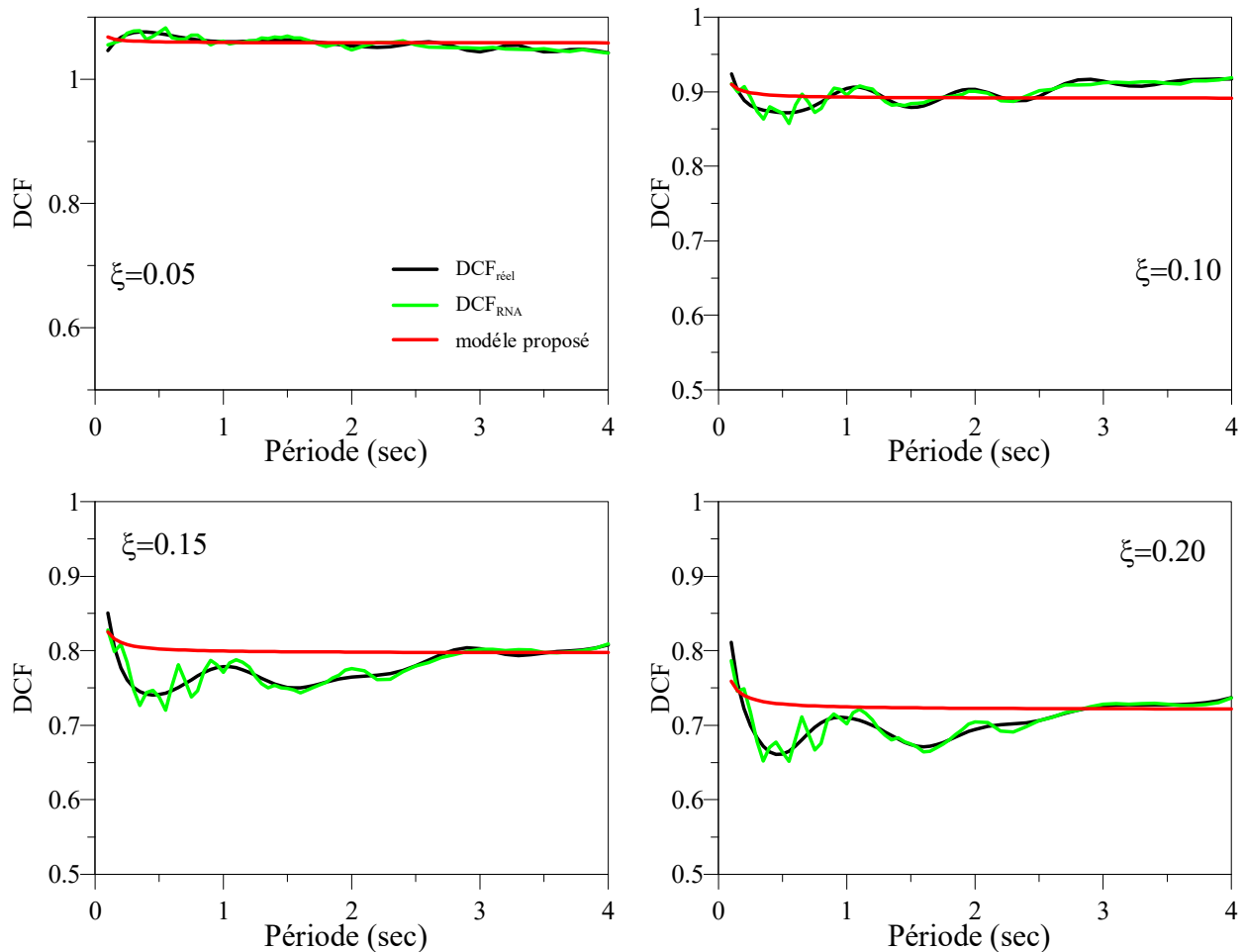
Dans notre cas, le modèle finalement retenu est le suivant :

$$DCF(\xi, T) = 0.896 + \frac{0.011}{\xi} + 0.019 \times \frac{\xi}{T} - 1.151 \times \xi \quad (4.13)$$

Cette formulation a été retenue compte tenu de la valeur de la qualité de l'ajustement (goodness of fit)  $R^2$  la plus élevée et de la simplicité et de la stabilité numérique du modèle. En effet, Eureka propose des formulations de DCF relativement plus précises mais dont les expressions sont néanmoins beaucoup plus complexes que celle retenue.

#### 4.6.1 Analyse des résultats

La figure 4.10 compare, pour quatre valeurs de  $\xi_1 = 5\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$ ,  $\xi_8 = 15\%$  et  $\xi_{10} = 20\%$  du taux d'amortissement, la nouvelle formulation du DCF proposé ci-dessus pour les Règles Parasismiques Algériennes RPA aux valeurs réelles de DCF et à celles résultants de la procédure RNA. Il est clair que ces résultats représentent les valeurs de DCF qui incluent en leur sein les incertitudes sur l'amortissement.



**Figure 4.10:** Comparaison entre les DCF obtenue de 2 méthodes et les valeurs réelles de DCF en considérant un amortissement incertain.



Le coefficient de variation caractérisant ces incertitudes est pris égal à 20% [Haviland (1976)]. Une très bonne corrélation entre les résultats réels et les résultats obtenus de RNA est observée, on remarque aussi que les valeurs estimées à partir de la formulation proposée ont une bonne concordance avec les résultats réels, dans la majorité des cas avec une légère surestimation des valeurs réels.

Cette dernière observation est due au fait qu'on a opté pour la construction du modèle de formulation à des valeurs  $DCF_{moy}$  prenant en compte les effets majeurs sur les structures et par conséquent supérieures aux valeurs réelles issues des accélérogrammes sélectionnés.

Il est important de noter qu'il est possible de trouver des formulations du DCF beaucoup plus précises mais malheureusement avec une plus grande complexité.

Ces conclusions sont également confirmées par le calcul de l'erreur relative entre les valeurs réelles du DCF et d'une part celles données par le modèle formulé et d'autre part celles obtenues à l'aide de la procédure RNA.

Il est constaté que l'erreur augmente avec l'augmentation des valeurs de  $\xi$ , elle est inférieure à 4% pour un  $\xi$  égale à 10 %, et reste toujours inférieur à 12.2 % pour  $\xi = 20$  % (dans ce cas le modèle est conservatif). Si on concentre l'attention sur le cas défavorable seulement où les erreurs sont négatives (résultats réels inférieurs aux résultats du modèle ou le modèle devient non-conservatif), les erreurs restent moins de 3.52 %. Ce qui nous donne des résultats très satisfaisants.

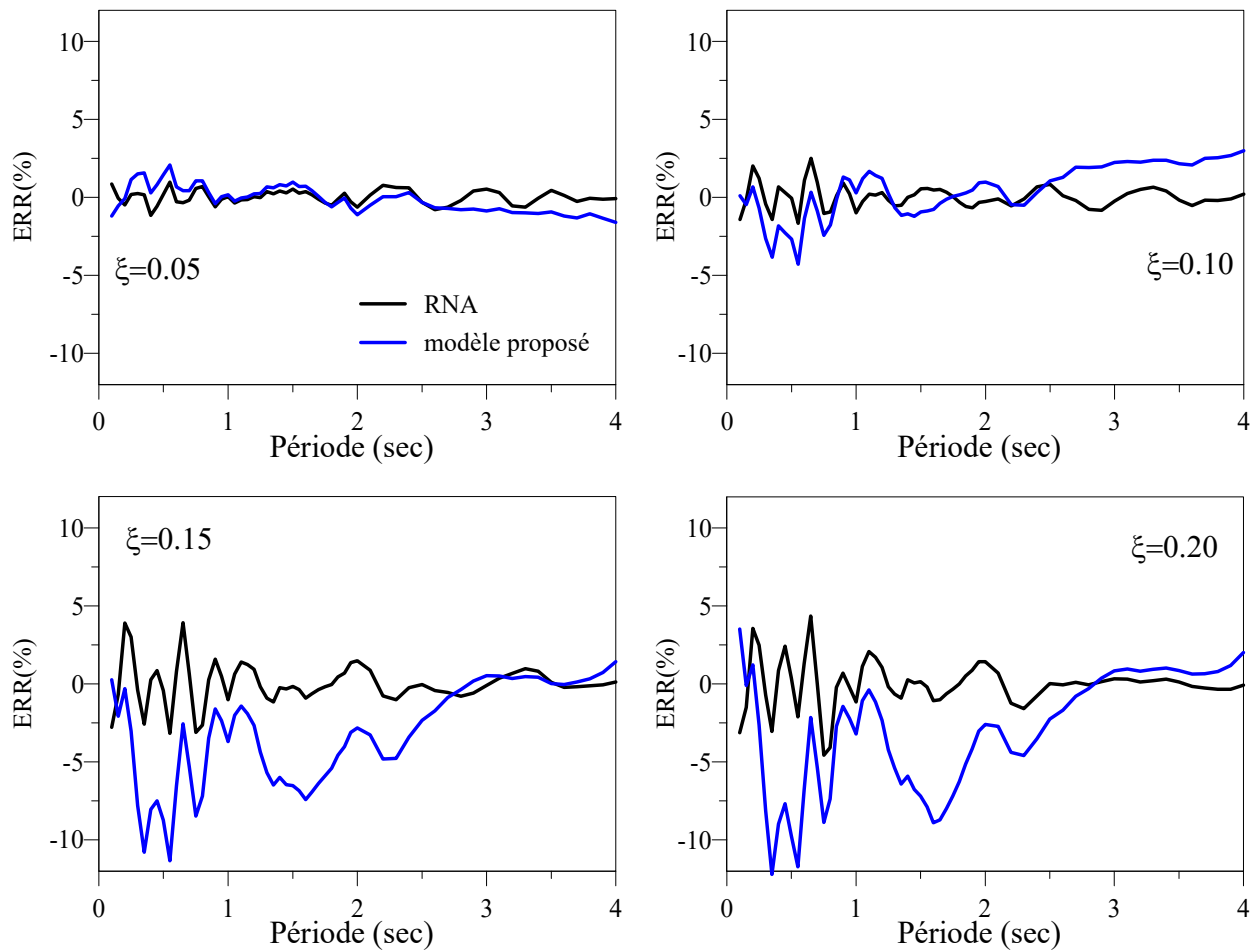
Le RNA présente des résultats beaucoup plus proches aux résultats réels, l'erreur obtenue est inférieure à 2.5 % pour un  $\xi$  égale à 10 %, et reste dans l'intervalle [-4.55%, 4.35%] pour  $\xi = 20$  %, ce qui confirme que le RNA donne des résultats plus satisfaisants que le modèle proposé.

Dans le tableau 4.1, nous comparons quelques valeurs de DCF réelles avec celles obtenu à la fois de deux méthodes pour certaines paires de valeurs de  $\xi$  et T. Quatre valeurs de  $\xi$  sont prises en considération dans cette comparaison (0.05, 0.10, 0.15 et 0.20).

Nous avons observé que l'erreur relative commise lors de l'utilisation de l'approche RNA est inférieure à celle résultante de la formule issue de la régression non linéaire. Par exemple, pour  $\xi = 10$  % et T = 4 s, nous avons observé que l'erreur pour le RNA est égale à 0,99 et 0.30% pour le modèle proposé, pour  $\xi = 20\%$  et T = 0.5 s, l'erreur observée pour le RNA est égale à 0.40 et 9.73%

pour le modèle proposé. Il ressort de ces résultats que l'utilisation de le RNA donne de très bons résultats comparant à la formulation proposée.

Le RNA constitue une méthode efficace pour prédire le DCF, et plus précis que les modèles obtenus à partir de la régression non linéaire.



**Figure 4.11:** Erreur entre les valeurs de DCF obtenues de 2 méthodes (modèle proposé, RNA) et les valeurs réelles de DCF en tenant compte les incertitudes sur  $\xi$ .

$\xi$	T	DCF (reel)	DCF (RNA)	DCF (modèle Proposé)	Erreur de RNA (%)	Erreur du modèle proposé (%)
0.05	0.5	1.076	1.074	1.060	0.19	1.49
	1.0	1.061	1.061	1.059	0.00	0.19
	2.0	1.047	1.054	1.059	-0.67	-1.15
	4.0	1.042	1.043	1.059	-0.10	-1.63
0.10	0.5	0.871	0.872	0.895	-0.11	-2.76
	1.0	0.895	0.904	0.893	-1.01	0.22
	2.0	0.901	0.903	0.892	-0.22	1.00
	4.0	0.919	0.917	0.891	0.22	3.05
0.15	0.5	0.738	0.741	0.802	-0.41	-8.67
	1.0	0.771	0.779	0.800	-1.04	-3.76
	2.0	0.776	0.765	0.798	1.42	-2.84
	4.0	0.809	0.808	0.797	0.12	1.48
0.20	0.5	0.664	0.661	0.728	0.45	-9.64
	1.0	0.702	0.710	0.725	-1.14	-3.28
	2.0	0.705	0.694	0.723	1.56	-2.55
	4.0	0.737	0.737	0.722	0.00	2.04

**Tableau 4.1:** Erreur relative de DCF obtenues de 2 méthodes pour quelques paires de T et  $\xi$ .

## 4.7 Conclusion

Dans le présent chapitre, nous avons, dans une première étape, élaboré une procédure basée sur les Réseaux de Neurones Artificiels (RNA) aux fins d'estimer les valeurs du Facteur de correction des taux d'amortissement (DCF). Cette méthode intègre de manière explicite les incertitudes inhérentes aux valeurs de l'amortissement.

C'est ainsi qu'une base de données contenant les valeurs du DCF associées à des couples de valeurs (T,  $\xi$ ) a été élaborée sur la base de quatre ensembles de 7 accélérogrammes réels compatibles respectivement avec les spectres réglementaires correspondant à chacune des 4 classes sols spécifiées par les règles parasismiques algériennes (RPA).

Une analyse de la corrélation des valeurs simulées de DCF avec les valeurs cibles a montré que les droites de régression sont pratiquement superposées à la diagonale, et que le coefficient de corrélation est très proche de 1, ce qui signifie que les valeurs du DCF obtenues en sortie avec le RNA sont en très bonne correspondance avec les valeurs cibles de la base de données.

Les résultats ont montré aussi que la procédure RNA permet de générer des valeurs du DCF dont les fluctuations correspondant à chaque type de sol restent relativement localisées autour des valeurs moyennes pour l'ensemble de la bande de périodes d'intérêt pour les structures civiles. Ces fluctuations sont de plus en plus importantes avec les valeurs croissantes de  $\xi$  quel que soit la nature du sol.

L'efficacité de l'approche RNA est confirmée par les écarts relatifs des valeurs estimées par rapport aux valeurs cibles (réelles) qui restent inférieurs à 2.5% pour  $\xi < 10\%$  et n'excèdent pas 5 % pour des valeurs supérieures de  $\xi$ : écart atteint pour quelques valeurs isolées de T pour  $\xi = 20\%$ .

Une analyse des effets des classes de sols sur les valeurs estimées du DCF a permis de conclure qu'il y a une faible dépendance entre les valeurs des DCF trouvées et le type de sol, ce dernier pouvant alors être négligé.

Dans une deuxième étape, une formulation du DCF intégrant les incertitudes inhérentes à l'amortissement a été développée pour les Règles Parasismiques Algériennes (RPA) en utilisant la même base de données utilisée dans l'approche RNA. Les variables explicatives de cette formulation sont la période de vibration T et le taux d'amortissement  $\xi$ . Les résultats montrent une bonne adéquation entre les valeurs estimées et les valeurs réelles associées.

Dans une troisième étape, une analyse comparative des erreurs relatives vis-à-vis des valeurs réelles calculées pour les estimations obtenues respectivement, par le RNA et par la formulation proposée a été menée. Les résultats montrent la même tendance des erreurs à croître, tout en demeurant inférieures à 10%, lorsque la valeur du taux d'amortissement augmente. Néanmoins, les erreurs obtenues par l'approche RNA demeurent relativement inférieures à celle obtenues par formulation, ce qui plaide à favoriser l'approche RNA pour les estimations du DCF

## **Chapitre 5**

# **Effets des incertitudes inhérentes à l'amortissement sur le DCF pour l'EC8**

# Effets des incertitudes inhérentes à l'amortissement sur le DCF pour l'EC8

---

## 5.1 Introduction

Il est évident que la réponse dynamique d'un bâtiment dépend de sa capacité de dissipation d'énergie, par conséquent, le rapport d'amortissement. La valeur d'amortissement subie par un bâtiment lors d'un séisme diffère sensiblement de la valeur spécifiée dans l'étape de conception. Cela introduit des incertitudes dans le processus de conception du bâtiment. Il serait souhaitable de considérer non seulement les effets des incertitudes dans le chargement, mais aussi les incertitudes dans les paramètres structurels.

Le DCF est principalement affecté par le taux d'amortissement critique  $\xi$ , par conséquent, l'erreur dans l'estimation d'amortissement peut conduire à une mauvaise valeur du DCF et par la suite à des inexactitudes significatives dans l'estimation de la réponse dynamique. Ceci est la principale motivation pour la recherche d'une nouvelle relation du DCF, capable de tenir compte les incertitudes à l'estimation des valeurs de  $\xi$ .

L'objectif de ce chapitre est d'étudier les effets des incertitudes liées à l'estimation de l'amortissement sur la valeur de DCF pour l'EC8. Les incertitudes d'amortissement sont représentées par une distribution de probabilité log-normale. Ces distributions sont générées en utilisant la méthode de Monte Carlo très reconnue dans le domaine des calculs aléatoires. La moyenne de cette distribution est la valeur déterministe de  $\xi$  (pris égal à 5%, 7,5%, 10%, 20% et 30%, respectivement), tandis que quatre valeurs différentes de coefficient de variation  $Cov$  ont été envisagées (10%, 20 %, 40 % et 60%, respectivement), sur la base des études réalisées par (Haviland, 1976).

Dans son travail, Haviland a assemblé les informations fournies par des expériences empiriques complètes, et a fourni une gamme de données pour les différents niveaux d'amplitudes de réponse

et les grandes classes de systèmes structurels et tailles de construction. Le travail de Haviland a prouvé que les distributions Log-normales et Gamma fournissent le meilleur ajustement aux variations d'amortissement, avec un coefficient de variation (Cov) allant de 42% à 87%. Davenport et Carroll (1986), après avoir examiné la base de données de Haviland, ont suggéré de modifier l'intervalle de coefficient de variation (Cov), de 33% à 78% et de prendre une valeur moyenne de 40%.

La technique de Monte Carlo a été utilisée pour simuler un grand nombre de valeurs de  $\xi$ . Le nombre le plus approprié d'échantillons (200 pour chaque spectre de réponse) a été trouvé après une étude statistique.

Tout d'abord, trois ensembles des enregistrements sismiques naturelles, compatibles (en moyenne) aux spectres de réponses associés à l'EC8 pour trois types de sols : sol A, B et C, ont été sélectionnés. Par la suite, ces enregistrements sismiques ont été utilisés pour obtenir des valeurs de DCF avec la prise en compte des incertitudes inhérentes à l'amortissement. Ensuite, ces valeurs de DCF ont été comparées avec quelques formules de DCF issues de la littérature.

Enfin, une nouvelle formule de DCF capable de prendre en considération les incertitudes inhérentes à l'évaluation de  $\xi$  lors de l'évaluation de DCF a été proposée. La formule proposée a été trouvée à travers la régression non linéaire en utilisant le logiciel Eureqa. Certaines conclusions et les besoins de recherche futurs sont discutés à la fin du travail.

## **5.2 Sélection des enregistrements sismiques**

Les mêmes principes réglementaires sont imposés par l'Eurocode 8 (EC8) en ce qui concerne les formes spectrales associées aux structures et leur dépendance de la classe de sol et de la valeur  $a_g$  reliée au hasard sismique en termes de PGA. L'EC8 permet l'utilisation d'accélérogrammes réels, artificiels ou simulés sous les mêmes conditions que celles édictées en introduction du chapitre 3. Aux fins de considérer des effets moyens sur les structures plutôt que les maxima, l'EC8 exige qu'au moins 7 analyses non linéaires soient effectuées. De même, pour l'utilisation d'accélérogrammes réels, on surmonte les difficultés de lier de manière rationnelle les mouvements sismiques au hasard du site en utilisant pour la sélection des enregistrements réels, un outil informatique, appelé "Rexel" [Iervolino et al (2010)], qui a été développé au "Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Università degli Studi di Napoli Federico II", en Italie.

Le programme "Rexel" a été utilisé pour sélectionner trois ensembles d'enregistrements de tremblements de terre compatibles avec les trois spectres de réponse de l'EC8 associés aux type de sols A, B et C. Rexel est un logiciel qui permet à l'utilisateur de sélectionner des ensembles d'enregistrements sismiques représentatifs des spectres de réponse de calcul. L'utilisateur spécifie le spectre de réponse cible et les caractéristiques souhaitées des enregistrements sismiques en termes de magnitude de tremblement de terre, de la distance épacentrale et d'autres caractéristiques générales. Rexel sélectionne ensuite des suites d'enregistrements sismiques de la base de données interne à partir des enregistrements sismiques qui satisfont aux critères de sélection définis par l'utilisateur et de fournir de bons ajustements au spectre de réponse de cible.

La figure 5.1 illustre l'interface du Rexel tel qu'elle a été conçu pour présenter les différents paramètres présentés aux utilisateurs pour la sélection des enregistrements sismiques. L'utilisateur peut choisir entre deux codes insérés dans le logiciel (le code Italien ou l'EC 8) ou choisir d'insérer le spectre de réponse conçu par l'utilisateur lui-même. Dans une fenêtre, il y a les paramètres de base de recherche dont la magnitude, le PGA et la distance épacentrales. Un autre paramètre de sélection est le nombre des enregistrements sismiques sélectionnés par groupe (set size) où on a le choix entre 1,7 et 30 enregistrements par set.

Comme de nombreux codes à travers le monde, l'Eurocode 8 (EC8) permet l'utilisation des enregistrements sismiques réels pour l'analyse sismique des structures. La principale condition à satisfaire est que le spectre élastique moyen ne sous-estime pas le spectre de code, avec une tolérance de 10%, dans un large éventail de périodes, en fonction des propriétés dynamiques de la structure.

La déviation moyenne du spectre ( $\delta$ ) donne une mesure quantitative de la quantité de spectre d'un enregistrement sismique dévié à partir du spectre code. La définition de ( $\delta$ ) est donnée par l'équation :

$$\delta = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left( \frac{Sa_0(T_i) - Sa_s(T_i)}{Sa_s(T_i)} \right)^2} \quad (5.1)$$



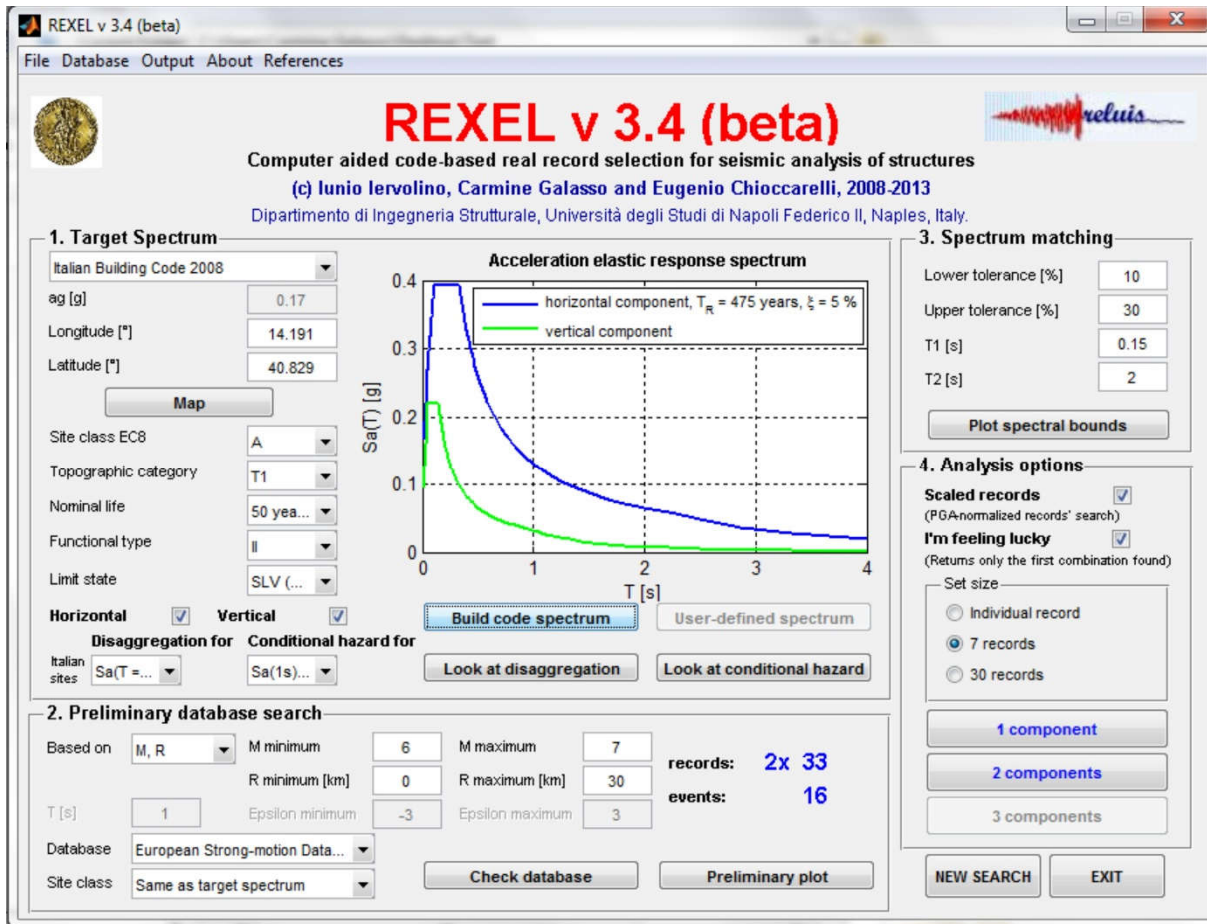


Figure 5.1: Interface de logiciel Roxel

Où  $Sa_0(T_i)$  représente l'ordonnée de pseudo-accélération de spectre moyen associée aux enregistrements sismiques sélectionnés pour la période  $T_i$ ,  $Sa_S(T_i)$  est la valeur de l'ordonnée du spectre code à la même période, et  $N$  est le nombre de valeurs au sein de la gamme des périodes considérées. La sélection d'un enregistrement avec une faible valeur de  $\delta$  signifie l'obtention d'un spectre moyen qui tend à être très proche du spectre de code. Le contrôle de ce paramètre peut permettre de choisir des combinaisons caractérisées par des enregistrements ayant des spectres individuels relativement proche du spectre de référence, et donc étant étroitement distribuées autour d'elle.

Dans ce travail, trois suites de sept enregistrements sismiques correspondant chacune à un type de spectres de conception associés à un type de sol de l'EC8 ont été sélectionnés, avec une accélération

du sol maximale  $a_g = 0,35$ . Selon EC8, le type de sol A correspond à la roche, le sol de type B à des dépôts de sable très dense, gravier ou d'argile très raide et le type de sol C à des dépôts profonds de dense ou moyen dense sable, de gravier ou d'argile.

La liste des enregistrements sélectionnés avec leurs principales caractéristiques sont présentées dans les tableaux 5.1, 5.2 et 5.3 pour les sols A, B et C respectivement. Les spectres de réponses de ces enregistrements avec leurs moyennes sont représentés aux figures 4.1, 4.2 et 4.3. Les spectres de réponse cible de l'EC8 qui sont utilisés pour la sélection en utilisant REXEL sont également présentés dans ces figures.

Station ID	Séisme	Date	Mw	Vs30 (m/s)	Distance Epicentral (km)
ST20	Friuli	06/05/1976	6,5	1021	23
ST54	Tabas	16/09/1978	7,3	826	12
ST96	Campano Lucano	23/11/1980	6,9	1100	32
ST96	Campano Lucano	23/11/1980	6,9	1100	32
ST2486	South Iceland	17/06/2000	6,5	-	5
ST_106	South Iceland	17/06/2000	6,5	-	5,25
ST_101	Olfus	29/05/2008	6,3	-	7,97

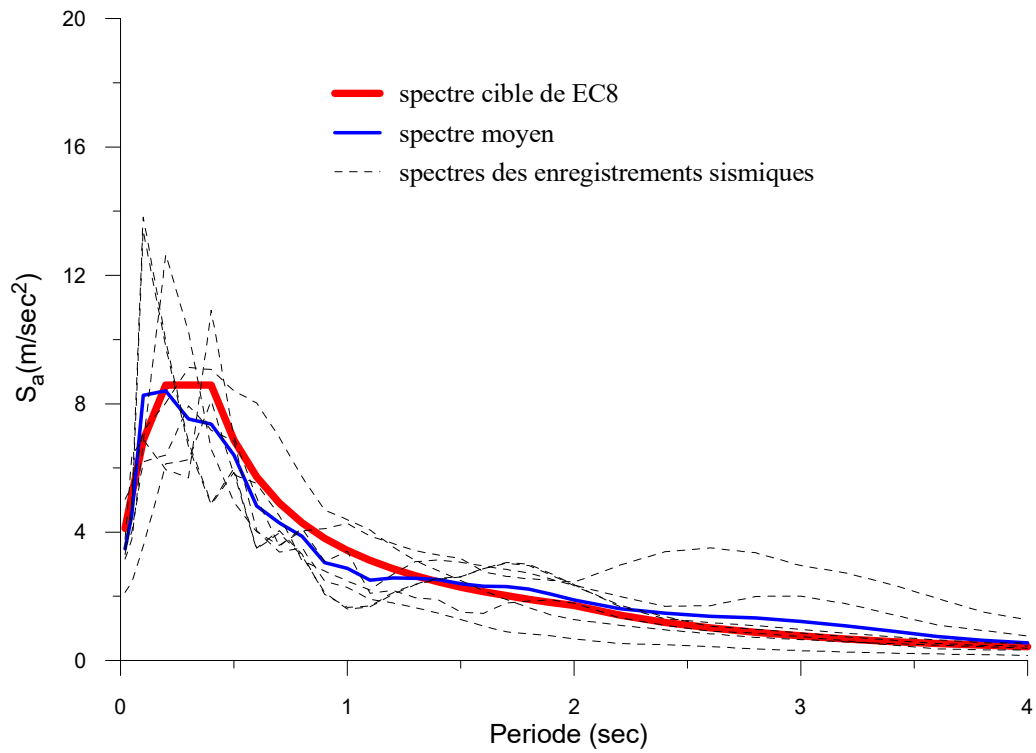
**Tableau 5.1 :** Enregistrements sismiques sélectionnés par REXEL pour le sol A

Station ID	Séisme	Date	Mw	Vs30 (m/s)	Distance Epicentral (km)
ST205	Erzincan	33676	6,6	421	13
ST2482	South Iceland	17/06/2000	6,5	-	15
ST2484	South Iceland (aftershock)	36698	6,4	-	12
ST_105	South Iceland	17/06/2000	6,5	-	14,56
AQV	L'Aquila mainshock	06/04/2009	6,3	474	4,87
LGPC	Loma Prieta	18/10/1989	6,9	477,7	18,75
ST_58065	Loma Prieta	18/10/1989	6,9	371	27,59

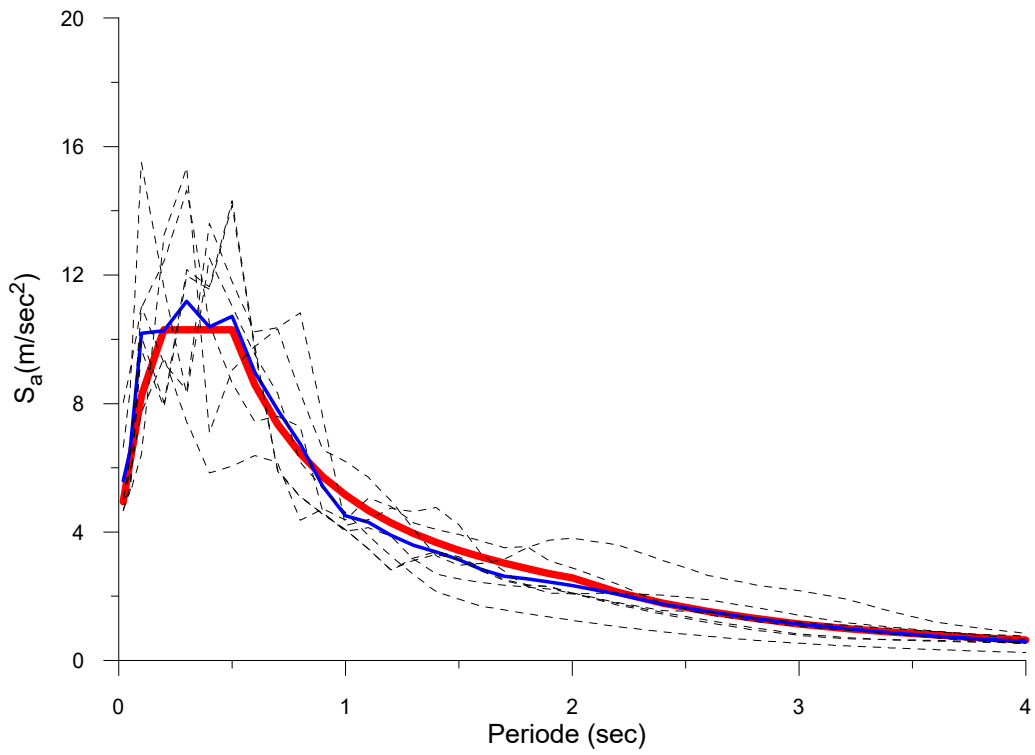
**Tableau 5.2 :** Enregistrements sismiques sélectionnés par REXEL pour le sol B

Station ID	Séisme	Date	Mw	Vs30 (m/s)	Distance Epicentral (km)
AI_137_DIN	Dinar	1995/10/01	6,4	198,1	0,47
EC04	Imperial Valley	1979/10/15	6,5	208,9	27,03
EC05	Imperial Valley	1979/10/15	6,5	205,6	27,68
EC05	Imperial Valley	1979/10/15	6,5	205,6	27,68
EC06	Imperial Valley	1979/10/15	6,5	203,2	27,35
ST_47380	Loma Prieta	1989/10/18	6,9	271	29,66
ERZ	Erzincan	1992/03/13	6,6	274,5	8,97

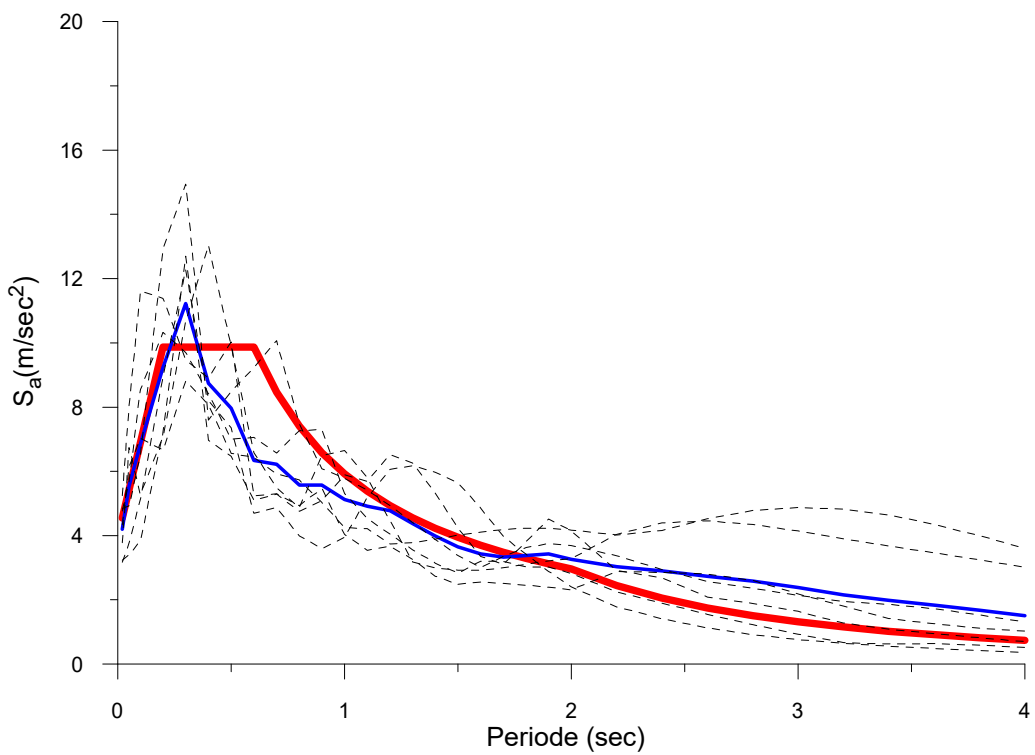
**Tableau 5.3 :** Enregistrements sismiques sélectionnés par REXEL pour le sol C



**Figure 5.2:** Spectres de réponses des enregistrements sismiques pour le sol A



**Figure 5.3:** Spectres de réponses des enregistrements sismiques pour le sol B



**Figure 5.4:** Spectres de réponses des enregistrements sismiques pour le sol C

## 5.3 Effets des incertitudes de l'amortissement sur le DCF

### 5.3.1 Nombre de simulations requises pour la Méthode de Monte Carlo

Une estimation du nombre de simulations nécessaires à un problème physique donné constitue un point très important de débat dans les calculs aléatoires.

Dans ce travail, la méthode de Monte Carlo est utilisée pour estimer les valeurs de DCF ( $\xi$ , T) associées à une structure de période fondamentale T et une valeur aléatoire de taux d'amortissement critique  $\xi$ .

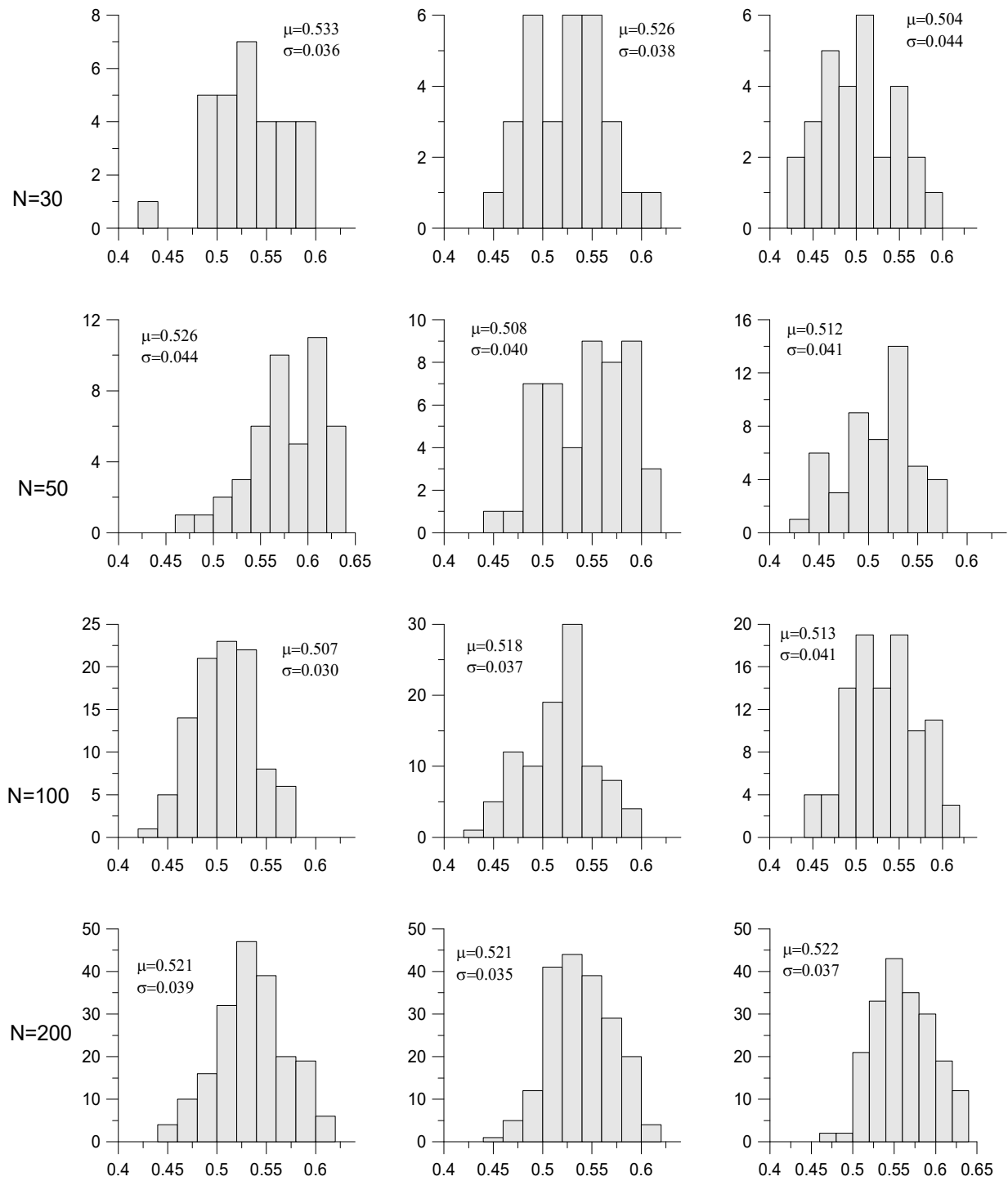
Le but ici est de trouver le nombre minimal de simulation qui donne une représentation fiable des résultats avec un coût minimum en termes de temps. Le nombre de spectres de réponse calculé pour chaque valeur de  $\xi$  simulée est de  $7 \times 32 \times 5 \times 3$  où 7 est le nombre d'enregistrements pour chaque sol, 32 est le nombre de périodes, 5 est le nombre de  $\xi$  considéré ici et 3 est le nombre des coefficients de variation, ce qui signifie que l'augmentation du nombre de simulation de N à N + 1 conduit à la multiplication du nombre de réponses spectrales qui doivent être calculés par 3360. Cela justifie le problème de l'augmentation du nombre de simulations à une valeur très élevée de N.

Pour chaque période T, nous avons un certain nombre de simulation N qui est le nombre de  $\xi$  simulé, cela signifie que nous avons le même nombre N pour les valeurs de DCF obtenues après le calcul des valeurs DCF selon la méthode représentée ci-dessous.

Cela signifie que lorsque N augmente l'histogramme des distributions des valeurs de DCF (voir figure 5.5) pour une valeur de T donnée tend à être stable et avoir la forme limite (loi des grands nombres), ces distributions limites des DCF ont pratiquement la même valeur de moyenne et d'écart type, ces valeurs de DCF sont celle utilisées par la suite dans cette étude. La figure 5.5 montre les résultats obtenus pour les limites des valeurs utilisées dans cette étude ( $\xi = 0,30$  et Cov = 0,40), ce qui présente le maximum de perturbations des résultats autour des valeurs moyennes de  $\xi$ . (Si le nombre de simulation est suffisant ici automatiquement il est suffisant pour des valeurs inférieures de  $\xi$  et des valeurs plus faibles de Cov).

Les résultats sont présentés pour une valeur de période égale à 2 sec et 4 valeurs de N (30, 50, 100 et 200) pour 3 estimations entre 100 estimations réalisées au cours de l'étude.

Il ressort de la figure 5.5 que l'augmentation du nombre de simulation 30-200 a une influence significative sur l'histogramme des valeurs DCF.



**Figure 5.5:** Histogrammes des valeurs de DCF pour T=2 sec pour différents nombres de simulations (N).

Pour  $N = 30$ , la variation des moyennes de distributions des valeurs de DCF est de  $\mu = 0,504$  à  $0,533$  et la variation de son écart-type est de  $\sigma = 0,036$  à  $0,044$ , l'erreur relative entre les valeurs de  $\mu$  atteignent  $5,75\%$ .

Pour  $N = 200$ , la moyenne est variée de  $\mu = 0,522$  à  $0,521$  et la variation de son écart-type est de  $\sigma = 0,035$  à  $0,039$ , l'erreur relative entre les 2 valeurs de  $\mu$  est pratiquement nulle. Ce qui signifie que  $N = 200$  constitué un nombre de simulations suffisant pour donner des résultats fiables pour ce cas d'étude. Il est clair de cette comparaison que la variation des caractéristiques statistiques des valeurs de DCF entre les différentes simulations diminuées lorsque  $N$  augmente.

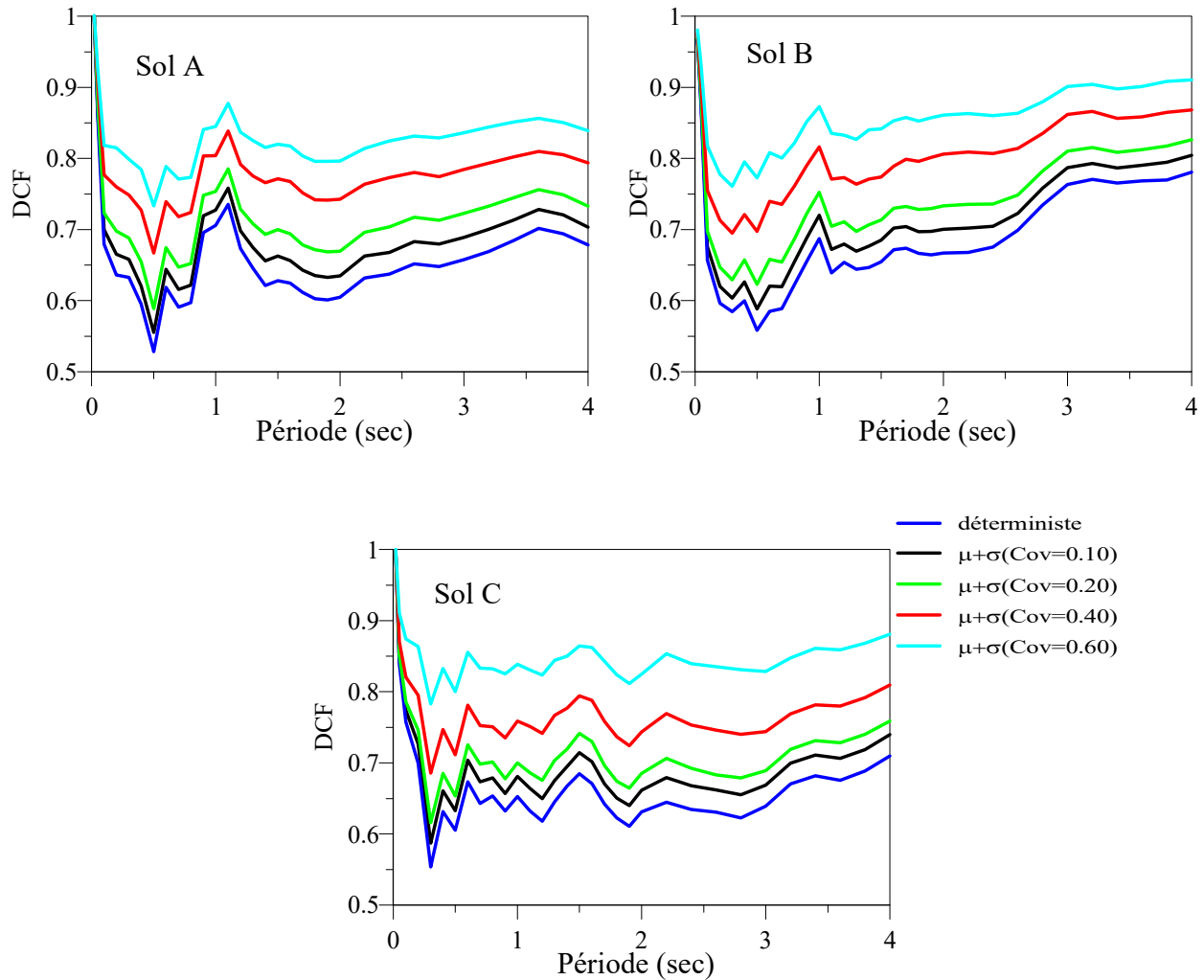
### **5.3.2 Comparaison entre différentes valeurs du coefficient de variation pour différentes conditions de sols**

Dans cette section, les résultats obtenus pour le DCF en considérant trois valeurs différentes du coefficient de variation  $Cov$  ( $Cov = 0,10, 0,20, 0,40$  et  $0,60$ ) sont présentés. La procédure de l'estimation de ces valeurs est présentée au paragraphe 4.3.2.

Dans la Figure 5.6, quatre courbes sont tracées pour chaque type de sol, à savoir: (i) les valeurs du DCF déterministe, à savoir les valeurs du DCF pertinent à la valeur d'amortissement déterministe ( $\xi = 20\%$ , dans le cas sous examen), (ii) de trois Courbes de DCF ( $\mu + \sigma$ ) (une pour chaque valeur  $Cov$ ), correspondant à la moyenne plus 1 écart-type des 200 courbes de DCF individuels associées aux 200 valeurs de  $\xi$  obtenues à partir d'échantillonnage aléatoire par la méthode de Monte Carlo.

Il est à noter que toutes les courbes représentées sur la figure 5.5 ont la même tendance, quelle que soit la valeur de  $Cov$  considérée. De toute évidence, les différences entre la courbe des DCF déterministe et les courbes ( $\mu + \sigma$ ) augmentent lorsque la valeur du  $Cov$  croît. Par exemple, pour  $T = 2$  sec, la valeur déterministe de DCF est égale à  $0,60$  alors qu'il en résulte égal à  $0,74$  pour un  $Cov = 0,4$  et  $0,80$  pour un  $Cov=0,60$ , avec une erreur d'environ  $23\%$  et  $32\%$  respectivement. Des résultats similaires sont obtenus compte tenu de différents types de sols et les plages de la période. En conséquence, les incertitudes inhérentes aux valeurs de  $\xi$  avec un  $Cov = 40\%$  conduit à des erreurs dans l'estimation DCF supérieure à  $23\%$ .

Les valeurs du DCF considérant les incertitudes se révèlent être plus grandes que les valeurs déterministes correspondantes, en d'autres termes, si les incertitudes dues à l'amortissement ne sont pas prises en considération, de plus petites amplitudes spectrales sont obtenues, lesquelles se situent du côté non sécuritaire de la conception.



**Figure 5.6:** Comparaison des valeurs de DCF pour différentes valeurs de Cov ( $\xi = 20\%$ ).

### 5.3.3 Comparaison des DCF obtenus avec les formulations de la littérature

Dans cette section, une comparaison entre les différentes formulations approximatives de DCF de la littérature et les valeurs de DCF dérivés dans cette étude envisagent incertaine amortissement ( $Cov = 0.20$ ) est présenté, pour différentes valeurs de  $\xi$  (10, 15, 20 et 30%, respectivement).

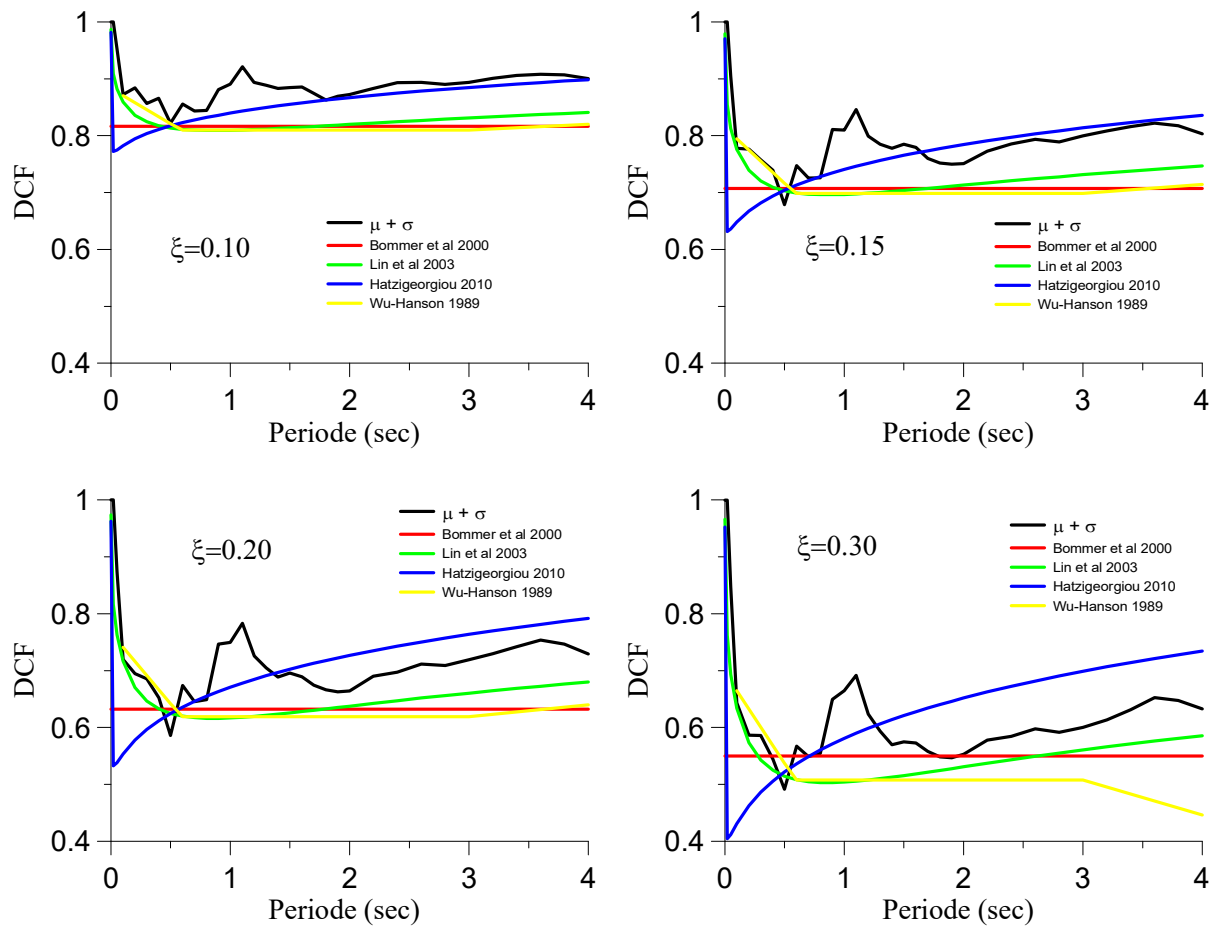
Les formulations approximatives du DCF considérées ici sont celles proposées par: (i) Bommer et al (2000), (ii) Lin et Chang (2003), (iii) Hatzigeorgiou (2010) et (iv) Wu et Hanson (1989).

Les résultats de cette comparaison sont montrés dans la figure 5.6, on note à priori que les différences entre les résultats de cette étude et les formulations du DCF issues de la littérature, en considérant les incertitudes, augmentent avec l'augmentation du taux d'amortissement. De plus, il est important de noter que les formulations de la littérature (à l'exception de la formule de



Hatzigeorgiou pour  $T > 1.2$  s) sous-estiment les valeurs du DCF, indépendamment des valeurs de  $\xi$ . Cette remarque montre qu'aucune formule de littérature n'est capable d'estimer les valeurs de DCF avec la prise en considération des incertitudes inhérentes à  $\xi$ .

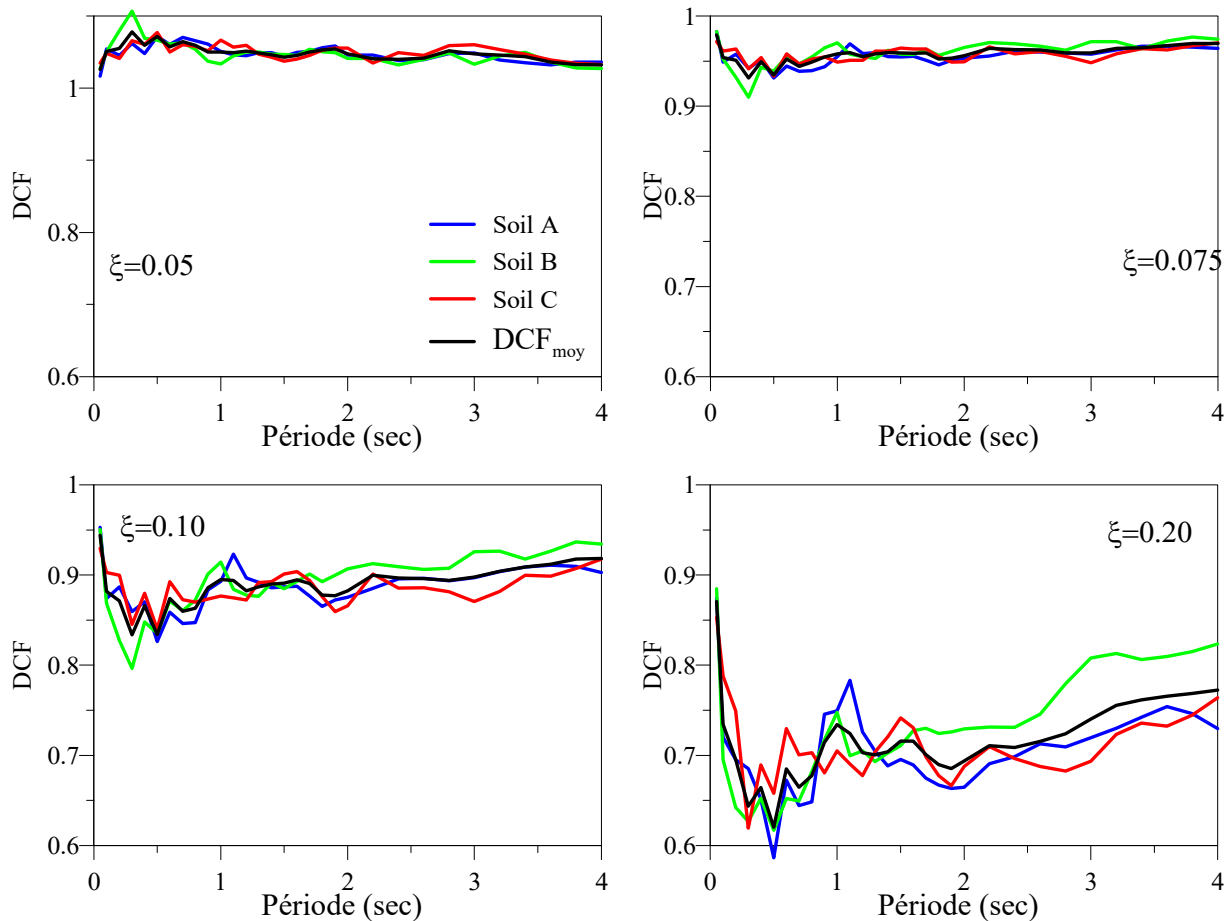
Les valeurs de DCF en considérant les incertitudes se révèlent être plus grandes que les valeurs déterministes correspondantes, c'est-à-dire que si les incertitudes sur l'amortissement ne sont pas considérées, on obtient des ordonnées spectrales inférieures, (c'est-à-dire des valeurs inférieure de cisaillement de base ou de déplacement de conception), ce qui met la structure dans le côté dangereux de la conception.



**Figure 5.7:** Comparaison entre les valeurs de DCF réelles et des formulations de littérature (Cov de  $\xi=20\%$ )

### 5.3.4 Etude de l'effet du sol

Pour quantifier la variabilité des courbes de DCF avec la prise en considération des incertitudes sur  $\xi$  pour différents sols, les courbes DCF pour chaque sol et leur moyenne ( $DCF_{moy}$ ) sont calculées et présentées à la figure 5.7. La valeur  $DCF_{moy}$  peut être considérée comme une valeur de DCF qui néglige les effets de site. Il ressort clairement de la figure que l'influence du type de sol sur les facteurs de correction de l'amortissement augmente avec l'augmentation du taux d'amortissement.



**Figure 5.8:** Comparaison entre les valeurs de DCF pour les 3 types du sol

L'erreur maximale entre le  $DCF_{moy}$  et le DCF estimé pour chaque site est inférieure à 8,38% pour un taux d'amortissement  $\xi = 20\%$  et 11,47% pour  $\xi = 30\%$ . Pour  $\xi = 20\%$ , l'erreur maximale est de 7,53% pour le sol A, de 8,38% pour le sol B et de 7,18% pour le sol C. D'après les résultats présentés sur cette figure, on peut conclure qu'il existe une faible dépendance entre les valeurs trouvées de DCF et le type de sol qui peut être négligé.

## 5.4 Formulation du DCF proposée pour l'EC8

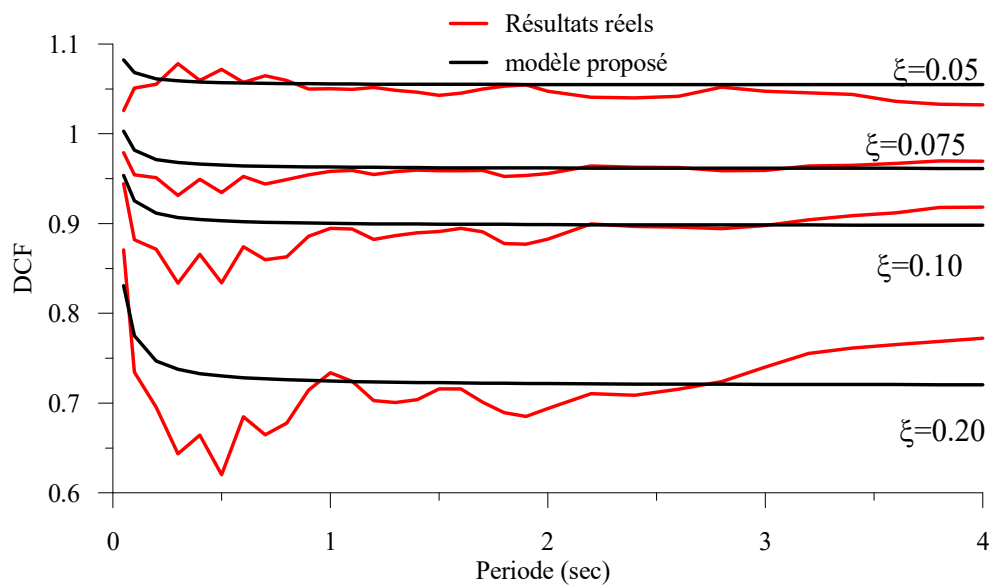
Comme vu précédemment, les formules de DCF existantes actuellement sur la littérature ne sont pas en mesure de prendre en compte les incertitudes sur l'amortissement dans l'estimation du DCF. Dans ce contexte, le but dans cette partie du travail est de développer une nouvelle formule pour combler cette lacune pour le code parasismique EC8. Le logiciel Eureka a été utilisé pour dériver cette nouvelle formule.

La base de données insérée sur Eureka est constituée de trois vecteurs dont les valeurs du DCF (en considérant des incertitudes sur  $\xi$  avec un  $Cov=0.20$ ) et les valeurs correspondantes du taux d'amortissement  $\xi$  et de la période de vibration, respectivement.

A la fin du travail, la relation suivante a été proposée [Benahmed et al (2017)]:

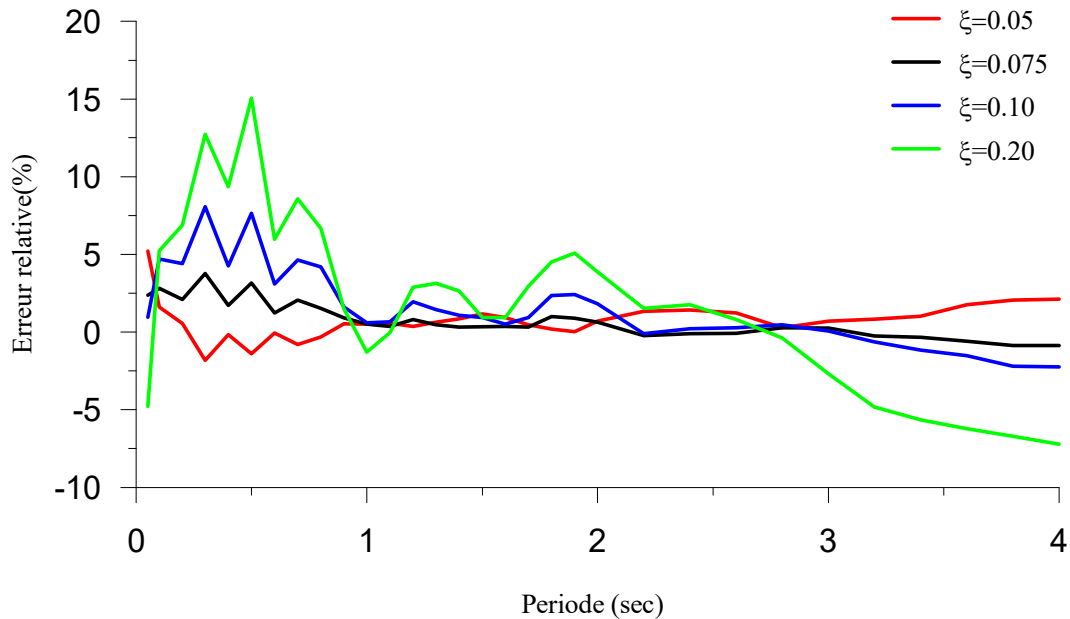
$$DCF = 0.941 + \frac{0.009}{\xi} + 0.028 \times \frac{\xi}{T} - 1.335 \times \xi \quad (5.2)$$

La figure 5.9 compare le modèle de DCF proposé et les valeurs réelles du DCF considérant l'amortissement incertain (DCF moyen + 1 écart-type ou  $\mu + \sigma$ ) pour quelques valeurs de  $\xi$  de l'ensemble sélectionné, égales à  $\xi_1 = 5\%$ ,  $\xi_3 = 7.5\%$ ,  $\xi_6 = 10\%$ ,  $\xi_{10} = 20\%$ . Une bonne corrélation entre les résultats obtenus par les deux méthodes est observée. La différence entre les deux courbes augmente avec l'augmentation de valeurs de  $\xi$ .



**Figure 5.9:** Comparaison entre la formule proposée du DCF et les valeurs du DCF réelles en considérant un amortissement incertain.

Cela est confirmé aussi par l'erreur relative entre les prédictions du modèle et les résultats exacts reportés dans la Fig. 5.10, comme on peut voir, en effet, l'erreur augmente avec l'augmentation des valeurs de  $\xi$ , elle demeure toujours inférieure à 15% (pour  $\xi = \xi_{10} = 20\%$ ). En concentrant l'attention sur les erreurs négatives seulement (c-à-d les résultats réels inférieurs aux résultats du modèle), des erreurs en deçà de 7,2% sont trouvés. Ce qui nous donne des résultats très satisfaisants.



**Figure 5.10:** Erreur relative entre les valeurs du DCF obtenues par les deux méthodes

## 5.5 Conclusions

Dans cette partie du travail, l'effet des incertitudes inhérentes à l'amortissement sur le facteur de correction d'amortissement (DCF) associé au code parasismique européen EC 8 a été examiné. Toutes les formulations de DCF trouvés dans la littérature ne sont pas capables de prendre en considération de telles incertitudes. Basée sur les résultats de cette étude, une nouvelle formulation du DCF, capable de tenir compte des incertitudes dans l'estimation de l'amortissement, a été proposée. La relation proposée dépend du taux d'amortissement et de la période fondamentale seulement. Les erreurs entre le modèle de prédiction et les résultats exacts n'excèdent pas 15% pour  $\xi = 0.20$  (dans ce cas le modèle est conservatif). Si on concentre l'attention sur le cas défavorable seulement où les erreurs sont négatives (résultats réels inférieurs aux résultats du modèle), les erreurs restent moins de 7,2%. Ce qui nous donne des résultats très satisfaisants.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

Dans la plupart des codes parasismiques de par le monde, les spectres de réponse sont donnés pour un taux d'amortissement  $\xi = 5\%$ . Néanmoins, les structures civiles peuvent être caractérisées par des valeurs d'amortissement différentes, notamment actuellement, avec l'incorporation de plus en plus importante de systèmes d'isolation et de dispositifs de dissipation d'énergie. Une des conséquences immédiates lors du calcul de telles structures se traduit par le besoin d'ajuster les spectres de réponse à 5% d'amortissement à d'autres niveaux d'amortissement. Dans ce cas, un facteur de correction est utilisé pour évaluer la réponse spectrale à n'importe quelle valeur. Nous adopterons dans cette étude le terme de Damping Correction Factor (DCF).

L'erreur dans l'estimation de l'amortissement peut conduire à de fausses valeurs du DCF et subséquemment à des inexactitudes significatives dans l'estimation de la réponse dynamique. C'est la raison principale qui a motivé la recherche d'une nouvelle formulation du DCF pouvant prendre en compte les incertitudes de l'amortissement dans les évaluations du DCF.

Dans ce contexte, L'objectif principal du travail développé dans cette thèse a été l'élaboration d'une procédure pour la prise en compte de l'effet des incertitudes liées à l'amortissement sur les valeurs de DCF et donc implicitement sur les réponses des structures notamment celle caractérisées par des niveaux d'amortissement supérieurs à 5%.

C'est ainsi que dans un premier chapitre, une recherche bibliographique sur les origines et les sources de l'amortissement, ainsi qu'une description des incertitudes qui lui sont inhérentes ont été présentées. Dans un deuxième chapitre la définition du facteur de correction d'amortissement (DCF) et la présentation de ses différentes formulations recensées dans la littérature scientifique ont été abordés.

Dans le troisième chapitre, la procédure d'établissement d'une formulation déterministe du DCF compatible avec le Règlement Parasismique Algérien (RPA99 version 2003) a été décrite. La formulation proposée tient compte des spécificités du code algérien en termes de classification des sols et de spectre de réponse de calcul. L'élaboration de la base de données utilisée dans cette procédure, est faite en sorte reliés de manière rationnelle les mouvements sismiques au hasard sismique du site et aux critères de sélection tel que décrit par le règlement. Il a été montré que

l'influence du sol peut être négligé et sur cette base, un programme informatique puissant utilisant des algorithmes de calcul évolutif est utilisé pour déterminer les formulations mathématiques les plus simples décrivant de manière la plus exacte possible les séries de données proposées.

Une étude comparative entre la formulation proposée, certaines approches proposées par la littérature et la réglementation RPA a été présentée. Les résultats ont été discutés en termes d'erreurs entre les résultats de chaque formulation et les données réelles. Il a été montré que l'approche proposée est celle qui s'accorde le mieux avec les valeurs cibles (prises comme références) tout en garantissant un meilleur degré de sécurité par rapport aux autres approches.

Dans le quatrième chapitre, une nouvelle méthode pour la prédiction des valeurs de DCF a été développée sur la base d'un Réseau de Neurones Artificiels (RNA) dont l'architecture a été conçue de manière compatible avec le problème. Cette technique, qui a intégrée de manière explicite les incertitudes inhérentes à l'amortissement, a permis de générer des valeurs du DCF de manière compatible avec les spécificités du règlement parasismique algérien et en utilisant une banque de données accélérométriques réelles.

Une analyse de la corrélation a montré que les valeurs du DCF obtenues par le RNA sont en très bonne correspondance avec les valeurs cibles de la base de données.

Les valeurs du DCF générées par la procédure RNA sont caractérisées, pour chaque type de sol, par des fluctuations de plus en plus importantes que les valeurs de l'amortissement augmentent. L'efficacité de l'approche RNA est confirmée par de faibles valeurs des écarts relatifs des valeurs estimées par rapport aux valeurs cibles (réelles).

Une analyse des effets des classes de sols sur les valeurs estimées du DCF a permis de conclure qu'il y a une faible dépendance entre les valeurs des DCF trouvées et le type de sol, ce dernier pouvant alors être négligé.

C'est ainsi, qu'une nouvelle formulation du DCF intégrant cette fois-ci les incertitudes inhérentes à l'amortissement a été développée pour les Règles Parasismiques Algériennes (RPA) sur la même base de données de valeurs du DCF utilisée comme entrée pour l'approche RNA. Les résultats montrent une bonne adéquation entre les valeurs estimées et les valeurs réelles associées.

Une analyse comparative des erreurs relatives vis-à-vis des valeurs réelles calculées respectivement pour l'approche le RNA et pour la formulation proposée du RPA a montré la même tendance de

ces erreurs à croître, tout en demeurant inférieures à 5%, lorsque la valeur du taux d'amortissement augmente. Néanmoins, les erreurs obtenues par l'approche RNA demeurent relativement inférieures à celle obtenues par formulation, ce qui plaide à favoriser l'approche RNA pour les estimations du DCF

Le cinquième chapitre est consacré à l'examen des effets des incertitudes de l'amortissement sur l'estimation du DCF en basant l'analyse (choix de la base de données réelles) sur l'Eurocode 8 (EC8). Il a été montré que les formulations de DCF trouvés dans la littérature ne sont pas capables de prendre en considération de telles incertitudes. Une nouvelle formulation du DCF compatible avec l'EC8, capable de tenir compte des incertitudes dans l'estimation de l'amortissement, a été proposée. La relation proposée dépend du taux d'amortissement et de la période fondamentale seulement. Les erreurs entre le modèle de prédiction et les résultats exacts n'excèdent pas 7.2 %.



## Bibliographie

- Abrahamson. NA, Silva. WJ (1996), *Empirical ground motion models, Section 4: Spectral scaling for other damping values*, Report to Brookhaven National Laboratory.
- Akkar. S, Bommer. J (2007), *Prediction of elastic displacement response spectra in Europe and the Middle East*, Earthq. Engrg. Struct. Dyn., 36:1275–1301.
- Akkar. S, Sandikkaya. MA, Ay. BÖ (2014), *Compatible ground-motion prediction equations for damping scaling factors and vertical-to-horizontal spectral amplitude ratios for the broader Europe region*, Bulletin of Earthquake Engineering, No. 1, 12(2014) 517-47.
- Ancheta. T, Darragh. R, Silva. W, Abrahamson. N., Atkinson. G, Boore. D, Bozorgnia. Y, Campbell. K, Chiou. B, Graves. R, Idriss. I. M, Stewart. J, Shantz. T, and Youngs. R, (2012a). PEER NGA-West2 Database: *A database of ground motions recorded in shallow crustal earthquakes in active tectonic regimes*, in Proceedings, 15th World Conference on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal, 5599.
- Ancheta. T, Darragh. R, Stewart. J, Seyhan. E, Silva. W, Chiou. B, Woodell. K, Graves. R, Kottke. A, and Boore. D, (2012b), *PEER NGA-West2 Database*, PEER Report, Pacific Earthquake Engineering Research Center, Berkeley, CA
- Anmin. H, Deyuan. Z, Yaming. L, Hui Z (2011) , *Effects of moment magnitude, site conditions and closest distance on damping modification factors*, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Volume 31, Issue 9, Pages 1232–1247
- Ashour. SA (1987), *Elastic seismic response of buildings with supplemental damping*, Ph.D, dissertation, Department of Civil Engineering, University of Michigan.
- Atkinson. GM, Pierre. JR (2004), *Ground-motion response spectra in eastern North America for different critical damping values*, Seismo. Res. Lett., 75:541-545.
- Bahram. G, Kermani, Susan S. Schiffman, H. Troy Nagle (2005), *Performance of the Levenberg–Marquardt neural network training method in electronic nose applications*, Sensors and Actuators B: Chemical, Volume 110, Issue 1, Pages 13-22.
- Benahmed. B, Hammoutene. M (2017), *Use of the neural networks to estimate the DCF for Eurocode 8*. Periodica Polytechnica Civil Engineering (accepted for publication).
- Benahmed. B, Hammoutene. M, Cardone. D (2017). *Effects of Damping Uncertainties on Damping Reduction Factors*, Period. Polytech. Civil Eng., Vol. 61, No. 2, pp. 341-350. DOI: 10.3311/PPci.9665
- Berge-Thierry. C, Cotton. F, Scotti. O, Griot-Pommer. DA, Fukushima. Y (2003). *New empirical response spectral attenuation laws for moderate European earthquakes*, J. Earthq. Engrg., 7:193–222
- Bommer. JJ, Elnashai. AS, Chlimintzas. GO, Lee. D (1998). *Review and development of response spectra for displacement-based design*, ESEE Research Report No. 98-3, Imperial College London.
- Bommer. JJ, Elnashai. AS, Weir AG (2000) *Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes*. In: Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering, Auckland.
- Bommer. JJ, Mendis. R (2005). *Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios*, Earthq. Engrg. Struct. Dyn., 34:145–165.
- Boore. DM, Joyner. WB, Fumal. TE (1993). *Estimation of response spectra and peak accelerations from western North American earthquakes: an interim report*, US Geological Survey Open-File Report 93-509, Menlo Park, CA.

- Bozorgnia. Y, Abrahamson. NA, Campbell. KW, Rowshandel. B, Shantz. T (2012), *NGA-West2: A comprehensive research program to update ground motion prediction equations for shallow crustal earthquakes in active tectonic regions*, Proc., 15th World Conf. on Earthquake Engineering, Lisbon, Portugal.
- Bozorgnia. Y, Campbell. KW (2004), *Engineering characterization of ground motion*, In: *Earthquake Engineering: From Engineering Seismology to Performance-Based Engineering*, Y. Bozorgnia and V.V. Bertero (eds.), CRC Press, Boca Raton, FL.
- Cameron. WI, Green. RU (2007), *Damping correction factors for horizontal ground-motion response spectra*, Bulletin of the Seismological Society of America; 97(3):934–960.
- Cardone. D, Dolce. M, Rivelli. M (2009), *Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra*, Bulletin of Earthquake Engineering; 7:273–291.
- Castillo. T, Sonia E. Ruiz (2014), *Reduction factors for seismic design spectra for structures with viscous energy dampers*, Journal of Earthquake Engineering, Issue 3, 18, 323-49.
- Celebi. M, and E. Safak (1991), *Recorded seismic response of Transamerica building. Part I: data and preliminary analysis*, .I. Struct. Eng. ASCE.
- Coats. D.W. Jr (1982), *Damping in Building Structures during Earthquakes: Test Data and Modeling*, Univ. of California, Davis, CA, 1982. Print.
- Crambuer. R (2013), *Contribution à l'identification de l'amortissement: approches expérimentales et numériques*. Autre. École normale supérieure de Cachan - ENS Cachan, 2013.
- Crandall. S (1970), *The role of damping in vibration theory*, Journal of Sound and Vibration, 11(1):3-IN1
- Davenport, A.G, Hill-Carroll (1986), *Damping in tall buildings: its variability and treatment in design*, ASCE Spring Convention, Seattle, USA, Building Motion in Wind, 42-57.
- Davidovici. V, (1999), *La construction en zone sismique approche réglementaire*, modèles d'analyse des structures, diagnostic des bâtiments existants, exemples de calculs, Le Moniteur. Paris : Le Moniteur. 1999. 330p
- Demuth. H.B, Beale. M.H, Math Works Inc (2004), *Neural Network Toolbox for Use with MATLAB: User Guide*, Math Works, 2004, 474 pages
- Dubčáková. R (2011), *Eureqa: software review*, *Journal of Genetic Programming and Evolvable Machines*, Volume 12, Issue 2, pp 173-178.
- Dubčáková. R, *Eureqa: software review*, *Genetic Programming and Evolvable Machines*, 12 (2), pp. 173-178. 2011. DOI: 10.1007/s10710-010-9124-z.
- Elmenshawi. A, Sorour, M, Mufti. A, Jaeger. L.G, Shrive. N (2010). *Damping mechanisms and damping ratios in vibrating unreinforced stone masonry*, *Engineering Structures*, 32(10):3269 -3278.
- Elnashai. A. S, Luigi. Di. Sarno (2008), *Fundamentals of earthquake engineering*, © 2008 John Wiley & Sons, Ltd.
- Eurocode 8. (2004), *Design of structures for earthquake resistance, part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings*. EN 2004-1-1, CEN, Brussels.
- Faccioli E, Paolucci R, Rey J (2004). *Displacement spectra for long periods*, *Earthq. Spectra*, 20:347–376.

- FEMA (Federal Emergency Management Agency), *Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings*. FEMA-356, Washington, D.C.; 2000.
- Funahashi. I, Kinoshita. K and Aoyama. H (1969), *Vibration testes and test to failure of a 7 story building survived a severe earthquake*, Santiago, chile,
- Gueguen. P, Bard. P.-Y. (2005). *Soil-structure and soil-structure-soil interaction: Experimental evidence at the volvi test site*. *Journal of Earthquake Engineering*, 09(05):657-693
- Haldar. A, Mahadevan. S, *Reliability assessment using stochastic element analysis*, New York: Wiley; 2000.
- Hart. G.C, R Vasudevan (1975), *Earthquake design of buildings: damping*, J. Struc. Div. ASCE, 101 (STt), 49 65.
- Hatzigeorgiou. GD (2010), *Damping modification factors for SDOF systems subjected to near-fault, far-fault and artificial earthquakes*, *Earthq. Engrg. Struct. Dyn*, 39:1239-1258.
- Haviland. R.A (1976), *Study of the uncertainties in the fundamental translational periods and damping values for real buildings*, Res. Rep. No. 5, pub. No. R76-12, Dept of Civil Eng., MIT, Cambridge, MA.
- Hudson. D. E. (1977), *Dynamic tests of full-scale structures*, J. Eng. Mech Div. ASCE 103 (EM6), 1141 1157.
- IBC (2000) International Building Code. International Conference of Building Officials, Whittier, CA
- Iervolino. I, Galasso. C, Cosenza. E (2010), *New features of REXEL 2.61 beta, a tool for automated record selection*. Proc. of 14th European Conference on Earthquake Engineering, Ohrid, Republic of Macedonia, August 29 – September 4.
- Iervolino. I, Galasso. C, Cosenza. E (2010), *REXEL : computer aided record selection for code-based seismic structural analysis*, 339–362. <https://doi.org/10.1007/s10518-009-9146-1>.
- Iervolino. I, Maddaloni. G, Cosenza. E (2008), *Eurocode 8 compliant real record sets for seismic analysis of structures*, *Journal of Earthquake Engineering*, 12(1):54-60.
- Jeary. A.P (1986), *Damping in tall buildings-a mechanism and a predictor*, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.*14, 733-750.
- Jeary. A.P, B.R. Ellis (1981), *Vibration tests of structures at varied amplitudes*, in: Proc. ASCE/EMD Specialty Conf. on Dynamic Response of Structures, ASCE, Atlanta, GA.
- JPN (2001), Ministry of vehicle, infrastructure and transport. *Guidelines for calculation procedure and technical standard on seismically isolated structures* (in Japanese). Building Center of Japan.
- Kareem, A. and Gurley, K. (1996), “*Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty*”, *J. Wind. Eng. and Ind.*, 59, 131-157
- Kawashima. K, Aizawa. K (1986), *Modification of earthquake response spectra with respect to damping ratio*. Proc. 3rd US National Conference on Earthquake Engineering, Charleston, South Caroline, vol. II.
- Lagomarsino. S (1993), *Forecast models for damping and vibration periods of buildings*, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.* 50, 309 318.
- Lemaire. M (2008), *Approche probabiliste du dimensionnement: Modélisation de l'incertain et méthode de Monte-Carlo*, Techniques de l'ingénieur. RÉF : BM5003 V2.

- Lin .YY (2007), *Statistical study on damping modification factors adopted in Taiwan’s seismic isolation design code by using the 21 September 1999 Chi-Chi earthquake*, Taiwan, Engineering Structures, 29 682-93.
- Lin. YY, Chang. KC (2003). *A study on damping reduction factor for buildings under earthquake ground motions*, Journal of Structural Engineering, ASCE; 129(2):206–14.
- Lin. YY, Chang. KC (2004), *Effects of site classes on damping reduction factors*. Journal of Structural Engineering, ASCE ; 130(11):1667–75.
- Lin. YY, Miranda. E, Chang. KC (2005), *Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high-damping*. Earthquake Engineering and Structural Dynamics. 34(9):375–388.
- Melchers. R.E (1987), *Structural Reliability, analysis and prediction*. John Wiley & Sons, New York.
- Metropolis. N (1987). *The Beginning of the Monte Carlo Method*. Los Alamos Science, no 15, p. 125-130.
- Metropolis. N, Ulam. S (1949). *The Monte Carlo Method*. Journal of the American Statistical Association, vol. 44, no 247, p. 335-341.
- Ministère de l’Habitat, Document Technique Réglementaire DTR B C 2 48, *Règles Parasismiques Algériennes RPA 99 / version 2003* Centre National de Recherche Appliquée en Génie-Parasismique, 2003.
- Mollaioli. F, Liberatore. L, Lucchini. A (2014), *Displacement damping modification factors for pulse-like and ordinary records*, Engineering Structures, Volume 78, Pages 17-27, ISSN 0141-0296, <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.046>.
- Naeim. F, Kircher. CA (2001). *On the damping adjustment factors for earthquake response spectra*. *Structural Design of Tall Buildings*, 10:361–369.
- Newmark. NM, Hall. WJ (1982). *Earthquake spectra and design*, EERI monograph series, Oakland (CA), Earthquake Engineering Research Institute.
- Otani. S, Kani. N (2002), *Japanese state of practice in design of seismically isolated buildings*. *The Fourth U.S.-Japan, Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures* 22–24 October 2002, Toba, Japan; 13-28.
- Otsuki.Y et al (1969), *Summarized report on dynamic tests of high-rized buildings and cooperative plan for large-scale vibration tests in Japan*, Proceedings of the fourth World Conference on Earthquake Engineering, Santiago, Chile.
- Pacific Earthquake Engineering Research Center. PEER Strong Motion Database, Available from: [http:// ngawest2.berkeley.edu](http://ngawest2.berkeley.edu)
- Paultre. P, *Dynamique des structures, Application aux ouvrages de génie civil*, Hermès – Lavoisier, 702 pages, 09/04/2004.
- Polycarpou. P, et Komodromos. P (2012), *A methodology for an efficient three-dimensional (3d) numerical simulation of earthquake-induced pounding of building*. In 14th World Conference of Earthquake Engineering, numero 2913, Lisbon, Portugal.
- Priestley. MJN (2003). *Myths and Fallacies in Earthquake Engineering*, Revisited. IUSS Press: Italy.
- Pu. W, Kasai. K., Kabando.E.K, Huang. B (2016), *Evaluation of the damping modification factor for structures subjected to near-fault ground motions*, Bulletin of Earthquake Engineering. June 2016, Vol 14, Issue 6, pp 1519-1544.

- Raggett. J.D (1975), *Estimating damping of real structures*, J. Struct. Div. ASCE 101 (ST9) 1823-1835.
- Ramirez. OM, Constantinou. MC, Kircher. CA, Whittaker. AS, Johnson. MW, Gomez. JD, Chrysostomou. C Z (2000), *Development and evaluation of simplified procedures for analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems*. Report no: MCEER-00-0010, New York: (MCEER), University of New York at Buffalo.
- Ramirez. OM, Constantinou. MC, Whittaker. AS, Kircher. CA, Chrysostomou. CZ (2002), *Elastic and inelastic seismic response of buildings with damping systems*, Earthquake Spectra; 18(3):531–47.
- Rezaeian. S, Bozorgnia. Y, Idriss IM (2014), Abrahamson. N, Campbell. K, and Silva.W (2014), *Damping Scaling Factors for Elastic Response Spectra for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions: “Average” Horizontal Component*. Earthquake Spectra, Vol. 30, No. 2, pp. 939-963.
- Rezaeian. S, Bozorgnia. Y, Idriss. IM, Campbell. K, Abrahamson. N, Silva. W (2012), *Spectral Damping Scaling Factors for Shallow Crustal Earthquakes in Active Tectonic Regions*. PEER Report 2012/01, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.
- Richard. B (2010). *Comportement des éléments de structures en béton armé dégradés par corrosion: la problématique de la modélisation de l’interface acier/béton en présence de corrosion*. Université Paris-Est.
- Rosenblueth. E (1980), *Characteristics of earthquakes*. In: Rosenblueth E, editor. Design of Earthquake Resistant Structures, Wiley; [Ch. 1].
- Rubino. G, Tuffin. B (2001), *Simulations et méthodes de Monte Carlo*, Techniques de l’ingénieur. AF600.
- Satake. N, Suda. K, Arakawa. T, Sasaki. A, Tamura. Y (2003). *Damping evaluation using full-scale data of buildings in japan*. Journal of Structural Engineering, 129(4):470-477.
- Schmidt. M, Lipson. H (2009), *Distilling free-form natural laws from experimental data*, Science. 324 (5923), pp. 81-85. DOI: 10.1126/ science.1165893.
- Seghir. A, Tahakourt. A, Bonnet. G (2009), *Coupling fem and symmetric bem for dynamic interaction of dam reservoir systems*. Engineering Analysis with Boundary Elements, 33(10):1201-1210.
- Stafford. PJ, Mendis. R, Bommer. JJ (2008), *Dependence of damping correction factors for response spectra on duration and number of cycles*. J Struct Eng; 134(8):1364–73.
- Stevenson. J (1980), *Structural damping values as a function of dynamic response stress and deformation levels*. Nuclear Engineering and Design, 60(2):211-237.
- Takeuchi. M, Nakagawa. K (1960), *Vibrational characteristics of buildings*, *Proceedings of the second World Conference on Earthquake Engineering*, Tokyo, Japan, pp. 961-982.
- Tamura. Y, M. Yamada, H. Yokota (1994), *Estimation of structural damping of buildings*, ASCE Struct. Cong. and IASS Int. Symp., Atlanta, USA, Vol. 2, 1012-1017.
- Taoka, G.T, M. Hogan, F. Khan, R.H. Scanlan (1975), *Ambient response analysis of some tall structures*, J. Struct. Eng. 101 (ST1), 49-65.
- Tardast. A, Rahimnejad, M, Najafpour, GH, Ghoreyshi, A (2014). *Use of artificial neural network for the prediction of bioelectricity production in a membrane less microbial fuel cell* Fuel, 117697–703.
- Ting. J. M, Crawley. F (1992). *Characterization of damping of materials and structures from nanostrain levels to one thousand microstrain*. AIAA Journal, 30(7):1856 - 1863.

- Tolis. SV, Faccioli. E (1999), *Displacement design spectra*. Journal of Earthquake Engineering. 3:107–125.
- Trifunac. M.D (1972), *Comparisons between ambient and forced vibration*, Earthquake Eng. Struct. Dyn. 1, 133-150.
- Trifunac. MD, Lee. VW (1989), *Empirical models for scaling pseudo relative velocity spectra of strong earthquake accelerations in terms of magnitude, distance, site intensity and recording site conditions*, Soil Dyn. Earthq. Engrg., 8:126 –144.
- UBC (1994), Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, Whittier, CA
- UBC (1997), Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, Whittier, CA
- Wu. JP, Hanson. RD (1989), *Inelastic response spectra with high damping*, Journal of the Structural Division, ASCE; 115(6):1412–3
- Yokoo. Y, H. Akiyama (1972), *Lateral vibration and damping due to wind and earthquake effects*, in: Proc. Int. Conf. on Planning and design of Tall Buildings, Vol. II-17, ASCE, NY.
- Yu. H, Wilamowski. B M (2011), *Levenberg–Marquardt Training*, in: *Industrial Electronics Handbook*. vol. 5 – Intelligent Systems, ed: CRC Press, pp. 12-1--12-15.
- Zhang. L, Tamura. Y (2003), *Damping estimation of engineering structures with ambient response measurements*. In: Proceedings of 21st international modal analysis conference (IMAC-21), Kissimmee, Florida: Society for Experimental Mechanics (SEM), 3–6 February, pp.226–233.
- Zhou. F, Wenguang. L, Xu. Z (2003), *State of the art on applications, R&D and design rules for seismic isolation in China*. In: Proc. 8th world seminar on seismic isolation, energy dissipation and active vibration control of structures, Yerevan, Armenia.