



Department: Civil Engineering

Order N° : . .... / 2024

Defense authorization N° ...../2024

## DOCTORAL THESIS

Doctoral of science

Presented by

**Abdelmalek ABDELHAMID**

With a view to obtaining the doctoral of science diploma

Branch: Civil Engineering

Specialty: Civil Engineering

### Topic

## Effects of Seismic Characteristics on the Damping Correction Factor

Supported, on September 23rd, 2024, before the jury composed of:

Last and first name	Grade	Institution of affiliation	Designation
Mr HARICH Lazhar	MCA	Djelfa University	President
Mr BENAHMED Baizid	Professor	Djelfa University	Supervisor
Mr AIDAOUI Lakhdar	Professor	Djelfa University	Co-Supervisor
Mr BOUDERBA Bachir	Professor	Tissemsilt University	Examiner
Mr ZELMAT Yassine	MCA	Mostaganem University	Examiner
Mr BAKHTI Rachid	MCA	Bouira University	Examiner

**Djelfa University, FST - 2024**



## THESE DE DOCTORAT

Doctorat en sciences

Présenté par

**ABDELHAMID Abdelmalek**

En vue de l'obtention de Doctorat En Sciences

Spécialité : Génie Civil

### Titre

## Effets des caractéristiques sismiques sur le facteur de correction d'amortissement

Soutenu, le 23/09/2024, devant le jury composé de :

Prénom et prénom	Grade	Institution d'affiliation	Désignation
Mr. HARICH Lazhar	MCA	Université Ziane Achour, Djelfa	Président
Mr. BENAHMED Baizid	Prof	Université Ziane Achour, Djelfa	Directeur de thèse
Mr. AIDAOUI Lakhdar	Prof	Université Ziane Achour, Djelfa	Co-Directeur de thèse
Mr. BOUDERBA Bachir	Prof	Université de Tissemsilt	Examineur
Mr. ZELMAT Yassine	MCA	Université de Mostaganem	Examineur
Mr. BAKHTI Rachid	MCA	Université de Bouira	Examineur

# Remerciements

الحمد لله حمدا كثيرا طيبا مباركا فيه، والحمد لله الذي بنعمته تتم الصالحات.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de thèse, le Professeur Benahmed Baizid, pour son encadrement, sa patience et les précieux conseils qu'il m'a prodigués tout au long de ce travail de recherche. Je remercie également mon co-encadrant, le Professeur Aidaoui Lakhder, pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée, depuis mon inscription jusqu'à la soutenance.

Mes remerciements s'adressent aussi à tous les membres du jury : Docteur Hariche Lazhar, Professeur Boudierba Bachir, Docteur Yassine Zemat et Docteur Bakhti Rachid, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer et d'examiner ce travail.

Je souhaite également remercier chaleureusement le Professeur Omar Laghrouche de l'Université Heriot-Watt à Édimbourg, pour m'avoir invité dans son laboratoire en Écosse, pour son hospitalité chaleureuse, ainsi que pour son soutien tant psychologique que scientifique.

Un remerciement tout particulier est dédié au Professeur Mahmet Palanci de l'Université d'Arel à Istanbul, pour son aide et son soutien scientifique.

Je tiens enfin à exprimer ma reconnaissance à l'ensemble du personnel des laboratoires LDMM de l'université de Djelfa et LGSDS à l'Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, ainsi qu'à mes collègues enseignants de l'Université de Tissemsilt, de l'Université de Bouira, et du centre nationale de recherche CNERIB.

*Je dédié ce travail à*

- ✓ *Mes parents, mon père qu'Allah le bénisse dans son vaste paradis et à ma chère mère pour leurs prières, leurs sacrifices.*
- ✓ *Ma petite famille ma femme pour leur soutien moral infaillible et à mes enfants Younes et Lokmane.*
- ✓ *Mes frères Elhadi, Yazid, Abderrezak et Housseem.*
- ✓ *Ma grande famille.*

## ملخص

يستخدم معامل تخفيض التخميد (DRF) في الأكواد الزلزالية لضبط استجابة الهيكل لقيم التخميد المختلفة عن النسبة المرجعية البالغة 5%. كما تعرّف الأكواد القياسية الـ DRF على أنه عامل يتغير فقط بدلالة معامل تخميد الهيكل وأحياناً بدلالة الدور الأساسي للهيكل. غير أنه، أظهرت العديد من الدراسات البحثية الحديثة تأثير هذا المعامل بالخصائص الزلزالية كشدّة الزلزال، والبعد عن البؤرة (المجال القريب والمجال البعيد) وكذلك مدة الزلزال، وكذا بخصائص جيوتقنية. بناء على ما تم ذكره قمنا بإجراء تحقيقات حول هذا المعامل ضمن هذه الأطروحة من جانبين مختلفين، الأول الجانب الحتمي والثاني الجانب الاحتمالي. في البداية، تم حساب الـ DRF من الحوادث الزلزالية المختارة بعناية وفقاً للطيف الهدف المستخرج من الكود الأوروبي EUROCODE 8. تم تسجيل هذه الأحداث في محطات قريبة من الفالق مرة وبعيداً عن الفالق مرة أخرى، وتقع في ثلاثة أنواع من التربة (صخري، متماسك وطري) وفقاً لتصنيف EUROCODE 8. بالنسبة للفئات الست السابقة، تم تقييم الـ DRF من الطيف المشتق من الإزاحة ثم من التسارع. أكدت النتائج أن الـ DRF يتأثر بشكل كبير بتغير الدور الأساسي للاهتزاز وكذلك معامل التخميد للهيكل. كما تم ملاحظة فرق كبير بين قيم الـ DRF المحسوب من التسجيلات في المجال القريب وبين التي تم تسجيلها في المجال البعيد. كما لوحظ أن نوع التربة يؤثر على قيم الـ DRF المشتقة من الطيفين التسارعي والإزاحي، خاصةً بالنسبة للنوع المتماسك صنف ب. أما في المقام الثاني، تم التركيز على تأثير الارتبايات الحاصلة في معامل التخميد على قيم الـ DRF المقدر من أطيف مختلفة، الإزاحة والسرعة والتسارع. تم استخدام طريقة Monte Carlo لإنتاج قيم التخميد العشوائية والممثلة بتوزيع لوغاريتمي طبيعي. بالإضافة إلى ذلك، تم اقتراح شبكة عصبونية اصطناعية (RNA) لتقدير قيم الـ DRF الاحتمالي المشتقة من أطيف الإزاحة والسرعة والتسارع، لمستويات الارتبايات المختلفة وفقاً للنموذج المطور، يتم تقييم النتائج الموجهة نحو الممارسة لتطور المعايير الزلزالية في المستقبل.

**الكلمات المفتاحية:** معامل تخفيض التخميد، الحقل القريب والحقل البعيد، أنواع من التربة، شبكة عصبونية اصطناعية.

# Résumé

Le coefficient de réduction d'amortissement (DRF) est utilisé dans les codes sismiques afin d'ajuster la réponse structurelle pour les valeurs d'amortissement structurel différent de la valeur de référence de 5%. Les standards définissent le DRF comme étant un facteur qui dépend uniquement du taux d'amortissement de la structure et parfois de la période fondamentale de la structure. Cependant, plusieurs recherches ont montré la sensibilité de ce facteur aux paramètres sismologiques tel que, la magnitude, la distance épacentrale (champ proche et champ lointain), les conditions géotechniques, la durée du séisme ...etc. Des investigations sur ce facteur, ont été menées dans le cadre de cette thèse dans deux volés différents, déterministe et probabiliste.

En premier lieu, le DRF a été calculé à partir des séismes soigneusement sélectionnés selon le spectre cible de l'Eurocode 8. Ces événements ont été enregistrés dans des stations proches de la faille une fois et loin de la faille d'autre fois, situés dans trois types de sol (roche, ferme et meuble) selon la classification de l'Eurocode 8. Pour les six catégories précédentes, le DRF a été évalué à partir des spectres dérivés du déplacement et de l'accélération. Les résultats ont montré entre autres que, le DRF dépend fortement de la période fondamentale de vibration et du taux d'amortissement de la structure. Une large différence a été observée entre le DRF calculé à partir des enregistrements en champ proche et ceux en champ lointain. Il a été observé aussi que les conditions du site affectent les valeurs du DRF dérivés des spectres d'accélération et de déplacement, en particulier pour les sols de classe B.

Dans un deuxième lieu, l'attention est portée sur l'effet de l'incertitude de l'amortissement sur le DRF estimé à partir de différents spectres, déplacement, vitesse et accélération. L'approche de Monte Carlo a été utilisée pour produire les valeurs d'amortissement aléatoires représentées par une distribution log normale. De plus, un réseau neuronal artificiel (RNA) est proposé pour estimer le DRF stochastique pour différents niveaux d'incertitude d'amortissement pour DRFd, DRFv et DRFa. Enfin, des conclusions et des perspectives sont tirées à lumière des résultats obtenues, ces résultats peuvent être orientés vers la pratique pour l'évolution future des codes sismiques.

**Mots clés :** DRF, sélection, champ proche et champ lointain, classes du sol, RNA.

# ABSTRACT

The damping reduction factor DRF is used in seismic codes to adjust the structural response for damping values of the structure different from the reference percentage of 5%. Standards define the DRF as a factor that depends only on the damping rate of the structure and sometimes on the fundamental period of the structure. However, several research studies have shown the sensitivity of this factor to seismological parameters such as magnitude, epicentral distance (near field and far field), geotechnical conditions, earthquake duration, etc. Investigations on this factor have been conducted in this thesis in two different aspects, deterministic and probabilistic.

Firstly, the DRF was calculated from earthquakes carefully selected according to the target spectrum of Eurocode 8. These events were recorded in stations close to the fault once and far from the fault another time, located in three types of soil (rock, firm, and soft) according to the classification of Eurocode 8. For the six previous categories, the DRF was evaluated from spectra derived from displacement and then from acceleration. The results showed, among other things, that the DRF strongly depends on the natural vibration period and the damping rate of the structure. A wide difference was observed between the DRF calculated from near-field recordings and those from the far field. It was also observed that site conditions affect the DRF values derived from acceleration and displacement spectra, especially for site class B.

Secondly, attention is focused on the effect of damping uncertainty on DRF estimated from different spectra, displacement, velocity, and acceleration. The Monte Carlo approach was used to produce random damping values represented by a log-normal distribution. In addition, an artificial neural network (ANN) is proposed to estimate the stochastic DRF for different levels of uncertainty for DRFd, DRFv, and DRFa. The stochastic DRFs are estimated for the average plus one standard deviation of the DRF values to avoid underestimating the DRF values and thus the seismic response of buildings. According to the developed model, practice-oriented results are evaluated for the future evolution of seismic codes.

**Key words:** DRF, selection, near fault and far fault, soil classes, ANN.

## Liste des abréviations

**DRF,  $\eta$ , Bd** : Facteur de Reduction d'amortissement

**DRFd** : Facteur de Reduction d'amortissement dérivé du déplacement

**DRFv**: Facteur de Reduction d'amortissement dérivé de la vitesse  
**DRFa** : Facteur de Reduction d'amortissement dérivé de l'accélération  
**Sa** : Spectre d'accélération  
**Sv** : Spectre de vitesse  
**Sd**: Spectre de déplacement  
**SPA**: Pseudo Spectre d'accélération  
**SPV**: Pseudo Spectre de vitesse  
**SPD**: Pseudo Spectre de déplacement  
**U(t)** : Déplacement  
 $\dot{U}(t)$  : Vitesse  
 $\ddot{U}(t)$  : Accélération  
 $\omega$  : Pulsation  
 $\omega_d$  : Pseudo Pulsation  
 $\xi$  : Pourcentage d'amortissement  
**T** : La Période fondamentale  
**SH** : Ondes secondaire ou de cisaillement horizontale  
**E<sub>I</sub>** : Spectre d'Energie  
**m** : La masse  
**g** : La gravité  
**NF** : Champ proche  
**FF** : Champ lointain  
**Cv $\xi$**  : Coefficient de variation de l'amortissement  
**V<sub>s30</sub>** : Vitesse des ondes de cisaillement à 30m de profondeur  
**DRF $\mu$**  : la moyenne des valeurs du DRF  
**DRF $\sigma$**  : l'écart-type des valeurs du DRF  
**DRFdét** : Facteur de Reduction d'amortissement déterministe  
**DRFst** : Facteur de Reduction d'amortissement stochastique  
**ReLu** : Rectified Linear unit

## Table des matières

ملخص.....	III
Résumé.....	IV

ABSTRACT .....	V
Liste des abréviations .....	V
Introduction .....	2
Chapitre I : Une revue de la littérature sur le facteur de réduction d'amortissement (DRF).....	5
I.1    Introduction .....	5
I.2    Généralités sur les séismes .....	5
I.2.1    Causes des séismes .....	5
I.2.2    Mesure d'un tremblement de terre .....	6
I.2.3    Notion sur le champ proche et le champ lointain .....	7
I.3    Spectre de réponse.....	10
I.4    L'amortissement et le mécanisme de dissipation .....	11
I.4.1    Définition.....	11
I.4.2    Types d'amortissements .....	12
I.5    Le Facteur de Réduction d'Amortissement DRF .....	12
I.5.1    Définition.....	12
I.5.2    Fondement mathématique du DRF.....	13
I.5.3    Formules proposées pour le DRF .....	14
I.5.4    Effets des paramètres sismiques sur le DRF .....	20
I.5.5    L'approche stochastique et évaluation des incertitudes sur le DRF .....	23
I.6    Conclusion.....	24
Chapitre II : Sélection et étalonnage des enregistrements sismiques .....	27
II.1    Généralités sur la sélection et l'étalonnage .....	27
II.2    Méthodes de sélection des accelerograms .....	28
II.2.1    Evaluation basée sur l'intensité.....	28
II.2.2    Evaluation basée sur des scénarios.....	28
II.2.3    Evaluation basée sur le temps.....	28
II.2.4    La méthode multifonctionnelle.....	28
II.3    Critères de sélection des enregistrements sismiques .....	29
II.3.1    Magnitude du séisme (M) et distance (d) .....	29
II.3.2    Type du sol .....	30
II.3.3    Durée de la secousse.....	31
II.3.4    Paramètres liés à la source (faille).....	32
II.3.5    Contenu fréquentiel .....	32
II.3.6    Compatibilité spectrale.....	32
II.3.7    Mesures d'intensité du mouvement du sol.....	33
II.4    Méthodes d'étalonnages .....	33
II.4.1    Etalonnage au PGA .....	33

II.4.2	Etalonnage à l'accélération spectrale .....	34
II.4.3	Etalonnage selon ASCE .....	34
II.4.4	Etalonnage par la méthode SIa .....	34
II.4.5	Etalonnage par la méthode MSE .....	35
II.4.6	Etalonnage par la méthode « Spectral Matching » .....	35
II.4.7	La sélection dans codes sismiques .....	36
II.5	Sélection des accélérogrammes selon le spectre cible de l'Eurocode 8 .....	36
II.6	Conclusion.....	42
Chapitre III : Sensibilité du DRF aux paramètres sismiques.....		44
III.1	Introduction .....	44
III.2	Influence des paramètres sismiques sur le DRF dérivé du spectre de déplacement.....	44
III.2.1	Valeurs du DRFd pour un sol classe A ( $V_{s,30} > 800(m/s)$ ).....	45
III.2.2	Valeurs du DRFd pour un sol classe B ( $360 \leq V_{s,30} (m/s) \leq 800$ ).....	46
III.2.3	Valeurs du DRFd pour un sol classe C ( $180 \leq V_{s,30} (m/s) \leq 360$ ).....	48
III.2.4	Calcul des erreurs RMSE & MAE dérivés du DRFd .....	50
III.2.5	Evaluation du rapport de DRFd (champ proche/champ lointain).....	51
III.3	Influence des paramètres sismiques sur le DRF dérivé du spectre d'accélération .....	54
III.3.1	Valeurs du DRFa pour un sol classe A ( $V_{s,30} > 800(m/s)$ ).....	54
III.3.2	Valeurs du DRFa pour un sol classe B ( $360 \leq V_{s,30} (m/s) \leq 800$ ).....	55
III.3.3	Valeurs du DRFa pour un sol classe C ( $180 \leq V_{s,30} (m/s) \leq 360$ ).....	57
III.3.4	Calcul des erreurs RMSE & MAE .....	59
III.3.5	Evaluation du rapport de DRFd (champ proche/champ lointain).....	60
III.4	Comparaison entre les DRFd et DRFa .....	63
III.5	Conclusion.....	63
Chapitre IV : Évaluation des incertitudes dans le DRF à l'aide des RNA pour les spectres d'accélération, de vitesse et de déplacement. ....		66
IV.1	Introduction .....	66
IV.2	Variabilité de la réponse structurelle dynamique .....	67
IV.3	Base de données des accélérogrammes utilisés.....	68
IV.4	Résultats de l'analyse.....	69
IV.4.1	Résultats pour le DRF déterministe.....	69
IV.4.2	Résultats pour le DRF stochastique.....	71
IV.5	Réseaux de neurones artificiels .....	74
IV.5.1	Conception du réseau .....	74
IV.5.2	Analyse de corrélation.....	75
IV.5.3	Erreur relative.....	75
IV.6	Remarques conclusives .....	76

V. Conclusion.....	78
Bibliographies .....	80

## **Listes des Figures**

Figure I.1 La tectonique des plaques.....	6
Figure I.2 Les paramètres de la source.....	6
Figure I.3 Effets de site dans la ville de Mexico (enregistrement du séisme de 1985) .....	7

Figure I.4 Enregistrements sismiques pour (a) champ proche à Newhall et (b) champ lointain à Los Angeles durant le séisme de Northridge.....	10
Figure II.1 Exemples de spectre cible et de spectres individuels possibles.....	27
Figure II.2 Illustration graphique du problème d'optimisation (minimisation de la zone hachurée). ...	29
Figure II.3 Distance Epicentrale.....	30
Figure II.4 Accélération spectrale de 15 enregistrements sélectionnés en champ lointain pour le sol classe A .....	37
Figure II.5 Accélération spectrale de 15 enregistrements sélectionnés en champ lointain pour le sol classe B.....	38
Figure II.6 Accélération spectrale de 15 enregistrements sélectionnés en champ lointain pour le sol classe C.....	39
Figure II.7 Accélération spectrale de 15 enregistrements sélectionnés en champ proche pour le sol classe A .....	40
Figure II.8 Accélération spectrale de 15 enregistrements sélectionnés en champ proche pour le sol classe B.....	41
Figure II.9 Accélération spectrale de 15 enregistrements sélectionnés en champ proche pour le sol classe C.....	42
Figure II.10 Le Moment de magnitude vs La distance épacentrale pour les enregistrements sélectionnés. a) Champ proche- b) Champ lointain.....	42
Figure III.1 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 10\%$ , sol classe A .....	45
Figure III.2 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 20\%$ , sol classe A .....	45
Figure III.3 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 40\%$ , sol classe A .....	46
Figure III.4 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 10\%$ , sol classe B .....	47
Figure III.5 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 20\%$ , sol classe B .....	47
Figure III.6 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 40\%$ , sol classe B .....	48
Figure III.7 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 10\%$ , sol classe C .....	48
Figure III.8 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 20\%$ , sol classe C .....	49
Figure III.9 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 40\%$ , sol classe C .....	49
Figure III.10 Comparaison de la distribution du RMSE (à gauche) et du MAE (à droite) des modèles en termes de DRFd pour différentes classes de sol et taux d'amortissement. ....	50
Figure III.11 DRFd (NF/FF) pour $\xi = 10\%$ , sol classe A, B et C.....	51
Figure III.12 DRFd (NF/FF) pour $\xi = 20\%$ , sol classe A, B et C.....	51
Figure III.13 DRFd (NF/FF) pour $\xi = 40\%$ , sol classe A, B et C.....	52
Figure III.14 Comparaison entre le ratio du DRFd (champ proche sur champ lointain) pour sol classe A.....	52
Figure III.15 Comparaison entre le ratio du DRFd (champ proche sur champ lointain) pour sol classe B .....	53
Figure III.16 Comparaison entre le ratio du DRFd (champ proche sur champ lointain) pour sol classe C .....	53
Figure III.17 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 10\%$ , sol classe A ....	54
Figure III.18 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 20\%$ , sol classe A ....	55
Figure III.19 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 40\%$ , sol classe A ....	55

Figure III.20 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 10\%$ , sol classe B.....	56
Figure III.21 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 20\%$ , sol classe B .....	56
Figure III.22 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 40\%$ , sol classe B.....	57
Figure III.23 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 10\%$ , sol classe C.....	57
Figure III.24 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 20\%$ , sol classe C.....	58
Figure III.25 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour $\xi = 40\%$ , sol classe C.....	58
Figure III.26 Comparaison de la distribution du RMSE (à gauche) et du MAE (à droite) des modèles en termes de DRFa pour différentes classes de sol et taux d'amortissement.....	60
Figure III.27 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour $\xi = 10\%$ .	60
Figure III.28 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour $\xi = 20\%$ .	61
Figure III.29 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour $\xi = 40\%$ .	61
Figure III.30 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour sol classe A.....	62
Figure III.31 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour sol classe B .....	62
Figure III.32 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour sol classe C .....	63
Figure VI.1 Nuages de points des enregistrements sélectionnée (Magnitude Mw) .....	68
Figure VI.2 Nuages de points des enregistrements sélectionnée (Distance Epicentrale).....	68
Figure VI.3 Nuages de points des enregistrements sélectionnée (VS30).....	69
Figure VI.4 Les valeurs déterministes du DRFd, DRFv et DRFa.....	70
Figure VI.5 Organigramme de la procédure d'évaluation du DRFst .....	71
Figure VI.6 Les valeurs stochastiques du DRFd, DRFv et DRFa.....	72
Figure VI.7 Les valeurs du DRF stochastiques/DRF déterministe (DRFd, DRFv et DRFa) .....	73
Figure VI.8 Réseau neuronal multicouche à propagation directe .....	75
Figure VI.9 Les données de sortie du réseau neurone par rapport aux valeurs cibles de DRF. ....	75

## Liste des Tableaux

Tableau I.1 Coefficients du DRFd selon les classes du sol.....	17
Tableau I.2 Coefficients du DRFa selon les classes du sol .....	17

Tableau I.3 Coefficients du DRFd .....	19
Tableau I.4 Coefficients du DRFa.....	19
Tableau II.1 Approches d'évaluation du Spectre cible .....	28
Tableau II.2 Classes du sol selon l'Eurocode 8 .....	30
Tableau II.3 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ lointain, sol classe A.....	37
Tableau II.4 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ lointain, sol classe B .....	38
Tableau II.5 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ lointain, sol classe C .....	38
Tableau II.6 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ proche, sol classe A .....	39
Tableau II.7 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ proche, sol classe B .....	40
Tableau II.8 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ proche, sol classe C .....	41
Tableau IV.1 Ecart entre le DRF entre le déterministe et le probabiliste .....	72

# INTRODUCTION

# Introduction

Un séisme se manifeste de manière brutale, engendrant en quelques instants des centaines de victimes. Les codes sismiques, tels que [1], établissent deux objectifs fondamentaux pour la conception parasismique. Premièrement, assurer le non-effondrement des structures lors d'un séisme majeur avec une probabilité de dépassement de 10 % en 50 ans, correspondant à un séisme de période de retour de 475 ans. Cela implique que la structure doit résister sans s'effondrer, en préservant son intégrité structurelle et une capacité portante résiduelle. Les vérifications associées relèvent de l'État Limite Ultime (ELU). Deuxièmement, limiter les dommages lors d'un séisme plus fréquent, avec une probabilité de dépassement de 10 % en 10 ans, correspondant à un séisme de période de retour de 95 ans. La structure doit être conçue pour éviter des dommages et des limitations d'exploitation disproportionnés par rapport au coût de la structure. Les vérifications associées à cet objectif relèvent de l'État Limite de Service (ELS), notamment en contrôlant les déformations maximales entre les étages. Il est à noter que la tendance actuelle évolue vers la définition de plus de deux objectifs ou de plusieurs niveaux de performance dans les projets parasismiques tels que [1]–[3]

Ces codes sismiques du bâtiment préconisent l'utilisation de diverses procédures et méthodes d'analyse statique et dynamique, linéaire et non linéaire. Parmi celles-ci figurent la Méthode Statique Équivalente et la Méthode Modale Spectrale comme méthodes simplifiées, ainsi que la méthode dynamique temporelle, qui est utilisée pour évaluer la réponse des structures stratégiques et des ouvrages d'art. Ces méthodes sont largement employées, mais elles présentent certaines limitations.

Ces codes définissent les spectres de réponse sismique pour un taux d'amortissement structurel égal à 5 %. Le facteur de réduction d'amortissement (DRF) est utilisé pour ajuster la réponse structurelle à des niveaux d'amortissement différents de cette valeur commune de 5 %. Cependant, plusieurs chercheurs ont montré que le DRF est sensible non seulement aux propriétés structurelles, telles que le pourcentage d'amortissement et la période fondamentale, mais aussi aux paramètres sismologiques et aux conditions du sol. Le DRF est largement utilisé dans les méthodes susmentionnées, que ce soit pour l'analyse statique équivalente, la méthode modale spectrale, ou même l'analyse temporelle. En conséquence, des expressions empiriques ont été proposées dans ce sens. La plupart de ces paramètres n'ont pas encore été pris en compte dans les codes de conception parasismique. Le DRF reste principalement fonction de l'amortissement et parfois de la période structurelle. Dans ces codes, l'utilisation du DRF tel qu'il est stipulé dans les règlements [1] et [4], conduit à une estimation imprécise de la réponse sismique. Cela met en évidence la nécessité de consacrer une attention particulière à ce facteur dans les recherches sur le génie parasismique en Algérie.

La présente thèse portera sur l'investigation du DRF et sa sensibilité vis-à-vis des paramètres sismiques, tant pour les ordonnées spectrales dérivées du déplacement que pour celles dérivées de l'accélération. Les effets du champ proche et du champ lointain, déterminés essentiellement par la distance épacentrale, ainsi que les effets des conditions du sol selon la classification de l'Eurocode 8, sur le DRF, sont discutés dans le cadre de cette thèse. Une étude statistique des

## INTRODUCTION

---

données de plusieurs enregistrements sismiques soigneusement sélectionnés et étalonnés est également présentée. Ensuite, une analyse des effets des incertitudes inhérentes à l'amortissement sur ce facteur est menée à l'aide d'une analyse stochastique avec des réseaux de neurones artificiels (RNA). Les résultats concernant le DRF dérivé du déplacement, de la vitesse et de l'accélération sont également discutés.

Dans une première étape de l'étude, l'Eurocode 8 est utilisé comme spectre cible, et des systèmes SDOF sont employés pour la détermination des DRF à l'aide des spectres de réponse en déplacement et en accélération. Il convient de noter que les enregistrements sismiques en champ proche et en champ lointain de la faille n'ont pas été étudiés par de nombreuses recherches. À la connaissance de l'auteur, cette étude constitue la première tentative de sélectionner des enregistrements de mouvements du sol proches et éloignés de la faille, compatibles avec le spectre de réponse basé sur l'Eurocode 8. Une base de données d'enregistrements sismiques réels, sélectionnés à partir de la base de données européenne des mouvements forts [5] et de la base de données mondiale *Pacific Earthquake Engineering Research*, est utilisée et regroupée en six catégories pour les mouvements du sol proches et lointains de la faille, selon trois classes de sites (A, B et C) définies selon la classification de l'Eurocode 8. Un total de 15 enregistrements sismiques réels a été utilisé pour chaque classe de site, avec un moment de magnitude ( $M_w$ ) variant entre 5,2 et 7,7. Pour l'étude paramétrique, le DRF a été calculé pour des taux d'amortissement de 5 %, 10 %, 20 % et 40 %. Pour chaque enregistrement et pour chaque coefficient d'amortissement, les valeurs de DRF ont été calculées pour un ensemble de 200 périodes de vibration comprises entre 0,02 et 4 secondes. L'analyse des incertitudes a été évaluée à l'aide des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Cette thèse s'articule autour de quatre chapitres principaux : une introduction, une revue de la littérature, la sélection des enregistrements sismiques, évaluation du DRF avec une étude paramétrique, analyse des incertitudes à l'aide des réseaux de neurones artificiels RNA, et enfin, conclusions et recommandations. La revue de la littérature commence par une présentation générale des séismes, suivie de l'analyse des différents paramètres sismiques, et d'une bibliographie sur le facteur de réduction d'amortissement. Le chapitre suivant se concentre sur les différentes méthodes de sélection et d'étalonnage des accélérogrammes sismiques avec un cas d'étude utilisé pour évaluer le DRF dans le chapitre suivant. Le troisième chapitre présente les résultats de la sélection, avec une évaluation du DRF selon trois catégories de sol en champ proche et en champ lointain. Les différentes analyses, ainsi que les résultats et conclusions, sont présentés. Enfin, un dernier chapitre aborde les incertitudes liées au DRF via une analyse par réseaux de neurones artificiels, qui est également discutée.

Pour conclure, une synthèse résume les principaux points du projet, suivie de recommandations. Une liste de suggestions pour des études complémentaires est également fournie.

# CHAPITRE I

# Chapitre I : Une revue de la littérature sur le facteur de réduction d'amortissement (DRF)

## I.1 Introduction

L'ingénierie parasismique est une discipline du génie civil qui se concentre sur la conception et le dimensionnement de structures capables de résister aux forces générées par les mouvements sismiques forts. Son objectif principal est de minimiser les dommages structurels et de garantir des niveaux de performance et de sécurité acceptables pour les occupants pendant un tremblement de terre.

Les ingénieurs structures sont impliqués dans plusieurs domaines, notamment la conception parasismique des bâtiments, des ponts, des tunnels, des barrages et d'autres ouvrages. Ils appliquent des méthodes d'analyse sismique statique et dynamique, aussi bien linéaire que non linéaire, afin d'évaluer les charges dues aux séismes et de développer des techniques de conception visant à renforcer les structures et à augmenter leur résistance capacitaire. Parmi les méthodes stipulées dans [4] et [1], on trouve la méthode statique équivalente, la méthode modale spectrale et la méthode d'analyse temporelle. Ces méthodes utilisent un coefficient de correction d'amortissement (DRF).

Cependant, que signifie ce coefficient ? Quelles sont les formules proposées dans les codes sismiques et de quels paramètres dépend-il ? Actuellement, la plupart des codes à travers le monde ne présentent que le spectre de réponse avec un taux d'amortissement de 5 %.

Cependant, le facteur de réduction d'amortissement (DRF) revêt une importance capitale dans la détermination de la valeur des ordonnées spectrales lors de la conception parasismique. Dans le cas de la conception parasismique de structures de bâtiments avec des taux d'amortissement différents de 5 %, le DRF est souvent utilisé pour ajuster le spectre de réponse élastique.

De plus, avec le développement des bâtiments de grande hauteur et l'application de la technologie d'isolation sismique et des équipements de dissipation d'énergie, les spectres de réponse à fort amortissement ont été largement utilisés dans la conception parasismique. Par conséquent, la rationalité et la fiabilité du DRF sont d'une grande importance pour les structures de bâtiments avec des taux d'amortissement différents de 5 %.

Cependant, ce facteur n'a pas reçu l'attention nécessaire de la part des chercheurs au niveau national, à l'exception des travaux [6]–[11], qui ont énormément contribué à l'évaluation de ce facteur en proposant des formules du DRF pour les règlements nationaux et internationaux.

## I.2 Généralités sur les séismes

### I.2.1 Causes des séismes

Lorsqu'un matériau rigide est soumis à des contraintes de cisaillement, il va d'abord se déformer de manière élastique, puis, lorsqu'il aura atteint sa limite d'élasticité, il va atteindre la rupture, en libérant de façon instantanée toute l'énergie qu'il a accumulée durant la déformation élastique. C'est ce qui se passe lorsque la lithosphère est soumise à des contraintes.

Sous l'effet des contraintes causées le plus souvent par le mouvement des plaques tectoniques, la lithosphère accumule l'énergie. Lorsqu'en certains endroits, la limite d'élasticité est atteinte, il se produit une ou des ruptures qui se traduisent par des failles. L'énergie brusquement dégagee le long de ces failles cause des séismes (tremblements de terre). Si les contraintes se poursuivent

dans cette même région, l'énergie va à nouveau s'accumuler et la rupture consécutive se produira dans les plans de faille déjà existants. A cause des forces de friction entre les deux parois d'une faille, les déplacements le long de cette faille ne se font pas de manière continue et uniforme, mais par coups successifs, dégageant à chaque fois un séisme. Dans une région donnée, des séismes se produiront à plusieurs reprises le long d'une même faille, puisque cette dernière constitue un plan de faiblesse dans la lithosphère. A noter que les séismes ne se produisent que dans du matériau rigide. Par conséquent, les séismes se produiront toujours dans la lithosphère voir Figure I.1, jamais dans l'asthénosphère qui est plastique. [12]

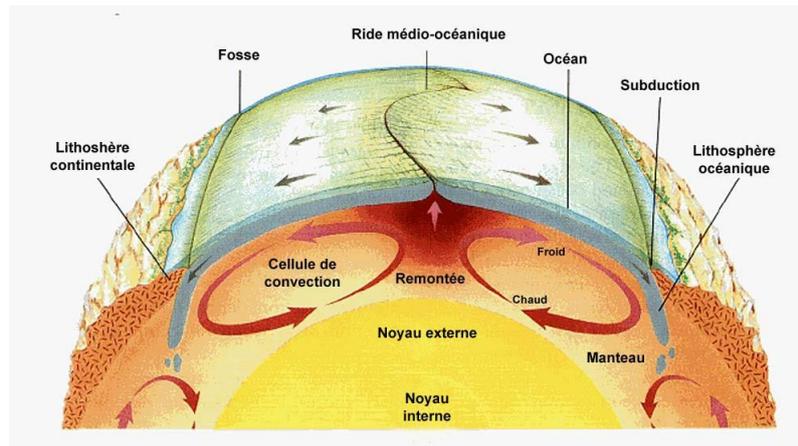


Figure I.1 Schéma de la tectonique des plaques 1970 [12]

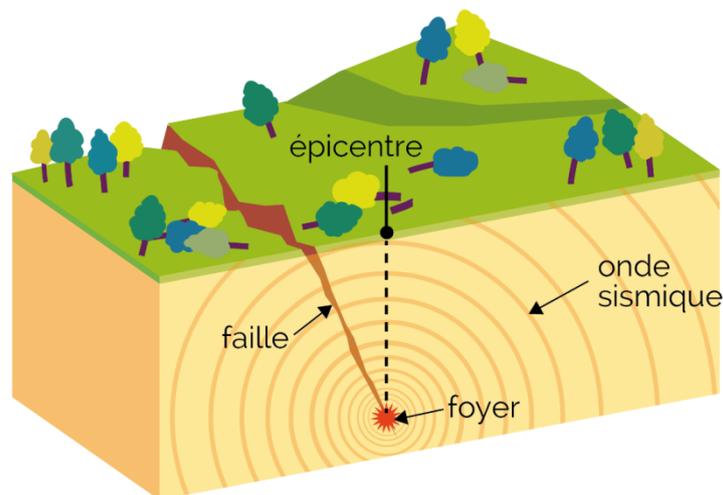


Figure I.2 Les paramètres de la source d'un séisme [12]

Lorsqu'un séisme est déclenché, un front d'ondes sismiques se propage dans la croûte terrestre, on nomme **foyer** le lieu dans le plan de faille où se produit réellement le séisme, alors que l'**épicentre** désigne le point à la surface terrestre à la verticale du foyer.

## I.2.2 Mesure d'un tremblement de terre

Nous disposons de deux échelles pour évaluer les tremblements de terre : l'échelle de Mercalli et l'échelle de Richter. Aujourd'hui, nous n'utilisons que celle de Richter, mais les séismes du passé ne peuvent être évalués que selon celle de Mercalli.

- a) **L'échelle de Mercalli** a été développée en 1902 et modifiée en 1931. Elle indique l'intensité d'un séisme sur une échelle de I à XII. Cette intensité est déterminée par deux choses : l'ampleur des dégâts causés par un séisme et la perception qu'a eue la population du séisme. Il s'agit d'une évaluation qui fait appel à une bonne dose de subjectivité. De plus, la perception de la population et l'ampleur des dégâts vont varier en fonction de la distance à l'épicentre. On a donc avec cette échelle, une échelle variable géographiquement. Mais, à l'époque, on ne possédait pas les moyens d'établir une échelle objective.
- b) **L'échelle de Richter** a été instaurée en 1935. Elle nous fournit ce qu'on appelle la magnitude d'un séisme, calculée à partir de la quantité d'énergie dégagée au foyer. Elle se mesure sur une échelle logarithmique ouverte ; à ce jour, le plus fort séisme a atteint 9,5 sur l'échelle de Richter (Chili). Cette fois, il s'agit d'une valeur qu'on peut qualifier d'objective : il n'y a qu'une seule valeur pour un séisme donné. Aujourd'hui, on utilise un calcul modifié du calcul originel de Richter, en faisant intervenir la dimension du segment de faille le long duquel s'est produit le séisme.

Le graphique qui suit met en relation, la magnitude des séismes sur échelle arithmétique, et l'énergie dégagée au foyer sur échelle logarithmique ; il présente aussi une comparaison entre quelques séismes les plus connus. [12]

### I.2.3 Notion sur le champ proche et le champ lointain

Les enregistrements près de la faille sont caractérisés par une impulsion d'énergie élevée et importante, et causent beaucoup de dégâts. Aussi, la valeur énergétique des enregistrements près de la faille sont plus importants et plus destructifs que les enregistrements loin de la faille. Somerville 2005

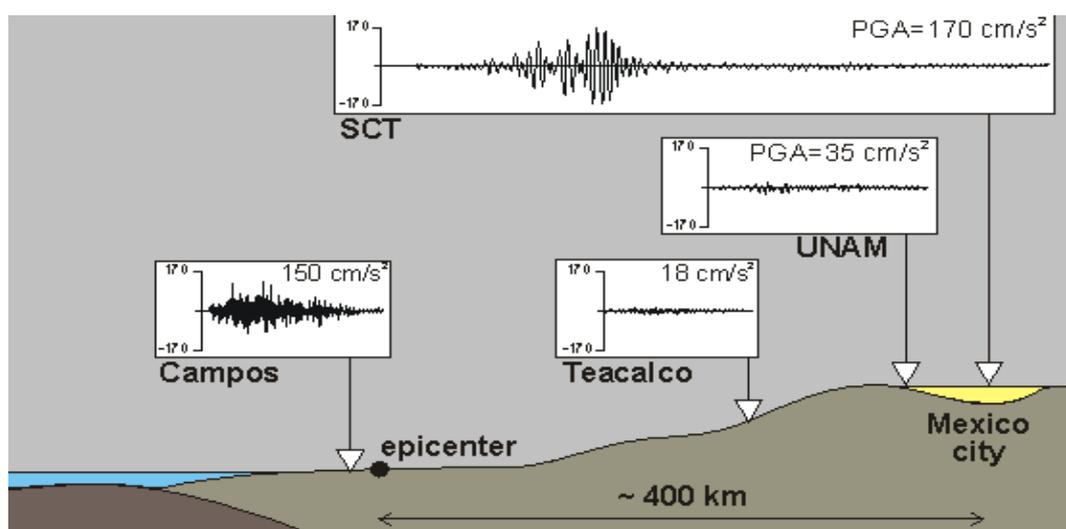


Figure I.3 Effets de site sismiques à Mexico 1985. [12]

#### a) Champ Proche

Les mouvements sismiques proches de la faille contiennent souvent des impulsions d'ondes significatives. Pour les failles de décrochement, elles dominent le mouvement horizontal et peuvent apparaître sous forme d'impulsions simples ou doubles avec des amplitudes à un ou deux côtés. La durée (période) de l'impulsion principale peut varier de 0,5 à 5s ou plus pour les plus grandes magnitudes. Ces propriétés dépendent du type, de la longueur et de la complexité de la rupture de la faille. [13]

Il y a deux causes à ces impulsions de longue période :

Premièrement, l'interférence constructive de l'agitation dynamique due à la directivité de la rupture de la faille ;

Deuxièmement, le mouvement du sol associé au décalage permanent du sol. Leur dépendance azimutale dans les deux cas est une conséquence du rebond élastique de la faille en rupture. Un terme descriptif est le lancement rapide du sol pendant le glissement de la faille. Pour distinguer ces deux effets, les termes impulsion de directivité et « *fling-step* » ont été utilisés pour les effets de directivité de la rupture et de rebond élastique, respectivement [14].

Les deux impulsions générées s'atténuent différemment l'une de l'autre, de sorte que leurs mesures séparées ne doivent pas être combinées statistiquement dans un seul échantillon. Considérez les implications pour la conception sismique résistante. Les effets de directivité de la rupture se produisent lorsque la source de la rupture de la faille est en direction du site et que la direction du glissement (sur le plan de la faille) est alignée avec la direction de la rupture [15].

Les enregistrements horizontaux des stations lors du séisme de Parkfield, Californie en 1966 et de la station Pacoima lors du séisme de San Fernando, Californie en 1971, [16] ont été les premiers à être discutés dans la littérature comme montrant des impulsions de vitesse proches de la faille. Ces cas, avec des amplitudes maximales de 78 et 113cm/s respectivement, consistaient principalement en un mouvement d'ondes SH polarisées horizontalement et étaient de période relativement longue (environ 2 à 3s).

Plus récemment, la disponibilité de mesures de mouvement du sol instrumentées proches des sources du séisme de Northridge en 1994, du séisme de Kobe en 1995 et particulièrement du séisme de Chi-Chi en 1999 a fourni des enregistrements importants de l'impulsion de vitesse dans différentes conditions. [17]

De nombreuses études pertinentes détaillées sur la source de Chi-Chi et les mouvements du sol ont déjà été publiées dans un volume spécial du Bulletin of the Seismological Society of America [18]. Dans le cas d'une rupture de faille vers un site à une vitesse plus ou moins constante (presque aussi grande que la vitesse de l'onde S), la plupart de l'énergie sismique de la rupture de faille étendue arrive dans un court intervalle de temps, résultant en une seule grande impulsion de longue période de vitesse et de déplacement, qui se produit près du début de l'enregistrement.

Cette impulsion d'onde représente l'effet cumulatif de la plupart de toutes les radiations sismiques de la dislocation en mouvement. La coïncidence du maximum du motif de radiation pour le mouvement tangentiel et la focalisation de l'onde due à la direction de propagation de

la rupture vers le site d'enregistrement produit une grande impulsion de déplacement normale à la direction de la faille [19].

La directivité de la rupture de la faille provoque des variations spatiales dans l'amplitude et la durée du mouvement du sol autour des failles et produit des différences systématiques entre les composantes normales à la faille et parallèles à la faille des amplitudes du mouvement du sol horizontal [15]. Ces variations augmentent généralement en taille avec la période croissante. Des modifications aux relations d'atténuation du mouvement fort du sol empirique ont été développées pour tenir compte des effets de la directivité de la rupture sur les amplitudes et les durées du mouvement fort [15]. Les paramètres du mouvement du sol qui ont été modifiés incluent l'accélération spectrale moyenne horizontale de réponse, la durée de l'historique temporel de l'accélération et le rapport entre l'accélération spectrale normale à la faille et parallèle à la faille.

### **b) Distance épacentrale pour le champ proche**

La définition de la distance à partir de laquelle on considère qu'on est en champ proche (*near-fault*) peut varier selon les études et les contextes sismologiques. En général, le champ proche est défini comme la région située à proximité immédiate de la faille sismique, où les effets de directivité et de *fling-step* sont les plus prononcés.

Bien qu'il n'y ait pas de distance standard universellement acceptée pour définir le champ proche, certaines études utilisent des critères basés sur des distances spécifiques ou des multiples de la longueur de la faille. Par exemple, on peut considérer que le champ proche se situe à une distance inférieure à 10 à 15 km de la faille pour les failles de longueur moyenne, ou à moins de 1 à 2 fois la longueur de la faille.

Il est important de noter que la définition du champ proche peut dépendre des caractéristiques particulières de la faille, de la géométrie de la rupture, ainsi que des propriétés des ondes sismiques étudiées. Par conséquent, il est recommandé de se référer aux critères spécifiques utilisés dans les études ou les normes sismiques pertinentes pour une définition précise dans un contexte donné. [20]

En plus de la distance de 10 à 15 km souvent mentionnée pour le champ proche, d'autres distances épacentrales ont été proposées dans la littérature pour caractériser le champ proche et le champ lointain. Voici quelques exemples :

- a) **Moins de 20 km** : Certains chercheurs considèrent que le champ proche peut s'étendre jusqu'à 20 km de l'épicentre, en particulier pour les grandes failles.
- b) **Moins de 30 km** : D'autres études définissent le champ proche comme étant à moins de 30 km de l'épicentre, en prenant en compte les effets de directivité pour les séismes de magnitude plus élevée. [21]
- c) **En fonction de la longueur de la faille** : Une approche basée sur la géométrie de la faille consiste à définir le champ proche comme étant à une distance égale à 1 à 2 fois la longueur de la faille. Cette définition est particulièrement utile pour les études de rupture de faille spécifiques. [22]
- d) **En fonction de la distance de rupture** : Certains chercheurs utilisent la distance de rupture (distance au point de la faille le plus proche) plutôt que la distance épacentrale pour

caractériser le champ proche. Dans ce cas, le champ proche peut être défini comme la zone où les effets de directivité et de *fling-step* sont significatifs, sans une distance fixe spécifiée.

Dans le cadre de ce travail de doctorat, il a été considéré comme champ proche la distance épacentrale inférieure à 20Km, les stations situées à une distance plus de 20Km, sont considéré comme champ lointain.

### c) Champ Lointain

Le champ lointain désigne les zones situées à des distances loin de la source du séisme. Cette zone s'étend au-delà du champ proche, souvent à des dizaines ou des mêmes centaines de kilomètres de la rupture. Dans le champ lointain, les ondes P et S dominant, et les effets des ondes de surface sont généralement atténués. Les mouvements du sol sont moins complexes et moins intenses que dans le champ proche.

Bien que les effets d'un séisme soient généralement moins sévères dans le champ lointain, ils peuvent toujours être significatifs, en particulier pour les grands séismes. Les bâtiments et autres structures dans le champ lointain peuvent subir des dommages, mais ces dommages sont généralement moins graves que dans le champ proche.

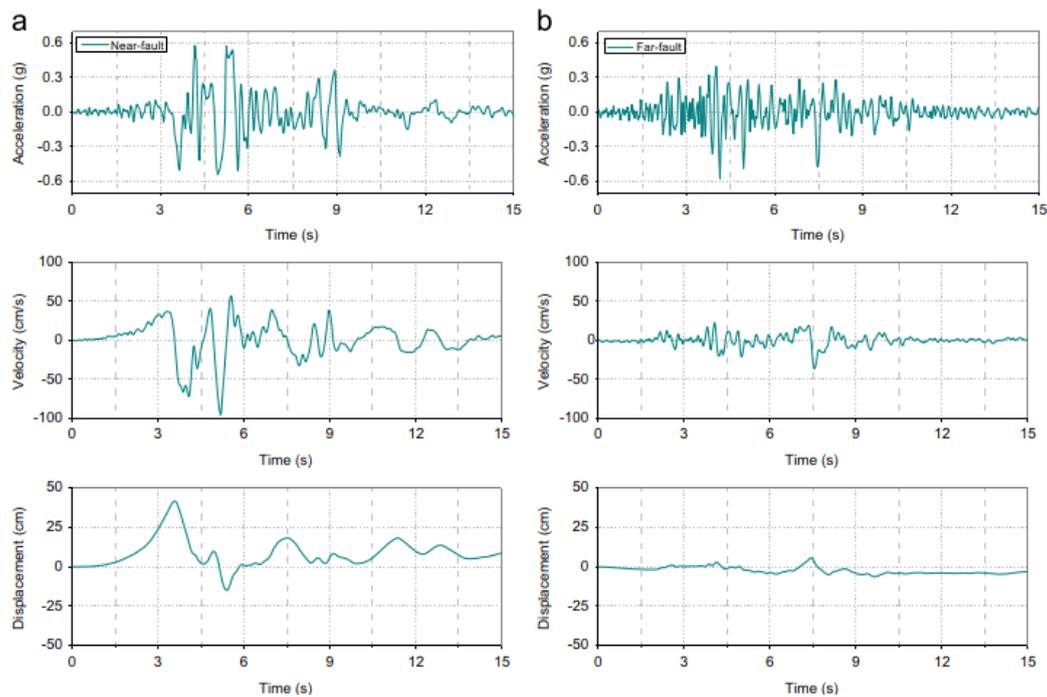


Figure I.4 Enregistrements sismiques pour (a) champ proche à Newhall et (b) champ lointain à Los Angeles durant le séisme de Northridge.

## I.3 Spectre de réponse

Le « spectre de réponse élastique horizontal » doit être utilisé dans les cas particuliers de structures à comportement purement élastique, correspondant à un coefficient de comportement  $R$  égal à 1. Il est défini au chapitre 3.2.2.2 de la norme EN 1998-1 pour les composantes horizontales, les équations du spectre de réponse élastiques suivantes (Eq I.1) :

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq T \leq T_B : S_a(T) = a_g S \left[ 1 + \frac{T}{T_B} (2.5\eta - 1) \right] \\ T_B \leq T \leq T_C : S_a(T) = a_g S (2.5\eta) \\ T_C \leq T \leq T_D : S_a(T) = a_g S (2.5\eta) \left[ \frac{T_C}{T} \right] \\ T_D \leq T \leq 4.0s : S_a(T) = a_g S (2.5\eta) \left[ \frac{T_C T_D}{T^2} \right] \end{array} \right. \quad (I.1)$$

$\eta$  : est le facteur de réduction d'amortissement (DRF)

$$\eta = \max \left\{ 0.55, \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \right\} \quad (I.2)$$

$\xi$  : est le pourcentage d'amortissement

Le spectre de réponse associé à la méthode modale spectrale selon le RPA 99 version 2003, est défini comme suit :

$$\frac{S_a(T)}{g} \left\{ \begin{array}{ll} A \left[ 1 + \frac{T}{T_1} (2.5\eta \left( \frac{Q}{R} \right) - 1) \right] & 0 \leq T \leq T_1 \\ 2.5\eta(A) \left( \frac{Q}{R} \right) & T_1 \leq T \leq T_2 \\ 2.5\eta(A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left[ \frac{T_2}{T} \right]^{2/3} & T_2 \leq T \leq 3s \\ 2.5\eta(A) \left( \frac{Q}{R} \right) \left[ \frac{T_2}{T} \right]^{2/3} \left[ \frac{T_2}{T} \right]^{5/3} & T \geq 3.0s \end{array} \right. \quad (I.3)$$

$Q$  : est le facteur de qualité

$R$  : est le coefficient de comportement

La formule proposée pour le règlement parasismique algérien [4] est stipulée dans l'équation I.4

$$\eta = \sqrt{\frac{7}{2+\xi}} \quad (I.4)$$

Il est à noter que le facteur de correction d'amortissement DRF, est un paramètre important dans la définition du chargement sismique pour les différents codes et règlements sismiques.

## I.4 L'amortissement et le mécanisme de dissipation

### I.4.1 Définition

En génie civil, le comportement des matériaux composites et non composites, ainsi que des assemblages structuraux, n'est jamais parfaitement élastique. Cette inélasticité se traduit, sous chargement cyclique, par une dissipation d'énergie, phénomène désigné par le terme "amortissement". L'énergie dans les structures est dissipée de plusieurs façons : par amortissement matériel (déformations internes des matériaux), amortissement structural (connexions et assemblages), amortissement visqueux (dispositifs d'amortissement remplis de

fluide), frottement sec (entre surfaces de contact), déformation plastique (permanente dans les matériaux), frottement aux joints (mouvement relatif), dispositifs d'amortissement ajoutés (viscoélastiques ou à friction), fissuration (formation et propagation des fissures), et par le sol (interaction entre fondations et sol environnant).

Dans une structure, l'amortissement matériel provient de divers mécanismes et sa valeur est influencée par plusieurs facteurs, tels que le type de structure, les matériaux de construction, la contribution des éléments non structuraux, et l'intensité des secousses. Par exemple, les structures dotées de systèmes d'isolation ou de dispositifs de dissipation d'énergie peuvent avoir des coefficients d'amortissement bien au-delà de 5%. Généralement, une structure qui demeure élastique présente un taux d'amortissement plus bas. Cependant, en cas de séisme suffisamment fort pour endommager les composants structurels et non structuraux, le coefficient d'amortissement peut augmenter considérablement.

#### **I.4.2 Types d'amortissements**

- a. **L'amortissement interne ou structural** se produit dans les matériaux lors des déformations qu'ils subissent, constituant la principale source de dissipation d'énergie. Il résulte de la dissipation d'énergie dans les matériaux de construction, les composants structurels, et leurs liaisons, et dépend de la température, de l'amplitude, ou de la fréquence de vibration. Cet amortissement comprend principalement deux aspects :
  - **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 par hystérésis** : indépendant de la fréquence, il provient de la non-linéarité du comportement des éléments structurels. Tant que la structure reste dans le domaine élastique, cet amortissement tend vers zéro.
- b. **L'amortissement externe** : Il s'agit de divers frottements, principalement ceux le long des surfaces de contact entre la structure et les éléments non structurels, lorsqu'ils sont présents. La contribution des éléments non structurels à l'amortissement total devient significative à des amplitudes d'oscillation élevées. Cette catégorie inclut le frottement entre les fondations et le sol, également appelé amortissement géométrique, pris en compte dans les modèles d'interaction sol-structure. L'amortissement externe peut également être aérodynamique et hydrodynamique, résultant de l'interaction entre la structure et l'air ambiant ou l'eau, respectivement. Ces derniers mécanismes sont généralement négligeables comparés à d'autres types d'amortissement [23].

### **I.5 Le Facteur de Réduction d'Amortissement DRF**

#### **I.5.1 Définition**

L'analyse dynamique spectrale est l'une des méthodes les plus utilisées dans la conception parasismique et l'évaluation de la réponse des structures en génie parasismique pour les structures existantes et nouvelles. Pour cela, les codes sismiques définissent généralement un facteur de réduction d'amortissement (DRF) et il est utilisé pour ajuster le spectre de référence afin de prendre en compte d'autres valeurs d'amortissement dans l'analyse.

Ce facteur est nommé facteur de correction, de réduction, d'ajustement ou de calibration d'amortissement et parfois par les coefficients d'amortissement dans les règlements américains.

La plupart des équations de prédiction des mouvements du sol sont disponibles pour un amortissement critique de référence de 5%. Or les structures stratégiques et les bâtiments dotés de systèmes d'isolation ont des valeurs d'amortissement différent de 5%. Le taux d'amortissement dépend de la structure, du type de matériau et son comportement et de vibration du sol ainsi que d'autres caractéristiques. Cependant, les systèmes structurels peuvent avoir un taux d'amortissement autre entre 1 et 40%.

Il est nécessaire d'avoir un facteur de réduction d'amortissement DRF pour convertir les mesures d'intensité à un amortissement de 5% tel que prédit par les équations de prédiction conventionnelles des mouvements du sol, à d'autres niveaux d'amortissement spécifiés. Le DRF est généralement estimé à partir de diverses ordonnées spectrales telles que le déplacement spectral, la vitesse spectrale, l'accélération spectrale, la vitesse pseudo-spectrale et l'accélération pseudo-spectrale (PSA). [24]

### I.5.2 Fondement mathématique du DRF

Les facteurs de réduction de l'amortissement adoptés par les codes sismiques sont des facteurs d'ajustement à appliquer aux ordonnées spectrales amorties à 5% ; ils sont souvent dérivés des effets de l'amortissement visqueux sur la réponse en déplacement des systèmes élastiques à un seul degré de liberté (SDOF). Ils peuvent être obtenus en utilisant les équations suivantes

$$\ddot{u}(t) + 2\omega\xi\dot{u}(t) + \omega^2u(t) = -\ddot{u}_g(t) \quad (\text{I.5})$$

La solution de  $u(t)$ ,  $\dot{u}(t)$ ,  $\ddot{u}(t)$  peut être résolue à l'aide de l'intégrale de Duhamel donné par :

$$u(t) = -\frac{1}{\omega_D} \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \sin[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad (\text{I.6})$$

$$\dot{u}(t) = -\xi\omega u(t) - \int_0^t \ddot{u}_g(\tau) e^{-\xi\omega(t-\tau)} \cos[\omega_D(t-\tau)] d\tau \quad (\text{I.7})$$

$$\ddot{u}(t) = -\omega^2u(t) - 2\xi\omega\dot{u}(t) \quad (\text{I.8})$$

L'expression générale la réponse spectrale peuvent être défini par les équations suivantes :

$$S_d(T, \xi) = \max|u(t, T, \xi)| \quad (\text{I.9})$$

$$S_v(T, \xi) = \max|\dot{u}(t, T, \xi)| \quad (\text{I.10})$$

$$S_a(T, \xi) = \max|\ddot{u}(t, T, \xi)| \quad (\text{I.11})$$

Il existe également deux autres pseudo-spectres liés au déplacement de la structure, à savoir le pseudo-spectre de vitesse  $S_{pv}$  et le pseudo-spectre d'accélération  $S_{pa}$ . Ils sont souvent utilisés pour étudier les vrais spectres de réponse ( $S_v$ ,  $S_a$ ) et construire les spectres de conception.  $S_{pv}$  et  $S_{pa}$  sont définis comme suit :

$$S_{pv}(T, \xi) = \frac{2\pi}{T} S_d(T, \xi) \quad (\text{I.12})$$

$$S_{pa}(T, \xi) = \frac{2\pi}{T} S_v(T, \xi) = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d(T, \xi) \quad (\text{I.13})$$

Les facteurs de réduction de l'amortissement (DRF) adoptés par les codes sismiques sont souvent définis comme le rapport entre le spectre de déplacement amorti à 5%,  $S_d(T, 5\%)$  et les spectres de déplacement  $S_d(T, \xi)$  pour différentes valeurs d'amortissement visqueux des systèmes élastiques à un degré de liberté (SDOF). En d'autres termes, le DRF est calculé comme suit :

$$DRF_d(T, \xi) = \frac{S_d(T, \xi)}{S_d(T, 5\%)} = \frac{S_{pa}(T, \xi)}{S_{pa}(T, 5\%)} \quad (I.14)$$

$$DRF_v(T, \xi) = \frac{S_v(T, \xi)}{S_v(T, 5\%)} \quad (I.15)$$

$$DRF_a(T, \xi) = \frac{S_a(T, \xi)}{S_a(T, 5\%)} \quad (I.16)$$

Où

$S_D(\xi, T)$ ,  $S_v(\xi, T)$ , et  $S_a(\xi, T)$  sont les spectres de déplacement de vitesse et d'accélération pour  $\xi > 5\%$  et  $S_d(5\%, T)$ ,  $S_v(5\%, T)$ ,  $S_a(5\%, T)$  pour  $\xi = 5\%$  respectivement.

Une autre définition en fonction du spectre d'énergie d'entrée « Input Energy Spectral » a été proposée par [25]

$$DRF_{EI}(T, \xi) = \frac{E_I(T, \xi)}{E_I(T, 5\%)} \quad (I.17)$$

$E_I(T, \xi)$  Représente l'ordonnée spectrale de l'énergie d'entrée pour un système SDOF linéaire avec une période naturelle  $T$  et un taux d'amortissement  $\xi$ , tandis que  $E_I(T, 5\%)$  désigne l'énergie d'entrée maximale pour un système SDOF linéaire ayant une période naturelle  $T$  et un taux d'amortissement de 5%.

L'énergie totale indépendante de la masse introduite dans le système SDOF ( $EI/m$ ) est donnée pour mettre en évidence la dépendance des ordonnées spectrales de l'énergie d'entrée au taux d'amortissement.

$$\frac{E_I}{m} = - \int_0^t \ddot{u}_g(t) \cdot \dot{u}(t) dt \quad (I.18)$$

### I.5.3 Formules proposées pour le DRF

De nombreuses formulations ont été proposées dans la littérature pour le **DRF**, bien que ce soit le travail initial présenté par :

#### a) Newmark et Hall (1973, 1982),

Ont utilisé les composantes horizontales et verticales de 14 mouvements du sol en Californie avant 1973 pour proposer des DRF correspondant à des niveaux d'amortissement inférieurs à 20% [26]. Leur approche a été pionnière dans l'utilisation de données sismiques pour évaluer l'impact de différents niveaux d'amortissement [27]. Leurs travaux ont été largement reconnus et leur équation a été adoptée dans [2], [3], [28]–[30].

$$\text{Newmark and Hall (1973) } DRF = \left( \frac{1}{1,309 - 0,194 \ln(\xi)} \right) \quad (I.19)$$

$$\text{Newmark and Hall (1982) DRF} = \begin{cases} 1.514 - 0.321 \cdot \ln \xi \\ 1.400 - 0.248 \cdot \ln \xi \\ 1.309 - 0.194 \cdot \ln \xi \end{cases} \quad (\text{I.20})$$

**b) Kawashima et Aizawa (1986)**

Leurs recherches, axées sur les structures isolées sismiquement, ont été incorporées dans les critères de conception sismique de Caltrans 2010, soulignant l'importance croissante de l'isolation sismique dans la construction [31].

$$\text{DRF} = \left( \frac{0,2\xi+2}{0,4\xi+1} \right) \quad (\text{I.21})$$

**c) Ashour (1987)**

La formulation spécifique d'Ashour pour les Facteurs de Réduction de l'Amortissement (DRF), axée uniquement sur le rapport d'amortissement, a été intégrée dans [2] et [32]. Cette adoption souligne l'avancement dans la compréhension de l'impact de l'amortissement sur les structures lors de séismes, marquant une évolution notable dans les normes de conception sismique [33].

$$\text{DRF} = \left( \frac{0,05 \times (1 - e^{-\alpha \times \xi})}{\xi \times (1 - e^{-0,05 \times \alpha})} \right)^{0,5} \quad (\text{I.22})$$

**d) Wu et Hanson (1989)**

En revanche, Wu et Hanson ont dérivé le facteur de réduction à partir de la réponse au déplacement, et ont établi une relation en termes de période et d'amortissement. Ce résultat a été mis en œuvre dans le programme national de réduction des risques sismiques pour la conception de bâtiments avec des systèmes de dissipation passive de l'énergie [34].

La formule proposée par Wu et Hanson est la suivante :

$$\eta = \frac{\lambda(T, \xi)}{\lambda(T, 5\%)} \quad (\text{I.23})$$

$\lambda$  est donnée par :

$$\lambda = -0.349 \cdot \ln(0.095 \cdot \xi), \text{ pour } T = 0.1 \text{ s}$$

$$\lambda = -0.547 \cdot \ln(0.417 \cdot \xi), \text{ pour } T = 0.5 \text{ s}$$

$$\lambda = -0.471 \cdot \ln(0.524 \cdot \xi), \text{ pour } 0.5 < T < 3 \text{ s}$$

$$\lambda = -0.478 \cdot \ln(0.475 \cdot \xi), \text{ pour } T = 3 \text{ s}$$

$$\lambda = -0.291 \cdot \ln(0.0473 \cdot \xi), \text{ pour } T = 10 \text{ s}$$

**e) Tolis et Faccioli (1999)**

Tolis et Faccioli ont proposé une variante des expressions précédentes, basée sur l'examen des spectres de réponse en déplacement dérivés des enregistrements sismiques du tremblement de terre de Kobe en 1995 [35].

$$\text{DRF} = \left( \frac{15}{10 + \xi} \right)^{0,5} \quad (\text{I.24})$$

**f) Bommer et al. (2000)**

Ont étudié les spectres de déplacement amortis de 183 composantes de mouvements du sol issus de 43 séismes peu profonds enregistrés sur des sites rocheux, fermes et meubles en Europe et au Moyen-Orient [36].

Leur équation a été intégrée dans [1], contribuant ainsi aux normes de conception parasismique européennes tel que [37].

$$DRF = \left( \frac{10}{5+\xi} \right)^{0,5} \quad (I.25)$$

**g) Ramirez et al. (2002)**

Leur formulation a été incluse dans le [30], indiquant une reconnaissance de l'importance de l'amortissement dans la conception sismique moderne [38].

$$DRF = \left( \frac{5}{\xi} \right)^{\alpha} \quad (I.26)$$

$\alpha$  est un paramètre qui dépend de la période fondamentale de la structure et des caractéristiques du sol.

Ramirez et al. ont trouvé que  $\alpha$  varie entre 0,2 et 0,4, selon la période de vibration et les conditions du sol.

**h) Otani et Kani en 2002**

Ont proposé une expression qui dépend seulement de la dissipation d'énergie [39], leur expression a été adoptée par [40].

$$DRF = \left( \frac{1.5}{(1+10 \times \xi)} \right) \quad (I.27)$$

**i) Priestley et al. (2003)**

Ont proposé une révision du DRF dans l'Eurocode 8, montrant l'évolution continue des normes de conception parasismique en Europe [41].

$$DRF = \left( \frac{5+\xi}{10} \right)^{0,25} \quad (I.28)$$

Cette formule a été proposée pour l'Eurocode 8, afin de tenir compte de l'effet du champ proche ;

**j) Zhou et al. (2003)**

Les directives chinoises pour les structures isolées sismiquement incluent une équation indépendante de la période pour les DRF [42]. Cette formulé a été implémenter dans le code [43].

$$DRF = \frac{6+1.7\xi}{11+0.7\xi} \geq \frac{1}{0,55} \quad (I.29)$$

**k) Lin et Chang (2003, 2004)**

Lin et Chang ont analysé 1037 accélérogrammes enregistrés aux États-Unis pour proposer des DRF dépendants de la période, pour des périodes entre 0,1s et 6s et des taux d'amortissement entre 2% et 50% [44], [45].

Leur travail a mis en évidence l'importance de la période dans l'estimation des DRF.

$$DRFd = 1 - \frac{aT^b}{(T+1)^c} \quad (I.30)$$

Tableau I.1 Coefficients du DRFd selon les classes du sol

Site class	<i>A</i>	<i>b</i>	<i>c</i>
<b>AB</b>	1.1637+0.3885 Ln( $\xi$ )	0,229	0.505
<b>C</b>	1.4532+0.4872 Ln( $\xi$ )	0.354	0.810
<b>D</b>	1.3243+0.4426 Ln( $\xi$ )	0.311	0.664

$$DRFa = d + eT \quad (I.31)$$

Tableau I.2 Coefficients du DRFa selon les classes du sol

Site class	<i>D</i>	<i>e</i>
<b>AB</b>	0.391 $\xi^{-0.304}$	0.0057+0.383 $\xi^{-1/15}$ ,929 $\xi^2$
<b>C</b>	0.309 $\xi^{-0.392}$	0.0151+0.474 $\xi^{-1/10}$ ,241 $\xi^2$
<b>D</b>	0.326 $\xi^{-0.371}$	0.0348+0.248 $\xi^{-1/8}$ ,250 $\xi^2$

**l) Atkinson et Pierre (2004)**

Ont étendu les simulations pour générer un ensemble de données d'enregistrements synthétiques utilisés dans le développement du [46] pour des scénarios entre M4.0 et M7.25 à des distances hypocentrales de 10 km à 500 km.

Ils ont proposé un ensemble de facteurs  $\eta$  indépendants de la magnitude et de la distance pour des périodes entre 0,05s et 2s [47].

**m) Priestley et al. (2007)**

$$DRF = \left(\frac{2+\xi}{7}\right)^{0,25} \quad (I.32)$$

Cette formule a été proposée pour Eurocode 8 pour tenir compte d'autres phénomènes tel que les caractéristiques à la vitesse et à la directivité des ondes [48];

**n) Cameron et Green (2007)**

Cameron et Green ont conclu que les valeurs du DRF varient en fonction du type de site, de la magnitude du séisme et du contexte tectonique, particulièrement pour les faibles niveaux d'amortissement (1%) [49]. Pour un amortissement de 2%, les DRF dépendent principalement de la largeur de bande des fréquences des mouvements sismiques, influencée par la magnitude et le contexte tectonique, mais peu par la distance site-source. En revanche, pour un amortissement de 1%, les DRF sont fortement influencés par la durée des mouvements sismiques, surtout pour des distances inférieures à 50 km. Ils avertissent que l'utilisation des

DRF pour des mouvements proches de la faille avec un taux d'amortissement de 5% pourrait surestimer la réponse spectrale, notamment pour des périodes proches des impulsions de vitesse observées dans les zones proches des failles. Ainsi, les DRF proposés peuvent différer des valeurs couramment utilisées, étant parfois trop élevés ou trop bas, soulignant l'importance de considérer la magnitude, la durée et les effets de site pour des ajustements précis.

**o) Stafford et al. 2008**

Ont étudié l'influence de la durée et du nombre de cycles sur les facteurs de correction d'amortissement. [50] ont initié cette approche, développant des équations pour prédire les facteurs d'étalonnage spectraux. Ils ont inclus la durée comme paramètre supplémentaire en plus de l'amortissement et de la période dans la formule du DRF [51]:

$$B_d(x/\xi_i) = \frac{S_d(\xi_i)}{S_d(5\%)} = 1 - \frac{\alpha_{1,i}}{1 + \exp\{-[\ln(x) + \alpha_{2,i}]/\alpha_{3,i}\}} \quad (\text{I.33})$$

Où

$\alpha_{1,i}$  : est un paramètre qui représente la durée et le nombre de cycles.

$\alpha_{2,i}$  et  $\alpha_{3,i}$  : sont des paramètres contrôlent la position de la courbe sigmoïde le long de l'axe des abscisses et la "pente" de la sigmoïde, respectivement.

**p) Cardone et al. (2009)**

Cardone a mené une étude sur l'utilisation des facteurs de réduction d'amortissement pour l'évaluation des spectres de réponse à fort amortissement, en se concentrant sur leur précision pour les structures avec des ratios d'amortissement supérieurs à 5%. Les résultats montrent que l'utilisation de ces facteurs est fiable uniquement pour des amortissements ne dépassant pas 10%, au-delà desquels des erreurs significatives peuvent survenir dans l'estimation de la réponse sismique maximale. Cardone a comparé différentes formulations et a déterminé que les facteurs proposés par Wu-Hanson et Lin-Chang sont les plus précis, ces derniers prenant en compte à la fois le ratio d'amortissement et la période de vibration. Le facteur de Wu-Hanson est précis pour les longues périodes, tandis que celui de Lin-Chang l'est davantage pour les courtes périodes. En revanche, le facteur de réduction de Bommer et al., utilisé dans le code sismique européen, offre un bon compromis entre précision et simplicité, car il ne dépend que du taux d'amortissement. Enfin, l'étude recommande d'utiliser des facteurs de réduction différents pour les spectres de déplacement et de pseudo-accélération afin d'obtenir des forces sismiques de conception précises, en particulier pour les systèmes avec des taux d'amortissement élevés et de longues périodes de vibration [52].

**q) Hatzigeorgiou (2010)**

Hatzigeorgiou a proposé un nouveau modèle (Eq. I.34) pour prédire les DRF dépendant des spectres de réponse en déplacement et en accélération, en considérant l'influence des conditions du sol et du type de mouvement du sol (séismes proches ou éloignés de la faille), en plus du rapport d'amortissement visqueux et de la période de vibration [53].

$$\text{DRF}(T, \xi) = 1 + (\xi - 5) \cdot [1 + c_1 \cdot \ln(\xi) + c_2 \cdot (\ln(\xi))^2] \cdot [c_3 + c_4 \cdot \ln(T) + c_5 \cdot (\ln(T))^2] \quad (\text{I.34})$$

Dans l'équation précédente, c1 à c5 sont des constants donné dans le tableau I.3 et I.4 pour le DRFd et DRFa, respectivement.

Tableau I.3 Coefficients du DRFd

	Far-fault			Near-fault
	Soil A	Soil B	Soil C	All Soil classes
<b>c1</b>	-0.30453	-0.29404	-0.29406	-0.30241
<b>c2</b>	0.2184	0.01963	0.0199	0.02183
<b>c3</b>	-0.07729	-0.09299	-0.09014	-0.08926
<b>c4</b>	0.00229	0.00897	-0.00001	0.01097
<b>c5</b>	0.00229	0.01219	0.01196	0.01007

Tableau I.4 Coefficients du DRFa

	Far-fault			Near-fault
	Soil A	Soil B	Soil C	All Soil classes
<b>c1</b>	-0.36725	-0.36051	-0.36128	-0.36227
<b>c2</b>	0.03526	0.03498	0.03494	0.03495
<b>c3</b>	-0.02634	-0.04093	-0.05435	-0.04517
<b>c4</b>	0.0323	0.03379	0.02907	0.03454
<b>c5</b>	-0.01047	-0.00191	0.00612	-0.0024

**r) Rezaeian et al. (2014)**

Ont étudié une base de données de 2250 enregistrements sismiques peu profonds et ont développé un modèle basé sur la magnitude et la distance pour prédire les facteurs de réduction de l'amortissement DRF pour la composante horizontale moyenne du mouvement du sol et pour des niveaux d'amortissement entre 0,5% et 30% [54].

$$\ln(DRF_V) = b_0 + b_1 \ln(\beta) + b_2 (\ln(\beta))^2 + [b_3 + b_4 \ln(\beta) + b_5 (\ln(\beta))^2] + [b_6 + b_7 \ln(\beta) + b_8 (\ln(\beta))^2] \ln(R_{RUP} + 1) + \varepsilon \quad (\text{I.35})$$

M est le moment de la magnitude

Rrup est la distance par rapport le plan de rupture de la faille

$\beta$  est le pourcentage d'amortissement

bi i= 0-8, sont des coefficients régression

**s) Bradley (2015)**

Bradley a examiné la dépendance des facteurs de modification de l'amortissement en fonction de la période, résultant de la directivité avant dans la zone proche de la source, des ondes de surface induites par le bassin et de la réponse des sols superficiels, en utilisant des enregistrements de mouvements de sol des tremblements de terre de Canterbury, en Nouvelle-Zélande, comme exemples. Il a illustré que les pics spectraux dans les spectres de réponse amortis à 5 % présentent systématiquement des facteurs de modification de l'amortissement

différents de ceux suggérés par les formules empiriques conventionnelles ; cela est également soutenu par des arguments basés sur la théorie des vibrations forcées. Étant donné que les effets spécifiques à la source et au site sont de plus en plus pris en compte dans le développement des spectres de réponse de conception spécifiques à une région ou à un site, ce travail illustre le besoin crucial de prendre en compte adéquatement les ajustements des facteurs de modification de l'amortissement afin de garantir que les procédures de conception sismique basées sur le déplacement restent cohérentes [55]. La formule proposée par Bradley est la suivante :

$$DMF_{Pulse, T=T_P} = \left(1 - \frac{\xi}{100}\right) \sqrt{\frac{10}{5+\xi}} \quad (I.36)$$

$T_P$  : est la période des pulses

#### **I.5.4 Effets des paramètres sismiques sur le DRF**

Les recherches indiquent que les DRF ne dépendent pas uniquement du taux d'amortissement de la structure et de la période structurale qui ont été introduit aux formules du DRF et implémenté dans les codes sismiques, mais aussi il existe une sensibilité des autres paramètres sismologiques et géotechniques qui nécessitent des investigations tel que la magnitude du séisme, la distance à la source, la durée du séisme le contenu fréquentiel et les conditions du site. Dans ce qui suit, une présentation des différentes recherches sur les effets des paramètres sismologiques et géotechniques sur le DRF ont été présenté.

##### **a) Magnitude**

Des recherches, notamment celles menées par [47], [50], [56], [57], ont examiné cette dynamique, révélant une sensibilité marquée du DRF à la magnitude, à la distance, et à d'autres facteurs sismiques.

Bommer et Mendis ont spécifiquement observé une diminution des DRF avec l'augmentation de la magnitude, suggérant que les séismes de grande magnitude entraînent généralement des demandes de déplacement réduites. Hao et al. ont approfondi cette analyse en étudiant 54 séismes, concluant que les DRF sont plus sensiblement affectés par la magnitude que par la distance épacentrale ou les conditions du sol. Daneshvar et Bouaanani ont quant à eux développé des expressions empiriques pour calculer le DRF, soulignant leur dépendance à la période spectrale et leur sensibilité aux variations de magnitude, particulièrement pour les périodes longues.

Zhang & Zhao ont identifié le contenu fréquentiel des mouvements du sol comme le facteur clé influençant la relation Sa-Spa, avec des variations pouvant être expliquées par les caractéristiques sismologiques telles que la magnitude et la distance [58].

Ces études fournissent un aperçu précieux de l'influence complexe de la magnitude sur les DRF, enrichissant ainsi notre compréhension de la conception sismique et offrant des pistes pour l'amélioration des modèles et des estimations des mouvements de conception.

##### **b) Distance en champ proche et en champ lointain**

Les études sur les Facteurs de Réduction de l'Amortissement (DRF) ont souligné une sensibilité notable de ces derniers à la distance particulièrement pour les mouvements du sol proches de la faille, où les valeurs de DRF proposées dans la plupart des normes et codes sont basées sur des excitations sismiques lointaines et se révèlent non-conservatrices. [59] et [60], ont mis en évidence que les DRF dérivés de mouvements du sol éloignés ne conviennent pas pour la conception face aux effets de proximité de faille, pouvant conduire à des résultats erronés. Li et Chen ont également signalé des problèmes de précision avec les DRF issus de mouvements du sol éloignés dans des cas proches de la faille. Atkinson et Pierre ont trouvé une sensibilité des DRF à la magnitude et à la distance, alors que Hatzigeorgiou a observé une indépendance des DRF vis-à-vis de la distance, ceux-ci étant plutôt sensibles aux conditions du sol.

Lin et Chang ont examiné l'influence des conditions du sol sur les DRF, concluant à une similitude des DRF dérivés des spectres de déplacement pour les classes de sol A, B, et D, tandis que pour la classe C, ils étaient légèrement différents selon le classement de la norme NEHRP 2000. Ils ont aussi noté que les valeurs de DRF basées sur l'accélération étaient plus sensibles aux conditions du sol. Daneshvar et Bouaanani ont proposé une expression empirique pour les DRF, prenant en compte la magnitude, la distance et les conditions du sol, et ont trouvé que l'effet de la distance était moins significatif.

Le code sismique UBC97 a spécifiquement abordé l'effet de proximité de faille en définissant un facteur de source proche, dépendant de la distance entre le site et l'épicentre, tandis que le code sismique chinois classe les sites de construction en fonction de la distance à la faille rompue, recommandant une amplification du spectre de réponse pour une conception plus conservatrice. Ces observations suggèrent que les DRFs utilisés dans la conception structurelle pour des mouvements du sol proches de la faille dans les codes sismiques sont basés sur des mouvements du sol ordinaires, soulignant le besoin d'approches spécifiques pour mieux adresser les effets de proximité de faille.

### **c) Conditions du sol**

Les recherches sur les Facteurs de Réduction de l'Amortissement (DRF) ont mis en évidence leur sensibilité aux conditions du site des séismes, Hatzigeorgiou a trouvé une sensibilité du DRF aux conditions du sol, de la roche dure au sol meuble. Lin et Chang ont analysé l'impact des conditions du sol sur les DRF, observant peu de différences entre les classes de sol A, B et D, contrairement à la classe C. Ils ont également noté que les valeurs de DRF dérivées de l'accélération sont plus sensibles aux conditions du sol que celles dérivées du déplacement. Daneshvar et Bouaanani ont proposé une expression empirique tenant compte de la magnitude, de la distance, et des conditions du sol, trouvant un impact moindre de la distance [51].

### **d) La durée du séisme**

Les recherches menées par [51] et [61] ont approfondi l'influence de la durée des mouvements du sol sur le DRF. Stafford et al. ont proposé des équations prenant en compte la durée significative et le nombre de cycles pour estimer les DRF à divers niveaux d'amortissement, soulignant que les mesures de durée sont plus efficaces que le nombre de cycles pour prédire les DRF [51]. Zhou et al. ont analysé l'effet de la durée effective des mouvements du sol sur les DRF en utilisant des enregistrements du séisme de Chi-Chi, révélant que les DRF diminuent

avec l'augmentation de la durée effective des mouvements du sol et le nombre de cycles d'excitation harmonique [61].

Ces études mettent en évidence l'importance de la durée des mouvements du sol dans la détermination des réponses sismiques des structures, proposant des approches améliorées pour intégrer cet effet dans les analyses sismiques. [51] soulignent l'efficacité des mesures de durée sur les prédictions de DRF, tandis que [61] révèlent une diminution des DRF avec l'augmentation de la durée. Ces conclusions suggèrent la nécessité d'intégrer la durée sismique de manière plus explicite dans la formule du DRF et par conséquent dans les analyses de conception sismique pour améliorer la fiabilité des estimations de la réponse des structures face aux séismes.

#### e) Effet de la forme spectrale

L'objectif principal de l'étude [62] est d'examiner l'effet de la forme spectrale sur les facteurs de modification de l'amortissement utilisés dans les analyses statiques équivalentes et les analyses du spectre de réponse de structures avec des taux d'amortissement différents de 5% d'amortissement critique.

L'étude évalue la variabilité de ces facteurs à travers une analyse statistique de 5270 enregistrements de mouvements du sol issus de séismes au Chili. Elle explore l'utilisation de métriques de forme spectrale comme prédicteurs potentiels et propose un modèle de régression simple. Les résultats suggèrent que la forme spectrale est un prédicteur efficace, en particulier pour les structures fortement amorties, mais que le mécanisme de faille sismique et la classe de site ont peu d'influence sur ces facteurs pour les sites rocheux.

Sur la base de cette étude, ils ont pu introduire l'effet de la forme spectrale sur le DRF, en utilisant les paramètres proxy de forme spectrale récemment proposés comme epsilon ( $\epsilon$ ) et SaRatio. Les résultats montrent que SaRatio est un meilleur prédicteur que la magnitude du séisme ou sa durée, surtout pour les systèmes à périodes modérées ou longues et les structures fortement amorties.

Un modèle de régression simple est proposé, basé sur le rapport d'amortissement et SaRatio.

$$\eta(\xi, S_a \text{Ratio}) = \exp(a_1 \cdot \xi) + \exp(a_2 \cdot S_a \text{Ratio}) \quad (\text{I.37})$$

$$a_1 = -3,66 \text{ et } a_2 = -3,22.$$

L'étude [63] évalue l'impact de la magnitude, de la distance et des conditions du site sur le facteur de réduction d'amortissement (DRF) et propose une nouvelle formulation intégrant un facteur de forme spectrale. Cette approche améliore la prédiction du DRF pour la conception sismique, soulignant que la magnitude influence davantage le DRF, surtout lorsque la période est supérieure à un seuil minimal. La distance épacentrale et les conditions du site ont un effet moindre, qui augmente avec le taux d'amortissement.

Dans l'étude [64], Liu et al. ont analysés 5680 enregistrements sismiques maritimes de 2016 à 2021, et ils ont proposé un modèle pour le DRF tenant compte du taux d'amortissement et de la période spectrale, comparé aux modèles existants *onshore*. Les résultats soulignent l'importance d'adapter le DRF aux caractéristiques sismiques maritimes, avec des influences significatives de la magnitude, de la profondeur de la faille et de la distance épacentrale sur le DRF.

### I.5.5 L'approche stochastique et évaluation des incertitudes sur le DRF

Dans la plupart des études mentionnées précédemment, le DRF a été évalué sur la base des effets d'amortissement structurel sur la réponse maximale en déplacement des systèmes SDOF élastiques lors de séismes artificiels ou naturels.

Cependant, sur la base de ces recherches, on peut affirmer que le coefficient d'amortissement demeure le principal paramètre influençant le DRF, de sorte qu'une erreur dans l'estimation de l'amortissement peut conduire à une valeur erronée du DRF et par conséquent à des inexactitudes significatives dans l'évaluation de la réponse dynamique.

Les études [6],[48],[49],[65],[66] abordent l'importance de tenir en compte les incertitudes dans l'évaluation du facteur de réduction de l'amortissement (DRF) dans la conception sismique des structures fortement amorties, révélant des approches variées pour leur estimation. Palermo propose des formules analytiques basées sur la densité spectrale de puissance, soulignant l'influence du rapport entre la période prédominante du sol et la période fondamentale de la structure.

Benahmed a examiné les effets des incertitudes sur l'estimation du rapport d'amortissement sur les DRF, tandis que Greco explore une nouvelle définition du DRF en utilisant le spectre de réponse stochastique. Ces études mettent en lumière la variabilité des formulations proposées et la nécessité de prendre en compte les caractéristiques sismologiques spécifiques et les incertitudes dans l'évaluation des DRF.

Tandis que l'étude de Palermo offre des insights sur le facteur de réduction de l'amortissement ( $\eta$ ) applicable à la conception parasismique de structures équipées d'amortisseurs visqueuse. En modélisant le spectre de réponse comme un processus aléatoire, une expression analytique de  $\eta$  basée sur la densité spectrale de puissance de Kanai–Tajimi est dérivée.

$$\eta_{K-T} = \frac{\sigma(\xi)}{\sigma(\xi=5\%)} = \frac{\sqrt{\int |H(\omega, \xi)|^2 G(\omega)}{\sqrt{\int |H(\omega, \xi=5\%)|^2 G(\omega) d\omega}} \quad (I.38)$$

La formulation prend en compte l'influence de la période prédominante du sol sur la réduction due aux forts taux d'amortissement.

Une formule simple de type code est proposée, englobant les formulations existantes et introduisant un exposant  $\chi$  corrélé au rapport entre la période prédominante du sol et la période fondamentale de la structure.

$$\eta_{K-N} = \frac{\sigma(\xi)}{\sigma(\xi=5\%)} = \frac{\sqrt{\int |H(\omega, \xi)|^2 d\omega}}{\sqrt{\int |H(\omega, \xi=5\%)|^2 d\omega}} \quad (I.39)$$

Les conclusions de l'étude mettent en lumière des corrélations entre  $\chi$  et le rapport  $k$ , et suggèrent des facteurs de réduction de l'amortissement variables en fonction des caractéristiques structurelles.

Dans l'étude de Benahmed, les incertitudes liées à l'amortissement ont été représentées par une distribution log normale de probabilité, tandis que la technique de Monte Carlo a été utilisée pour simuler un grand nombre de valeurs d'amortissement. Ils ont finalement constaté que les

effets de l'incertitude sur l'amortissement entraînaient des valeurs de DRF supérieures à celles déterminées de manière déterministe. En conséquence, une nouvelle formulation de DRF est proposée dans cette étude pour prendre en compte les incertitudes liées à l'estimation de l'amortissement. La relation proposée dépend uniquement du rapport d'amortissement et de la période, ce qui permet d'obtenir une erreur de prédiction inférieure à 15% pour  $\xi=0,20$ .

$$DRF = 0.941 + \frac{0.009}{\xi} + 0.028 \times \frac{\xi}{T} - 1.355 \times \xi \quad (\text{I.40})$$

D'après Benahmed, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour intégrer les incertitudes liées à la période ainsi qu'aux incertitudes liées à l'amortissement dans le DRF [6].

[67] l'objectif principal est d'évaluer la courbe du DRF en prenant en compte la variation possible due à l'incertitude du rapport d'amortissement, en utilisant une approche stochastique. Un système SDOF stochastique linéaire soumis à une charge sismique stationnaire est examiné, avec l'entrée simulée par le modèle stochastique [27], bien adapté pour représenter les séismes. Le DRF est défini comme le rapport entre le spectre de déplacement d'un système avec un rapport d'amortissement donné et celui d'un système à valeur conventionnelle (5%) sous le même séisme, incluant l'incertitude de l'amortissement dans l'analyse.

À travers cette analyse de sensibilité, l'étude révèle que le DRF est significativement influencé par la période de vibration et le rapport  $k$  entre la période prédominante du mouvement sismique et la période de la structure. De plus, le DRF est très sensible à la bande passante de l'excitation, caractérisée par le rapport d'amortissement du filtre.

Dans cette étude [68], une nouvelle méthode pour déterminer les Facteurs de Réduction de l'Amortissement (DRF) incluant les effets de l'incertitude d'amortissement a été proposée. Cette méthode combine la théorie du pic des processus stochastiques et la méthode de perturbation directe, prenant en compte l'incertitude de l'amortissement structurel. Les résultats principaux révèlent que l'impact de l'incertitude d'amortissement sur les DRF augmente avec le coefficient de variation, et que négliger ces incertitudes peut conduire à une conception non conservatrice et dangereuse. De nouvelles formulations de DRF intégrant cette incertitude ont été proposées, équilibrant précision et complexité, dépendant du rapport d'amortissement, de la période, et du coefficient de variation.

$$DRF = -0.377 + \frac{1}{\sqrt[3]{\xi_s}} \left( 0.471 + 0.151\rho + \frac{0.0464}{\sqrt[3]{T}} \right) \quad (\text{I.41})$$

## I.6 Conclusion

En conclusion, les séismes sont des phénomènes complexes, qui ont un impact significatif sur les structures dont ces caractéristiques principales ont été présentées dans le présent chapitre.

Ce chapitre a résumé les recherches sur le DRF tout en mettant l'accent sur les formules existantes dans la littérature et ceux proposé par les chercheurs et n'ont pas encore été adoptés dans les règlements en vigueur.

Additivement aux formules déterministes proposées pour le DRF, le volet probabiliste a été aussi évoqué dans ce chapitre en citant les recherches faites sur l'incertitude inhérente sur le DRF.

# CHAPITRE II

## Chapitre II : Sélection et étalonnage des enregistrements sismiques

### II.1 Généralités sur la sélection et l'étalonnage

Le processus de sélection et d'étalonnage des enregistrements sismiques, i.e. accélérogrammes, est une étape primordiale avant tout type d'analyses dynamiques incrémentales ou temporelle. Et ce, afin de s'assurer de la correspondance entre les mouvements du sol enregistrés et les conditions sismiques spécifiques d'un site donné. Cette correspondance améliore la fiabilité des résultats de simulations de la réponse structurelle due aux séismes.

La procédure de sélection tiens compte de plusieurs paramètres sismologiques tel que la magnitude, la distance épacentrale, la durée sismique, le contenu fréquentiel et même géotechniques. Les séismes choisis doivent correspondre à l'aléa sismique caractérisant le site de l'ouvrage étudié, par exemple, en termes d'accélération maximale ou de contenu fréquentiel. Certains sites se trouvent dans des régions dont la sismicité ne correspond pas aux enregistrements disponibles pour cette région, pour affecter l'intégrité des structures. Dans ce contexte, des accélérogrammes artificiels, tels que ceux simulés par [69], peuvent être utilisés comme alternative aux enregistrements historiques.

Concernant, l'étalonnage des accélérogrammes permet d'ajuster aux spectres de réponse cibles, rendant ainsi les analyses sismiques plus représentatives des effets sismiques réels. La précision dans ces processus est vitale pour obtenir des estimations fiables du comportement sismique des structures, contribuant directement à la sécurité et à la performance structurelle lors d'événements sismiques.

Selon la sismicité de la région et les conditions du sol, les enregistrements sélectionnés peuvent ne pas être parfaitement compatibles avec le spectre cible. Par conséquent, ces enregistrements peuvent être soit inférieurs, soit supérieurs au spectre cible, comme le montrent la figure II.1. Pour cette raison, l'étalonnage devient nécessaire pour assurer une bonne correspondance et une compatibilité acceptable au spectre cible. [70]

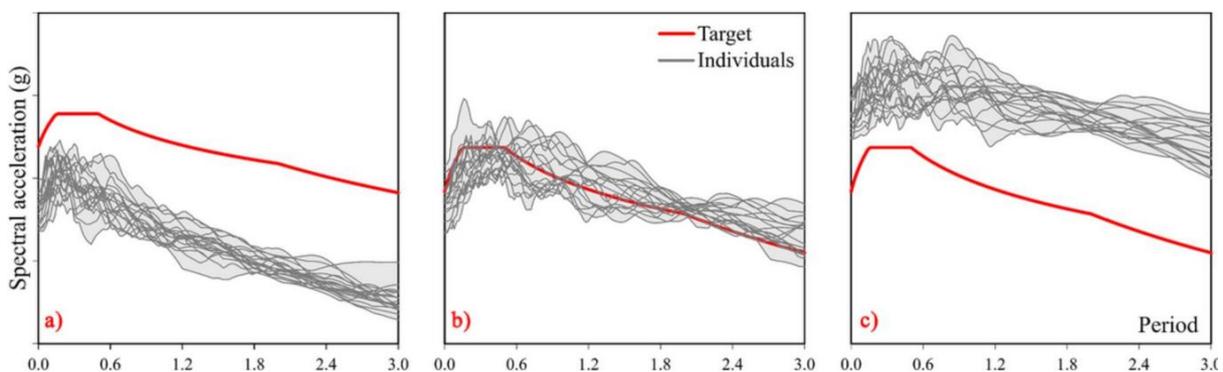


Figure II.1 Exemples de spectre cible et de spectres individuels possibles.

## II.2 Méthodes de sélection des accelerograms

En effet, l'évaluation de la performance des bâtiments définit trois méthodologies de sélection basées sur l'évaluation de la performance des bâtiments [71]:

- 1- Evaluation basée sur l'intensité,
- 2- Evaluation basée sur des scénarios,
- 3- Evaluation basée sur le temps.

Ces méthodes comprennent le développement d'un spectre de réponse cible, la sélection d'un ensemble approprié des enregistrements sismiques et la procédure de l'étalonnage pour une bonne compatibilité avec le spectre cible, sont nécessaire pour ajuster l'enregistrement au spectre cible pour la période  $y$  correspond et pour s'assurer que les accelerogrammes sélectionnés correspondent aux exigences spécifiques de l'évaluation de performance d'un bâtiment, permettant ainsi une analyse plus précise et ciblée de la réponse structurelle aux séismes.

### II.2.1 Evaluation basée sur l'intensité

Tout spectre cohérent avec les caractéristiques géologiques du site est essentiel pour une évaluation précise de la réponse sismique d'une structure. La sélection d'un spectre cible qui reflète fidèlement les conditions géologiques locales permet de garantir que l'analyse sismique prend en compte les effets du sol spécifiques au site, contribuant ainsi à une conception parasismique.

### II.2.2 Evaluation basée sur des scénarios

Le spectre dérivé à l'aide d'une équation de prédiction des enregistrements appropriée est nécessaire pour l'évaluation de la performance sismique. Cette équation permet de prédire les mouvements du sol en fonction des caractéristiques sismiques et géologiques du site, assurant que le spectre de réponse utilisé pour l'analyse correspond au potentiel sismique réel du site.

### II.2.3 Evaluation basée sur le temps

L'évaluation basée sur le temps implique l'utilisation d'un spectre spécifique pour chaque intervalle d'alea sismique considéré dans l'analyse. Cette approche permet de cibler et d'adapter l'évaluation de la performance sismique d'une structure aux différents niveaux de performance prédits sur une période donnée, offrant ainsi une compréhension plus nuancée et spécifique du comportement structurel attendu face aux séismes.

Tableau II.1 Approches d'évaluation du Spectre cible

<b>Evaluation basée sur l'intensité</b>	<b>Evaluation basée sur des scénarios</b>	<b>Evaluation basée sur le temps</b>
Tout spectre compatible aux caractéristiques géologiques du site	Dérivation du spectre avec un accélérogramme approprié.	Un spectre pour chaque intervalle d'alea sismique utilisé dans l'analyse.

### II.2.4 La méthode multifonctionnelle

Un modèle de solution multifonctionnel basé sur l'algorithme stochastique d'harmonisation de recherche (HS) est proposé par [12] pour obtenir à la fois des ensembles de composantes d'enregistrements réelles, étalonnés et non étalonnés, ainsi que des ensembles de paires de composantes d'enregistrements. Le modèle de solution est capable de prendre en compte le niveau de compatibilité requis entre le spectre moyen et le spectre cible correspondant. Simultanément, la compatibilité des spectres individuels des accélérograms sélectionnés avec le spectre cible ou la variabilité spectrale souhaitée à une période spécifique ou sur une plage de périodes peut également être considérée.

La sélection et la mise à l'échelle des mouvements sismiques compatibles avec les spectres de réponse élastique cibles sont considérées comme un problème d'optimisation.

L'objectif de la fonction  $F(x)$  est de minimiser l'écart pour obtenir la solution optimale est donnée dans l'équation (II.1).

$$F(x) = f_1(x) + g_1(x) + g_2(x) + g_3(x) \quad \text{II.1}$$

Dans l'équation (II.2),  $x$  est un vecteur dans lequel sont stockées les variables de décision du problème d'optimisation, les étiquettes numériques des mouvements du sol sélectionnés et les facteurs de calibrage utilisés pour les enregistrements sélectionnés.

$f_1(x)$  est défini comme la somme des carrés des différences entre  $S_e(T)$  (spectre cible) et  $E_m(T)$  (spectre moyen) des enregistrements sismiques sélectionnées et étalonnées.  $g_1(x)g_2(x)g_3(x)$ , sont les fonctions de pénalité pour imposer des conditions traitant des critères de sélection des enregistrements sous forme de contraintes. La figure II.2 illustre la zone entre  $S_e(T)$  and  $E_m(T)$ .

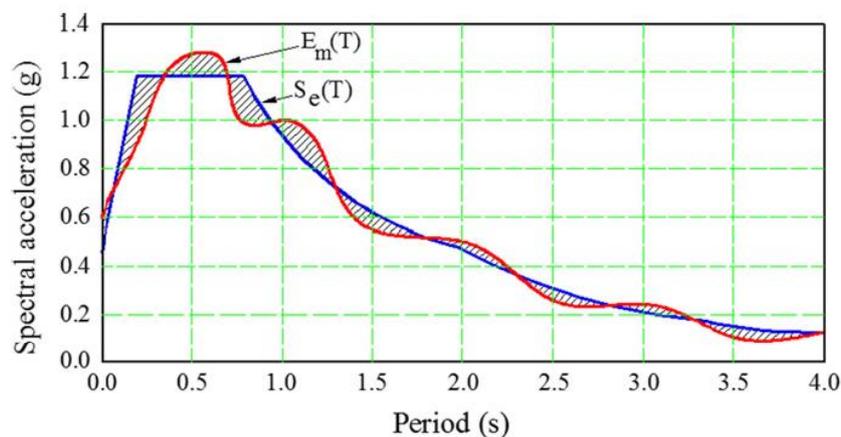


Figure II.2 Illustration graphique du problème d'optimisation (minimisation de la zone hachurée).

### II.3 Critères de sélection des enregistrements sismiques

Les paramètres à prendre en compte pour identifier les conditions de scénario sont ceux qui ont le plus d'influence sur la forme spectrale du mouvement du sol [72]

Selon [71] les critères de sélection des accélérograms pour la conception sismique des structures comprennent :

#### II.3.1 Magnitude du séisme (M) et distance (d)

La magnitude du séisme ( $M$ ) et la distance Epicentrale ( $d$ ) de la faille Figure II.3 sont des paramètres importants pour la sélection des accélérogrammes, servant de critères initiaux pour filtrer les enregistrements sismiques appropriés dans les bases de données. Des études ont formé des ensembles d'accélérogrammes réels pour évaluer la réponse sismique non linéaire de structures en se basant sur différentes paires de magnitude-distance.

Cependant, l'efficacité de cette méthode de sélection basée sur ( $M$ ,  $d$ ) a été remise en question en raison de la variabilité observée dans la réponse structurale, car la réaction d'une structure à des séismes de même magnitude et distance épiscopentrale peut varier considérablement, comme l'ont démontré des études telles que celles menées par [73].

Bien que la magnitude et la distance jouent un rôle important dans la détermination du spectre de réponse, l'ajout d'autres critères tels que le contenu fréquentiel, le type de sol et la durée significative des secousses permet d'affiner la sélection. Néanmoins, l'utilisation exclusive de la magnitude et de la distance reste courante en raison de sa simplicité d'application et de leur familiarité pour les ingénieurs structurels.

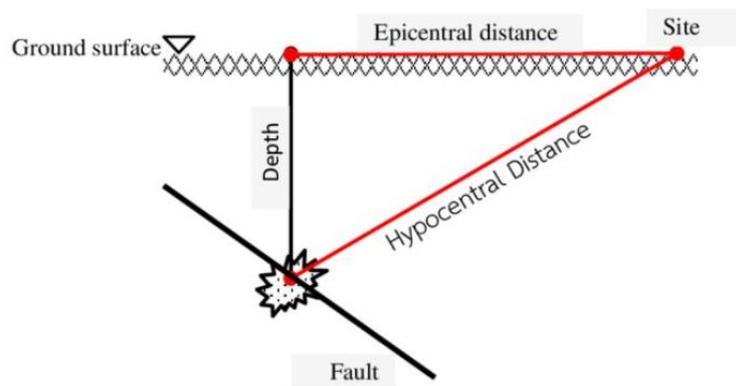


Figure II.3 Distance Epicentrale

### II.3.2 Type du sol

Le critère relatif à la classe du sol peut être pris en compte en considérant la vitesse moyenne des ondes de secondaires ( $V_{s,30}$ ) voir tableau II.2, un indicateur fréquemment utilisé pour décrire le profil géotechnique. Ce paramètre est déterminant pour le contenu fréquentiel de l'accélérogramme, car un sol rocheux, donc très rigide, présentera un contenu de haute fréquence significativement plus important qu'un sol meuble. Par conséquent, il est primordial de sélectionner des accélérogrammes issus de sites aux conditions géotechniques similaires à celles du site à étudier, pour assurer une analyse sismique représentative et précise.

Tableau II.2 Classes du sol selon l'Eurocode 8

Classe de Sol	Description du profil stratigraphique	$V_{s,30}$ (m/s)	$N_{SPT}$ (coups/30cm)	Cu (kPa)
A	Rocher ou autre formation géologique de ce type comportant une couche superficielle d'au plus 5m de matériaux moins résistant	> 800	-	-
B	Dépôts raides de sable de gravier ou d'argile sur-consolidée, d'au moins plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur, caractérisés par une augmentation progressive des propriétés mécaniques avec la profondeur	360 - 800	> 50	> 250
C	Dépôts profonds de sable de densité moyenne, de gravier ou d'argile moyennement raide, ayant des épaisseurs de quelques dizaines à plusieurs centaines de mètres	180 - 360	15 - 50	70 - 250

### II.3.3 Durée de la secousse

En plus du profil du sol, la durée du mouvement sismique est un critère complémentaire pour la sélection des enregistrements réels. La durée des secousses est généralement contrôlée par la durée de la rupture de la faille, qui est à son tour fonction de la magnitude. [74] ont déclaré que la durée est un paramètre prédictif secondaire et qu'il serait futile d'explorer des corrélations directes entre la durée et les dommages. En effet, la durée du mouvement fort affecte les différents types d'indices de dommages de différentes manières.

Les mesures de dommages basées sur la réponse maximale ne dépendent pas de la durée, tandis que les mesures de dommages telles que l'énergie hystérétique absorbée et les dommages de fatigue sont corrélées à ce paramètre particulier.

[73] ont confirmé cette dernière affirmation en examinant la réponse non linéaire de systèmes à un degré de liberté. En sélectionnant des accélérogrammes réels comme représentatifs de scénarios de durée spécifiques, ils ont conclu que la durée est insignifiante pour les indices de demande basés sur le déplacement, tandis qu'elle influence les modèles basés sur l'énergie.

[67] ont également souligné que ce phénomène dépend également du modèle structural lui-même. Les structures présentant une dégradation de la rigidité ou de la résistance sous chargement cyclique seront plus sensibles au nombre de cycles de mouvement et donc à la durée des secousses. Malgré plus de 40 définitions différentes pour la durée du mouvement fort proposées, les ingénieurs sont dissuadés de les utiliser comme leur principal paramètre de sélection, un fait qui peut également être attribué à leur réticence à décider d'une définition de durée spécifique parmi les nombreuses disponibles.

Certains codes sismiques modernes proposent que la durée des enregistrements sélectionnés soit représentative du mouvement du sol attendu sur un site pour un niveau de risque sismique donné. Malhotra [75] a proposé que le processus de sélection soit basé à la fois sur la forme spectrale et la durée significative. En tout cas, l'adoption de la durée du mouvement fort dans le processus de sélection des enregistrements doit toujours être soigneusement justifiée.

### **II.3.4 Paramètres liés à la source (faille)**

Un aspect important dans la littérature est la prise en compte des caractéristiques sismotectoniques régionales et le degré auquel celles-ci sont reflétées dans les mouvements du sol enregistrés lors d'un événement sismique. Ces effets comprennent le mécanisme de rupture, l'environnement source, le type de faille, le chemin de la source et la directivité des ondes sismiques, et leur influence sur les mouvements forts a été observée dans de nombreuses études. Par exemple, il a été mentionné que les mouvements du sol générés par des séismes de type rupture enterrée dans la plage de périodes autour de 1,0 s sont significativement plus forts que les mouvements du sol causés par des événements de rupture en surface. Des différences dans les spectres de réponse prévus dérivés de mouvements forts dans des régions stables peu profondes et dans des zones de subduction ont également été démontrées.

De plus, l'impact de diverses caractéristiques de l'environnement sismotectonique sur les mouvements forts a conduit de nombreux chercheurs à utiliser ces paramètres dans le processus de sélection des enregistrements sismiques. Cependant, un équilibre doit être atteint dans le processus de sélection global, car l'inclusion de critères utilisant des caractéristiques de l'environnement sismotectonique peut réduire considérablement le nombre acceptable d'enregistrements requis dans les analyses dynamiques non linéaires.

En dehors de cela, un raffinement supplémentaire de la fenêtre de recherche peut être inefficace car l'impact de l'environnement sismotectonique sur les quantités de réponse structurelle n'est toujours pas bien compris [14].

### **II.3.5 Contenu fréquentiel**

En tenant compte des caractéristiques sismotectoniques et des spécificités du site où le mouvement fort a été enregistré, le rapport de l'accélération maximale sur la vitesse maximale a été proposé comme une mesure complémentaire pour le processus de sélection.

En particulier, [76],[77] ont étudié le rapport ( $a/v$ ) pour les mouvements forts du sol et ont conclu que ce paramètre est lié à la magnitude du séisme, à la distance de la source ainsi qu'au contenu fréquentiel des accélérogrammes. Par conséquent, la sélection d'accélérogrammes avec des rapports pouvant être regroupés comme

- Faibles : ( $a/v < 0,80$  g/m/s),
- Intermédiaires : ( $0,80 < a/v < 1,20$  g/m/s)
- Élevés : ( $a/v > 1,20$  g/m/s), est considérée comme couvrant une large gamme de séismes indépendants du site en question et fournissant une limite supérieure conservatrice du mouvement du sol attendu.

Cependant, il est noté que cet indice particulier ne peut pas être considéré comme le seul critère pour un processus de sélection, mais plutôt comme une limite supérieure conservatrice du mouvement du sol attendu.

### **II.3.6 Compatibilité spectrale**

La sélection des accélérogrammes réels est souvent effectuée sur la base de la compatibilité entre leurs spectres de réponse et un spectre cible correspondant, tel que défini par les dispositions des codes ou calculé directement à travers une Analyse Probabiliste de Risque Sismique (PSHA).

L'ajustement spectral est la méthode de sélection des enregistrements sismiques la plus couramment proposée par les codes sismiques et, en tant que telle, peut être utilisée dans le cadre de la conception basée sur les forces et la conception basée sur la performance. L'ajustement spectral ne doit pas être confondu avec la génération d'accélérogrammes artificiels compatibles avec le spectre, car ces derniers nécessitent un logiciel spécialisé ; de plus, ils ne constituent pas de véritables ondes sismiques et, en conséquence, contiennent un contenu énergétique déraisonnablement élevé.

L'ajustement spectral est généralement considéré comme un critère de sélection de deuxième niveau, après une sélection initiale basée sur la magnitude et la distance. Il convient de mentionner ici que le terme "techniques spéciales" (par exemple, les ondelettes) pour établir la convergence spectrale. Cependant, la terminologie utilisée ici correspond à la méthode largement utilisée pour sélectionner des enregistrements réels basés sur la conformité de forme entre les spectres de réponse et cibles.

Lorsque l'ajustement spectral est recherché dans le cadre d'un code sismique, le spectre cible est le spectre élastique (ou de conception). Dans cette optique, Ambraseys et al. ont proposé l'équation (II.2) comme moyen de vérifier la compatibilité spectrale d'un enregistrement donné avec le spectre cible à travers la banque de données de mouvements forts européens.

$$D_{rms} = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{i=1}^N \left( \frac{S\alpha_0(T_i)}{PGA_0} - \frac{S\alpha_s(T_i)}{PGA_s} \right)^2} \quad (\text{II.2})$$

### II.3.7 Mesures d'intensité du mouvement du sol

Des mesures telles que l'accélération maximale du sol (PGA), la vitesse maximale du sol (PGV) et la durée significative du mouvement du sol peuvent être utilisées pour caractériser les accélérogrammes. La sélection des enregistrements doit viser à minimiser la dispersion des réponses structurales en utilisant des accélérogrammes ayant des mesures d'intensité similaires.

En résumé, la sélection des accélérogrammes doit être effectuée de manière à garantir que les enregistrements sismiques soient représentatifs des conditions de site, des caractéristiques de la source sismique et des exigences de conception, tout en minimisant la variabilité des réponses structurales.

## II.4 Méthodes d'étalonnages

### II.4.1 Etalonnage au PGA

L'étalonnage au Peak Ground Acceleration (PGA) est un processus utilisé en ingénierie sismique pour ajuster les paramètres des modèles de prédiction des mouvements sismiques afin qu'ils correspondent aux observations réelles de l'accélération maximale du sol lors d'un séisme. Le PGA est une mesure de l'amplitude maximale des mouvements sismiques enregistrée à la surface du sol lors d'un événement sismique. Pour mettre en œuvre cette méthode, il faut multiplier l'accélérogramme par un coefficient afin que son PGA corresponde au PGA cible.

$$F_{PGA} = \frac{PGA_{cible}}{PGA_{secousse}} \quad (II.3)$$

Cette méthode fait l'objet de nombreuses critiques car elle ne tient pas compte du contenu fréquentiel du mouvement sismique. En conséquence, cela entraîne une dispersion importante dans les indicateurs de potentiel de dommages liés aux tremblements de terre.

#### II.4.2 Etalonnage à l'accélération spectrale

Le terme "Sa(T1) scaling" fait référence à une méthode d'étalonnage des enregistrements sismiques où l'accélération spectrale à la période fondamentale du bâtiment (Sa(T1)) est utilisée comme critère d'étalonnage. Dans cette approche, les enregistrements sismiques sont ajustés de manière à ce que leur accélération spectrale à la période fondamentale (T1) du bâtiment soit égale à celle spécifiée par le spectre de réponse cible. Cette méthode prend en compte non seulement l'accélération maximale du sol (PGA), mais aussi la forme du spectre de réponse, offrant ainsi une meilleure correspondance entre les caractéristiques dynamiques de la structure et le mouvement du sol.

$$F_{S_{a(T_1)}} = \frac{S_{a(T_1)cible}}{S_{a(T_1)secousse}} \quad (II.4)$$

Cette méthode est critiquée car elle néglige le contenu fréquentiel du mouvement sismique ainsi que les modes de vibration supérieurs, qui peuvent être significatifs pour les structures élevées. De plus, elle ne prend pas en compte l'extension possible de la période T1 due au comportement ductile de la structure, ce qui peut conduire à une dispersion considérable dans les indicateurs du potentiel de dommages sismiques.

#### II.4.3 Etalonnage selon ASCE

La méthode ASCE, prescrite par le code [29] recommandée par les codes américains exige que le spectre de réponse entre 0.2 T1 et 1.5 T1, où T1 est la période naturelle de vibration de la structure, ne soit pas inférieur au spectre cible pour chaque période T(s) entre ces mêmes deux bornes. Cette plage est choisie en raison du comportement inélastique qui résulte en des périodes fondamentales plus élevées à une valeur effective de 1.5T1 et d'autre part la période de transition modale qui tombe souvent entre un quart et un tiers de la période fondamentale. La procédure de mise à l'échelle [29] et [45] ne garantit pas un facteur de mise à l'échelle unique pour chaque enregistrement ; évidemment, diverses combinaisons de facteurs de mise à l'échelle peuvent être définies pour garantir que le spectre moyen des enregistrements mis à l'échelle reste au-dessus du spectre de conception. Les procédures et critères dans l'IBC et le CBC pour la sélection et la mise à l'échelle des mouvements du sol pour une utilisation dans l'analyse de l'histoire de réponse non linéaire des structures sont basés sur les dispositions [29] et [45].

#### II.4.4 Etalonnage par la méthode SIa

Pour mettre en œuvre la méthode SIa, il est essentiel d'identifier les intervalles de périodes pour l'étalonnage de l'accélérogramme. L'utilisation des périodes de 0 s à 4 s comme limites est courante pour englober la majorité des périodes de vibration rencontrées, mais ces limites peuvent être ajustées en fonction de la structure analysée. La prochaine étape consiste à calculer

l'aire sous le spectre cible et sous le spectre de réponse entre les périodes choisies. Le facteur d'étalonnage nécessaire est alors déterminé à partir de l'équation (II.5) pour égaliser les aires sous les deux courbes. Dans cette méthode, le multiplicateur est appliqué à l'accélérogramme de façon à ce que l'aire sous le spectre de réponse corresponde à l'intégration de l'accélération spectrale dans l'intervalle de périodes d'intérêt de  $0,2T_1$  à  $1,5T_1$  [78].

$$F_{SIa} = \frac{\int_0^4 S_{acible(T)} dT}{\int_0^4 S_{asecouse(T)} dT} \quad (\text{II.5})$$

Cette démarche assure que le spectre de réponse ajusté représente de manière adéquate la sollicitation sismique sur la structure pour les périodes spécifiées, offrant ainsi une meilleure représentation de la réponse dynamique attendue de la structure lors d'un séisme.

#### II.4.5 Etalonnage par la méthode MSE

La méthode MSE (Mean Square Error) utilisée par la base de données de PEER (2010a) permet de quantifier l'ajustement global de l'enregistrement à un spectre cible en calculant la moyenne du carré de l'erreur entre les logarithmes naturels du spectre cible et du spectre de réponse. Pour ce faire, la plage de périodes d'intérêt ( $0,2T_1$  à  $1,5T_1$ ) est subdivisée en points également espacés, et les spectres de réponse cible et enregistré sont interpolés pour fournir une accélération spectrale à chaque période. Le MSE est calculé à l'aide d'une équation spécifique où  $SA(T_i)$  target est l'accélération spectrale du spectre cible,  $SA(T_i)$  réponse est celle du mouvement du sol mis à l'échelle,  $w(T_i)$  est une fonction de poids et  $f$  est un facteur d'échelle linéaire appliqué à l'ensemble du spectre de réponse de l'enregistrement, minimisant le MSE entre les deux spectres. Ce processus garantit que le spectre de réponse ajusté reflète adéquatement la demande sismique sur la structure pour les périodes spécifiées, offrant ainsi une meilleure représentation de la réponse dynamique attendue de la structure pendant un séisme.

$$MSE = \frac{\sum w(T_i) \{ \ln[S_a^{cible}(T_i)] - \ln[f * S_a^{réponse}(T_i)] \}^2}{\sum w(T_i)} \quad (\text{II.6})$$

- ✓ L'axe T, représentant la période du spectre, est subdivisé en un grand nombre ( $T_i$ ) également espacé selon  $\ln(T)$ .
- ✓  $S_a^{cible}$  : est l'accélération spectrale du spectre cible
- ✓  $S_a^{réponse}$  : est l'accélération spectrale de l'accélération étalonné
- ✓  $w(T_i)$  : fonction de pondération
- ✓  $f$  : est un facteur d'ajustement linéaire appliqué à l'ensemble du spectre de réponse de l'enregistrement, minimisant l'erreur quadratique moyenne entre le spectre cible et le spectre de réponse

#### II.4.6 Etalonnage par la méthode « Spectral Matching »

Le programme informatique SeismoMatch (Seismosoft 2009) a été utilisé pour ajuster spectralement les enregistrements sismiques au spectre cible. SeismoMatch est une application qui utilise l'algorithme d'ondelette proposé par [15] et [79] pour ajuster les mouvements sismiques du sol et obtenir un spectre de réponse compatible au spectre cible dans une plage de

périodes précise. Dans cette approche, des ondelettes élémentaires soigneusement sélectionnées sont ajoutées et soustraites à l'enregistrement original de manière à ne pas imposer de déplacement supplémentaire à l'enregistrement.

La caractéristique de base de l'enregistrement original concernant l'amplitude et le contenu fréquentiel de l'enregistrement sur la durée de l'historique temporel est préservée et les historiques temporels de conception développés ont des spectres similaires aux spectres de conception (NEHRP 2011).

Cette procédure est populaire dans la pratique de l'ingénierie car elle réduit la variance des réponses structurelles en raison de la variabilité des enregistrements sismiques et fournit une plateforme pour estimer la réponse moyenne avec moins d'analyses. Le seul argument qui peut être avancé est que bien que cette méthode réponde adéquatement aux exigences du spectre cible, elle ne produit pas de mouvements du sol représentatifs des enregistrements sismiques réels.

#### **II.4.7 La sélection dans codes sismiques**

Les codes sismiques nationaux établissent des directives générales pour la sélection des enregistrements sismiques pour les analyses dynamiques non linéaires, mais ne fournissent pas de spécifications détaillées en raison de la nouveauté des analyses temporelles dans la pratique de l'ingénierie, du développement continu de la recherche dans ce domaine et de l'absence d'un accord complet sur les critères de sélection.

Les procédures décrites par les codes sismiques contemporains, comme l'Eurocode 8, les normes ASCE et les réglementations FEMA, sont relativement similaires. Cependant, l'efficacité et la faisabilité de ces techniques ont été remises en question par de nombreux chercheurs, notamment en ce qui concerne leur capacité à sélectionner efficacement des accélérogrammes réels pour les sites à forte sismicité et les profils de sol mous. Il a été suggéré que l'application de critères supplémentaires et l'utilisation de logiciels pourraient améliorer la procédure de sélection, mais cela ne garantit pas nécessairement une réduction de la dispersion dans les réponses structurelles.

#### **II.5 Sélection des accélérogrammes selon le spectre cible de l'Eurocode 8**

La sélection et l'étalonnage des accélérogrammes sismiques est une étape très importante pour mener une analyse dynamique ou une investigation statistique. Une sélection appropriée des enregistrements sismiques pour un type de sol bien précis en tenant compte des caractéristiques sismologiques donne des résultats très fiables et proche de la réalité.

Lors de la sélection les critères sismologiques qu'on doit tenir compte sont ceux qui influent sur la forme spectrale [72]. Dans cette étude la sélection a été menée à l'aide le programme développé par Kayhan et al. [80], la plage des périodes considérés varie entre 0.01s et 4.0s qui couvrent un nombre important des structures pour assurer une compatibilité relative avec le spectre cible réglementaire.

Pour notre cas les spectres issus du règlement Eurocode 8 ont été utilisés pour trois classes du sol (A, B et C) (voir Tableau. II.2) et ce, pour examiner les effets des conditions du sol sur le DRF. Les enregistrements en champ proche et en champ lointain ont été gérés par la distance

épicentrale de 20km. Le moment de magnitude considéré dans la sélection varie entre 5.2 et 7.7.

Les valeurs du DRF calculés pour un système d'un seul degré de liberté dérivé du déplacement DRFd et de l'accélération DRFa. Les tableaux II.0.I-12, résumant les résultats de la sélection pour chaque classe du sol il a été convenu de choisir les meilleurs 15 accélérogrammes enregistré en champ proche puis en champ lointain. Un total de 90 enregistrements, a été sélectionné. L'accélération maximale (PGA) utilisé dans la sélection est de 0.35g qui reflète une accélération maximale importante.

La liste de tous les enregistrements sélectionnés pour chaque classe de sol dans les deux cas, en champ proche et lointain de la faille, avec leurs caractéristiques principales, est répertoriée dans les tableaux ci-dessous,

Tableau II.3 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ lointain, sol classe A

Enregistrement	Séisme	Date	Mw	Station	d Epi (Km)	Classe du Sol
6262y	South Iceland	17.06.2000	6.5	ST2496	31	A
1255y	Izmit	17.08.1999	7.6	ST770	78	A
198y	Montenegro	15.04.1979	6.9	ST64	21	A
4678x	South Iceland	17.06.2000	6.5	ST2557	32	A
296x	CampanoLucano	23.11.1980	6.9	ST102	80	A
290y	CampanoLucano	23.11.1980	6.9	ST96	32	A
363y	Umbria	29.04.1984	5.6	ST138	27	A
6761y	Vrancea	30.08.1986	7.2	ST40	49	A
7187x	Avej	22.06.2002	6.5	ST3311	28	A
6500y	Duzce 1	12.11.1999	7.2	ST3136	23	A
55x	Friuli	6.05.1976	6.5	ST20	23	A
294x	CampanoLucano	23.11.1980	6.9	ST100	26	A
200y	Montenegro	15.04.1979	6.9	ST68	65	A
1228x	Izmit	17.08.1999	7.6	ST561	47	A
287y	CampanoLucano	23.11.1980	6.9	ST93	23	A

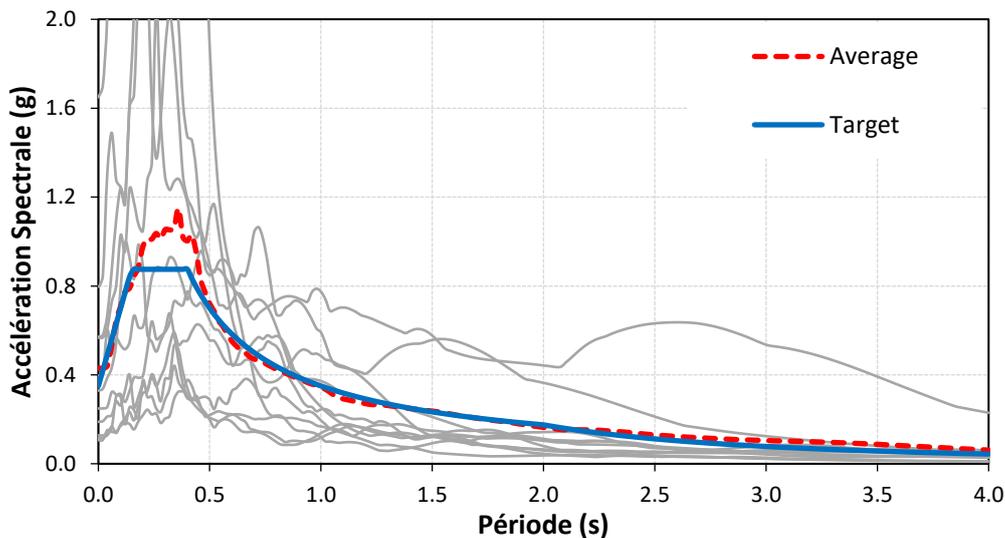


Figure II.4 Sa-T (Champ lointain, sol classe A)

Tableau II.4 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ lointain, sol classe B

Enregistrement	Séisme	Date	Mw	Station	d Epi (Km)	Classe du Sol
293x	Campano Lucano	23.11.1980	6.9	ST99	33	B
6144x	Aigion	15.06.1995	6.5	ST1332	42	B
197x	Montenegro	15.04.1979	6.9	ST63	24	B
196x	Montenegro	15.04.1979	6.9	ST62	25	B
1881x	South Aegean	23.05.1994	6.1	ST1310	45	B
619x	Umbria Marche	26.09.1997	6.0	ST231	78	B
354y	Panisler	30.10.1983	6.6	ST133	33	B
CHICHI\CHY028-E	Chi-Chi,Taiwan	20/09/1999	7.62	CHY028	32.67	B
1875y	Griva	21.12.1990	6.1	ST1306	36	B
MANJIL\ABBAR--T	Manjil, Iran	20/06/1990	7.37	ABBAR	40.43	B
TABAS\TAB-LN	Tabas, Iran	16/09/1978	7.35	Tabas	55.24	B
297y	Campano Lucano	23.11.1980	6.9	ST103	72	B
187x	Tabas	16.09.1978	7.3	ST59	57	B
1216y	Izmit	17.08.1999	7.6	ST544	93	B
612y	Umbria Marche	26.09.1997	6.0	ST228	38	B

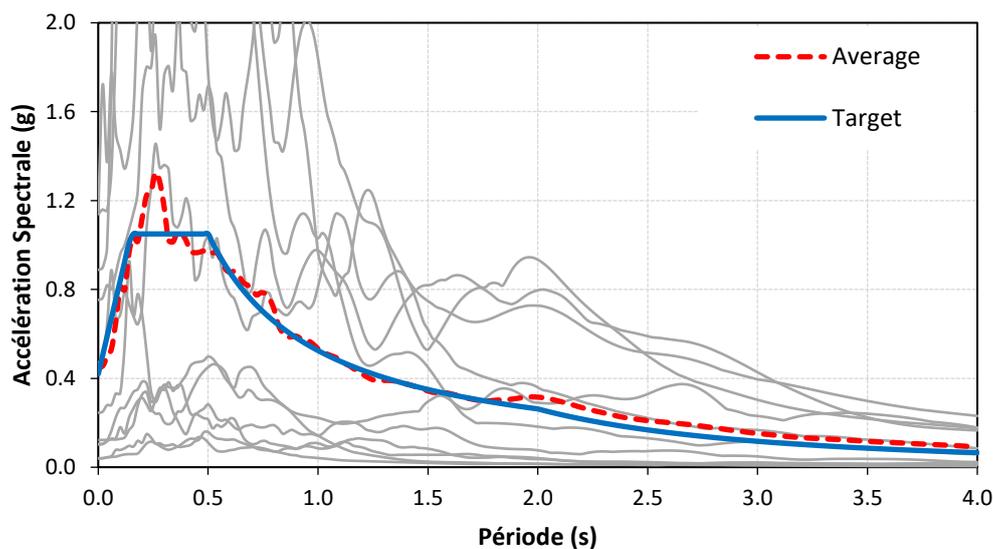


Figure II.5 Sa-T (Champ lointain, sol classe B)

Tableau II.5 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ lointain, sol classe C

Enregistrement	Séisme	Date	Mw	Station	d Epi (Km)	Classe du Sol
1794y	Cubuklu	20.04.1988	5.5	ST65	34	C
IMPVALL\H-E08140	Imperial Valley	15/10/1979	6.53	Imperial Valley-06	28.09	C
NORTHR\PAR--L	Northridge 01	17/01/1994	6.69	Pardee – SCE	25.65	C
374y	LazioAbruzzo	7.05.1984	5.9	ST148	45	C

CAPEMEND\R IO360	Cape Mendocino	25/04/1992	7.01	RIO DELL OVERPASS	53.34	C
6498x	Duzce 1	12.11.1999	7.2	ST3139	28	C
7129y	Seferihisar	10.04.2003	5.7	ST858	42	C
1560x	Duzce 1	12.11.1999	7.2	ST541	39	C
CHICHI\TCU06 5-E	Chi- Chi,Taiwan	20/09/1999	7.62	TCU065	26.67	C
PARKF\C02065	PARKFIELD	28/06/1966	6.00	CHOLAME	31.04	C
571y	Patras	14.07.1993	5.6	ST215	37	C
LOMAP\G0300 0	Loma Prieta	18/10/1989	6.93	GILROY ARRAY	31.40	C
5488y	Chenoua	29.10.1989	5.9	ST2881	29	C
600x	Umbria Marche	26.09.1997	6.0	ST223	22	C
1908x	Filippias	16.06.1990	5.5	ST126	44	C

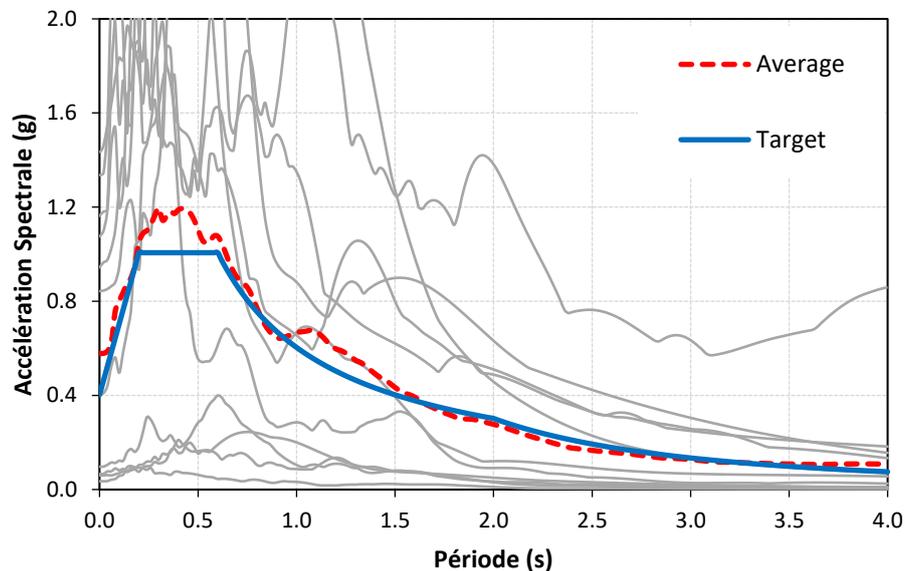


Figure II.6 Sa-T (Champ lointain, sol classe C)

Tableau II.6 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ proche, sol classe A

Enregistrement	Séisme	Date	Mw	Station	d Epi (Km)	Classe du Sol
6335x	South Iceland (aftershock)	21.06.2000	6.4	ST2557	15	A
6326y	South Iceland (aftershock)	21.06.2000	6.4	ST2496	14	A
1231y	Izmit	17.08.1999	7.6	ST575	9	A
242y	Valnerina	19.09.1979	5.8	ST225	5	A
7142x	Bingol	1.05.2003	6.3	ST539	14	A
5090y	Mt. HengillArea	4.06.1998	5.4	ST2495	18	A
5085y	Mt. HengillArea	4.06.1998	5.4	ST2497	15	A
6277y	South Iceland	17.06.2000	6.5	ST2558	15	A

182y	Tabas	16.09.1978	7.3	ST54	12	A
5655y	NE ofBanja Luka	13.08.1981	5.7	ST2950	10	A
4674x	South Iceland	17.06.2000	6.5	ST2486	5	A
365x	LazioAbruzzo	7.05.1984	5.9	ST140	5	A
169y	Calabria	11.03.1978	5.2	ST45	10	A
SFERN\PUL164	San Fernando	2/9/1971	6.61	Pacoima Dam	11.86	A
1243y	Izmit (aftershock)	13.09.1999	5.8	ST575	15	A

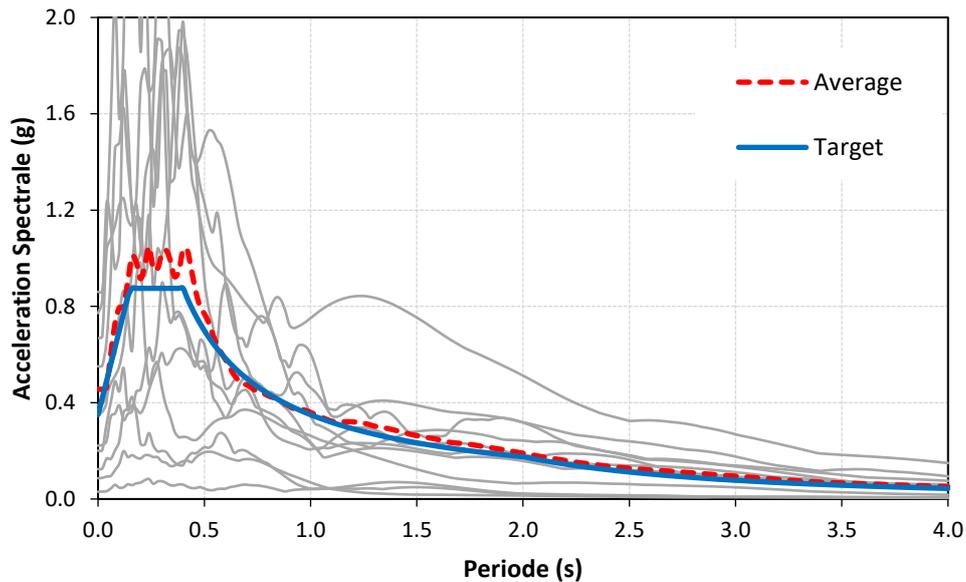


Figure II.7 Sa-T (Champ proche, sol classe A)

Tableau II.7 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ proche, sol classe B

Enregistrement	Séisme	Date	Mw	Station	d Epi (Km)	Classe du Sol
4673y	South Iceland	17.06.2000	6.5	ST2482	15	B
7162y	Firuzabad	20.06.1994	5.9	ST3297	7	B
1874x	Skydra-Edessa	18.02.1986	5.3	ST1306	2	B
1714y	Ano Liosia	7.09.1999	6.0	ST1258	14	B
413y	Kalamata	13.09.1986	5.9	ST164	10	B
1713x	Ano Liosia	7.09.1999	6.0	ST1257	18	B
1715x	Ano Liosia	7.09.1999	6.0	ST1259	14	B
291y	Campano Lucano	23.11.1980	6.9	ST276	16	B
192x	Montenegro	9.04.1979	5.4	ST63	18	B
414y	Kalamata	13.09.1986	5.9	ST163	11	B
535x	Erzincan	13.03.1992	6.6	ST205	13	B
1928y	Patras	14.07.1993	5.6	ST1330	10	B
6263y	South Iceland	17.06.2000	6.5	ST2484	7	B
199y	Montenegro	15.04.1979	6.9	ST67	16	B
594y	Umbria Marche	26.09.1997	6.0	ST60	11	B

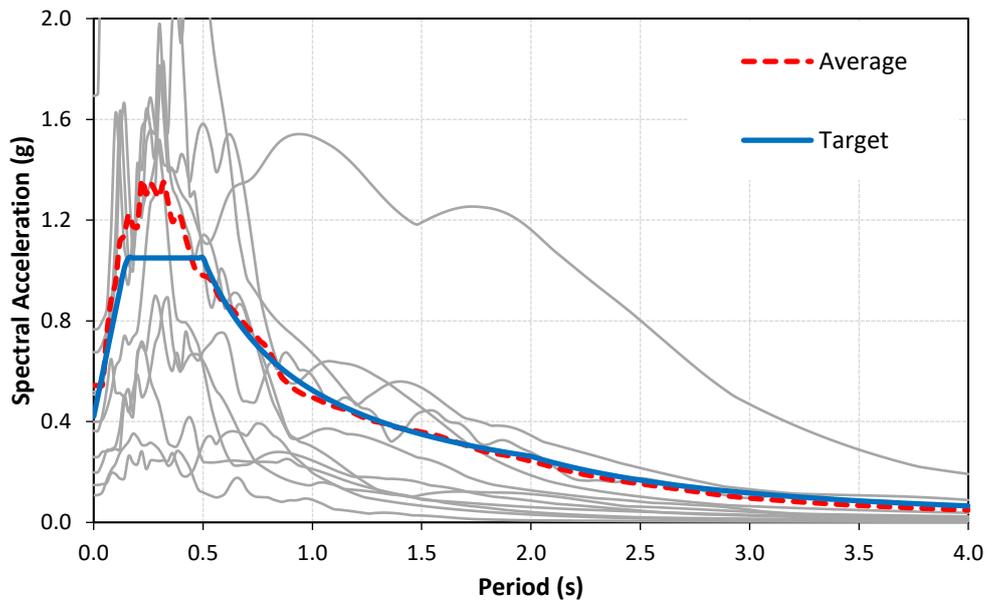


Figure II.8 Sa-T (Champ proche, sol classe B)

Tableau II.8 Enregistrements sismiques sélectionnés en champ proche, sol classe C

Enregistrement	Séisme	Date	Mw	Station	d Epi (Km)	Classe du Sol
7329x	Faial	9.07.1998	6.1	ST87	11	C
373y	LazioAbruzzo	7.05.1984	5.9	ST147	16	C
WHITTIER\A-OBR270	WHITTIER NARROWS	10/01/1987	5.99	OBREGON PARK	9.05	C
133x	Friuli	15.09.1976	6.0	ST33	9	C
1708x	Ano Liosia	7.09.1999	6.0	ST1253	19	C
879y	Dinar	1.10.1995	6.4	ST271	8	C
334x	Alkion	24.02.1981	6.6	ST122	19	C
KOBE\KJM000	Kobe, Japan	16/01/1995	6.90	KJMA	18.27	C
1703y	Duzce 1	12.11.1999	7.2	ST553	8	C
573x	Patras	14.07.1993	5.6	ST10	10	C
IMPVALL\H-BCR230	Imperial Valley	15/10/1979	6.53	BONDS CORNER	6.20	C
SANSALV\NGI270	San Salvador	10/10/1986	5.8	NATL GEOGRAFICAL INST	9.54	C
NORTHR\SCS052	Northridge	17/01/1994	6.69	SYLMAR-CONVERTER	13.11	C
SUPERST\B-PTS225	SuperstitionHills	24/11/1987	6.54	Parachute Test Site	15.99	C
622x	Umbria Marche	6.10.1997	5.5	ST221	7	C

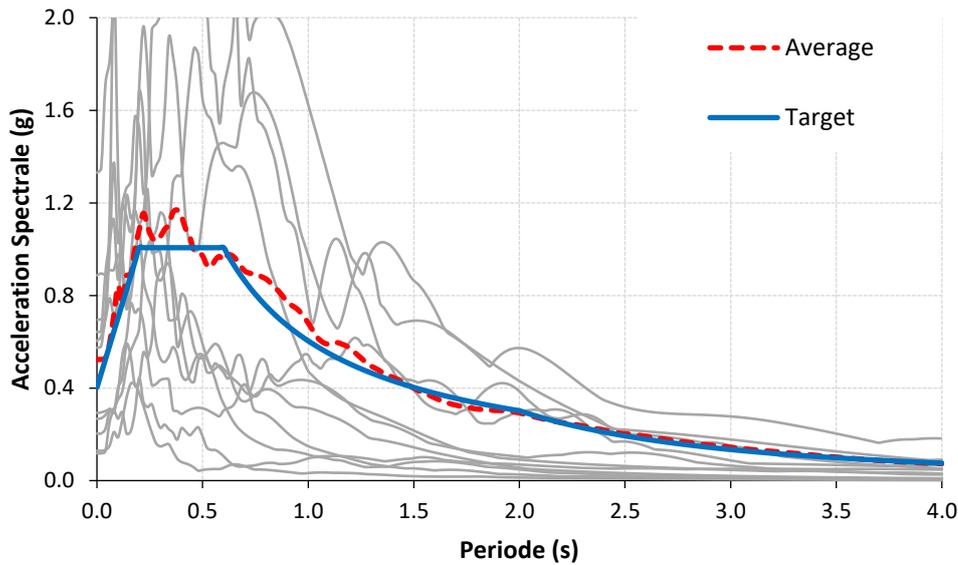


Figure II.9 Sa-T (Champ proche, sol classe C)

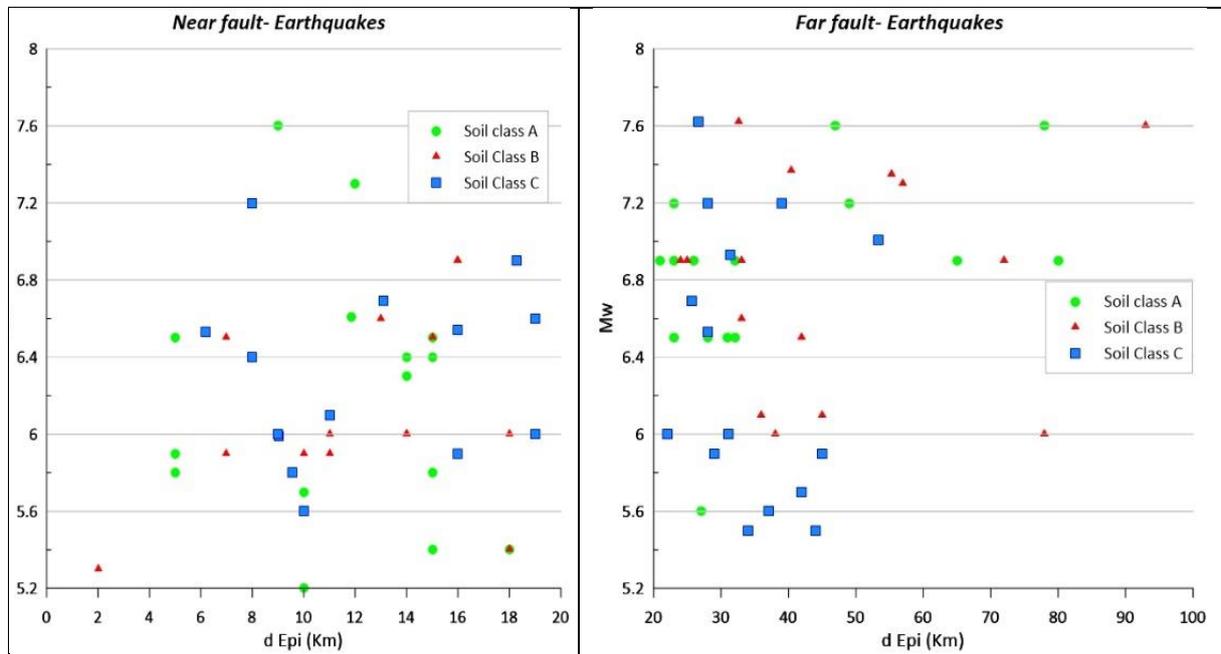


Figure II.10 Le Moment de magnitude vs La distance épacentrale pour les enregistrements sélectionnés. a) Champ proche- b) Champ lointain.

## II.6 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, il est essentiel de souligner que la sélection des enregistrements sismiques en fonction d'un spectre cible réglementaire constitue une étape cruciale pour l'évaluation des valeurs du facteur de réduction d'amortissement (DRF). Ce processus doit respecter certains critères liés aux caractéristiques sismiques, aux conditions du sol, ainsi qu'aux propriétés intrinsèques des structures, telles que la période et le taux d'amortissement. Dans le chapitre suivant, nous réaliserons une étude statistique basée sur les enregistrements sismiques sélectionnés dans ce chapitre, afin d'évaluer les valeurs réelles du DRF .

# CHAPITRE III

## Chapitre III : Sensibilité du DRF aux paramètres sismiques

### III.1 Introduction

Comme stipulé dans le premier chapitre, ils existent plusieurs chercheurs qui négligent l'effet du champ proche ou bien de la distance par rapport à la faille sur le DRF, en revanche d'autres recherches ont exprimé l'importance de prendre ce paramètre en considération lors de l'évaluation du DRF. C'est pour cela ce paramètre a été sujet d'investigation lors de ce chapitre.

Additivement aux effets de la distance, l'effet de la classe du sol représenté par la vitesse des ondes de cisaillement  $V_{S30}$  sur le DRF, a été sujet de différences entre chercheurs, ce qui a poussé l'auteur d'étudier ce paramètre en prenant en compte la classification de l'eurocode8.

Dans ce chapitre, une étude statistique afin d'évaluer le DRF a été menée. Les paramètres étudiés dans cette partie sont :

- Le champ proche et le champ lointain (la distance épacentrale moins et plus de 20Km)
- Les conditions du sol selon la classification de l'Eurocode 8 (sol A, B et C)
- La période fondamentale de la structure
- Le taux d'amortissement (5 ; 10 ; 20 ; 40%)

Les valeurs du DRF ont été évaluées à partir des spectres dérivés du déplacement DRFd puis de l'accélération DRFa, sur la base des enregistrements déjà sélectionnés dans le chapitre précédent à l'aide de l'intégrale de Duhamel pour chaque accélérogramme avec une période qui varie entre (0.02 – 4s) avec un pas de 0.02s. Pour chaque classe de site, il a été évalué la moyenne des valeurs du DRF pour les valeurs d'amortissement de 10, 20, et 40% en champ proche et en champ lointain.

Aussi, les modèles de Lin et Chang (LC04 ci-après) et de Hatzigeorgiou (H10 ci-après) sont présentés et comparés aux résultats obtenus dans cette étude, car ces modèles prennent en compte l'influence des conditions du sol. La formule définie par l'Eurocode8 a été aussi tracée et comparée avec les modèles suscités. Dans l'EC8, l'effet de l'amortissement est introduit via le facteur de correction d'amortissement ( $\eta$ ) défini par l'équation suivante (Eq. III.1) et  $\eta=1$  pour la valeur de référence de 5% d'amortissement visqueux. Dans cette équation, le taux d'amortissement est exprimé en pourcentage et le facteur de correction d'amortissement doit être égal ou supérieur à 0,55, comme recommandé par l'EC8.

$$\eta = \sqrt{10/(5 + \xi)} \quad \text{(III.1)}$$

### III.2 Influence des paramètres sismiques sur le DRF dérivé du spectre de déplacement

Dans toutes les figures entre III.1 et III.9, il a été tracé des variations en fonction de la période des valeurs moyennes des DRF calculées en champ proche (NF) et en champ lointain (FF) de la faille. Aussi, la moyenne de tous les mouvements du sol (c'est-à-dire la moyenne de tous les enregistrements en champ proche et en champ lointain) et ce, pour un rapport d'amortissement

structurel qui varie entre 10%, 20% et 40% et pour les classes du sol A, B et C, selon le Tableau II.2. A partir de ces figures, on peut constater que les valeurs du DRFd augmentent généralement avec l'augmentation du taux d'amortissement et de la période fondamentale de vibration.

### III.2.1 Valeurs du DRFd pour un sol classe A ( $V_{s,30} > 800(m/s)$ )

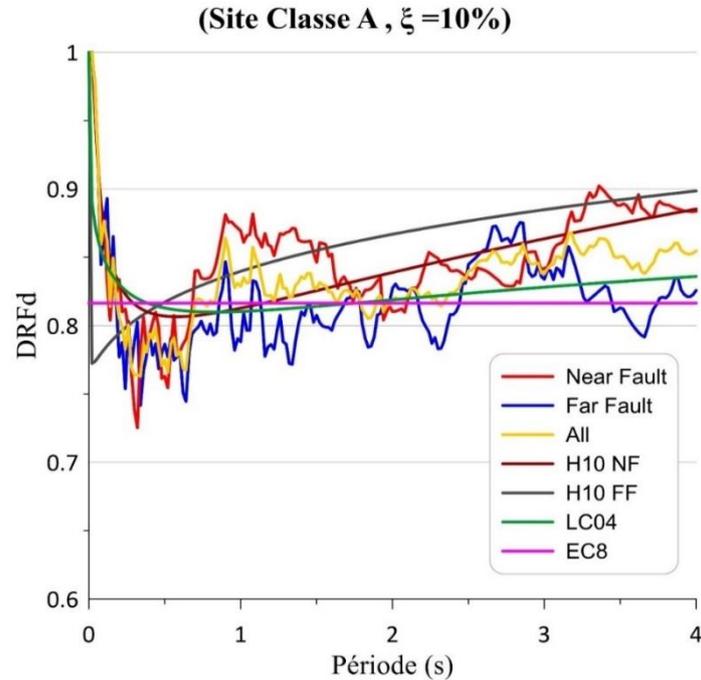


Figure III.1 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 10\%$ , sol classe A

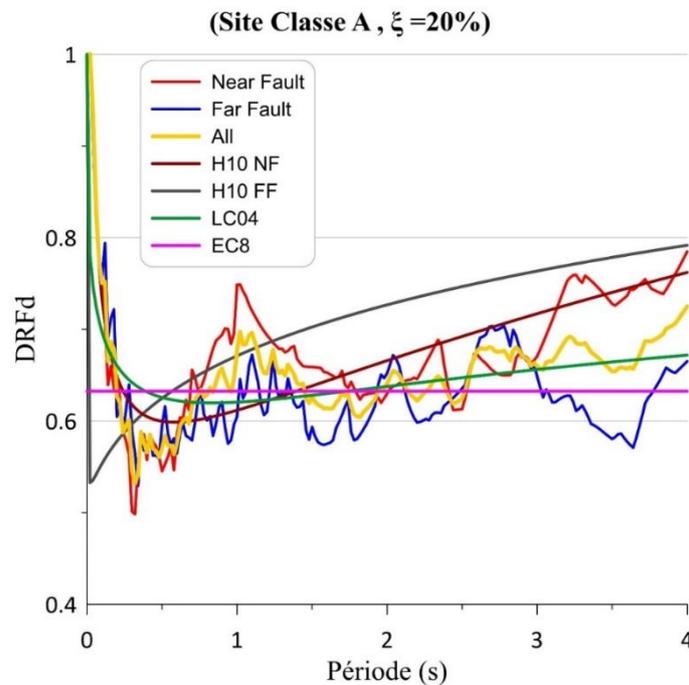


Figure III.2 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 20\%$ , sol classe A

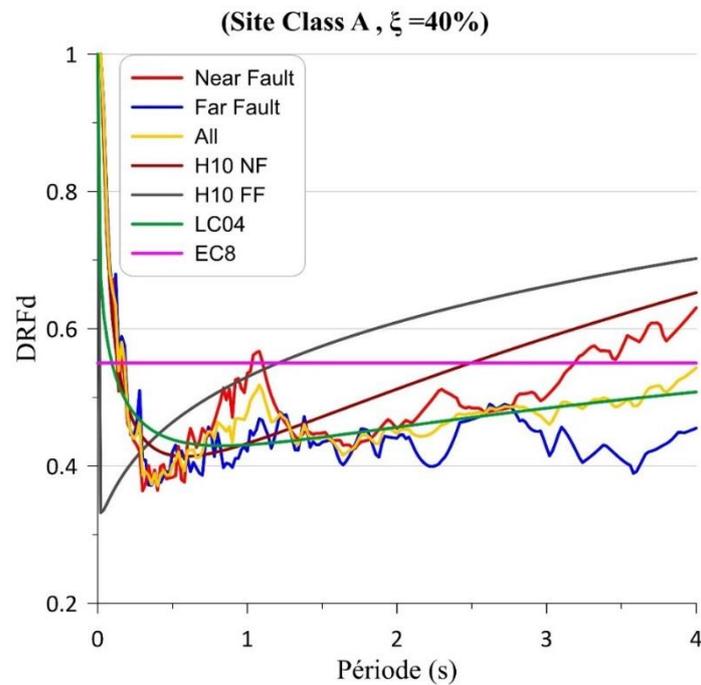


Figure III.3 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 40\%$ , sol classe A

Les figures III.1-3 montrent qu'il existe une bonne corrélation entre les valeurs de DRFd et les modèles LC04 et H10 pour le sol A pour tous les taux d'amortissement lorsque tous les enregistrements de mouvements du sol sont pris en compte. D'autre part, le modèle H10 devient conservateur avec l'augmentation des taux d'amortissement, comme pour 20% et 40%. La tendance des DRFs calculés ainsi que des modèles prédictifs et il est claire que le modèle LC04 est comparable avec les DRFs des enregistrements NF et FF.

La tendance du modèle H10 semble être en accord avec les DRFs pour les enregistrements NF, mais les DRFs produits par le modèle H10 pour les enregistrements FF ne sont pas satisfaisants par rapport aux résultats NF. L'écart des DRFs FF augmente avec l'augmentation du taux d'amortissement. Étant donné que le modèle EC8 ne dépend pas des périodes, les valeurs sont constantes pour toutes les périodes et les DRFs diminuent avec l'augmentation de l'amortissement. Les DRFs cibles fluctuent autour des DRFs produits par EC8 pour un taux d'amortissement inférieur à 40%, impliquant moins d'écart entre eux.

### III.2.2 Valeurs du DRFd pour un sol classe B ( $360 \leq V_{s,30} \leq 800$ )

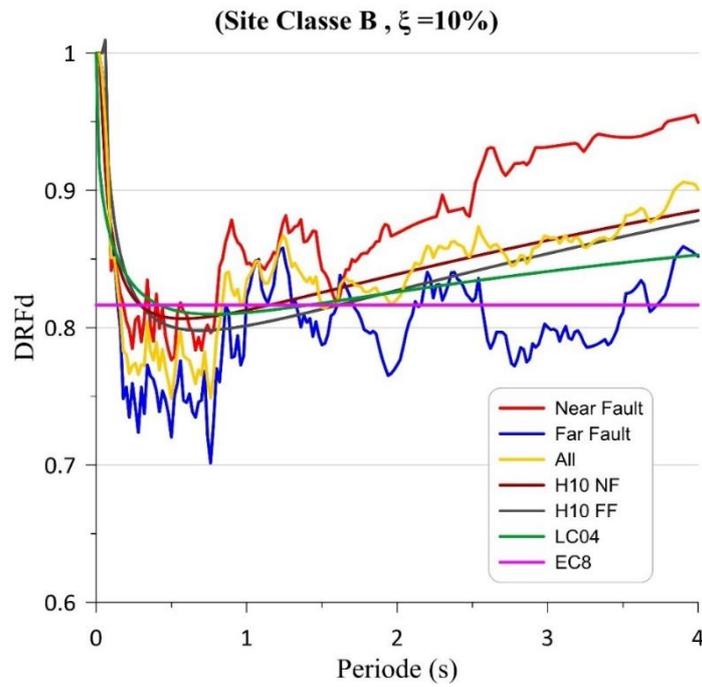


Figure III.4 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 10\%$ , sol classe B

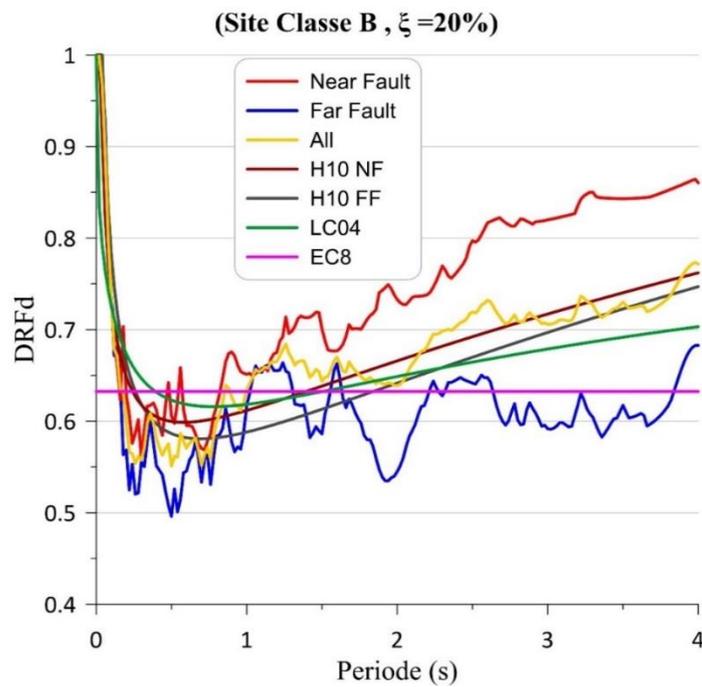


Figure III.5 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 20\%$ , sol classe B

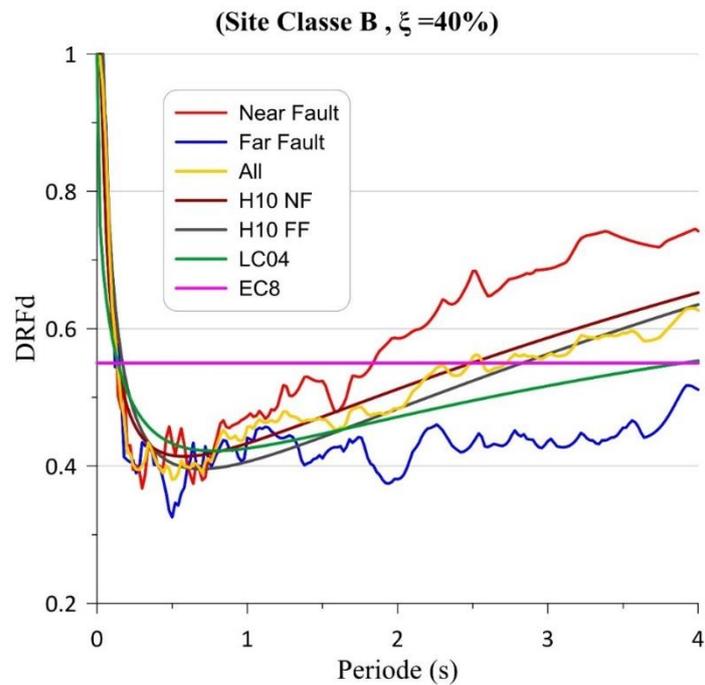


Figure III.6 Valeurs du DRF<sub>d</sub> en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 40\%$ , sol classe B

Les valeurs DRF<sub>d</sub> obtenues pour le sol B sont tracées dans les Figure III.4-6 avec les résultats basés sur le code et les modèles prédictifs. On observe que le modèle H10 diffère légèrement des résultats d'analyse pour le sol B pour  $T > 2,0$  s et des taux d'amortissement de 10% et 20%. La distribution des valeurs DRF<sub>d</sub> entre les mouvements NF et FF diverge et cela devient plus évident avec l'augmentation des taux d'amortissement dans le sol B par rapport au sol A. Les valeurs DRF<sub>d</sub> des mouvements NF sont supérieures à celles des mouvements FF de 16%, 38% et 58% pour des valeurs d'amortissement  $\xi=10\%$ , 20% et 40%, respectivement.

### III.2.3 Valeurs du DRF<sub>d</sub> pour un sol classe C ( $180 \leq V_s,30$ (m/s) $\leq 360$ )

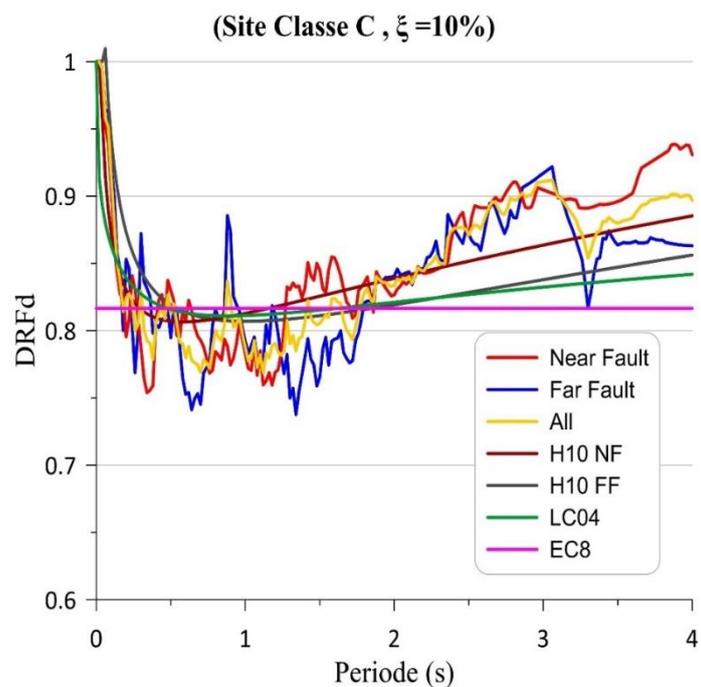


Figure III.7 Valeurs du DRF<sub>d</sub> en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 10\%$ , sol classe C

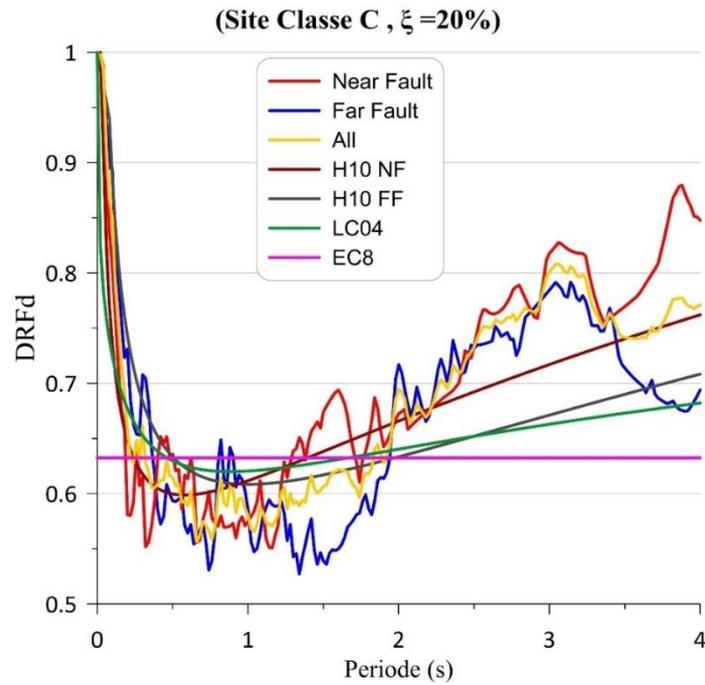


Figure III.8 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 20\%$ , sol classe C

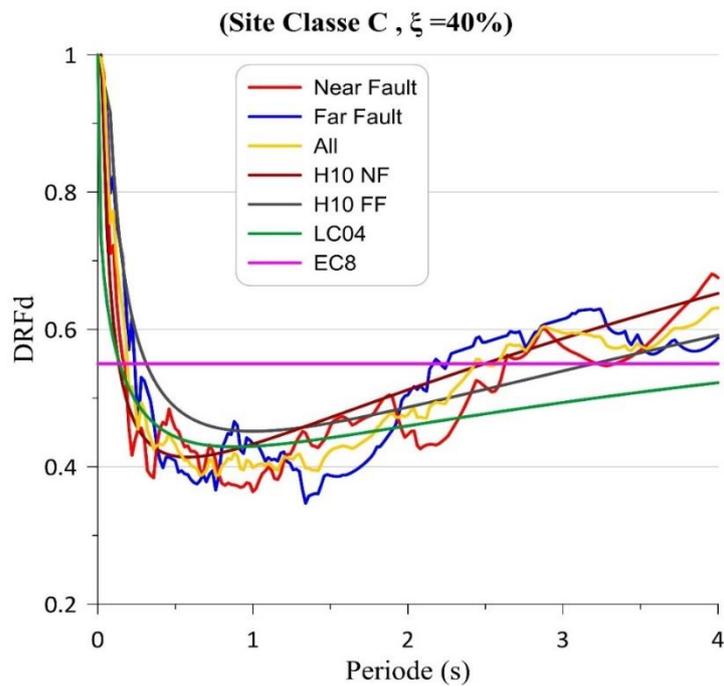


Figure III.9 Valeurs du DRFd en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 40\%$ , sol classe C

Comparant au sol B, les valeurs DRFd, calculées pour les accelerograms NF et FF montrées dans la Figure III.7-9, sont moins dispersées dans le sol C. Il est évident que la précision des modèles LC04 et H10 augmente et que le modèle H10 semble légèrement en meilleur accord avec les DRFs cibles par rapport à LC04 et cela devient plus évident pour les grandes périodes naturelles et les taux d'amortissement élevés.

Il est évident à partir des figures précédentes que les valeurs DRFd selon la définition EC8 sont non-conservatrices, en particulier pour  $T > 1,5$  s et  $\xi \leq 20\%$ . En raison de la condition fixe donnée par EC8 ( $\eta \geq 0,55$ ), les valeurs DRFd fournies par le code sont conservatrices puisque les valeurs basées sur le code sont plus grandes que les valeurs cibles pour un amortissement de 40%, en particulier pour des périodes inférieures à 3 s pour les types de sol A et B, et des périodes inférieures à 2,5 s pour le type de sol C.

### III.2.4 Calcul des erreurs RMSE & MAE dérivés du DRFd

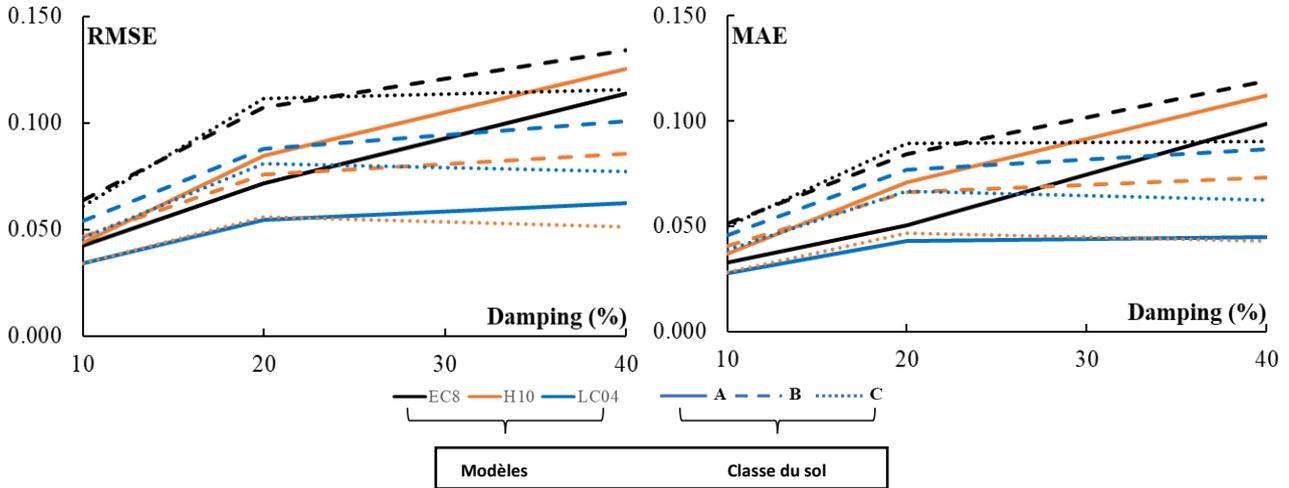


Figure III.10 Comparaison de la distribution du RMSE (à gauche) et du MAE (à droite) des modèles en termes de DRFd pour différentes classes de sol et taux d'amortissement.

Pour examiner la qualité des résultats des modèles de prédiction et des DRFs basés sur les codes de manière quantitative, l'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'erreur absolue moyenne (MAE) sont calculées pour les plages de périodes considérées entre la cible (c'est-à-dire déterminée à partir des séismes compatibles avec les codes) et les modèles de prédiction. Les résultats sont tracés dans la Figure III.10. Il convient de noter que ces mesures d'erreur (c'est-à-dire RMSE et MAE) sont calculées séparément pour les enregistrements en champ proche et en champ lointain NF et FF et la moyenne entre eux pour faciliter la comparaison.

On peut dire que des valeurs plus faibles de RMSE et MAE peuvent être attribuées à des résultats moins erronés ou biaisés, ce qui peut également être décrit comme montrant une meilleure corrélation. On peut voir aussi à partir de la Figure III.10, que les valeurs de RMSE et MAE augmentent généralement avec l'augmentation du taux d'amortissement, et cette situation est plus apparente avec les valeurs basées sur les codes. Selon les résultats, les prédictions du modèle LC04 sont moins biaisées par rapport aux DRFs H10 et basés sur les codes pour la classe de sol A. De plus, il semble que le modèle H10 soit plus biaisé par rapport à l'EC8 pour la classe de sol A puisque les valeurs de RMSE et MAE sont la moyenne des tremblements de terre NF et FF. Les évaluations ont révélé que cette situation est principalement liée aux prédictions FF du modèle H10, comme on peut également l'observer dans les Figures III.1-3.

D'un autre côté, les valeurs NF produites par le modèle H10 ( $RMSE < 0,03$ ) sont considérablement inférieures à celles du modèle EC8 ( $RMSE > 0,04$ ) et le modèle H10 ( $RMSE < 0,06$ ) est moins biaisé par rapport à l'EC8 ( $RMSE > 0,09$ ) et LC04 ( $RMSE > 0,07$ ) pour les

classes de sol B et C pour tous les taux d'amortissement. Sur la droite de la Figure III.10, les résultats MAE impliquent que les tendances des modèles LC04 et H10 sont presque comparables. On peut dire qu'en général, les modèles H10 et LC04 sont moins biaisés (RMSE < 0,07 et MAE < 0,06 en moyenne) que les DRFs de l'EC8, ce qui signifie une meilleure corrélation avec les DRFs déterminés à partir des tremblements de terre réels sélectionnés.

### III.2.5 Evaluation du rapport de DRFd (champ proche/champ lointain)

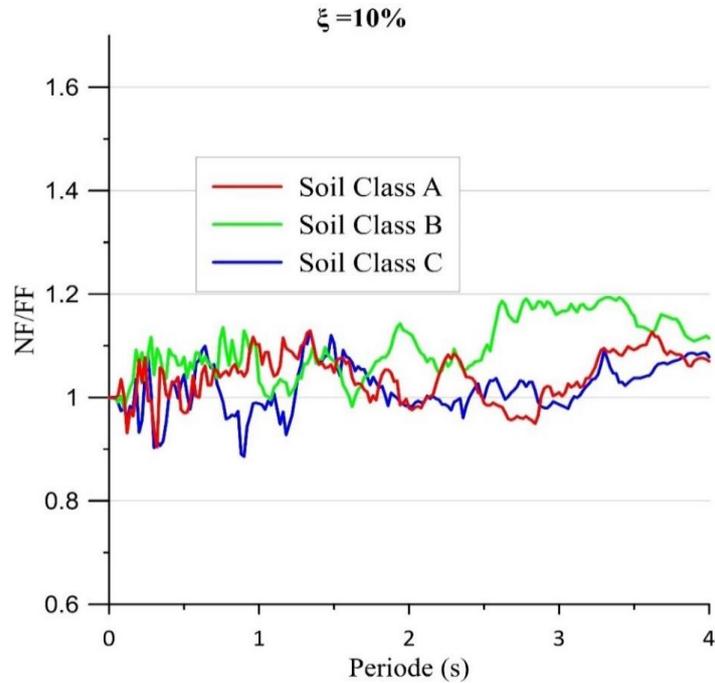


Figure III.11 DRFd (NF/FF) pour  $\xi = 10\%$ , sol classe A, B et C.

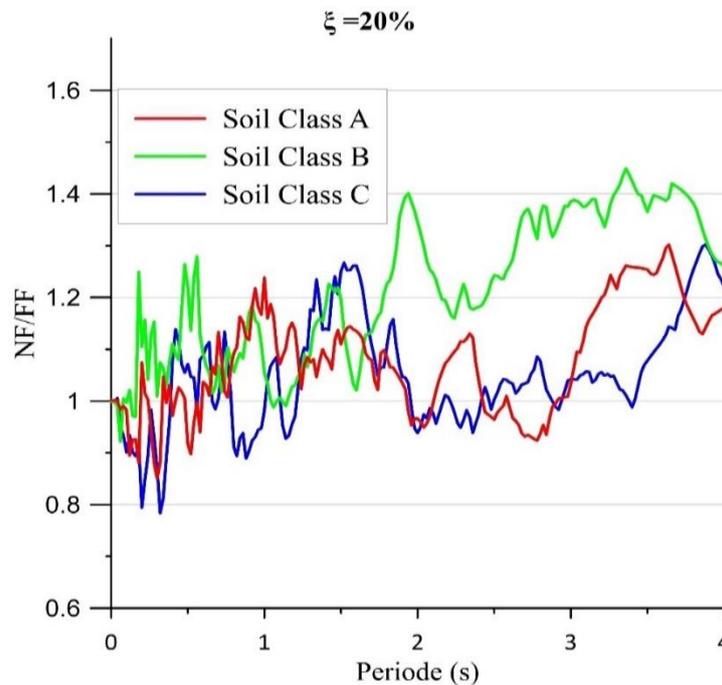


Figure III.12 DRFd (NF/FF) pour  $\xi = 20\%$ , sol classe A, B et C.

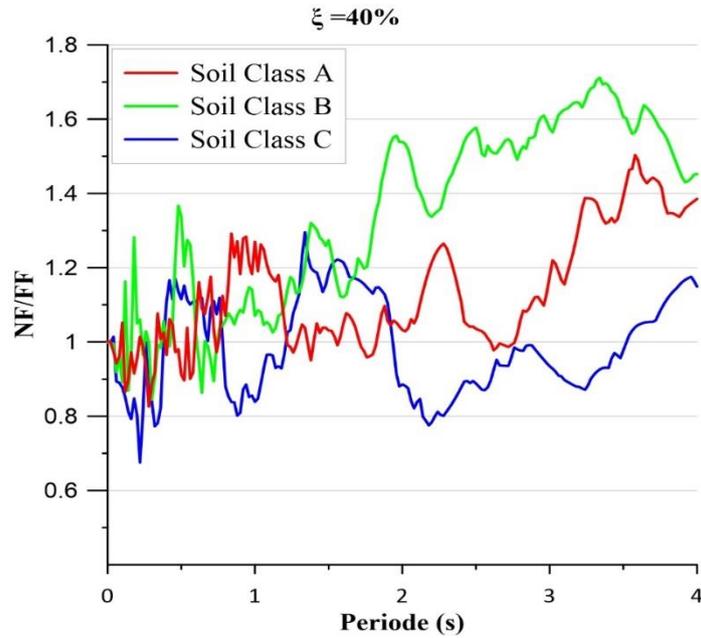


Figure III.13 DRFd (NF/FF) pour  $\xi = 40\%$ , sol classe A, B et C.

Dans la Figure III.11-13, le rapport des valeurs DRFd entre les enregistrements en champ proche NF et en champ lointain FF est tracé pour les classes suscitées et pour un taux d'amortissement de 10%, 20% et 40%.

On peut observer à partir de ces figures que, malgré les fluctuations entre les ratios, le rapport montré pour la classe de sol B diffère significativement de ceux des sols A et C, surtout quand T est supérieur à 1,5s. Les écarts entre les ratios augmentent à mesure que le taux d'amortissement augmente. Les valeurs maximales des ratios déterminés pour la classe B sont de 1,20, 1,45 et 1,71 pour des taux d'amortissement de 10%, 20% et 40%, respectivement. Les résultats sont également alignés avec le modèle de Lin & Chang pour le sol B.

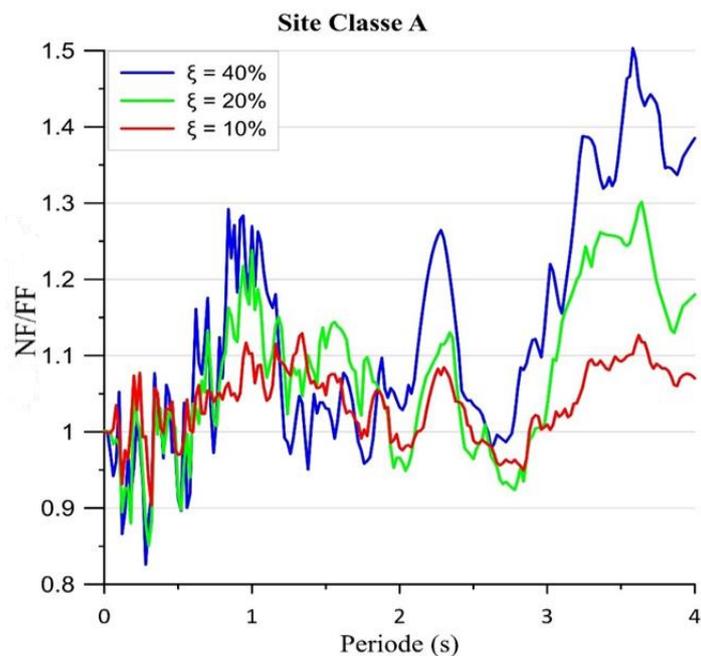


Figure III.14 Comparaison entre le ratio du DRFd (champ proche sur champ lointain) pour sol classe A

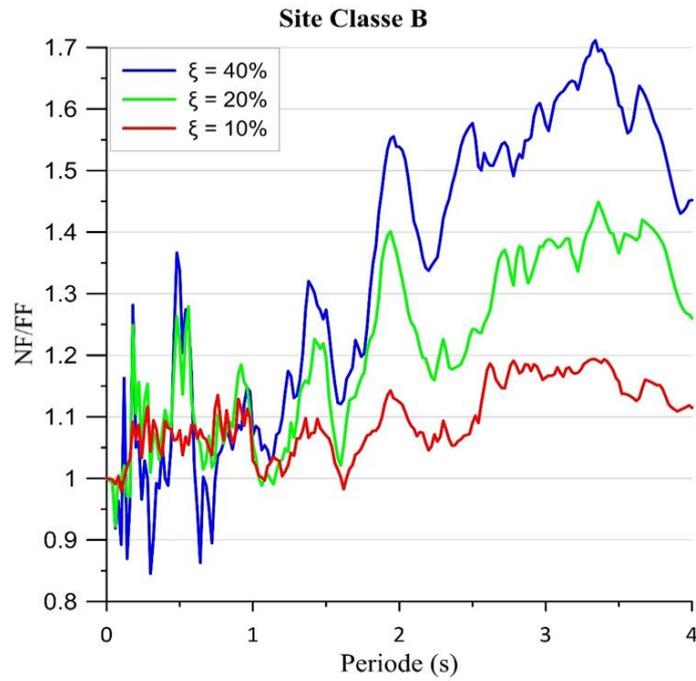


Figure III.15 Comparaison entre le ratio du DRFd (champ proche sur champ lointain) pour sol classe B

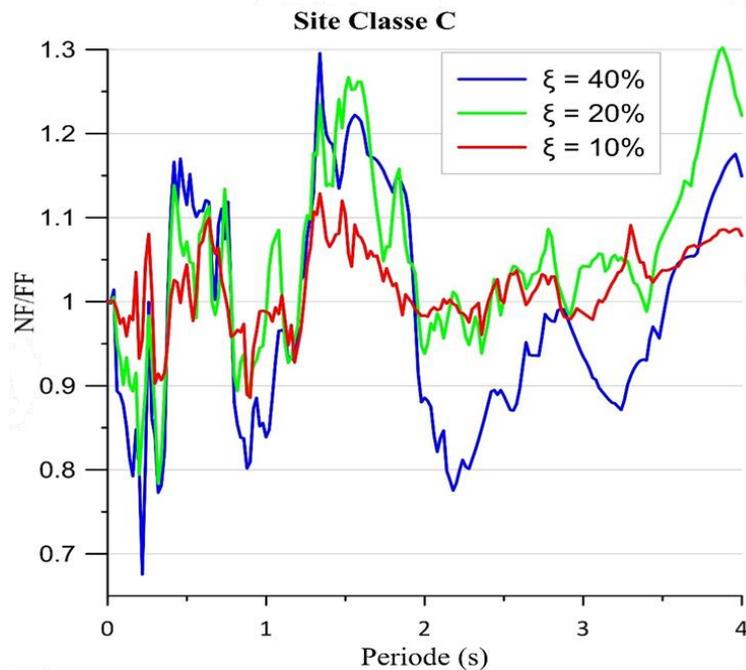


Figure III.16 Comparaison entre le ratio du DRFd (champ proche sur champ lointain) pour sol classe C

Dans la Figure III.14-16, le rapport des valeurs DRFd entre les enregistrements en champ proche NF et en champ lointain FF est tracé pour un taux d'amortissement 10%, 20% et 40% et pour les classes A, B et C.

Le rapport NF/FF augmente avec l'augmentation de l'amortissement pour les classes A et B, et il atteint un maximum de 1.5 et 1.7 respectivement pour un amortissement de 40%.

### III.3 Influence des paramètres sismiques sur le DRF dérivé du spectre d'accélération

L'effet des mouvements NF et FF est également examiné pour les valeurs de DRF basées sur les spectres d'accélération, en tenant compte des différents taux d'amortissement et des classes de sol A, B et C définies selon le classement de l'EC8. Les Figures 16 à 18 montrent la distribution des valeurs DRFa basées sur les codes selon les taux d'amortissement 10,20 et 40% et pour les enregistrements NF et FF correspondant aux classes A, B et C, respectivement.

La distribution des valeurs DRFa dans les Figures 16-18, indique que le modèle LC04 est presque compatible avec les DRFs cibles, même à des taux d'amortissement élevés pour la classe de site A.

Cependant, le modèle H10 a produit des valeurs plus élevées que les valeurs cibles de DRFa pour tous les taux d'amortissement et pour les tremblements de terre proches et lointains. Comme observé dans la section précédente, les DRFs produits par l'EC8 sont constants et les DRFs basés sur les codes semblent cohérents avec les valeurs de DRF déterminées à partir des séismes sélectionnés. Cependant, la compatibilité des valeurs de DRF basées sur les codes diminue de manière significative avec l'augmentation de la période, en particulier pour les périodes élevées (par exemple,  $T > 1,0s$ ).

#### III.3.1 Valeurs du DRFa pour un sol classe A ( $V_{s,30} > 800(m/s)$ )

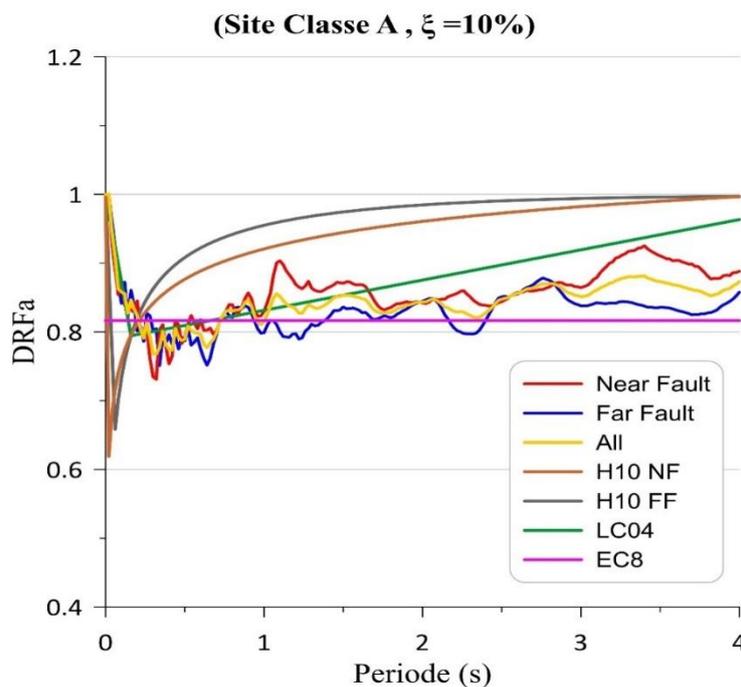


Figure III.17 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 10\%$ , sol classe A

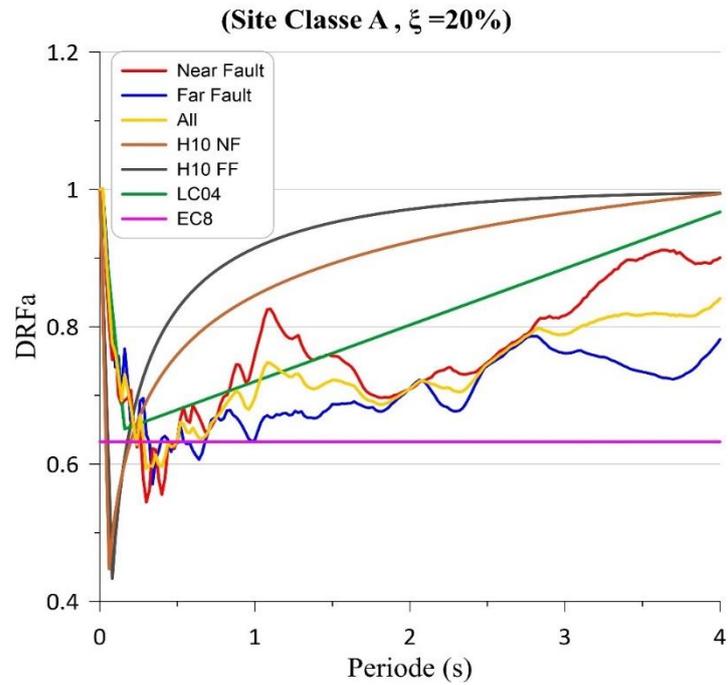


Figure III.18 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 20\%$ , sol classe A

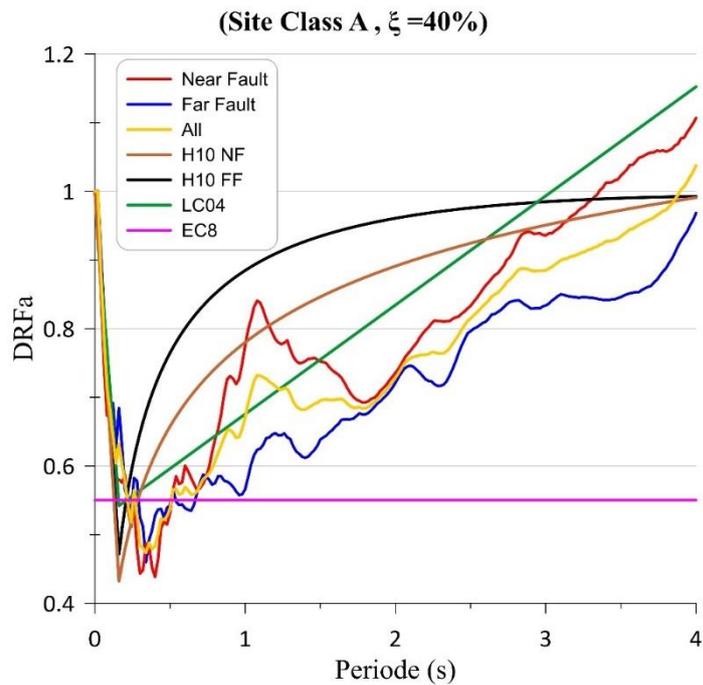


Figure III.19 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 40\%$ , sol classe A

**III.3.2 Valeurs du DRFa pour un sol classe B ( $360 \leq V_{s,30} \text{ (m/s)} \leq 800$ )**

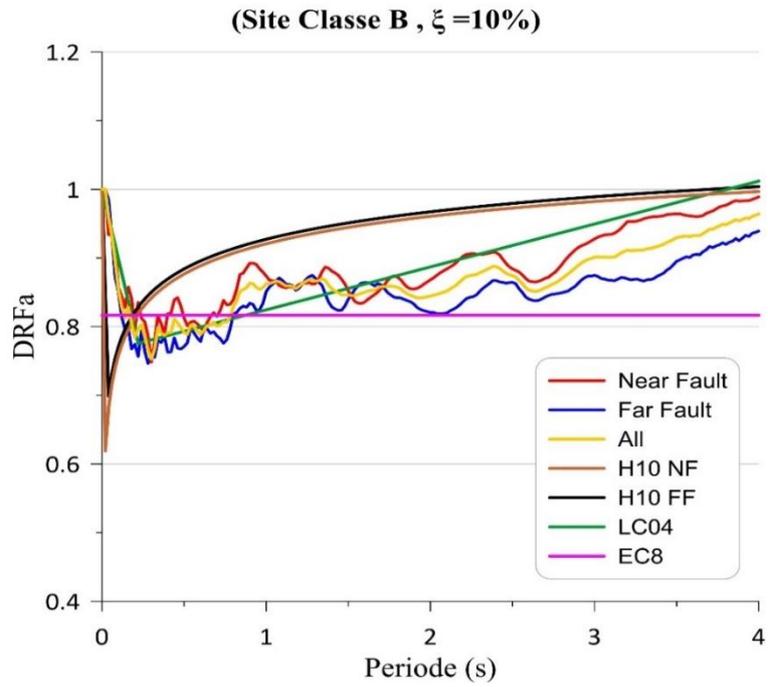


Figure III.20 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 10\%$ , sol classe B

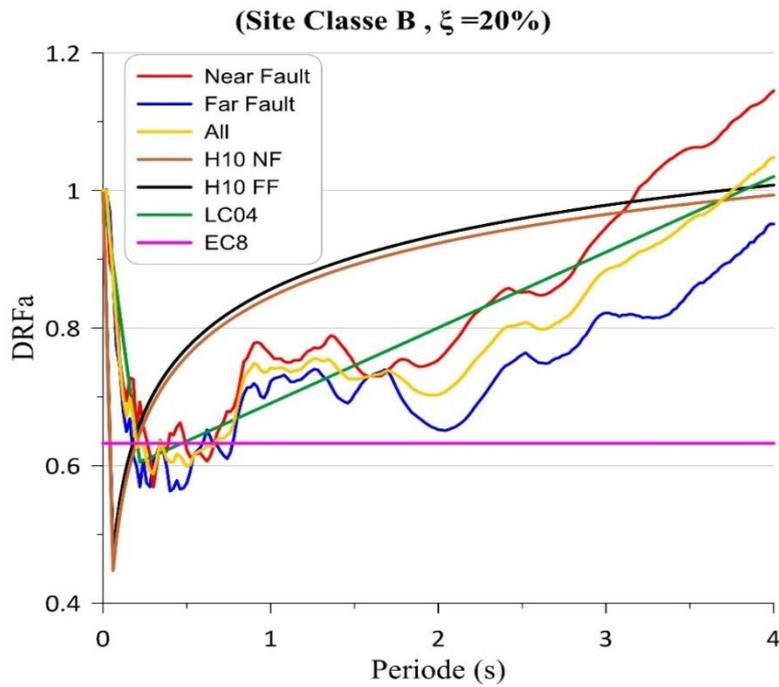


Figure III.21 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 20\%$ , sol classe B

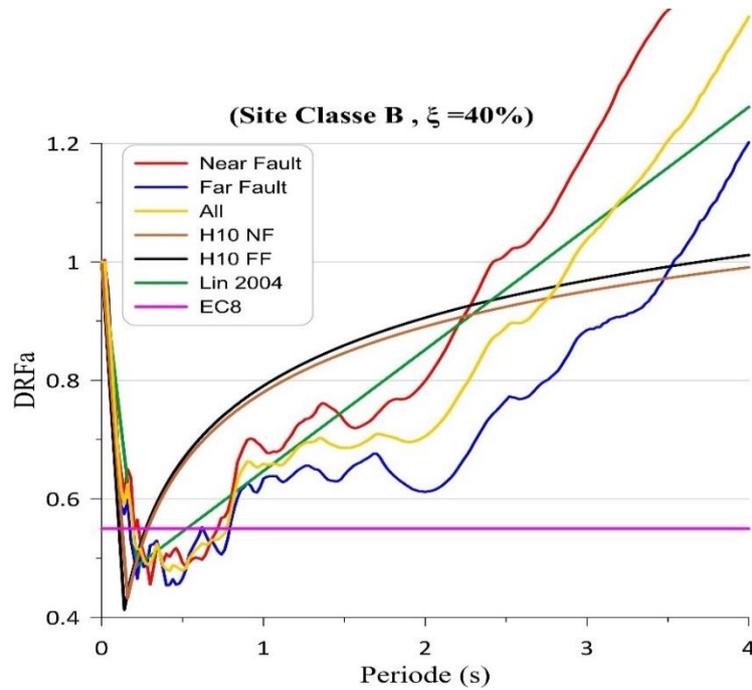


Figure III.22 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 40\%$ , sol classe B

La distribution des valeurs DRFa correspondant au sol B (voir Figure III.19-21) est également similaire à la distribution observée pour le sol A. On peut dire que la distribution des valeurs DRF déterminées à partir des spectres d'accélération est plus lisse que les valeurs DRF déterminées à partir des spectres de déplacement.

### III.3.3 Valeurs du DRFa pour un sol classe C ( $180 \leq V_s,30 \text{ (m/s)} \leq 360$ )

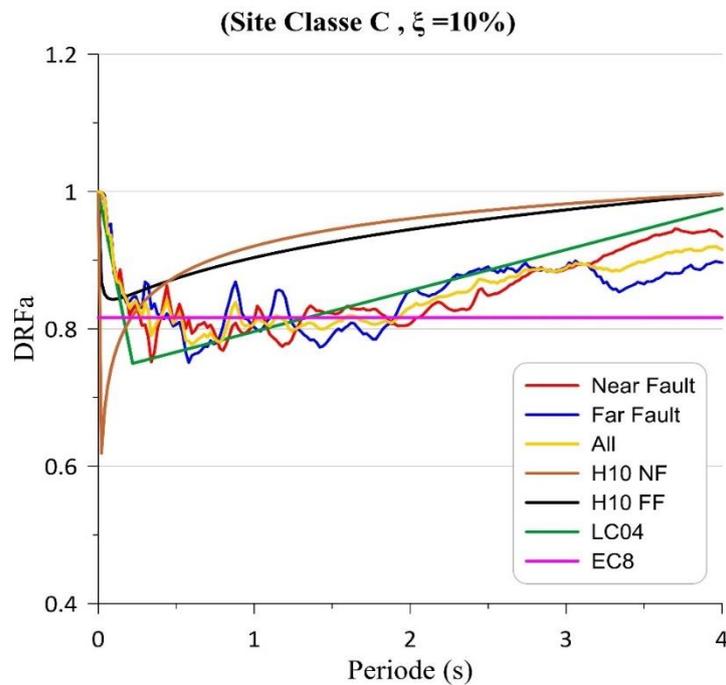


Figure III.23 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 10\%$ , sol classe C

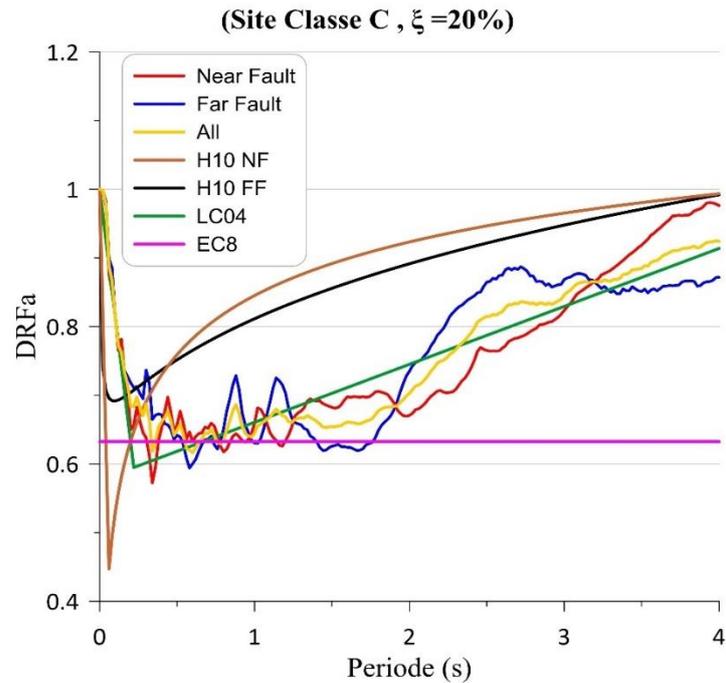


Figure III.24 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 20\%$ , sol classe C

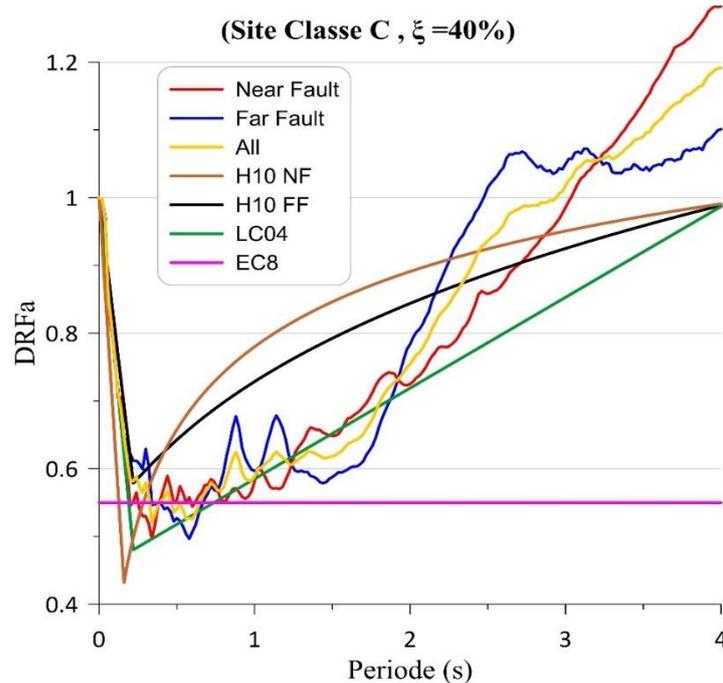


Figure III.25 Valeurs du DRFa en champ proche et en champ lointain pour  $\xi = 40\%$ , sol classe C

L'effet du champ proche et du champ lointain NF et FF peut également être observé pour la classe de sol B, mais les valeurs DRFa sont plus élevées que celles des DRFd. Les mêmes observations faites pour les sols A et B peuvent également être faites pour le sol C (voir Figure III.22-24). De plus, on peut dire que la compatibilité du modèle H10 augmente légèrement par rapport aux valeurs DRF pour les classes A et B, ainsi que les valeurs déterminées à partir de l'analyse.

La distribution des valeurs de DRFa correspondant au sol B est également similaire à celle observée pour le sol A. La distribution des valeurs de DRF dérivées des spectres d'accélération

est plus lisse que celle dérivée des spectres de déplacement. L'effet de NF et FF est également visible pour cette classe de sol, mais les valeurs de DRFa sont supérieures aux valeurs de DRFd. Les mêmes observations pour les sols A et B sont confirmées pour le sol C.

De plus, les estimations du modèle H10 deviennent plus compatibles avec les résultats d'analyse, par rapport aux sols A et B. Les valeurs de DRFd sont toujours inférieures à l'unité pour toutes les classes de sol et les taux d'amortissement. En revanche, les valeurs de DRFa peuvent être supérieures à l'unité (c'est-à-dire  $DRFa > 1.0$ ) pour des périodes de vibration élevées (par exemple,  $T > 2,5$  s).

Lorsque les DRF basés sur le code sont évalués avec les valeurs réelles de DRFa, il apparaît que les résultats basés sur le code sont généralement inférieurs aux valeurs de DRFa calculées, et ce problème devient plus apparent à des taux d'amortissement élevés.

Malgré les légères fluctuations calculées à partir de séismes réels compatibles avec le code, en particulier à des périodes structurelles faibles à moyennes ( $T < 2,0$ s), les valeurs basées sur le code semblent être relativement compatibles avec les valeurs de DRFa à des taux d'amortissement faibles (c'est-à-dire 10%). D'autre part, les valeurs de DRF basées sur le code restent assez faibles pour toutes les classes de sol à des périodes supérieures à 2,0s avec des taux d'amortissement croissants.

### III.3.4 Calcul des erreurs RMSE & MAE

Le RMSE et le MAE sont également calculés pour les valeurs DRFa afin de comparer la compatibilité des résultats des modèles avec les valeurs cibles et sont tracés dans la Figure 13. Il est évident, à partir des deux mesures d'erreur, que le modèle LC04 est constamment moins biaisé ( $RMSE < 0,1$  et  $MAE < 0,1$ ) par rapport aux DRFs des modèles H10 et EC8 pour toutes les classes de sol et tous les taux d'amortissement.

Selon les résultats de RMSE et MAE, le modèle H10 est plus biaisé, surtout pour  $\xi = 10\%$ , par rapport au modèle EC8 pour toutes les classes de sol. Des observations similaires ont également été faites pour les valeurs DRF déterminées à partir des spectres de déplacement, mais les biais sont devenus plus prononcés lorsque les valeurs DRFa sont utilisées. Cette situation peut à nouveau être attribuée aux considérations de la région des périodes très courtes ( $T < 0,50$  s). Néanmoins, il convient de noter que l'EC8 produit des résultats plus biaisés à mesure que le sol devient plus mou ( $RMSE > 0,2$  et  $MAE > 0,2$  pour la classe de sol B et C).

Les résultats MAE (c'est-à-dire sur la droite de la Figure III.26) confirment également les conclusions tirées des résultats RMSE. Lorsque les valeurs de RMSE et MAE déterminées à partir des résultats DRFd et DRFa sont comparées (c'est-à-dire, Figure III.10 et Figure III.25), on peut dire que les valeurs DRFa sont plus biaisées que les valeurs DRFd puisque les valeurs de RMSE et MAE sont plus élevées.

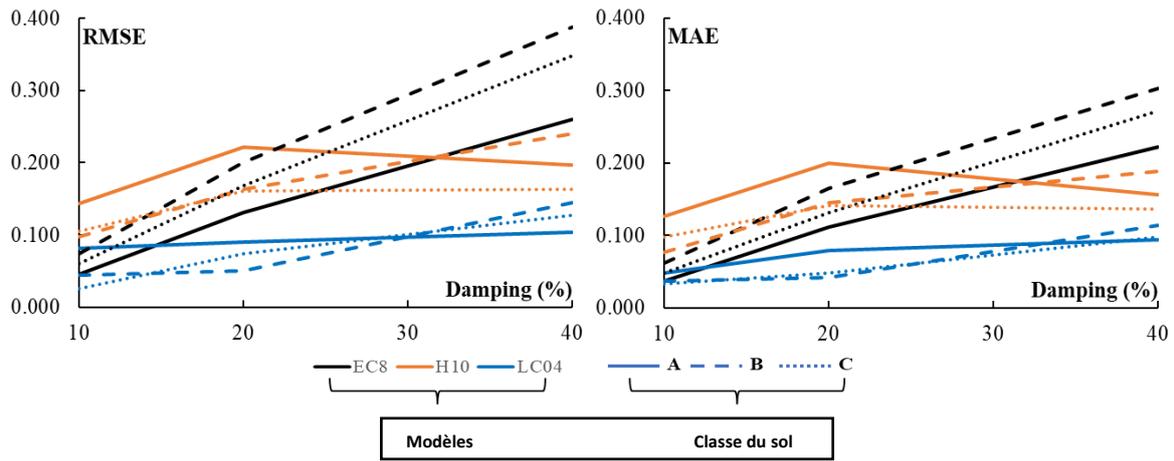


Figure III.26 Comparaison de la distribution du RMSE (à gauche) et du MAE (à droite) des modèles en termes de DRFa pour différentes classes de sol et taux d'amortissement.

### III.3.5 Evaluation du rapport de DRFa (champ proche/champ lointain)

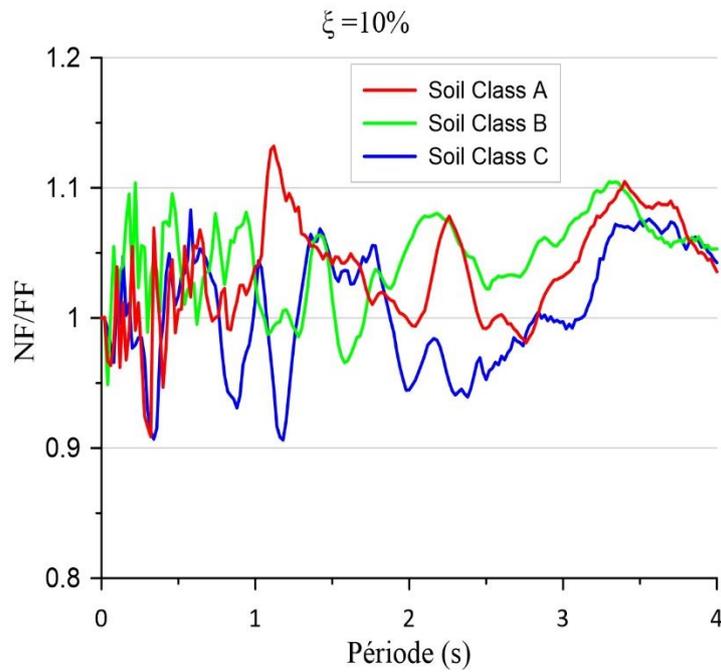


Figure III.27 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour  $\xi = 10\%$ .

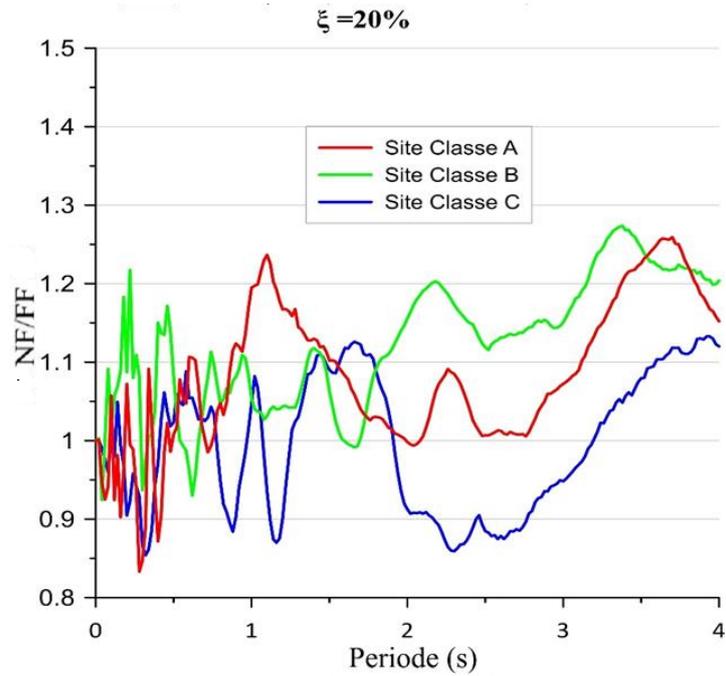


Figure III.28 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour  $\xi = 20\%$ .

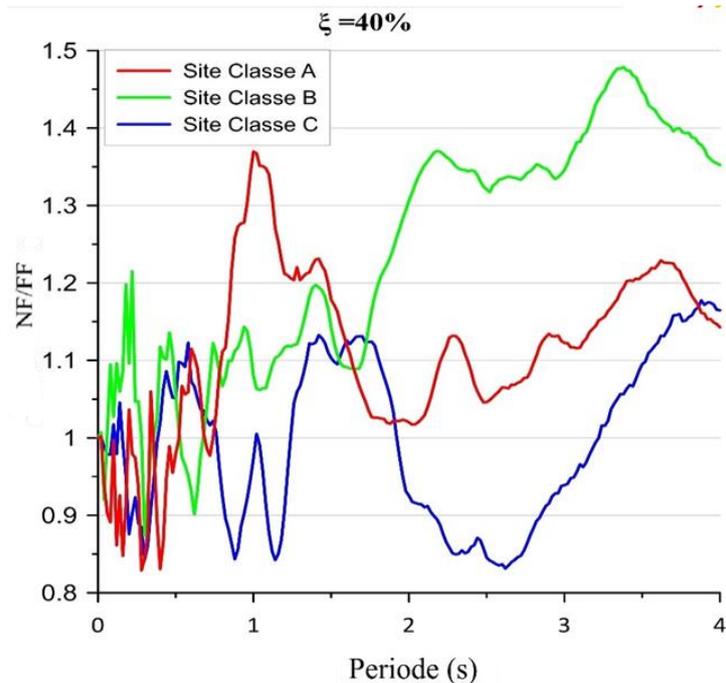


Figure III.29 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour  $\xi = 40\%$ .

La comparaison des valeurs DRFa entre les mouvements NF et FF, pour différents taux d'amortissement et classes de sol, est illustrée dans la Figure III.26-28. Les courbes montrent que les ratios fluctuent dans les plages de périodes courtes à moyennes, telles que 0,02 à 1,50 s. Pour les valeurs de périodes élevées (c'est-à-dire,  $T > 1,5$  s), les courbes DRFa sont plus lisses et les ratios des failles proches/lointaines pour le sol B sont plus élevés que pour les autres types de sol, surtout lorsque le taux d'amortissement augmente. En général, les ratios distance de la failles proches/lointaines, augmentent avec l'augmentation du taux d'amortissement et varient entre 0,9 et 1,1, 0,85 et 1,2, et 0,8 et 1,4 pour  $\xi = 10\%$ , 20% et 40%, respectivement.

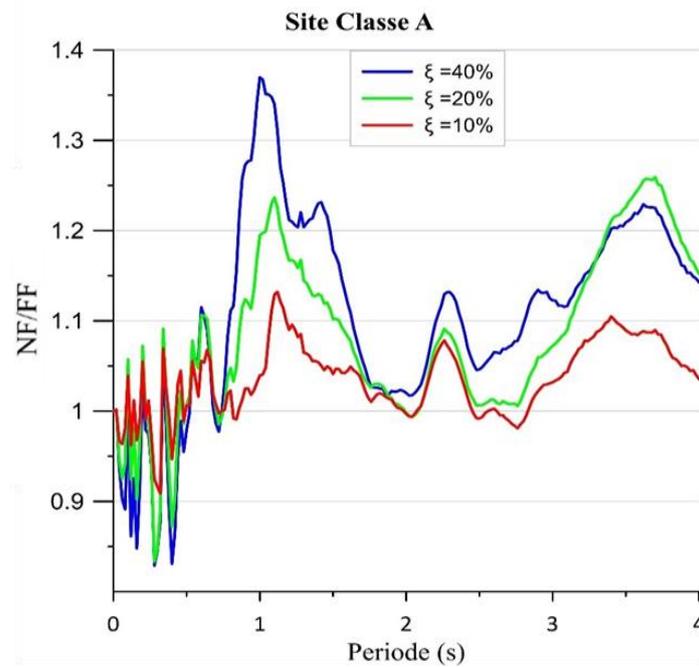


Figure III.30 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour sol classe A

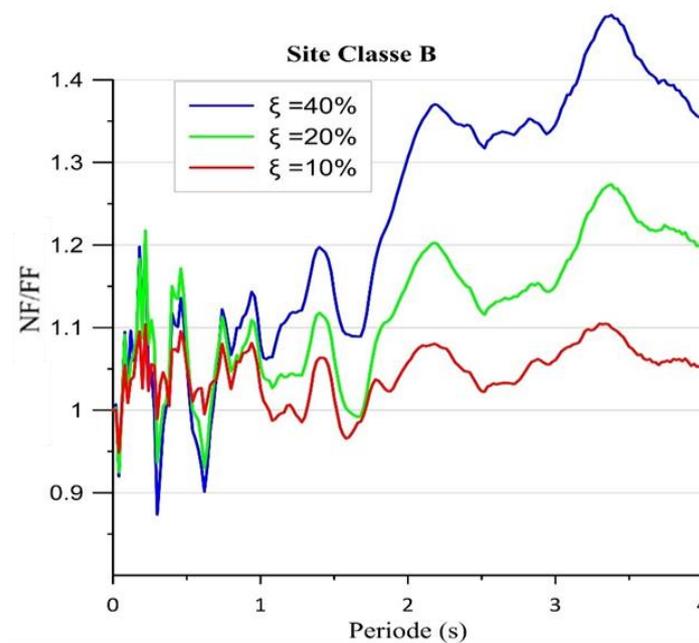


Figure III.31 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour sol classe B

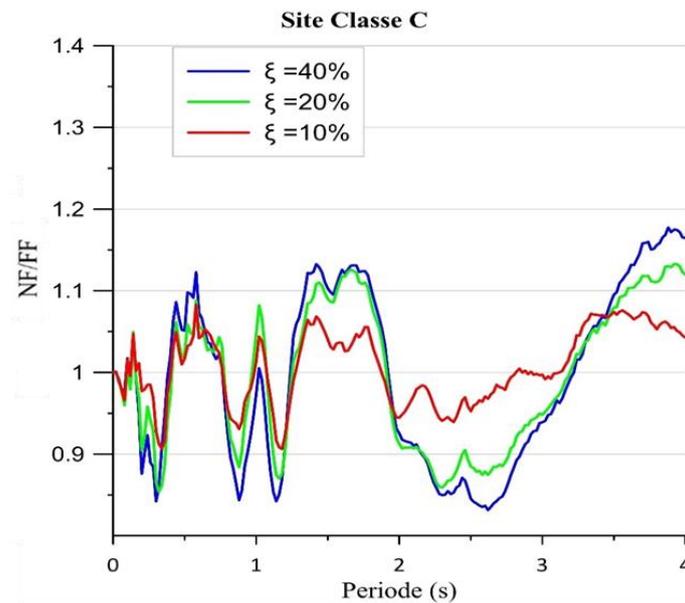


Figure III.32 Comparaison entre le ratio du DRFa (champ proche sur champ lointain) pour sol classe C

La comparaison des valeurs de DRFa entre les enregistrements proches et loin de la faille pour divers valeurs du taux d'amortissement et pour différents classes de sol est présentée dans les figures (III.27-III.32). Ces figures montrent que les rapports fluctuent dans des gammes de périodes courtes à moyennes telles que 0,02 s à 1,5 s. À des valeurs de période élevées (c'est-à-dire,  $T > 1,5$  s), les valeurs de DRFa sont lissées et les rapports pour le sol B sont plus élevés que pour les autres types de sol à mesure que le taux d'amortissement augmente. En général, les rapports augmentent également avec l'augmentation du taux d'amortissement.

### III.4 Comparaison entre les DRFd et DRFa

Les valeurs DRFd sont toujours inférieures à la valeur unitaire pour tous les types de sol et les taux d'amortissement. Cependant, les valeurs DRFa peuvent être supérieures à la valeur unitaire (c'est-à-dire,  $DRFa > 1,0$ ) à des périodes de vibration élevées (par exemple pour  $T > 2,5$ s). Lorsque les DRF basés sur les codes sont évalués avec les valeurs cibles DRFa, on peut dire que les résultats basés sur les codes sont généralement inférieurs aux valeurs DRFa calculées, et ce problème devient plus apparent à des taux d'amortissement élevés. Malgré les légères fluctuations calculées à partir des tremblements de terre réels compatibles avec les codes, surtout pour les périodes structurelles basses à moyennes ( $T < 2,0$ s), les valeurs basées sur les codes semblent relativement compatibles avec les valeurs DRFa à des taux d'amortissement faibles (c'est-à-dire 10%). D'autre part, les valeurs DRF basées sur les codes sont nettement inférieures aux DRFs cibles pour toutes les classes de sol et les périodes supérieures à 2,0s avec des taux d'amortissement croissants.

### III.5 Conclusion

En conclusion, l'analyse des Facteurs de Réduction d'Amortissement (DRF) a révélé leur forte dépendance à la période de vibration et aux taux d'amortissement. Les modèles LC04 et H10

ont montré une corrélation avec les DRF, notamment pour les sols de classe A, mais le modèle H10 peut être conservateur à des taux d'amortissement élevés.

Des différences notables entre les DRFs pour en champ proches et en champ lointains de la faille ont été observées, avec un impact significatif des conditions locales du site, particulièrement pour la classe de site B. Les variations des DRF avec le type de sol, la distance épacentrale et les taux d'amortissement soulignent la nécessité de réviser les définitions basées sur les codes pour mieux refléter les influences sismiques réelles.

Il existe une corrélation notable entre les valeurs de DRFd et les modèles LC04 et H10 pour le sol A pour toutes les valeurs du pourcentage d'amortissement lors de la prise en compte de tous les enregistrements de mouvements du sol. Cependant, pour des taux d'amortissement plus élevés, le modèle H10 tend à être conservateur.

Il a été observé que les conditions locales du site affectent les DRF dérivés des spectres d'accélération et de déplacement, en particulier pour la classe de site B. Cette observation est également conforme aux résultats de l'étude de Lin et Chang (2004).

# CHAPITRE IV

## Chapitre IV : Évaluation des incertitudes dans le DRF à l'aide des RNA pour les spectres d'accélération, de vitesse et de déplacement.

### IV.1 Introduction

Comme stipulé dans le chapitre I, les valeurs du DRF sont généralement estimées à partir des spectres de déplacement (Sd) ou de pseudo-accélération (PSA). Ils ont les mêmes valeurs en raison de leur relation approximative Equation I.13.

$$S_{pa}(T, \xi) = \frac{4\pi^2}{T^2} S_d(T, \xi) \quad (\text{IV.1})$$

Plusieurs études ont été menées pour expliquer la relation entre les valeurs de DRF dérivées des spectres de déplacement (DRFd) ou d'accélération (DRFa) et leur relation avec les paramètres sismologiques tels que la magnitude, la distance, les mouvements du sol près et loin de la faille, la vitesse en forme d'impulsion, le type de faille, la durée du séisme, la directivité devant de la source et les conditions du site comme déjà discutés dans le chapitre précédent. [81], [82].

DRFa peut être approximé par DRFd et ils peuvent être utilisés de manière interchangeable pour les faibles taux d'amortissement structurel. Si le rapport d'amortissement structurel est relativement grand, ces quantités peuvent être significativement différentes, en particulier dans les périodes fondamentales élevées qui peuvent être observées dans le système d'isolation de base ou les structures avec des dispositifs d'amortissement supplémentaires. Par conséquent, l'utilisation de DRFd au lieu de DRFa peut sous-estimer les forces d'inertie et présenter une conception structurelle peu fiable. Dans le cas d'un rapport d'amortissement élevé, l'utilisation de DRFa au lieu de DRFd conduira à une estimation très conservatrice des réponses sismiques de la structure telles que le déplacement, les forces des éléments, etc. [81], [82]

Selon Lin & Chang, la force de conception doit être la force d'inertie, et les DRFs doivent être calculés à partir des réponses en accélération si l'amortissement des structures résulte de leur réponse inélastique [44]. Sinon, la force de conception est la force de rappel, et les DRFs doivent être déterminés à partir des réponses de déplacement si les dispositifs de dissipation d'énergie supplémentaires dominent dans l'amortissement. C'est nécessaire pour les systèmes à haut amortissement car un DRF plus petit résultant des spectres de pseudo-accélération pourrait entraîner une sous-estimation significative des forces sismiques de conception.

Les erreurs dans l'estimation de l'amortissement peuvent donc entraîner des valeurs de DRF inexacts et une estimation incorrecte de la réponse structurelle. Ces incertitudes peuvent être une raison majeure de la variation significative des structures et de la variabilité des réponses structurelles. Par conséquent, il est important de tenir compte de ces effets lors de l'étude des

propriétés dynamiques des structures. Jusqu'à présent, seuls quelques auteurs se sont concentrés sur l'impact de l'incertitude de l'amortissement sur la réponse sismique des structures.

Les effets des incertitudes inhérentes de l'amortissement sur le DRF ont été d'abord étudiés par Benahmed, où une distribution de probabilité log normale a été utilisée pour caractériser l'incertitude de l'amortissement [6]. Selon cette recherche, une formulation est proposée pour estimer le DRF en tenant compte de 20% des incertitudes dans l'amortissement ( $Cv\xi$ ). Des études récentes [67], [83] ont étudié l'impact du type de sol et de la durée du mouvement sismique sur le DRF en utilisant une technique stochastique avec une entrée non stationnaire.

Selon l'étude de Greco et al., 2018, le DRF dépendait de la relation entre la période spectrale et la période dominante du mouvement du sol. Greco et al. 2019 ont fourni une méthode pour calculer le DRF sur la base de ces faits, en tenant compte de la durée efficace, du type de sol, du taux d'amortissement et de la période fondamentale de la structure [66].

Dans ce chapitre, l'attention est portée sur l'effet de l'incertitude dans l'amortissement sur le DRF estimé à partir de différents spectres dérivés du déplacement, de la vitesse et de l'accélération. L'approche de Monte Carlo a été utilisée pour produire les valeurs d'amortissement aléatoires représentées par une distribution log normale. De plus, un Réseau de Neurones Artificiel (RNA) est proposé pour estimer le DRF stochastique pour différents niveaux d'incertitude pour DRFd, DRFv et DRFa.

Les DRFs stochastiques sont estimés pour la moyenne plus un écart type des valeurs de DRF pour éviter la sous-estimation des valeurs de DRF et donc de la réponse sismique des bâtiments. Selon le modèle développé ci-après, des résultats orientés vers la pratique sont évalués pour l'évolution future des codes sismiques.

## **IV.2 Variabilité de la réponse structurelle dynamique**

Dans la conception parasismique, la sélection d'une valeur d'amortissement adéquate est un sujet controversé. Plusieurs chercheurs ont travaillé sur son évaluation pour différents niveaux de réponse, systèmes structurels et groupe d'usage des bâtiments. Ces études ont mis en évidence que les meilleures distributions de probabilité pour la variation de l'amortissement ( $Cv\xi$ ) sont les fonctions log normale et Gamma. [84], [85].

La principale source d'incertitude est le manque de compréhension des mécanismes d'amortissement et de dissipation d'énergie. De plus, l'incertitude inhérente à la période fondamentale est due aux hypothèses faites dans la modélisation de la masse et de la rigidité des éléments structurels.

Par exemple, certains bâtiments ou parties de bâtiments sont utilisés comme parkings, ce qui est fonction du temps (saisons, jours), rendant très compliquée l'estimation de la période fondamentale en cas de futur séisme. De plus, l'interaction sol-structure doit être prise en compte si la structure est construite sur un sol mou, car les caractéristiques dynamiques de la structure et du sol peuvent varier avant, pendant et après le séisme. Selon des recherches antérieures, l'incertitude de la période est représentée par un coefficient de variation égal à environ 0,17.

Haviland a d'abord évalué le coefficient de variation de l'amortissement ( $Cv\xi$ ) dans la plage de 42 à 87% pour la base de données constituée de bâtiments réels. Kareem a ensuite réexaminé la base de données et a observé que le  $Cv\xi$  variait entre 33 et 78% et a suggéré qu'une valeur moyenne pouvait être prise comme 40%. Étant donné que les valeurs de  $Cv\xi$  calculées sont très larges, ces incertitudes devraient être prises en compte par plusieurs méthodes (Monte Carlo, FORM, SORM, méthode de perturbation). Parmi ces méthodes, l'approche de simulation Monte Carlo (MCS) est l'outil le plus utilisé pour la quantification des incertitudes, en raison de sa simplicité et de sa robustesse. Il s'agit d'un algorithme informatique qui repose sur un échantillonnage aléatoire répété pour obtenir des résultats numériques.

### IV.3 Base de données des accelerograms utilisés

L'un des problèmes compliqués dans l'analyse dynamique est la sélection des enregistrements sismiques qui influencent la réponse sismique comme il a été détaillé dans le chapitre II.

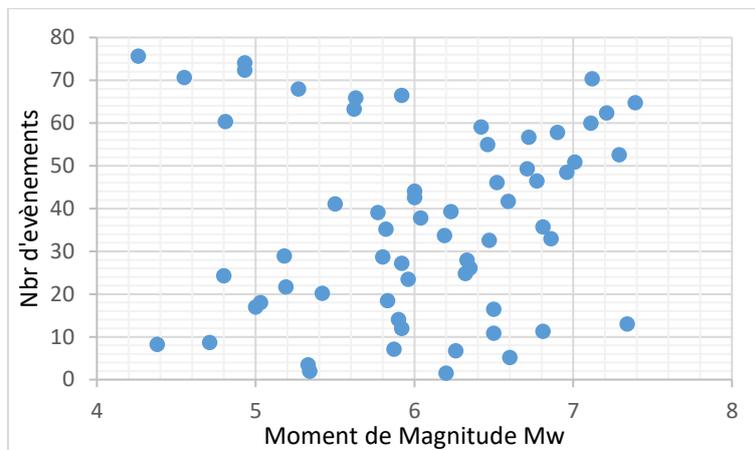


Figure VI.1 Nuages de points des enregistrements sélectionnés (Magnitude Mw)

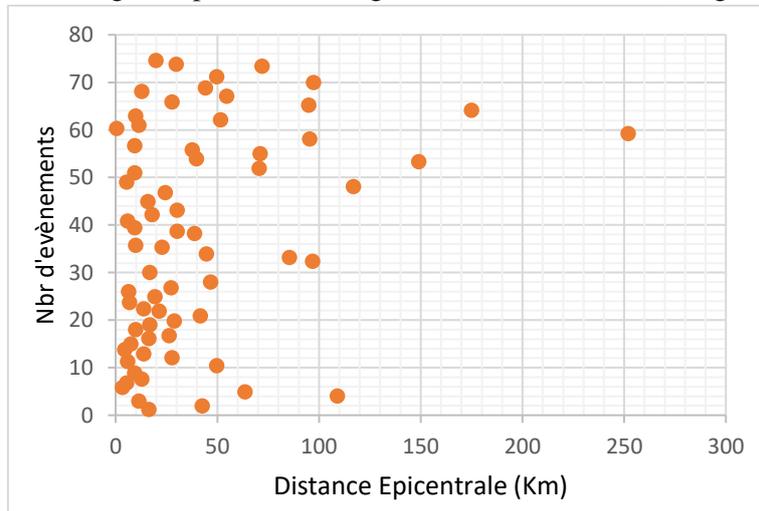


Figure VI.2 Nuages de points des enregistrements sélectionnés (Distance Epicentrale)

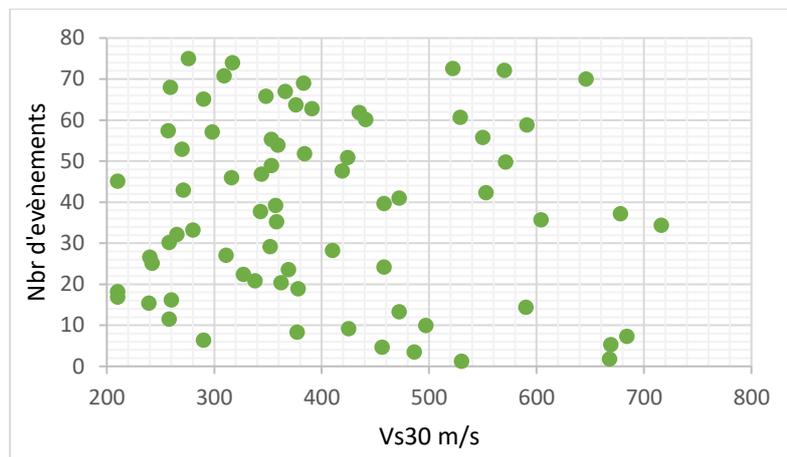


Figure VI.3 Nuages de points des enregistrements sélectionnés (VS30)

Dans ce chapitre, la base de données issue du *Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center* est utilisée.

Tout d'abord, l'utilisateur définit le spectre de réponse et les caractéristiques souhaitées des enregistrements de mouvements du sol, telles que la classification du site décrit par la vitesse des ondes de cisaillement ( $V_{s30}$ ), la plage de magnitude, la plage de distance à la source, le type et le mécanisme de la faille. Ensuite, l'utilisateur choisit les enregistrements sismiques en fonction des critères précédemment définis et fournit le meilleur ajustement au spectre de réponse cible.

Dans ce chapitre, 62 enregistrements réels d'enregistrements sismiques provenant de différents événements ont été sélectionnés. Il peut être observé que le moment de magnitude varie entre 4,2 et 7,3 quant à la distance épacentrale a été choisi entre 0 et 100 km et la  $V_{s30}$  des mouvements du sol sélectionnés varient entre 200 et 2000 km/s.

## IV.4 Résultats de l'analyse

### IV.4.1 Résultats pour le DRF déterministe

Dans cette section, une comparaison de différents DRFs déterministes dérivés de différents spectres sans prendre en compte les incertitudes d'amortissement est présentée. À cette fin, les spectres de réponse des systèmes SDOF pour chaque enregistrement sismique ont été calculés en considérant les taux d'amortissement de 5, 10, 20 et 30% pour les périodes de vibration allant de 0,01 à 4s. Ces spectres ont été calculés en termes de déplacements, de vitesses et d'accélération.

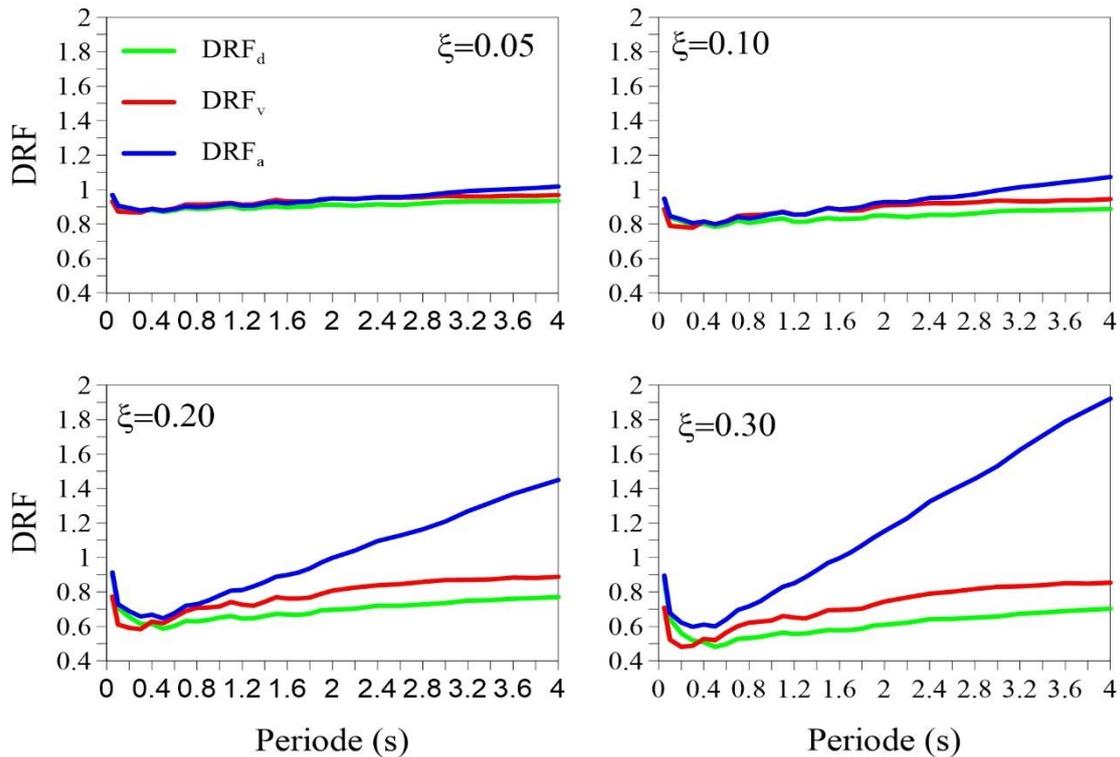


Figure VI.4 Les valeurs déterministes du DRFd, DRFv et DRFa

Par conséquent, les courbes moyennes de DRF déterministes dérivées de l'accélération DRFa, de la vitesse DRFv et du déplacement DRFd, ont été estimées et présentées dans la Figure IV.1, pour différents taux d'amortissement. Ces valeurs sont déterministes (incertitude = 0). Les résultats sont obtenus par l'estimation moyenne des DRFs calculés à partir des 62 enregistrements sismiques déjà sélectionnées.

Il peut être observé dans cette Figure que la tendance de la plupart des valeurs de DRF, augmente avec l'augmentation des périodes de vibration pour tous les taux d'amortissement considérés. Cependant, les valeurs de DRF obtenues à partir des spectres d'accélération présentent des valeurs plus élevées par rapport aux valeurs de DRF calculées à partir de la vitesse et du déplacement.

Les valeurs de DRFa sont supérieures à la valeur de 1 pour des périodes fondamentales supérieures à 1,5s et atteignent 1,9 pour un taux d'amortissement de 30%. D'autre part, les valeurs de DRFd et DRFv restent inférieures à 1, ces valeurs sont de l'ordre de 0,8. Il est évident que les valeurs de DRF supérieures à 1, signifient que la quantité calculée telle que l'accélération est plus élevée pour des taux d'amortissement plus élevés par rapport à l'amortissement de référence qui est de 5%, en particulier pour des périodes structurelles plus élevées. Cette observation est valable pour les valeurs de DRF calculées à partir du spectre d'accélération. Des conclusions similaires sont également tirées dans la littérature à ce sujet [44]. Il convient de préciser que cette situation est un phénomène naturel puisque les valeurs spectrales dans les périodes élevées ne sont pas sensibles à l'accélération.

Les résultats de cette analyse montrent de manière concluante que l'utilisation de l'un de ces DRFs sans d'abord déterminer lequel est le meilleur pour évaluer les spectres de réponse à fort

amortissement ne peut être efficace qu'à faibles niveaux d'amortissement. L'utilisation du mauvais peut sérieusement affecter la fiabilité de la structure, principalement pour des valeurs élevées d'amortissement et des périodes fondamentales.

#### IV.4.2 Résultats pour le DRF stochastique

En raison des valeurs significatives des incertitudes d'amortissement (généralement comprises entre 33 et 78%), il est important de tenir compte de cette incertitude lors de la conception des structures. Comme précédemment considéré, le rapport d'amortissement est une variable aléatoire qui suit une distribution log-normale. Par conséquent, la méthode de Monte Carlo peut être utilisée pour prendre en compte cette incertitude.

Dans cette étude, 200 valeurs d'amortissement pour chaque valeur de période ont été calculées en utilisant la méthode de Monte Carlo pour chaque type de spectre tel que l'accélération, la vitesse et le déplacement. En conséquence, 200 valeurs de DRF ont été estimées. La distribution du DRF résultant n'est pas log-normale car la relation entre  $\xi$  et DRF n'est pas linéaire.

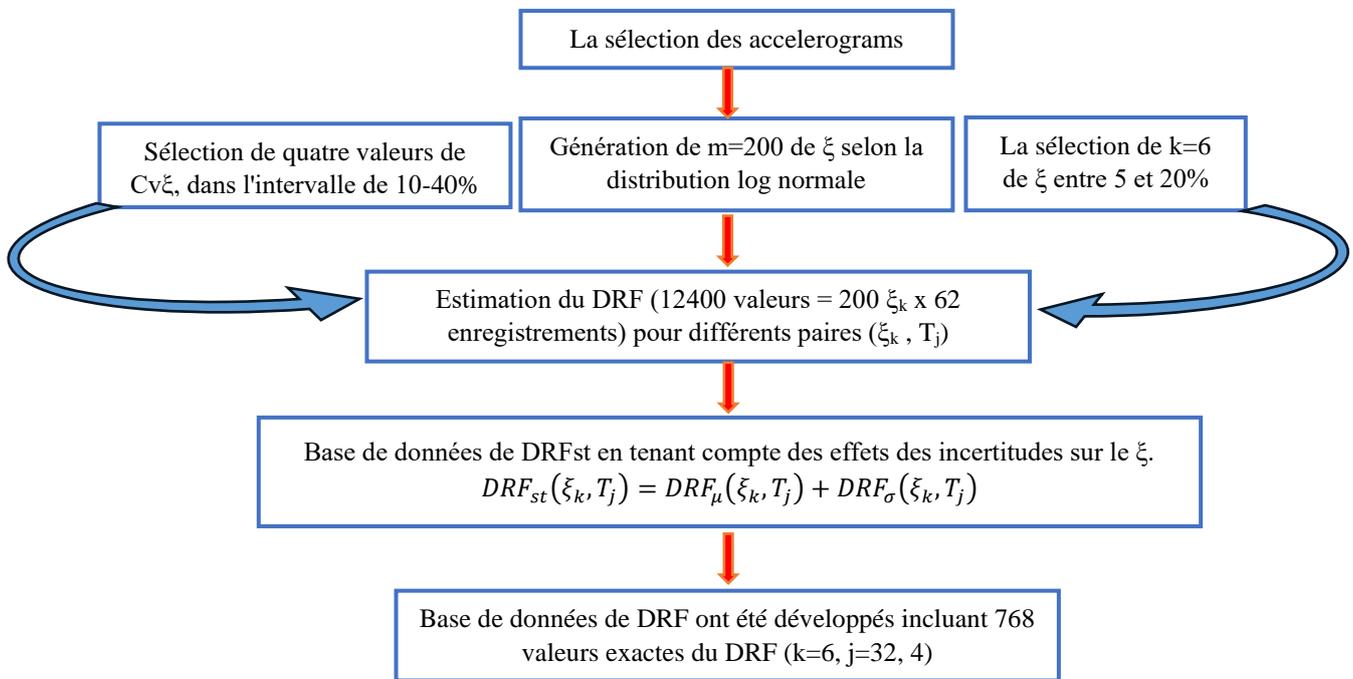


Figure VI.5 Organigramme de la procédure d'évaluation du DRFst

Après la détermination des valeurs de DRF, la moyenne ( $DRF_{\mu}$ ) et l'écart-type ( $DRF_{\sigma}$ ) des valeurs de DRF ont été calculés pour les spectres de déplacement, de vitesse et d'accélération associés à chaque période de vibration. Ensuite, la valeur stochastique de DRFst dépendant de l'amortissement et de la période est calculée en utilisant les valeurs  $DRF_{\mu}$  et  $DRF_{\sigma}$  via l'équation IV.2. Selon cette équation, le DRF stochastique est la somme du DRF moyen et d'un écart-type du DRF.

$$DRF_{st}(\xi_k, T_j) = DRF_{\mu}(\xi_k, T_j) + DRF_{\sigma}(\xi_k, T_j) \quad (IV.2)$$

La figure IV.5 présente un organigramme pour la base de données utilisée dans cet article, et la figure IV.6 illustre des courbes de DRF déterministe et stochastique pour  $C_{v\xi} = 10\%$  et  $40\%$ . Les valeurs calculées correspondent aux spectres moyens des 62 spectres individuels générés par la méthode de Monte Carlo, pour les spectres de déplacement, de vitesse et d'accélération. Les courbes DRFd et DRFv montrent une tendance similaire, et l'écart entre les courbes stochastiques et déterministes augmente avec l'augmentation du ratio  $\xi$ . Les différences entre les valeurs de DRF déterministes et stochastiques sont présentées dans le Tableau 1. Pour  $\xi=10\%$ , ces différences sont presque identiques à celles pour  $\xi=5\%$ , mais augmentent légèrement pour DRFa à  $\xi=20\%$ . Pour un amortissement de 10%, les différences entre les valeurs de DRFd, DRFv et DRFa sont presque les mêmes que pour un amortissement de 5%. Cette différence augmente légèrement pour DRFa à 20% d'amortissement, atteignant respectivement 4,8%, 4,5% et 7,0%.

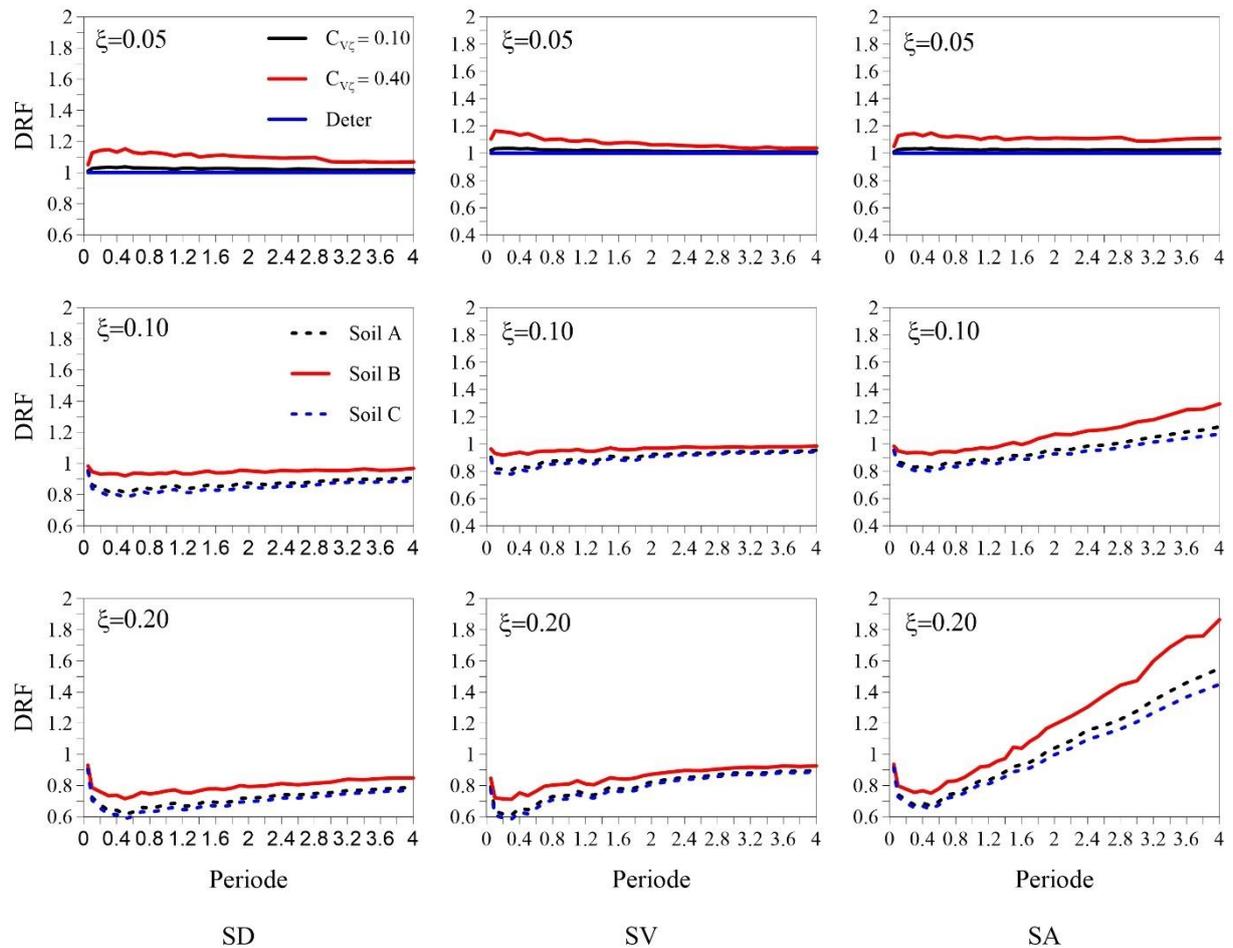


Figure VI.6 Les valeurs stochastiques du DRFd, DRFv et DRFa  
 Tableau IV.1 Ecarts entre le DRF entre le déterministe et le probabiliste

		$\xi=5\%$	$\xi=10\%$	$\xi=20\%$
$C_{v\xi}=10$	DRFd	3.7%	4.0%	4.8%
	DRFv	3.6%	3.9%	4.5%
	DRFa	3.6%	5.0%	7.0%
$C_{v\xi}=40$	DRFd	15.3%	17.9%	21.9%
	DRFv	16.3%	19.3%	21.8%
	DRFa	14.8%	20.6%	28.7%

Des résultats similaires sont obtenus pour un amortissement de 40%, où la différence est d'environ 21% pour DRFd et DRFv et de 28,7% pour DRFa. Par conséquent, le DRF dérivé des spectres d'accélération est plus sensible aux incertitudes inhérentes à l'amortissement que le DRF obtenu à partir des spectres du déplacement et de la vitesse. Il semble que les valeurs de DRF soient plus élevées que les valeurs déterministes comparables lorsque les incertitudes sont prises en compte.

En d'autres termes, des ordonnées spectrales plus basses, ou une force de cisaillement de base de conception ou un déplacement de conception plus faible, peuvent être estimés si les incertitudes dans l'amortissement ne sont pas prises en compte, ce qui signifie une conception trop conservatrice. Pour mieux comprendre la variabilité des courbes de DRF incertaines pour différents cas, les courbes de DRF stochastiques ont été normalisées par les déterministes et présentées dans la Figure IV.5 pour DRFd, DRFv, DRFa.

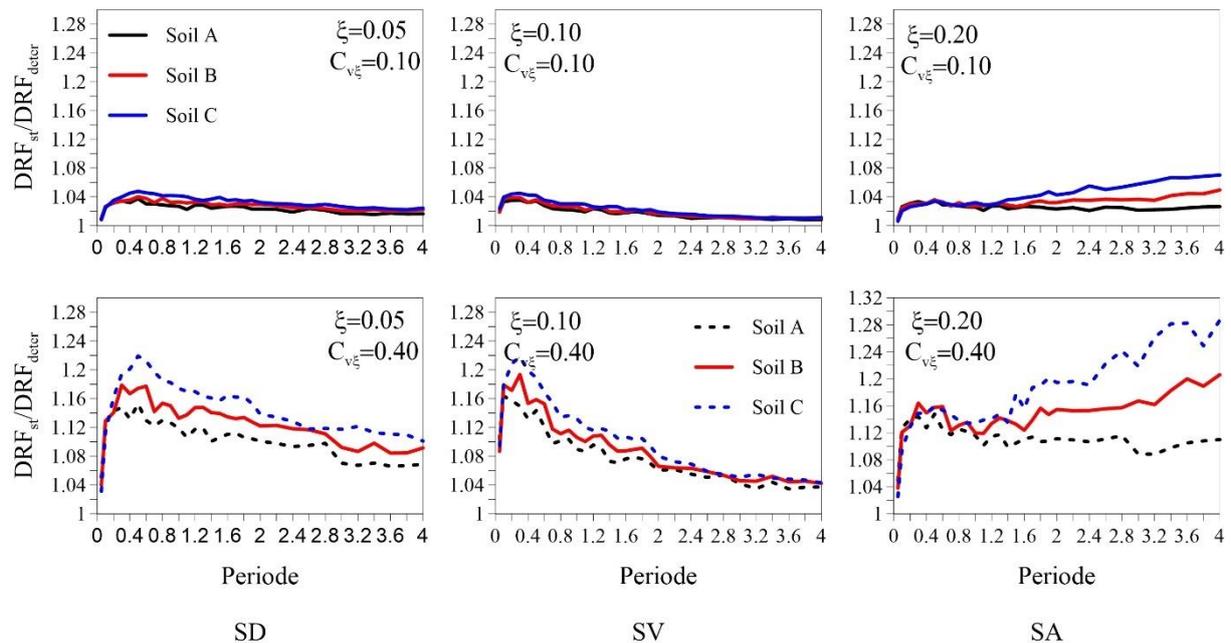


Figure VI.7 Les valeurs du DRF stochastiques/DRF déterministe (DRFd, DRFv et DRFa)

Pour des taux d'amortissement plus faibles, la tendance des rapports est très proche et similaire. Cependant, le DRFst/DRFdét dérivé de l'accélération a des valeurs plus élevées que celles dérivées de la vitesse et du déplacement. Cela confirme que les DRF dérivés des réponses d'accélération sont plus sensibles à l'incertitude d'amortissement que les DRF dérivés des du déplacement. Il est important de prendre en compte cette conclusion lors de l'utilisation de ces facteurs.

## IV.5 Réseaux de neurones artificiels

### IV.5.1 Conception du réseau

Les réseaux de neurones constituent une branche de l'intelligence artificielle qui a récemment connu une évolution et des progrès rapides. Ils sont capables d'apprendre les modèles pour définir la relation entre l'entrée et la sortie d'un certain test ou processus, qui peut ensuite être utilisée pour prédire de nouvelles conditions dont les résultats (sortie) ne sont pas connus.

Les réseaux de neurones se sont développés d'une architecture simple à divers types de structures complexes, comme les réseaux de neurones convolutifs (CNN) et les réseaux de neurones récurrents (RNN). Dans cette étude, le modèle RNA a été construit en utilisant l'un des types de RNA les plus largement utilisés, qui est le réseau neuronal *multicouche* à propagation avant (MLF). Un réseau neuronal MLF se compose de neurones organisés en couches, avec des connexions entre les couches successives et sans connexions entre les neurones de la même couche. La fonction de transfert permettant de calculer la sortie de la cellule est souvent une fonction sigmoïde linéaire. La fonction d'activation sigmoïde est souvent choisie dans les réseaux de neurones artificiels pour plusieurs raisons : elle est lisse et différentiable, ce qui facilite l'utilisation d'algorithmes d'optimisation basés sur le gradient comme la rétro propagation. De plus, elle mappe les valeurs d'entrée dans une plage comprise entre 0 et 1, ce qui est utile pour les problèmes nécessitant des sorties sous forme de probabilités ou de classification binaire. En introduisant de la non-linéarité, la fonction sigmoïde permet au réseau de neurones d'apprendre des modèles plus complexes. Bien que le problème du gradient qui disparaît puisse être un inconvénient dans les réseaux profonds, cette fonction peut dans certains cas stabiliser l'apprentissage en limitant l'ampleur des mises à jour des poids. Cependant, pour les réseaux plus profonds, des alternatives comme ReLU sont souvent privilégiées pour éviter ce problème et améliorer les performances.

Le nombre de couches cachées, le nombre de cellules par couche et leurs connexions définissent l'architecture du réseau de neurones.

Les neurones de chaque couche sont connectés par un coefficient de poids. Il existe une fonction de transfert qui transforme les entrées en sortie. Il est nécessaire de former l'RNA avant l'application, et la formation neuronale est une méthode utilisée pour calculer les poids synaptiques et le biais de manière itérative jusqu'à ce qu'elle produise des sorties de données compatibles. Le choix de l'architecture du réseau a un impact significatif sur la précision du modèle et le temps de calcul. Dans cette étude, le nombre optimal sélectionné est égal à 40. L'architecture RNA obtenue est présentée ci-dessous comme 3-40-1.

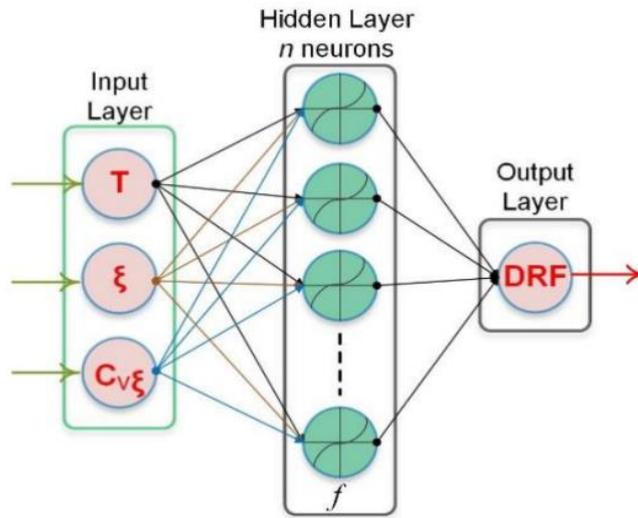
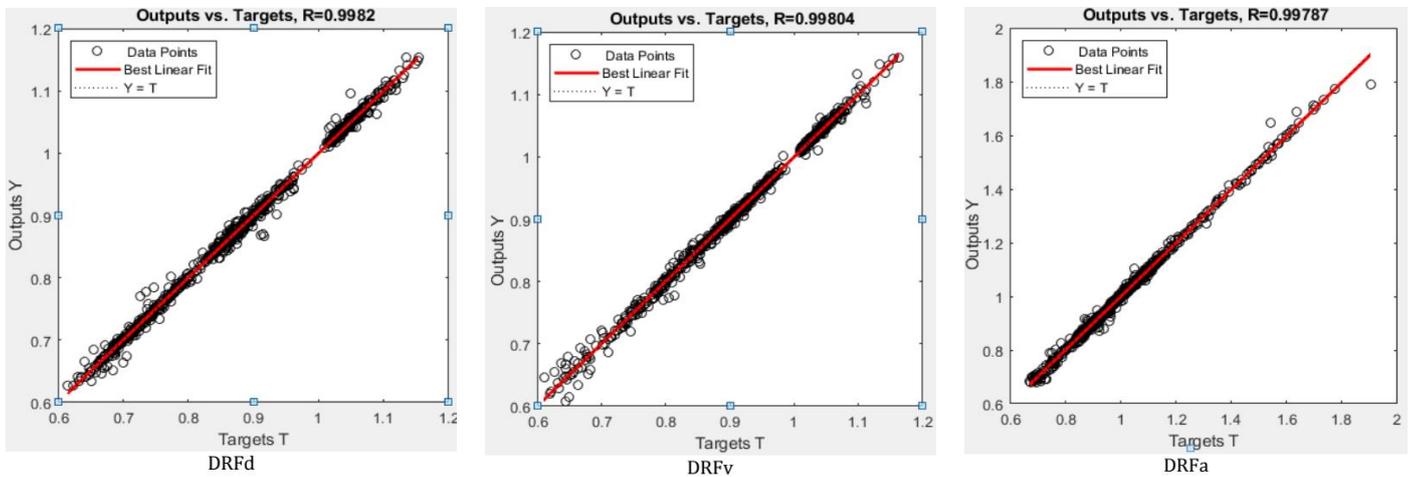


Figure VI.8 Réseau neuronal multicouche à propagation directe

### IV.5.2 Analyse de corrélation

Pour évaluer l'efficacité du réseau sélectionné, toutes les données (utilisées pour l'apprentissage, la validation et les tests) ont été passées à travers le réseau pour effectuer une régression entre les valeurs de sortie du réseau et les valeurs cibles correspondantes. Une comparaison des deux valeurs est présentée dans la figure IV.7. Il est visible que les lignes d'ajustement sont presque diagonales et le coefficient de corrélation ( $R$ ) est presque égal à un. Les coefficients de régression calculés sont respectivement de 99,82%, 99,80% et 99,78% pour DRFd, DRFv et DRFa.



IV.7

Figure VI.9 Les données de sortie du réseau neurone par rapport aux valeurs cibles de DRF.

### IV.5.3 Erreur relative

L'efficacité de la méthode proposée utilisant les réseaux de neurones artificiels (RNA) est vérifiée en calculant l'erreur relative entre le DRFst stochastique estimé par l'équation IV.2 et le DRFst estimé par l'RNA à l'aide de l'équation IV.3.

$$Err = \left| \frac{DRF_{real} - DRF_{ANN}}{DRF_{real}} \right| \quad (IV.3)$$

Les calculs ont révélé que les erreurs relatives commises par l'RNA sont toujours inférieures à 6%. La valeur maximale de cette erreur relative a été calculée à 5,8% pour DRFd, 4,8% pour DRFv et 6,6% pour DRFa. L'erreur relative moyenne a été calculée à 0,59% pour DRFd, 0,56% pour DRFv et 0,72% pour DRFa si les erreurs relatives pour tous les DRF sont utilisées dans la base de données. L'RNA constitue une approche efficace basée sur des échantillons pour prédire les valeurs de DRF stochastiques. En conséquence, il peut être affirmé que les valeurs de DRF obtenues à partir de l'RNA correspondent presque parfaitement aux résultats réels de DRF.

#### **IV.6 Remarques conclusives**

L'influence des incertitudes d'amortissement sur le DRF obtenu à partir des réponses de déplacement, de vitesse et d'accélération a été étudiée dans cette recherche. De plus, une méthode pour déterminer le DRF stochastique basé sur le réseau de neurones artificiels (RNA) a été proposée. Cette méthode tient clairement compte des incertitudes associées à l'amortissement structurel. Il est évident que la différence entre DRFa et DRFd et DRFv devient plus significative pour des valeurs plus élevées d'amortissement et de périodes fondamentales. L'évaluation a montré que les valeurs de DRFst ont la même tendance pour des taux d'amortissement faibles ( $\xi = 5\%$ ). D'autre part, la différence entre les DRF déterministes et stochastiques devient significative principalement pour  $T > 1,5s$  et des taux d'amortissement plus élevés. Des résultats similaires sont obtenus pour  $\xi = 40\%$  où l'erreur est d'environ 21% pour DRFd et DRFv et de 28,7% pour DRFa. Il est apparent que les valeurs de DRF sont plus élevées que les valeurs déterministes lorsque les incertitudes associées à l'amortissement structurel sont prises en compte. Cette situation implique que l'utilisation de valeurs de DRF déterministes pourrait sous-estimer la force de cisaillement de base de conception ou les déplacements si les incertitudes dans l'amortissement ne sont pas prises en compte, en particulier pour des ordonnées spectrales plus basses. Il est observé que l'erreur relative entre les valeurs réelles et prédites de DRF par l'RNA est très faible, toujours inférieure à 6%. Il est évident que les estimations de l'RNA ont un très bon accord avec les DRFs calculés réels.

# CONCLUSION

## V. Conclusion

Dans ce travail de recherche, les valeurs du DRF ont été calculées en fonction du spectre cible basé sur le code sismique. Le spectre de réponse de conception selon l'Eurocode 8 a été utilisé comme spectre cible pour la sélection des séismes. Pour les analyses temporelles, des enregistrements sismiques réels ont été sélectionnés et ajustés à partir de différentes bases de données européennes et mondiales. Ces enregistrements ont été divisés en deux groupes, en fonction de la distance épacentrale, pour représenter les séismes proches et éloignés de la faille.

Les facteurs de réduction d'amortissement (DRF) des mouvements du sol ont été calculés à partir des spectres de réponse en déplacement, puis en accélération, pour des taux d'amortissement variant entre 10 %, 20 % et 40 %. Les distributions des DRF ont été étudiées en tenant compte des classes de sol A, B et C selon la classification de l'Eurocode 8. Des analyses et comparaisons ont ensuite été menées avec les modèles existants de DRF, permettant de tirer les conclusions suivantes :

- Il est évident, d'après les distributions des DRF dérivées des spectres de réponse en déplacement et en accélération, que ces valeurs dépendent fortement de la période de vibration fondamentale et du taux d'amortissement.
- La comparaison des DRF résultant des enregistrements en champ proche et en champ lointain de la faille a montré des différences nettes entre les deux types d'événements, tant pour les DRF dérivés des spectres de réponse en déplacement que pour ceux en accélération.
- Les résultats de l'analyse indiquent que, de manière générale, les valeurs de DRFa sont plus sensibles à la période structurelle, aux taux d'amortissement, aux conditions du sol et à la distance épacentrale que les valeurs de DRFd.
- Il a été observé que les valeurs de DRFd, déterminées à partir des mouvements en champ proche, sont généralement plus élevées que celles des mouvements en champ lointain. De plus, il a été constaté que le rapport DRFd/DRFa est d'environ 1,25 en moyenne, impliquant des valeurs de DRFd plus élevées.
- L'analyse des DRFa montre une variation en fonction des classes de sol (A, B et C), des taux d'amortissement et de la distance épacentrale. Le modèle de Lin et Chang (2004) correspond bien aux résultats pour la classe de sol A, tandis que le modèle de Hatzigeorgiou (2010) tend à légèrement surestimer les valeurs de DRFa. Des tendances similaires sont observées pour la classe de sol B. Pour la classe de sol C, le modèle H10 fournit des prédictions plus cohérentes avec les résultats de l'analyse. De plus, les valeurs de DRFa peuvent dépasser la valeur unitaire à des périodes de vibration élevées, indiquant une augmentation avec le taux d'amortissement et la période.
- Sur la base des comparaisons, il peut être affirmé que les valeurs de DRF fournies par l'Eurocode 8 sont généralement non conservatrices, et il est suggéré que les définitions basées sur ce code devraient être profondément réexaminées pour prendre en compte les paramètres importants qui influencent les DRF.
- Pour évaluer et comparer les prédictions basées sur le code et les modèles connus (c'est-à-dire H10 et LC04), les mesures d'erreur RMSE et MAE ont été calculées. Les résultats montrent que, quel que soit le modèle, le type de sol ou le taux d'amortissement, les valeurs de DRFa sont plus biaisées que celles de DRFd.

## Conclusion

---

Concernant l'approche stochastique dans l'évaluation du DRF et les incertitudes inhérentes à ce facteur, les conclusions suivantes ont été tirées :

- Les résultats montrent que les valeurs de DRF sont plus élevées que les valeurs déterministes lorsque les incertitudes liées à l'amortissement structurel sont prises en compte. Cela suggère que l'utilisation de valeurs de DRF déterministes pourrait sous-estimer les efforts tranchants de base de conception ou les déplacements si les incertitudes liées à l'amortissement ne sont pas prises en compte, en particulier pour des ordonnées spectrales plus faibles.
- Il a été observé que l'erreur relative entre les valeurs réelles et prédites du DRF à partir du RNA est très faible, toujours inférieure à 6 %. Ces résultats montrent clairement que les estimations du RNA sont en très bon accord avec les DRF réels calculés.

En perspective, il est important de mener des investigations sur la sensibilité du DRF à d'autres paramètres et de proposer des formules plus précises pour les codes sismiques. Il est également essentiel de différencier entre les valeurs du DRF dérivées du déplacement, de l'accélération ou de la vitesse en termes d'utilisation dans les calculs spectraux.

## Bibliographies

- [1] “Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings,” Brussels Eur. Comm. Stand., 2005.
- [2] FEMA-273(1997)NEHRP guidelines for the seismic rehabilitation of buildings. Fed. Emergency Management Agency, Washington DC, no. October. Washington DC, 1997.
- [3] A. T. Council, “Seismic evaluation and retrofit of concrete buildings Report No.,” SSC 96-01 ATC-40, vol. 1, 1996.
- [4] “RPA99 (2003 Version), ‘Re`gles Parasismiques Alge´riennes., ‘D.T.R. –B.C. 2.48. National Center of Earthquake Applied Research (CGS), Algiers, Algeria. (OPU). (ISBN 9961-923-13-8).”
- [5] N. N. Ambraseys et al., “Dissemination of European strong-motion data, Volume 2,” 2004.
- [6] B. Benahmed, M. Hammoutene, and D. Cardone, “Effects of damping uncertainties on damping reduction factors,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 61, no. 2, 2017, doi: 10.3311/PPci.9665.
- [7] A. Abdelhamid, B. Benahmed, M. Palanci, and L. Aidaoui, “Assessment of uncertainties in damping reduction factors using ANN for acceleration, velocity and displacement spectra,” *Electron. J. Struct. Eng.*, pp. 8–13, 2023.
- [8] B. Benahmed and M. Hamoutenne, “Use of the artificial neural networks to estimate the DRF for eurocode 8,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 62, no. 2, 2018, doi: 10.3311/PPci.8139.
- [9] B. Benahmed, “Formulation of damping reduction factor for the Algerian seismic code,” *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 4, 2018, doi: 10.1007/s42107-018-0023-6.
- [10] B. Baizid and D. Cardone, “ESTIMATION OF STOCHASTIC DAMPING REDUCTION FACTOR USING MONTE CARLO SIMULATION AND ARTIFICIAL NEURAL NETWORK METHOD,” *Ing. Sismica*, vol. 38, no. 4, 2021.
- [11] B. Benahmed, A. Moustafa, and M. Badaoui, “Comparison between DRF for displacement and acceleration spectra with uncertain damping for EC8,” *J. Mater. Eng. Struct. «JMES»*, vol. 6, no. 3, pp. 345–358, 2019.
- [12] “Université de Laval.” <https://www.fsg.ulaval.ca/departements/departement-de-geologie-et-de-genie-geologique>.
- [13] X. Chen and D. Wang, “Multi-pulse characteristics of near-fault ground motions,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 137, p. 106275, 2020.
- [14] B. Bolt, “Estimation of strong seismic ground motions,” *Int. Handb. Earthq. Eng. Seismol.*, pp. 983–1001, 2002.
- [15] P. G. Somerville, N. F. Smith, R. W. Graves, and N. A. Abrahamson, “Modification of empirical strong ground motion attenuation relations to include the amplitude and duration effects of rupture directivity,” *Seismol. Res. Lett.*, vol. 68, no. 1, pp. 199–222, 1997.
- [16] B. A. Bolt and C.-Y. Wang, “The present status of earthquake prediction,” *Crit. Rev. Solid State Mater. Sci.*, vol. 5, no. 2, pp. 125–151, 1975.
- [17] B. A. Bolt, “Seismic input motions for nonlinear structural analysis,” *ISET J. Earthq. Technol.*, vol. 41, no. 2, pp. 223–232, 2004.
- [18] T.-C. Shin and T. Teng, “An overview of the 1999 Chi-Chi, Taiwan, earthquake,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 91, no. 5, pp. 895–913, 2001.
- [19] K. E. Bullen and B. A. Bolt, *An introduction to the theory of seismology*. Cambridge university press, 1985.
- [20] Y. Bozorgnia and V. V Bertero, *Earthquake engineering: from engineering seismology to performance-based engineering*. CRC press, 2004.

- [21] E. A. Elhout, “Damping modification factor of the vertical response spectrum,” *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 23, no. 6, 2022, doi: 10.1007/s42107-022-00465-5.
- [22] J. F. Hall, T. H. Heaton, M. W. Halling, and D. J. Wald, “Near-source ground motion and its effects on flexible buildings,” *Earthq. spectra*, vol. 11, no. 4, pp. 569–605, 1995.
- [23] A. S. Elnashai and A. M. Mwafy, “Seismic response and design,” in *ICE Manual of Bridge Engineering: Second Edition*, ICE Publishing, 2008, pp. 145–163.
- [24] P. Anbazhagan, U. Anjali, S. R. M. Sayed, and S. N. A. A. Nassir, “Pseudo-spectral damping reduction factors for the himalayan region considering recorded ground-motion data,” *PLoS One*, vol. 11, no. 9, 2016, doi: 10.1371/journal.pone.0161137.
- [25] T. Ucar and O. Merter, “Ductility demands for stiffness-degrading SDOF systems under pulse-like ground motions of the 2023 Pazarcık (Kahramanmaraş) earthquake,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 22, no. 6, pp. 3243–3260, 2024.
- [26] N. M. Newmark and W. J. Hall, “Procedures and criteria for earthquake-resistant design,” in *Selected Papers By Nathan M. Newmark: Civil Engineering Classics*, 1973, pp. 829–872.
- [27] N. Newmark and W. Hall, *Earthquake Spectra And Desing*, vol. 1, no. 1. 1982.
- [28] “UBC. Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 1994, 1997.”
- [29] “ASCE. (2006). ‘Minimum design loads for buildings and other structures.’ ASCE/SEI 7-05, Reston, Va.”
- [30] FEMA-356 (2000) NEHRP prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Federal Emergency Management Agency, Washington D.C. .
- [31] K. Kawashima and K. Aizawa, “Modification of earthquake response spectra with respect to damping,” *Doboku Gakkai Ronbunshu*, vol. 1984, no. 344, pp. 351–355, 1984.
- [32] “UBC-94. Uniform Building Code. International Conference of Building Officials, Whittier, CA, 1994. 11.”
- [33] S. A. Ashour, *Elastic seismic response of buildings with supplemental damping*. University of Michigan, 1987.
- [34] J. Wu and R. D. Hanson, “Study of inelastic spectra with high damping,” *J. Struct. Eng.*, vol. 115, no. 6, pp. 1412–1431, 1989.
- [35] S. V Tolis and E. Faccioli, “Displacement design spectra,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 3, no. 01, pp. 107–125, 1999.
- [36] J. J. Bommer, A. S. Elnashai, and A. G. Weir, “Compatible acceleration and displacement spectra for seismic design codes,” in *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*, 2000, vol. 8.
- [37] G. U. della R. Italiana, “OPCM 3274 Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica.,” no. GU n. 105 del 8 maggio 2003, [Online]. Available: [https://rosa.uniroma1.it/rosa02/engineering\\_geology\\_environment/article/view/819/689](https://rosa.uniroma1.it/rosa02/engineering_geology_environment/article/view/819/689)
- [38] O. M. Ramirez, *Development and evaluation of simplified procedures for the analysis and design of buildings with passive energy dissipation systems*. State University of New York at Buffalo, 2001.
- [39] S. and K. N. Otani, “Japanese state of practice in design of seismically isolated buildings.,” in *The Fourth U.S.-Japan Workshop on Performance-Based Earthquake Engineering Methodology for Reinforced Concrete Building Structures*, Sep. 2002.
- [40] H. Kuramoto, “Seismic design codes for buildings in Japan,” *J. Disaster Res.*, vol. 1, no. 3, pp. 341–356, 2006.
- [41] M. J. N. Priestley, *Myths and fallacies in earthquake engineering, revisited: The ninth mallet Milne lecture*, 2003. IUSS press Pavia, Italy, 2003.
- [42] F. Zhou, L. Wenguang, and Z. Xu, “State of the art on applications, R&D and design

- rules for seismic isolation in China,” in Proceedings of the 8th World Seminar on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, 2003, pp. 6–10.
- [43] C. Code, “Seismic Design Code for Buildings (GB 50011-2001),” China Archit. Ind. Press. Beijing, China, 2001.
- [44] Y. Y. Lin and K. C. Chang, “Study on Damping Reduction Factor for Buildings under Earthquake Ground Motions,” *J. Struct. Eng.*, vol. 129, no. 2, 2003, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2003)129:2(206).
- [45] Y.-Y. Lin and K.-C. Chang, “Effects of Site Classes on Damping Reduction Factors,” *J. Struct. Eng.*, vol. 130, no. 11, pp. 1667–1675, 2004, doi: 10.1061/(asce)0733-9445(2004)130:11(1667).
- [46] G. M. Atkinson and D. M. Boore, “Ground-motion relations for eastern North America,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 85, no. 1, pp. 17–30, 1995.
- [47] G. M. Atkinson and J.-R. Pierre, “Ground-motion response spectra in eastern North America for different critical damping values,” *Seismol. Res. Lett.*, vol. 75, no. 4, pp. 541–545, 2004.
- [48] G. M. Calvi, M. J. N. Priestley, and M. J. Kowalsky, “Displacement-based seismic design of structures,” in *New Zealand conference on earthquake engineering*, 2007, vol. 2007.
- [49] W. I. Cameron and R. A. Green, “Damping correction factors for horizontal ground-motion response spectra,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 97, no. 3, pp. 934–960, 2007, doi: 10.1785/0120060034.
- [50] J. J. Bommer and R. Mendis, “Scaling of spectral displacement ordinates with damping ratios,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 34, no. 2, 2005, doi: 10.1002/eqe.414.
- [51] P. J. Stafford, R. Mendis, and J. J. Bommer, “Dependence of damping correction factors for response spectra on duration and numbers of cycles,” *J. Struct. Eng.*, vol. 134, no. 8, pp. 1364–1373, 2008.
- [52] D. Cardone, M. Dolce, and M. Rivelli, “Evaluation of reduction factors for high-damping design response spectra,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 7, no. 1, 2009, doi: 10.1007/s10518-008-9097-y.
- [53] G. D. Hatzigeorgiou, “Damping modification factors for SDOF systems subjected to near-fault, far-fault and artificial earthquakes,” *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 39, no. 11, 2010, doi: 10.1002/eqe.991.
- [54] A. K. Kazantzi et al., “This preprint is a PDF of a manuscript that has been accepted for Comparison of NGA-West2 GMPEs,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 18, no. 2, 2014.
- [55] C. P. Hayden, J. D. Bray, and N. A. Abrahamson, “Selection of Near-Fault Pulse Motions,” *J. Geotech. Geoenvironmental Eng.*, vol. 140, no. 7, 2014, doi: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001129.
- [56] A. Hao, D. Zhou, Y. Li, and H. Zhang, “Effects of moment magnitude, site conditions and closest distance on damping modification factors,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 31, no. 9, pp. 1232–1247, 2011.
- [57] P. Daneshvar and N. Bouaanani, “Damping modification factors for eastern Canada,” *J. Seismol.*, vol. 21, no. 6, 2017, doi: 10.1007/s10950-017-9678-9.
- [58] H. Zhang and Y. G. Zhao, “Damping Modification Factor of Acceleration Response Spectrum considering Seismological Effects,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 26, no. 16, 2022, doi: 10.1080/13632469.2021.1991521.
- [59] D. T. Hubbard and G. P. Mavroeidis, “Damping coefficients for near-fault ground motion response spectra,” *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 31, no. 3, pp. 401–417, 2011.
- [60] W. Pu, B. Huang, and E. K. Kabando, “Damping Modification Factors for Response Spectra of Pulse-like Near-fault Ground Motions,” *Xinan Jiaotong Daxue Xuebao/Journal Southwest Jiaotong Univ.*, vol. 52, no. 2, 2017, doi: 10.3969/j.issn.0258-

- 2724.2017.02.009.
- [61] J. Zhou, K. Tang, H. Wang, and X. Fang, "Influence of ground motion duration on damping reduction factor," *J. Earthq. Eng.*, vol. 18, no. 5, 2014, doi: 10.1080/13632469.2014.908152.
  - [62] S. Miranda, E. Miranda, and J. Carlos de la Llera, "The effect of spectral shape on damping modification factors," *Earthq. Spectra*, vol. 36, no. 4, 2020, doi: 10.1177/8755293020936691.
  - [63] J. Zhang and B. Huang, "Damping modification factor model for vertical acceleration response spectrum from subduction interface earthquake," *World Earthq. Eng.*, vol. 39, no. 2, 2023, doi: 10.19994/j.cnki.WEE.2023.0032.
  - [64] M. J. Liu, J. J. Hu, H. Shi, and J. Y. Tan, "DAMPING MODIFICATION FACTOR FOR VERTICAL ACCELERATION SPECTRUM FROM OFFSHORE GROUND MOTIONS," *Gongcheng Lixue/Engineering Mech.*, vol. 40, no. 4, 2023, doi: 10.6052/j.issn.1000-4750.2021.10.0788.
  - [65] M. Palermo, S. Silvestri, and T. Trombetti, "Stochastic-based damping reduction factors," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 80, 2016, doi: 10.1016/j.soildyn.2015.09.014.
  - [66] R. Greco, I. Vanzi, D. Lavorato, and B. Briseghella, "Seismic duration effect on damping reduction factor using random vibration theory," *Eng. Struct.*, vol. 179, 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2018.10.074.
  - [67] R. Greco, A. Fiore, and B. Briseghella, "Influence of soil type on damping reduction factor: A stochastic analysis based on peak theory," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 104, 2018, doi: 10.1016/j.soildyn.2017.10.020.
  - [68] A. Greco, I. Fiore, G. Occhipinti, S. Caddemi, D. Spina, and I. Calì, "An equivalent non-uniform beam-like model for dynamic analysis of multi-storey irregular buildings," *Appl. Sci.*, vol. 10, no. 9, p. 3212, 2020.
  - [69] G. M. Atkinson, "Earthquake time histories compatible with the 2005 National building code of Canada uniform hazard spectrum," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 36, no. 6, pp. 991–1000, 2009.
  - [70] D. Caicedo, S. Karimzadeh, V. Bernardo, and P. B. Lourenço, "Selection and scaling approaches of earthquake time-series for structural engineering applications: a state-of-the-art review," *Arch. Comput. Methods Eng.*, vol. 31, no. 3, pp. 1475–1505, 2024.
  - [71] E. I. Katsanos, A. G. Sextos, and G. D. Manolis, "Selection of earthquake ground motion records: A state-of-the-art review from a structural engineering perspective," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 30, no. 4, pp. 157–169, 2010.
  - [72] V. Graizer and E. Kalkan, "Prediction of spectral acceleration response ordinates based on PGA attenuation," *Earthq. Spectra*, vol. 25, no. 1, pp. 39–69, 2009.
  - [73] I. Iervolino and C. A. Cornell, "Record selection for nonlinear seismic analysis of structures," *Earthq. Spectra*, vol. 21, no. 3, pp. 685–713, 2005.
  - [74] J. Hancock and J. J. Bommer, "Using spectral matched records to explore the influence of strong-motion duration on inelastic structural response," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 27, no. 4, pp. 291–299, 2007.
  - [75] P. K. Malhotra, "Strong-motion records for site-specific analysis," *Earthq. Spectra*, vol. 19, no. 3, pp. 557–578, 2003.
  - [76] W. K. Tso, T. J. Zhu, and A. C. Heidebrecht, "Engineering implication of ground motion A/V ratio," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 11, no. 3, pp. 133–144, 1992.
  - [77] T. Sawada, K. Hirao, H. Yamamoto, and O. Tsujihara, "Relation between maximum amplitude ratio ( $a/v$ ,  $ad/v^2$ ) and spectral parameters of earthquake ground motion," in *Earthquake Engineering, Tenth World Conference*, 1992, vol. 2, p. 617.
  - [78] D. Michaud and P. Léger, "Ground motions selection and scaling for nonlinear dynamic analysis of structures located in Eastern North America," *Can. J. Civ. Eng.*, vol. 41, no. 3, pp. 232–244, 2014.

- [79] J. Hancock et al., “An improved method of matching response spectra of recorded earthquake ground motion using wavelets,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 10, no. spec01, pp. 67–89, 2006.
- [80] A. H. Kayhan, A. Demir, and M. Palanci, “Multi-functional solution model for spectrum compatible ground motion record selection using stochastic harmony search algorithm,” *Bull. Earthq. Eng.*, vol. 20, no. 12, pp. 6407–6440, 2022.
- [81] V. I. Fernandez-Davila and A. R. Mendo, “Damping modification factors for the design of seismic isolation systems in Peru,” *Earthq. Spectra*, vol. 36, no. 4, 2020, doi: 10.1177/8755293020926189.
- [82] J. X. Zhao et al., “Effects of earthquake source, path, and site conditions on damping modification factor for the response spectrum of the horizontal component from subduction earthquakes,” *Bull. Seismol. Soc. Am.*, vol. 109, no. 6, pp. 2594–2613, 2019.
- [83] A. Fiore and R. Greco, “Influence of Structural Damping Uncertainty on Damping Reduction Factor,” *J. Earthq. Eng.*, vol. 26, no. 4, 2022, doi: 10.1080/13632469.2020.1747573.
- [84] R. Haviland, *A study of the uncertainties in the fundamental translational periods and damping values for real buildings*. Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering ..., 1976.
- [85] A. Kareem and K. Gurley, “Damping in structures: its evaluation and treatment of uncertainty,” *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 59, no. 2–3, pp. 131–157, 1996.