

DISCUSSION SUR LE FACTEUR DE CORRECTION D'AMORTISSEMENT DES RPA 99 V2003

DISCUSSION ON DAMPING CORRECTION FACTOR OF RPA 99 V2003

Réception : 14 /07/2020

Acceptation : 28/10/2020

Publication : 02/01/2021

BENAHMED Baizid¹

¹Development Laboratory in Mechanics and Materials, University of Djelfa, Algeria,

e-mail : benahmed.tp@gmail.com

Résumé - Les spectres de réponse élastique à amortissement fort ont plusieurs applications importantes dans l'évaluation de la conception de structures parasismiques. Ils sont dérivés du spectre de référence pour un amortissement égal à 5% en utilisant le facteur de correction d'amortissement (DCF). La plupart des facteurs de correction de l'amortissement actuellement utilisés découlent de l'observation des effets de l'amortissement sur la réponse maximale élastique des systèmes SDOF soumis à des tremblements de terre. Ce facteur dépend de l'amortissement visqueux équivalent de la structure, de sa période de vibration, de la distance épacentrale, de l'amplitude du tremblement de terre (la magnitude et l'intensité sismique) et d'autres paramètres. Plusieurs expressions différentes des facteurs de correction de l'amortissement ont été proposées puis adoptées sous une forme quelque peu différente dans les codes sismiques. Les enregistrements sismiques utilisés dans cette étude sont sélectionnés à partir de la base PGMD (Peer Ground Motions Database) soutenu par le Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

Le but de ce travail est de présenter une comparaison entre la formulation de DCF des Règles Parasismiques Algériennes (RPA) et certaines formulations de la littérature. Les résultats ont été discutés en termes d'erreurs entre les résultats de chaque formulation et les résultats dénommés exacts obtenues en calculant la réponse à partir des enregistrements sismiques sélectionnés.

Mots - clés : Sélection des enregistrements sismiques, PGMD, Facteur de correction d'amortissement, Règles Parasismiques Algériennes.

Abstract-The high-damping elastic response spectra have several important applications in evaluating the design of earthquake resistant structures. They are derived from the reference spectrum for damping equal to 5% using the damping correction factor (DCF). Most damping reduction factors currently used were derived from observing the effects of damping on the maximum elastic response of SDOF systems subjected to earthquakes. This factor depends on the equivalent viscous damping of the structure, its vibration period, the epicentral distance, earthquake magnitude (the seismic magnitude and intensity) and other parameters, several different expressions of damping reduction factors were proposed and then adopted in a form somewhat different in seismic codes. The seismic records used in this study are selected from the Peer Ground Motions Database (PGMD) supported by the Pacific Earthquake Engineering Research Center (PEER).

The aim of this work is to present a comparison between the DCF formulation of the Algerian Seismic Regulations (RPA) and some formulations of the literature. The results were discussed in term of the errors between the results from each formulation and the results so-called exact obtained by calculating the response from the selected seismic records.

Keywords: Ground motions selection, PGMD, Damping correction factor, Algerian Seismic Regulations

1. Introduction

Le spectre de réponse est l'un des concepts les plus utilisés dans l'analyse des structures sous excitations sismiques. Il caractérise les effets du séisme sur les structures et est généralement représenté dans les codes de calculs sismiques sous la forme de spectre de réponse en accélération pour un taux d'amortissement critique $\xi = 5\%$. Cependant, en pratique, les structures civiles peuvent avoir des valeurs d'amortissement plus grandes que celle de 5%. Ces structures peuvent avoir des valeurs d'amortissement pouvant atteindre 20% ($\xi = 21.7\%$ pour le bâtiment de ITO Chu building de 8 étages [1], et Sanno building de 4 étage en BA de $\xi = 14.3\%$ [2]). Ces spectres sont généralement dérivés du spectre de référence à $\xi = 5\%$ par l'application d'un facteur qui est couramment appelé facteur de correction d'amortissement (DCF). De nombreuses équations différentes ont été proposées pour le DCF et certaines d'entre elles ont été également adoptées dans les dispositions et les directives de codes sismiques [3], [4]. Souvent, le DCF est représenté dans les codes en fonction du taux d'amortissement seulement. Cependant, diverses études ont montré que différents paramètres, par exemple, la période de vibration de la structure, la magnitude du tremblement de terre, les conditions du site et la distance épiscopale, peuvent affecter, à des degrés divers, le DCF.

Jusqu'à présent, plusieurs expressions du DCF ont été proposées et ont été ensuite adoptées, sous des formes quelque peu différentes, dans divers codes sismiques. La plupart des DCF actuellement utilisés ont été dérivés de l'observation des effets de l'amortissement sur la réponse maximale de systèmes SDOF élastiques soumis à des mouvements sismiques à la base. Ces facteurs sont aussi souvent utilisés pour l'analyse et la conception de structures avec systèmes de dissipation d'énergie ou d'isolation sismique. De nombreuses formulations de DCF ont été proposées et intégrées dans les codes sismiques. Quelques formulations issues de la littérature sont examinées dans le présent travail. La précision de chacune d'elles pour l'estimation de la réponse élastique maximale des structures avec $\xi > 5\%$ est évaluée en comparant les spectres exacts (calculés en utilisant les enregistrements sismiques sélectionnés) et les

spectres approximatifs de réponse (calculés en utilisant les formules du DCF proposées dans la littérature).

Différentes expressions du DCF ont été proposées telles que celles qui sont fonctions du taux d'amortissement [4]–[6], du taux d'amortissement et de la période [3], [7]–[10], et d'autres caractéristiques (exp.: durée, conditions de site, distance épiscopale, magnitudes) [7], [11], [12]. Parmi tous les paramètres considérés, le DCF est principalement affecté par le taux d'amortissement qui demeure l'une des caractéristiques structurales les plus importantes et pourtant la moins bien comprise, qui caractérise le comportement d'une structure sous l'action de charges dynamiques (séisme, vent, etc...). L'évaluation de l'amortissement dans les systèmes structuraux demeure un problème complexe du fait que des écarts significatifs dans son estimation peuvent être introduits du fait des différences dans le type des structures considérées, de la participation ou non d'éléments non structuraux, des variations sensibles des propriétés d'un même matériau utilisé et du niveau des secousses sismiques.

L'objectif de ce travail est de faire une comparaison de formulation du DCF du code parasismique algérien RPA99 V2003 avec une formulation développée dans un travail récent [13] destiné pour ce dernier et quelques autres formulations de littérature. Ce code utilise actuellement l'ancienne formule du code européen de construction parasismique, l'Eurocode 8 (EC8) (1994) qui a été remplacée dans l'EC8 (2004) par la formule proposée par Bommer et al., (2000).

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

2. Revue des DCF actuellement utilisés

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

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

$$DCF = \frac{SD(\xi, T)}{SD(5\%, T)} = \frac{PSA(\xi, T)}{PSA(5\%, T)} \quad (1)$$

Dans laquelle $SD(\xi, T)$ et $PSA(\xi, T)$ sont le déplacement spectral et la pseudo-accélération spectrale pour un coefficient d'amortissement ξ quelconque et $\xi = 5\%$, respectivement.

Le DCF a été étudié par de nombreux chercheurs et différentes expressions de DCF ont été proposées. Une des premières formulations du DCF est proposée par Newmark et Hall (1973, 1982) [14], [15]. Cette formule, constituée de trois relations chacune pour une plage de périodes de spectre de réponse, est divisée en 3 plages, de la vitesse constante, l'accélération constante et de déplacement constant. Leurs résultats ont inspiré de nombreux codes et normes sismiques. Les expressions proposées sont exprimées comme suit :

$$DCF = \begin{cases} 1.514 - 0.321 \times \ln(\xi) \\ 1.400 - 0.248 \times \ln(\xi) \\ 1.309 - 0.194 \times \ln(\xi) \end{cases} \quad (2)$$

Elles ont été obtenues à partir des estimations médianes de la réponse de déplacement maximal des systèmes de SDOF avec des taux d'amortissement inférieurs à 20%. Dans l'ATC-40 et la FEMA-273, le procédé approximatif développé par Newmark et Hall (1973) est en outre simplifié en négligeant la relation valable dans la région constante de déplacement du spectre. Dans la FEMA-273, en outre, les valeurs les plus conservatives sont adoptées pour des taux d'amortissement égaux ou supérieurs à 30%. Enfin, les relations de Newmark- Hall sont réduites à une seule valeur de DCF, correspondant à celle adoptée par la FEMA-273 dans les régions à vitesse constante du spectre.

Le DCF proposé par Ashour (1987) est exprimé comme suit :

$$DCF = \sqrt{\frac{0.05 \times (1 - e^{-\alpha \times \xi})}{\xi \times (1 - e^{-0.05 \times \alpha})}} \quad (3)$$

Où α est un coefficient allant de 18 à 65, selon les caractéristiques sismiques. Ces résultats ont été adoptés dans les UBC-94 et NEHRP-94

pour la conception de bâtiments avec systèmes de dissipation d'énergie passive.

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

$$DCF = \frac{\lambda(\xi, T)}{\lambda(5\%, T)} \quad (4)$$

Dans laquelle : λ est représenté par une relation logarithmique :

$$\begin{aligned} \lambda &= -0.349 \times \ln(0.095 \times \xi) && \text{pour } T = 0.1s \\ \lambda &= -0.547 \times \ln(0.417 \times \xi) && \text{pour } T = 0.5s \\ \lambda &= -0.471 \times \ln(0.524 \times \xi) && \text{pour } 0.5 < T < 3s \\ \lambda &= -0.478 \times \ln(0.475 \times \xi) && \text{pour } T = 3s \\ \lambda &= -0.291 \times \ln(0.0473 \times \xi) && \text{pour } T = 10s \end{aligned} \quad (5)$$

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

$$DCF = \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (6)$$

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

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

$$DCF = 4 \sqrt{\frac{10}{5 + \xi}} \quad (8)$$

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

$$DCF = \sqrt{\frac{15}{10 + \xi}} \quad (9)$$

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

$$DCF = \frac{1.5}{0.4 \times \xi + 1} + 0.5 \quad (10)$$

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

$$DCF = 1 + \frac{0.5 - \xi}{0.06 + 1.4 \times \xi} \quad (11)$$

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

$$DCF = \frac{1.5}{1 + 10 \times \xi} \quad (12)$$

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

Lin et al., (2005) et Lin, (2007), ont réalisé une série d'études sur le DCF. Ces études ont été axées sur la différenciation de l'effet d'amortissement sur les spectres en déplacement et en accélération. Dans ces études, l'effet du site sur les valeurs de DCF a été également étudié. Dans une étude antérieure de Lin et Chang, (2003), une analyse statistique des valeurs de DCF, compte tenu des effets des conditions du site, a été effectuée en utilisant 1037 mouvements de sol enregistrés sur trois classes différentes de sites (roches, sols très denses et raides). Les expressions obtenues à partir d'une analyse de régression non linéaire utilisant la méthode de Levenberg-Marquardt sont présentées afin d'estimer la DCF dérivée des réponses en déplacement et en accélération. La formule proposée peut s'écrire :

$$DCF = 1 + \frac{(1.303 + 0.436 \ln(\xi)) T^{0.80}}{(T + 1)^{0.65}} \quad (13)$$

Cardone et al., (2008) ont examiné la précision des principales formulations de DCF incluses dans les codes de conception, soulignant que pour les séismes uniques, les formulations actuelles peuvent être considérées comme raisonnablement exactes seulement pour des taux d'amortissement inférieurs à 10%. Pour les spectres de réponse représentant des groupes de tremblements de terre, la précision de l'estimation dépend fortement de la formulation du DCF sélectionné et de la période considérée. Hatzigeorgiou, (2010) [16] a proposé une nouvelle méthode d'évaluation de DCF prenant en compte l'influence des conditions du sol et du type de mouvement du sol (utilisation

d'accélérogrammes naturels ou artificiels, tremblements de terre proches ou lointains), outre le rapport d'amortissement visqueux et la période de vibration:

$$DCF(\xi, T) = 1 + (\xi - 5) \cdot \left[1 + c_1 \cdot \ln(\xi) + c_2 \cdot (\ln(\xi))^2 \right] \cdot \left[c_3 + c_4 \cdot \ln(T) + c_5 \cdot (\ln(T))^2 \right] \quad (14)$$

Les valeurs des coefficients-ci sont données en référence [16] en fonction du type de sol et du type de mouvement sismique.

Récemment, Palermo et al., (2016) [17] ont présenté dans leur étude des formulations du DCF basées sur les fonctions de densité spectrale de puissance, les DCF sont dérivés et comparés aux principales formules disponibles dans la littérature scientifique. Le mouvement du sol de surface est modélisé avec la densité spectrale de puissance de Kanai-Tajimi, c'est-à-dire comme un "bruit blanc idéal" au niveau du substratum rocheux filtré à travers le dépôt de sol. Enfin, des formules simples pour l'estimation du DCF pour le rapport entre la période prédominante du sol et la période fondamentale de la structure ont été proposées :

$$DCF = \left(\frac{10}{5 + \xi} \right)^\chi \quad (15)$$

Où χ est une constante dépendant du rapport k entre la fréquence SDOF et la fréquence prédominante du sol.

Par exemple, les courbes proposées pour DCF pour 13 valeurs de χ de 0,2 à 0,8 sont présentées dans le travail de Palermo et al., [17].

Les effets des incertitudes d'amortissement inhérentes sur le DCF ont été étudiés pour la première fois dans [18] où les incertitudes d'amortissement sont modélisées comme une distribution de probabilité log-normale. Dans cette étude, une nouvelle formulation DCF capable de tenir compte des incertitudes dans l'estimation de l'amortissement est proposée pour une incertitude sur l'amortissement avec un coefficient de variation $Cv\xi = 20\%$:

$$DCF = 0.941 + \frac{0.009}{\xi} + 0.028 \times \frac{\xi}{T} - 1.335 \times \xi \quad (16)$$

L'importance du sujet représente la principale motivation pour rechercher une méthode capable de prendre en compte les incertitudes d'amortissement dans l'analyse des spectres de réponse avec DCF. Dans ce travail, dans un premier temps, l'attention est focalisée sur le développement d'une méthode d'estimation des valeurs DCF tenant compte des incertitudes d'amortissement inhérentes, exploitant le concept de Réseaux de Neurones Artificiels (ANN), sans imposer aucune formulation. L'ANN est utilisée pour la génération artificielle de valeurs de DCF en intégrant explicitement les incertitudes inhérentes aux valeurs d'amortissement.

L'ANN a été utilisé dans [19], [20] pour l'estimation des valeurs DCF pour les systèmes SDOF déterministes. Les incertitudes sont également traitées dans [18] et une formulation a été proposée pour un niveau donné d'incertitude d'amortissement ($C_{v\xi} = 20\%$) en utilisant une régression non linéaire. Des études récentes [21], [22] ont utilisé une approche stochastique pour étudier l'effet du type de sol et de la durée des mouvements forts sur les DCF. Greco et al., [22] ont proposé une formulation pour estimer les valeurs des DCF en tenant compte de la durée effective du mouvement sismique, du type de sol, du taux d'amortissement et de la période naturelle de la structure.

Benahmed [13] a proposé une formulation DCF à travers une régression non linéaire pour le règlement parasismique algérien (RPA 99 v 2003) (Eq.12), qui contient actuellement l'ancienne formule EC8 (1994). Les mouvements du sol utilisés dans cette étude sont sélectionnés à partir de la base de données mondiale des mouvements du sol PEER, compte tenu de la classification des sols des RPA.

$$DCF = 0.582 + 0.418 (12.279 - T)^{(-3.9(\zeta - 0.05))} \quad (17)$$

La formulation proposée tient compte de la spécificité du code algérien en termes de classification des sols et du spectre de réponse

des RPA et donne des résultats précis pour l'estimation des DCF. Par conséquent, l'expression ci-dessus est recommandée pour les RPA dans l'estimation du spectre de réponse à amortissement supérieure à 5 %.

3. Sélection des enregistrements sismiques utilisés

La sélection des enregistrements sismiques est une étape essentielle pour une analyse temporelle. Ils peuvent être sélectionnés de la base de données européennes, californiennes et japonaises, accessibles en ligne sur les sites Internet suivants : www.isesd.cv.ic.ac.uk, www.quake.ca.gov, www.peer.berkeley.edu et www.kik.bosai.go.jp.

Une des bases les plus grandes et les plus utilisées est celle de PEER (PGMD-Peer Ground Motions Data base). Elle permet la recherche de suites d'enregistrements sismiques pour des applications sur les calculs structurels et constitue une méthode efficace de sélection dans la plupart des cas. Cette base présente une application en ligne qui permet aux utilisateurs de sélectionner des enregistrements sismiques correspondant aux critères de sélection prédéfinis par l'utilisateur (magnitude, type de sol, distance épacentrale et vitesse des ondes de cisaillement V_{s30}).

Des suites des enregistrements sismiques naturels ont été sélectionnés à partir de la base PGMD, ayant les caractéristiques suivantes : (i) magnitude comprise entre 5 et 8, (ii) distance épacentrale entre 0.1 et 270 km. Quatre (04) suites contenant 7 enregistrements chacune pour les 4 types de sols selon la classification prescrite par les RPA 99 v2003 ont été sélectionnées. Elles sont données dans les tableaux 1-4, avec les paramètres associés.

Le critère utilisé dans cette étude qui permet la sélection des enregistrements sismiques est la vitesse des ondes de cisaillement V_{s30} comme prescrite dans les RPA 99 V2003.

Ces règles définissent le sol S1 comme le sol où la vitesse des ondes de cisaillement est supérieure à 800 m/s, S2 entre 400 et 800 m/s, S3 entre 200 et 400 m/s et S4 < 200 m/s.

Tableau 1 : Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S1**Table 1:** Seismic records obtained by PGMD-tool for soil S1

Séisme	Année	Station	Magnitude	Distance épicentrale (km)	Vitesse des ondes S Vs30 (m/s)
Norcia, Italy	1979	Bevagna	5.90	31	1000
Irpinia, Italy-01	1980	Arienzo	6.90	53	1000
Morgan Hill	1984	Gilroy Array #1	6.19	14.9	1428
Kocaeli, Turkey	1999	Izmit	7.51	7.2	811
Chi-Chi, Taiwan	1999	HWA003	7.62	56	1526
Northridge-06	1994	Anacapa Island	5.28	83	822
Denali, Alaska	2002	Carlo (temp)	7.90	51	964

Tableau 2 : Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S2**Table 2:** Seismic records obtained by PGMD-tool for soil S2

Séisme	Année	Station	Magnitude	Distance épicentrale (km)	Vitesse des ondes S Vs30 (m/s)
Little Skull Mtn,NV	1992	Station #8-Death Valley Scotties Castle	5.65	98	660
Chi-Chi, Taiwan-02	1999	CHY024	5.9	39	428
Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array #12	6.19	17.6	409
Kobe, Japan	1995	TOT	6.9	120	609
Duzce, Turkey	1999	Arcelik	7.14	131	523
Kocaeli, Turkey	1999	Arcelik	7.51	13.5	523
Denali, Alaska	2002	Anchorage - K2-03	7.9	264	474

Tableau 3 : Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S3**Table 3:** Seismic records obtained by PGMD-tool for soil S3

Séisme	Année	Station	Magnitude	Distance épicentrale (km)	Vitesse des ondes S Vs30 (m/s)
Imperial Valley-06	1979	Aeropuerto Mexicali	6.53	0.3	275
Coyote Lake	1979	Gilroy Array #2	5.74	9	271
Parkfield	1966	Cholame - Shandon Array #8	6.19	12.9	257
Lytle Creek	1970	Colton - So Cal Edison	5.33	30	302
San Fernando	1971	Whittier Narrows Dam	6.61	39	299
Kern County	1952	LA - Hollywood Stor FF	7.36	118	316
Borrego Mtn	1968	LA - Hollywood Stor FF	6.63	222	316

Tableau 4 : Enregistrements sismiques obtenus par PGMD-tool pour le sol S4**Table 4:** Seismic records obtained by PGMD-tool for soil S4

Séisme	Année	Station	Magnitude	Distance épicentrale (km)	Vitesse des ondes S Vs30 (m/s)
San Fernando	1971	Cholame - Shandon Array #2	6.61	218	185
Imperial Valley-07	1979	El Centro Array #3	5.01	16.3	163
Whittier Narrows-01	1987	Carson - Water St	5.99	30	161
Superstition Hills-02	1987	Westmorland Fire Sta	6.54	13.0	194
Northridge-01	1994	Carson - Water St	6.69	50	161
Kocaeli, Turkey	1999	Ambarli	7.51	70	175
Chi-Chi, Taiwan	1999	CHY012	7.62	59	198

4. Résultats

La figure 1 montre la tendance des facteurs de réduction les plus importants en fonction du taux d'amortissement pour une période égale à 01 seconde. Selon la figure 1, les valeurs les plus faibles de DCF sont celles fournies par le code sismique japonais, tandis que les plus grandes, c'est-à-dire les plus conservatives, sont celles obtenues à partir de l'équation de Lin et al., (2003). Les RPA 99 v2003 adoptent une des équations qui présente des valeurs de DCF les plus petites c'est-à-dire, la plus non conservative.

La formule proposée par [13] (Benahmed, 2018) pour les RPA, présente des valeurs conservatives plus petites que les valeurs obtenues à partir de l'équation de Lin et al. *

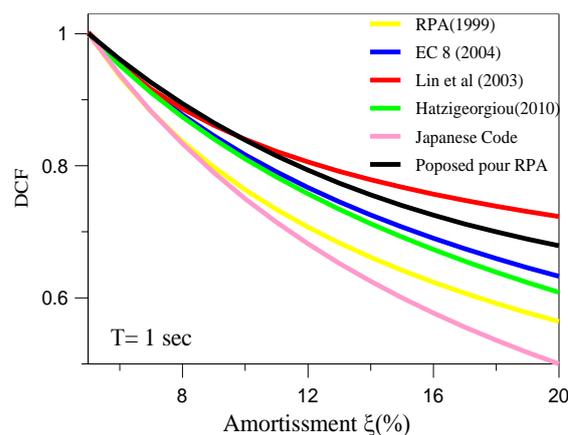


Figure 1 : Tendance de divers DCF en fonction de l'amortissement pour une période de structure égale à 01 sec.

Figure 1: Trend of various DCF as a function of damping for a period of building equal to 1 sec.

Dans tous les cas, les différences significatives entre les équations disponibles soulignent l'importance du problème.

4.1 Discussion des effets de condition de site

La classification des sites est généralement incluse dans les dispositions de conception sismique. Les spectres de conception élastique linéaire sont significativement différents d'une classe de sites à l'autre. Par conséquent, il est intéressant de savoir si les DCF utilisés dans la conception dépendent également des caractéristiques des sols.

À cette fin, les enregistrements sismiques dans cette étude sont sélectionnés sur la base de quatre groupes de sol décrits dans les RPA selon les vitesses des ondes S Vs30 (m/s) : sol rocheux (S1), sol ferme (S2), sol mou (S3) et sol très mou (S4). Les enregistrements sélectionnés ont été utilisés pour estimer les spectres de réponse avec quatre valeurs du taux d'amortissement (7.5, 10, 15 et 20%).

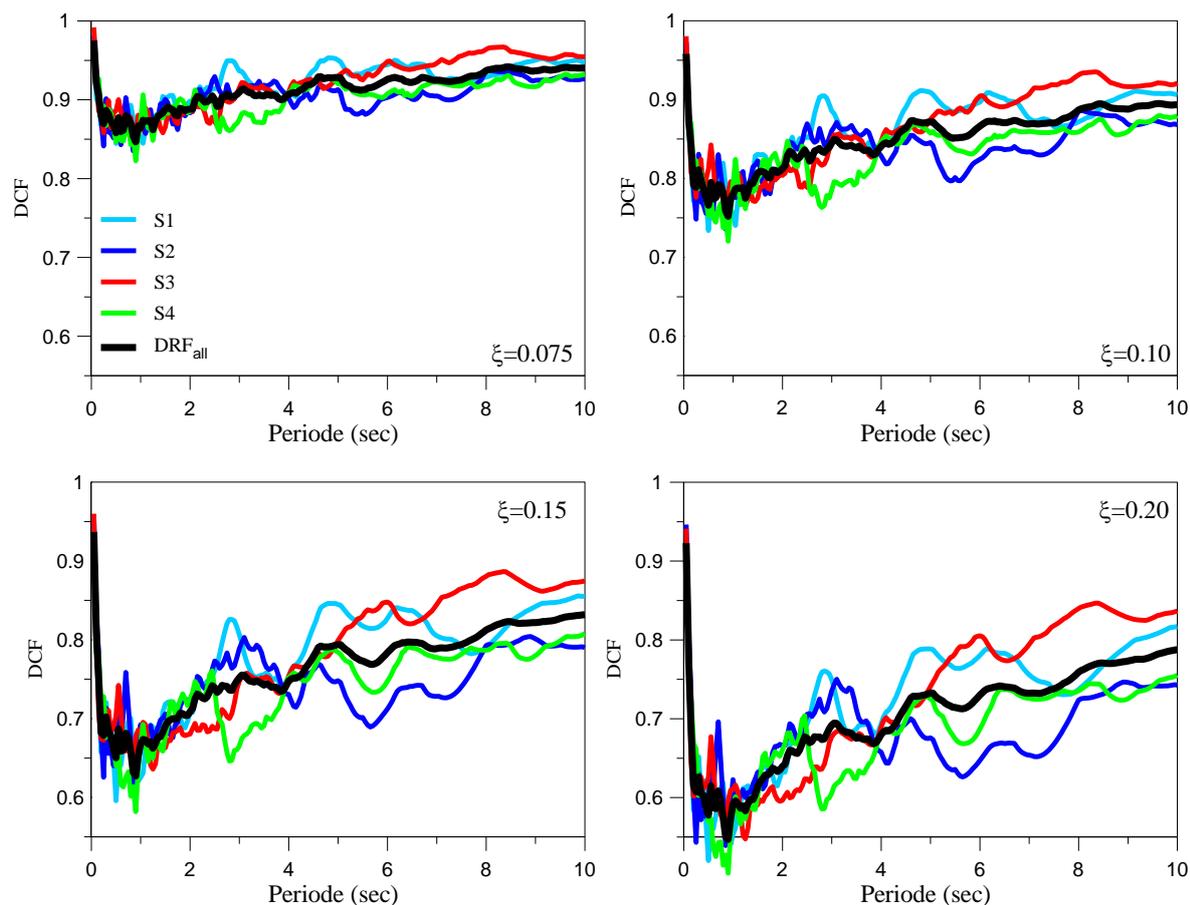


Figure 2 : Valeurs obtenues de DCF pour les quatre types de sol
Figure 2: Values obtained from DCF for the four soil types

Par la suite, les valeurs de DCF sont calculées pour tous les enregistrements pour la plage de période d'intérêt dans la conception sismique des structures.

La figure 2 montre les courbes du DCF moyen dérivé des spectres de réponse pour les enregistrements sismiques présentés. Il ressort de ces courbes que le DCF calculé à partir des tremblements de terre enregistrés sur le site de classe S4 est généralement légèrement supérieur à celui calculé à partir du mouvement du sol enregistré sur d'autres classes de sites. La forme des courbes des DCF pour toutes les classes de sols est très similaire, quel que soit le taux d'amortissement.

La moyenne des valeurs du DCF moyen présentées pour chaque type de sols est aussi présentée (DCF_{all}). La valeur de DCF_{all} peut être considérée comme une valeur de DCF qui

néglige l'effet de classe du sol. Il ressort clairement de la figure 2 que l'influence du type de sol sur les DCF augmente à mesure que le rapport d'amortissement est élevé. L'erreur maximale entre le DCF_{all} et le DCF_{Si} estimée pour chaque site est de 19% pour un taux d'amortissement $\xi = 20\%$ estimé pour le sol S4. Cette erreur ne dépasse pas 14% pour les sols S1, S2 et S3. Cette valeur d'erreur est considérée comme une valeur de pic et n'est obtenue que pour certaines périodes. La valeur moyenne de cette erreur pour l'ensemble du spectre ne dépasse pas 7% pour $\xi = 20\%$.

4.2 Comparaison entre différentes formulations de DCF

Dans cette section, une comparaison entre plusieurs formulations de DCF est présentée.

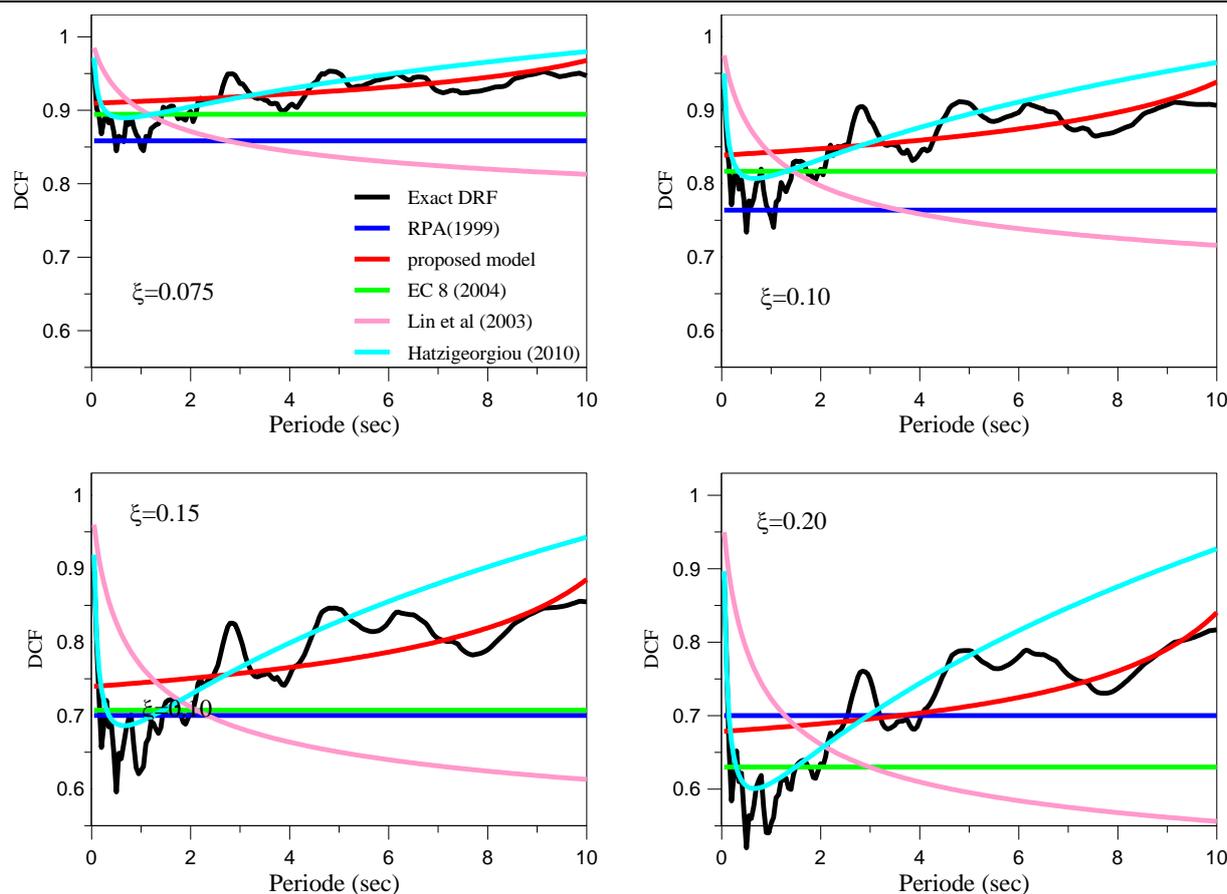


Figure 3 : Comparaison entre différentes formulations de DCF

Figure 3: Comparison between different DCF formulations

Les formulations utilisées sont : i) la formule présentée dans les RPA 99 v 2003, ii) la formule proposée par (Benahmed, 2018) pour les RPA, iii) les valeurs de DCF exactes dérivées dans cette étude à la base des enregistrements sélectionnés et quelques formulations de DCF de la littérature, et cela

pour différentes valeurs de ξ (7.5, 10, 15 et 20%). Les résultats de cette étude sont présentés sur la figure 3. Les formulations de littérature de DCF considérés ici sont ceux proposés par : (i) Bommer et al. (2000), (ii) Lin et Chang (2003), (iii) Hatzigeorgiou (2010) et (iv) Wu et Hanson(1989).

Tableau 5 : Erreur relative (%) entre les résultats exacts et quelques formulations de la littérature.

Table 5: Relative error (%) between the exact results and some literature formulations.

T	RPA 99		Proposée pour RPA		Bommer et al (2000)		Lin et al (2003)		Hatzigeorgiou (2010)	
	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$	$\xi=0.1$	$\xi=0.2$
0.5	-21.60	-26.30	-10.70	-30.30	-13.70	-40.40	4.70	6.90	2.30	1.40
1	1.30	21.00	10.50	19.10	7.70	12.20	10.20	23.50	7.00	9.10
2	-7.30	9.40	3.30	7.90	-0.30	-0.70	-2.80	4.00	1.60	3.10
3	-15.90	-7.10	-3.90	-7.80	-8.50	-19.00	-14.50	-19.10	-3.50	-6.90
6	-17.40	-11.50	-2.60	-7.70	-9.80	-23.80	-21.40	-33.60	1.60	4.30
10	-18.70	-16.70	3.40	2.80	-11.00	-29.70	-26.60	-46.90	6.00	11.90

Dans le tableau 5 sont consignées les valeurs des erreurs relatives des valeurs obtenues par

les diverses formulations du DCF (proposée, littérature et RPA) en utilisant les valeurs

respectives du DCF exactes comme référence. Les résultats sont présentés pour six valeurs de la période T (0.5, 1, 2, 3, 6 et 10 sec.) et pour deux valeurs de ξ (10% et 20%).

Selon la figure 3, les valeurs les plus importantes du DCF, c.-à-d. les plus conservatives, sont celles obtenues à partir de la formulation de Hatzigeorgiou alors que celles obtenues pour le RPA sont les plus basses, c.-à-d. les plus non-conservatives, pour $\xi < 12,2\%$. Pour $\xi > 12,2\%$, la valeur du DCF obtenue pour les RPA devient indépendante de ξ et a une valeur constante égale à 0,7, alors que le DCF pour Bommer et al. (utilisée par l'EC 8) devient le modèle le plus non-conservatif. Les valeurs obtenues par le modèle proposé pour les RPA est celui qui est en bonne concordance avec les valeurs du DCF exactes tout en restant conservatif pour l'ensemble des couples de valeurs (ξ , T) étudiés.

Les observations faites ci-dessus sont appuyées par le tableau 5 qui montre que l'erreur entre la formule du RPA et les résultats exacts peut atteindre 17,64 % pour $T = 10$ sec., pour $T = 3$ sec. cette erreur atteint 11,11 % pour $\xi < 10\%$. Ainsi, dans le cas considéré, le RPA sous-estime les amplitudes du spectre de réponse ce qui a pour conséquence de mettre en danger, vis-à-vis du séisme, les structures conçues en utilisant ces valeurs.

Le modèle proposé présente des valeurs du DCF supérieures aux résultats exacts pour la majorité des périodes et l'erreur relative atteint 13 %. Dans le cas contraire, où le modèle proposé présente des valeurs du DCF inférieures aux valeurs exactes, l'erreur ne dépasse pas 2 %. Ce modèle est en bonne adéquation avec les valeurs du DCF exactes.

Le modèle de Lin et al. présente un bon prédicteur du DCF pour $T < 6$ secondes, mais néanmoins, il sous-estime le spectre de réponse pour les valeurs de périodes $T > 6$ secondes.

La formulation de Bommer et al. présente des valeurs DCF plus proches des résultats exacts que la formule de RPA (ancienne formule EC8). Cette bonne approximation est perdue pour ξ supérieure à 15 %, le modèle conduit à une grande sous-estimation du spectre de réponse (modèle non-conservatif). Cette erreur

a des valeurs supérieures à 10 % et peut atteindre 23% pour $T=10$ secondes. La formulation de Hatzigeorgiou présente des valeurs d'erreurs qui peuvent atteindre 30 % pour $T = 1$ seconde. Cette erreur est réduite lorsque T est proche de $T= 10$ secondes. Les différences importantes entre les différentes formulations examinées montrent l'importance du problème.

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

5. Conclusion

Sur la base des résultats de ce travail, on peut tirer les conclusions suivantes :

- Les valeurs les plus importantes du DCF, c.-à-d. les plus conservatives, sont celles obtenues à partir de la formulation de Hatzigeorgiou. Bien que, les plus basses, c.-à-d. les plus non-conservatives, soient celles fournies par les RPA 99 ;
- Pour $\xi > 12,2\%$, la valeur de DCF des RPA devient indépendante de ξ et a une valeur constante égale à 0,7, alors que le DCF pour Bommer et al. (EC 8) devient le modèle le plus non-conservatif ;
- Le modèle proposé par Benahmed (2018) pour les RPA présente des valeurs de DCF supérieures aux résultats exacts pour la majorité des périodes et l'erreur relative peut atteindre 13 %. Dans le cas contraire, où le modèle proposé présente des valeurs de DCF inférieures aux valeurs exactes, l'erreur ne dépasse pas 2 %.

La formulation proposée a tenu compte de la spécificité de l'Algérie en termes de code sur la classification des sols et du spectre de réponse des RPA. Elle donne de très bons résultats pour l'estimation des facteurs de réduction de l'amortissement pour les RPA. Par conséquent, il est recommandé d'utiliser cette équation des RPA pour l'estimation des spectres de réponse pour des valeurs de ξ supérieures à 5 %,

Il a été montré que l'approche proposée est celle qui s'accorde le mieux avec les valeurs

exactes (prises comme références) tout en garantissant le meilleur degré de sécurité par rapport aux autres approches ;

- Les différences importantes entre les différentes formulations examinées montrent l'importance du problème.

Références

- [1] Takeuchi, M. and Nakagawa, K., "vibrational characteristic of buildings" Proceedings of The Second World Conference on Earthquake Engineering, Tokyo, Japan 1960.
- [2] R. W. Haviland, "A study of the uncertainties in the fundamental translational periods and damping values for real buildings," *Res. Rep. No. 5, Pub. No. R76-12, Dept Civ. Engng, MIT, Cambridge, MA*, p. 115, 1976.
- [3] 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, pp. 206–214, Feb. 2003.
- [4] J. J. Bommer and A. S. Elnashai, "Displacement Spectra for Seismic Design," *J. Earthq. Eng.*, vol. 3, no. 1, pp. 1–32, 1999.
- [5] S. V. Tolis, "DISPLACEMENT DESIGN SPECTRA," *J. Earthq. Eng.*, vol. 3, no. 1, p. 107, 1999.
- [6] S. Ashour, "Elastic seismic response of buildings with supplemental damping," University of Michigan., 1987.
- [7] 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.
- [8] Y. Y. Lin, E. Miranda, and K. C. Chang, "Evaluation of damping reduction factors for estimating elastic response of structures with high damping," *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, vol. 34, no. 11, pp. 1427–1443, 2005.
- [9] J. Wu and R. D. Hanson, "Study of Inelastic Spectra with High Damping," *J. Struct. Eng.*, vol. 115, no. 6, pp. 1412–1431, 1989.
- [10] F. Naeim and C. A. Kircher, "On the damping adjustment factors for earthquake response spectra," *Struct. Des. Tall Build.*, vol. 10, no. 5, pp. 361–369, 2001.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] B. Benahmed, "Formulation of damping reduction factor for the Algerian seismic code," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 19, no. 4, pp. 375–385, Jun. 2018.
- [14] Newmark N.M., Hall W.J. (1973) Seismic design criteria for nuclear reactor facilities. Report No. 46, Building Practices for Disaster Mitigation, National Bureau of Standards, US Department of Commerce.
- [15] Newmark N.M., Hall W.J. (1982) Earthquake spectra and design EERI monograph series. Earth Eng Research Inst, Oakland, CA
- [16] Hatzigeorgiou G.D., Damping modification factors for SDOF systems subjected to near-fault, far-fault and artificial earthquakes. *Earthquake Eng. Struct. Dynam.* 2010;39:1239–58.
- [17] M. Palermo, S. Silvestri, and T. Trombetti, "Stochastic-based damping reduction factors," *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, vol. 80, pp. 168–176, 2016.
- [18] B. Benahmed, M. Hamoutene, and D. Cardone, "Effects of damping uncertainties on damping reduction factors," *Period. Polytech. Civ. Eng.*, vol. 61, no. 2, pp. 341–350, 2017.
- [19] B. Benahmed, M. Hamoutene, B. Tiliouine, and M. Badaoui, "Prediction of the damping reduction factor by neural networks," *Asian J. Civ. Eng.*, vol. 17, no. 2, 2016.



[20] B. Benahmed and M. Hamoutene, “Use of the Artificial Neural Networks to Estimate the DRF for Eurocode 8,” *Period. Polytech. Civ. Eng.*, Jan. 2018.

[21] 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, no. October 2017, pp. 365–368, 2018.

[22] R. Greco, I. Vanzi, D. Lavorato, and B. Briseghella, “Seismic duration effect on damping reduction factor using random vibration theory,” *Eng. Struct.*, vol. 179, no. October 2018, pp. 296–309, 2019.