

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



THÈSE

Présentée pour l'obtention du **grade de DOCTORAT LMD**

En : Génie Civil

Spécialité : Géotechnique et Risque Sismique

Par : DIF Zouheyr

Sujet

**Étude de la variation de la chute de contrainte sismique
par des données synthétiques et réelles**

Soutenue, le 17/11/2021, devant le jury composé de :

M. HAMDAOUI Karim	Professeur	Univ-Tlemcen	Président
M. DERRAS Boumédiène	Professeur	Univ-Saïda	Directeur de thèse
M. MATALLAH Mohammed	Professeur	Univ-Tlemcen	Co- Directeur de thèse
M. BOURAHLA Nouredine	Professeur	ENP-Alger	Examineur
M. RAHAL Driss Djaouad	Professeur	USTO-Oran	Examineur
M. COTTON Fabrice	Professeur	GFZ-Potsdam, Allemagne	Invité

REMERCIEMENTS

Toute ma parfaite gratitude et remerciement à Allah le plus puissant qui m'a donné la force, le courage et la volonté pour élaborer ce travail.

Ce travail a été réalisé au sein du laboratoire RISAM de la faculté de Technologie de l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen. Il n'aurait pas pu être mené à bien sans l'aide des personnes à qui je voudrais adresser tous mes remerciements.

Mes premiers remerciements vont à mon directeur de thèse, le professeur DERRAS Boumédiène, pour son assistance permanente, ses précieux conseils, ses encouragements renouvelés, et surtout ses efforts consentis à la correction de ce manuscrit de thèse.

Je tiens aussi à remercier mon co-directeur, le professeur MATALLAH Mohammed, pour ses conseils et ses encouragements.

Je remercie aussi vivement le professeur COTTON Fabrice de GFZ-Potsdam, Allemagne, qui était l'initiateur de ce sujet de thèse, pour ses précieuses idées et pour son aide le long de la rédaction, la soumission et la révision de l'article. Je le remercie aussi d'avoir accepté d'assister à ma soutenance de thèse.

J'exprime toute ma reconnaissance et ma gratitude au professeur HAMDAOUI Karim, chef du département de génie civil, Université de Tlemcen, d'avoir accepté d'honorer la présidence du jury.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements, au professeur BOURAHLA Nouredine de l'École Nationale Polytechnique d'Alger, et au professeur RAHAL Driss Djaouad de l'Université d'Oran, pour l'intérêt qu'ils ont bien voulu porter à ce travail en acceptant de l'examiner.

Je tiens à remercier tous mes collègues du laboratoire RISAM.

Un grand merci à ma chère famille pour son soutien constant, sa patience et ses encouragements tout au long de mes études.

Merci à tous et à toutes

RÉSUMÉ

La chute de contrainte sismique ($\Delta\sigma$) est un paramètre de source très important lors de l'évaluation de l'aléa sismique. La question de dépendance du paramètre de la chute de contrainte avec la magnitude (M) est très discutée. Les mesures de la fréquence coin (f_c) dont sont issues les estimations de $\Delta\sigma$ restent cependant entachées de fortes incertitudes. L'objectif de cette thèse est d'étudier le $\Delta\sigma$ et sa dépendance avec la magnitude. Cette étude est effectuée en analysant la variation des mesures d'intensité du mouvement sismique (GMIMs) avec la magnitude. Les GMIMs sont obtenues de trois façons : Par l'approche stochastique en considérant le modèle point-source. Par des équations de prédiction du mouvement sismique (GMPEs) classiques de nouvelle génération. Et, à partir d'une approche neuro-floue (ANFIS) issue de l'apprentissage automatique (machine Learning).

Une confrontation entre les trois modèles issus des trois approches suscitées, est effectuée pour savoir quel est le modèle le plus adéquat (qui converge vers les données enregistrées). Finalement, un modèle du paramètre de chute de contrainte sismique est proposé.

Mots clés : Chute de contrainte, fréquence coin, mouvement sismique, magnitude, méthode stochastique, machine Learning, ANFIS.

ملخص

يعتبر سقوط الإجهاد الزلزالي ($\Delta\sigma$) معامل مصدر مهم للغاية عند تقييم الخطر الزلزالي. إن مسألة قياس سقوط الإجهاد على قوة الزلزال (M) محل نقاش. ومع ذلك، تظل قياسات تردد الانعطاف (fc) الذي تُشتق منها تقديرات سقوط الإجهاد محل لبس. الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة $\Delta\sigma$ واعتمادها على قوة الزلزال. يتم إجراء هذه الدراسة من خلال تحليل تباين قياسات شدة الحركة الزلزالية (GMIMS) مع القوة الزلزالية. يتم الحصول على GMIMS في هذا العمل بثلاث طرق: من خلال النموذج العشوائي مع الأخذ في الاعتبار نموذج المصدر النقطي. بواسطة الجيل الجديد من معادلات التنبؤ بالحركة الزلزالية الكلاسيكية (GMPEs). وباستخدام طريقة التشويش العصبي (ANFIS) الناتجة عن التعلم الآلي. يتم إجراء مقارنة بين الأنواع الثلاثة من النماذج لمعرفة النموذج الأكثر ملاءمة (الذي يتقارب مع البيانات المسجلة). أخيراً، تم اقتراح نموذج لمعامل سقوط الإجهاد الزلزالي.

الكلمات المفتاحية: انخفاض الإجهاد الزلزالي، تردد القياس، الحركة الزلزالية، الحجم الزلزالي، الطريقة العشوائية، التعلم الآلي، ANFIS.

ABSTRACT

The seismic stress drop ($\Delta\sigma$) is a very important source parameter in the seismic hazard. The issue of the dependence of the stress drop on the magnitude (M) is much debated. The measurements of the corner frequency (f_c) from which the estimates of $\Delta\sigma$ are derived contains high uncertainties. The aim of this thesis is to study $\Delta\sigma$ and its dependence on magnitude. This work is performed by analyzing the variation of ground motion intensity measurements (GMIMs) with magnitude. The GMIMs are obtained through three ways: By the stochastic method with the point-source model. By new generation classical ground motion prediction equations (GMPEs). And, using a neuro-fuzzy method (ANFIS) resulting from machine learning. A comparison between the three types of models is carried out to find out which model is the most adequate (which converges towards the measured data). Finally, a model of the seismic stress drop parameter is proposed.

Keywords: Stress drop, corner frequency, ground motion, magnitude, stochastic method, machine learning, ANFIS.

SOMMAIRE DE THÈSE

REMERCIEMENTS	I
RÉSUMÉ.....	II
ملخص	III
ABSTRACT	IV
LISTE DES FIGURES	IX
LISTE DES TABLEAUX.....	XV
LISTE DES ABRÉVIATIONS	XVI
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
CHAPITRE I. APERÇU SUR DES APPROCHES D’ESTIMATION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	4
1 INTRODUCTION.....	5
2 APPROCHE STOCHASTIQUE (BOORE, 2003).....	5
2.1 INTRODUCTION	5
2.2 ÉTAT DE L’ART	5
2.3 DÉMARCHE DE LA MÉTHODE STOCHASTIQUE	8
2.3.1 L’effet de source $E(M_0, f)$	9
2.3.2 L’effet de propagation d’onde [$P(R, f)$] et la durée.....	12
2.3.3 L’effet de site $G(f)$	15
2.3.4 L’effet de type du mouvement $I(f)$	19
2.4 OBTENTION DU MOUVEMENT SISMIQUE	20
2.4.1 Simulations des séries de temps	20
2.4.2 Mouvements à partir de la théorie de la vibration aléatoire	22
2.4.3 Comparaison des simulations du mouvement sismique	24
3 APPROCHE EMPIRIQUE	25
3.1 INTRODUCTION	25
3.2 ÉQUATIONS DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	25
3.2.1 Exemple d’une équation de prédiction du mouvement sismique : Boore et al. (2014)	26
3.2.2 Exemple d’une base de données : NGA-West 2.....	28

4	APPROCHE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (MACHINE LEARNING)	30
4.1	INTRODUCTION	30
4.2	MODÈLE DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE : GMPM-ANN	30
4.2.1	Exemple d'un modèle de prédiction du mouvement sismique basé sur l'ANN : Derras, Bard and Cotton (2016)	32
4.3	MODÈLE DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE : GMPM-ANFIS	32
4.3.1	Exemple d'un modèle de prédiction du mouvement sismique basé sur ANFIS : Ameur, Derras and Zendagui (2018)	34
5	ÉTUDE CRITIQUE ET COMPARAISON	35
6	CONCLUSION	40
	CHAPITRE II. PRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS MODÈLES DU PARAMÈTRE DE LA CHUTE DE CONTRAINTES SISMIQUE	41
1	INTRODUCTION	43
2	SIGNIFICATION PHYSIQUE DU PCCS	43
3	ORIGINE DU PCCS	44
3.1	CHUTE DE CONTRAINTES STATIQUES	46
3.2	CHUTE DE CONTRAINTES DYNAMIQUES	46
3.3	DÉPENDANCE ENTRE LA CHUTE DE CONTRAINTES STATIQUES ET DYNAMIQUES	48
4	MÉTHODES D'ESTIMATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTES	49
4.1	ESTIMATION DE LA CHUTE DE CONTRAINTES STATIQUES	50
4.1.1	Méthode de distribution des répliques	50
4.1.2	Méthode de rupture de surface et données géodésiques	50
4.1.3	Méthode des modèles de rupture de la source finie	50
4.1.4	Méthode d'analyse de la fréquence coin	50
4.2	ESTIMATION DE LA CHUTE DE CONTRAINTES DYNAMIQUES	51
4.2.1	Méthode d'estimation directe à partir de la vitesse des particules	51
4.2.2	Méthode de la pente initiale	51
4.2.3	Méthode d'accélération quadratique moyenne	52
5	LE PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTES ET LA LIBÉRATION D'ÉNERGIE	53
6	QUESTION DE LA DÉPENDANCE ENTRE LA CHUTE DE CONTRAINTES DYNAMIQUES ET LA MAGNITUDE	55

6.1	MODÈLES DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE INDÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE	56
6.1.1	Modèle de Aki (1967)	56
6.1.2	Modèle de Hanks (1979)	56
6.1.3	Modèle de Kanamori (1994).....	57
6.1.4	Modèle de Boore and Joyner (1997)	58
6.1.5	Modèle de Baltay and Hanks (2014)	59
6.2	MODÈLES DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE	60
6.2.1	Modèle de Edwards and Fäh (2013).....	61
6.2.2	Modèle de Rietbrock, Strasser and Edwards (2013)	62
6.2.3	Modèle de Drouet and Cotton (2015).....	63
6.2.4	Modèle de Bindi, Spallarossa and Pacor (2017).....	64
6.2.5	Modèle de Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018).....	65
7	CONCLUSION.....	66
CHAPITRE III. CONTRIBUTION DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE À L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA CHUTE DE CONTRAINTE : APPLICATION AUX DONNÉES NGA-WEST 2		
1	INTRODUCTION.....	70
2	DONNÉES	71
2.1	NGA-WEST 2	71
2.2	SIMULATIONS STOCHASTIQUES DES MOUVEMENTS SISMIQUES (SSGM)	72
2.3	DISTRIBUTIONS DES ENSEMBLES DE DONNÉES	73
3	DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES ANFIS DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	73
3.1	MODÈLES ANFIS	73
4	CONFIGURATIONS OPTIMALES POUR ANALYSER L'EFFET DE L'ÉCHELLE DE MAGNITUDE	76
4.1	INTERVALLE OPTIMAL DE DISTANCE	76
4.2	INTERVALLE OPTIMAL DE FRÉQUENCE	77
4.3	INTERVALLE DE MAGNITUDE.....	78
4.4	ROBUSTESSE DE L'APPROCHE ANFIS.....	79

5	ÉTUDE COMPARATIVE.....	81
5.1	COMPARAISON ENTRE LE GMPM D'ANFIS (NGA-WEST 2) ET LES GMPMS D'ANFIS (STOCHASTIQUE).....	81
5.2	COMPARAISON ENTRE LE GMPM D'ANFIS (NGA-WEST 2) ET LES GMPEs CLASSIQUES	84
6	PROPOSITION D'UN MODÈLE DE PARAMÈTRE DE CHUTE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE POUR NGA-WEST 2	85
6.1	FORME FONCTIONNELLE DU MODÈLE D'APPRENTISSAGE PILOTÉ PAR LES DONNÉES BASÉ SUR DES ENSEMBLES DE DONNÉES SYNTHÉTIQUES ET NGA-WEST 2.....	86
6.2	MODÈLE PROPOSÉ DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE	88
7	CONCLUSION.....	89
CHAPITRE IV. APPLICATIONS ET VALIDATIONS DU MODÈLE PROPOSÉ DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE SISMIQUE		91
1	INTRODUCTION.....	92
2	ESTIMATIONS DU MOUVEMENT SISMIQUE : UTILISATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE POUR DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES.....	93
3	ESTIMATIONS DU MOUVEMENT SISMIQUE : UTILISATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE POUR DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES DE L'INTERVALLE $F = [2 - 5 \text{ Hz}]$ ET POUR DES DONNÉES PLUS LARGES	94
3.1	APPLICATION AUX DONNÉES NGA-WEST 2.....	94
3.2	SIMULATIONS STOCHASTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	98
3.3	ÉQUATIONS CLASSIQUES DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	99
3.4	ANALYSES DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	99
4	CONCLUSION.....	103
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES		104
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....		106
ANNEXES.....		113

LISTE DES FIGURES

Figure I. 1 : Comparaison du PSA entre les simulations avec EXSIM, SMSIM et la GMPE de Atkinson and Boore (2006), pour différents scénarios de magnitude (M) et distance (R) ; (haut à gauche) : M égale à 5 et R égale à 15 km, (haut à droite) : M égale à 5 et R égale à 200 km, (bas à gauche) : M égale à 7 et R égale à 15 km, (bas à droite) : M égale à 7 et R égale à 200 km (Atkinson <i>et al.</i> , 2009).....	7
Figure I. 2 : Base de la méthode stochastique de Boore (2003)	8
Figure I. 3 : Mise à l'échelle de la source en utilisant le modèle du spectre de source sismique ω -carré avec une unique fréquence coin. $M_0 \times f_0^3$ est constante si le paramètre de la chute de contrainte ($\Delta\sigma$) est constant (Aki, 1967 ; Boore, 2003).....	10
Figure I. 4 : Représentation du spectre de Fourier (FAS) à R = 1 km pour différents modèles de spectre de source sismique (Boore, 2003).	11
Figure I. 5 : Dispersion géométrique utilisée par Atkinson and Boore (1995) ; Frankel <i>et al.</i> (1996) pour des applications au centre et à l'est de l'Amérique du Nord (Boore, 2003).....	13
Figure I. 6 : L'atténuation anélastique $Q(f)$ illustrée dans Boore (2003).....	13
Figure I. 7 : Illustration de l'atténuation observée des mouvements en fonction de la distance, dans l'est de l'Amérique du Nord, avec la combinaison de la dispersion géométrique et l'atténuation anélastique (Boore, 2003)	14
Figure I. 8 : Relation entre la durée et la distance (Derras, 2011).....	14
Figure I. 9 : Variation de la vitesse de l'onde S avec la profondeur utilisée par Boore and Joyner (1997) pour déterminer les amplifications de sites de roches génériques (Boore, 2003)	16
Figure I. 10 : Combinaison de l'amplification de site et de l'atténuation indépendante de l'effet de propagation d'onde, pour un site rocheux. (Boore and Joyner (1997) cité par Boore (2003))	18
Figure I. 11 : Représentation de diverses conditions de site par différentes valeurs de V_{s30} , pour la simulation du produit entre le facteur d'amplification $A(f)$ et le facteur d'atténuation $D(f) = \exp(-\pi k_0 f)$ (Boore and Joyner (1997) citée par Boore (2003)).	19
Figure I. 12 : Étapes de base de la méthode stochastique pour le domaine temporel afin d'effectuer des simulations du mouvement sismique (Boore, 2003)	21
Figure I. 13 : Simulation de séries de temps de magnitudes 4 et 7 (Boore, 2003).....	22
Figure I. 14 : Comparaison entre des simulations à partir de la méthode du domaine temporel (ou séries de temps) pour un nombre de 40 simulations, et des simulations en utilisant la	

théorie de la vibration aléatoire. Les spectres sont calculés pour une magnitude de 5.5 et à une distance de 30 km	25
Figure I. 15 : Position des 599 événements (chocs principaux et répliques) de la base de données NGA-West 2 (Ancheta <i>et al.</i> , 2014).....	29
Figure I. 16 : Distribution de la magnitude en fonction de la distance pour les enregistrements inclus dans la base de données NGA-West 2, pour $3.0 < M < 7.9$ (Ancheta <i>et al.</i> , 2014)..	29
Figure I. 17 : Nombre d'enregistrements pour différentes régions qui composent NGA-West 1 et NGA-West 2. (CH : Chine, JP : Japon, Med : Méditerranée, TW : Taïwan, WNA : Ouest de l'Amérique du Nord (principalement la Californie)) (Ancheta <i>et al.</i> , 2014)	30
Figure I. 18 : Illustration d'une architecture des réseaux de neurones artificiels.....	31
Figure I. 19 : Exemple d'illustration d'une architecture des systèmes ANFIS	33
Figure I. 20 : Comparaison des prédictions de PSA (à $T=0.0, 0.2, 1.0$ et 2.0 s) en fonction de la magnitude, utilisant GMPM-ANN (Derras, Bard and Cotton, 2016), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les prédictions sont effectuées pour $V_{s30}=500$ m/s, à $R_{JB}=30$ km et avec un intervalle de M_w entre 3.5 et 7.5 (Derras, Bard and Cotton, 2016).....	36
Figure I. 21 : Comparaison des prédictions de PSA en fonction de la période, appliquant GMPM-ANN (Derras, Bard and Cotton, 2016), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les prédictions sont effectuées pour $V_{s30}=500$ m/s, à $R_{JB}=30$ km et les magnitudes : $M_w=3.5, 4.5, 5.5, 6.5$ et 7.5 (Derras, Bard and Cotton, 2016).....	36
Figure I. 22 : Comparaison des prédictions de PSA (à $T=0.0, 0.2, 1.0$ et 2.0 s) en fonction de M_w , appliquant GMPM-ANFIS (Ameur, Derras and Zendagui, 2018), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les prédictions sont effectuées pour $V_{s30}=400$ m/s, à $R_{JB}=70$ km et avec un intervalle de M_w entre 3.6 et 7.6 (Ameur, Derras and Zendagui, 2018)	37
Figure I. 23 : Comparaison de prédictions de PSA en fonction de la période, entre le modèle GMPM-ANFIS (Ameur, Derras and Zendagui, 2018), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Pour M_w égale à : 4, 5, 6 et 7 ; $V_{s30}=400$ m/s ; $R_{JB}=70$ km (Ameur, Derras and Zendagui, 2018).....	38
Figure I. 24 : Comparaison de la variabilité aléatoire (Sigma) en fonction de la période, entre GMPM-ANFIS (Ameur, Derras and Zendagui, 2018), GMPM-ANN (Derras, Bard and Cotton, 2016), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les comparaisons sont montrées pour des scénarios de $M_w=4$ et 7, et de $V_{s30}=270$ et 600 m/s (Ameur, Derras and Zendagui, 2018).....	39
Figure II. 1 : Variation de la contrainte de cisaillement avec le temps (Causse, Dalguer and Mai, 2014)	44
Figure II. 2 : Variations de la contrainte en fonction de l'échelle du temps, pour différentes périodes sismiques.....	45

Figure II. 3 : Illustration du plan de faille en surface après le séisme d'El-Asnam (Algérie en 1980).....	45
Figure II. 4 : Définitions de la chute de contrainte statique. Avec, M_0 : le moment sismique, μ : le module de cisaillement élastique, D : le glissement moyen sur la zone faillée (A), r : la longueur caractéristique de la zone de faille et c : une constante géométrique proche de 1 (si r est bien choisi) (Ruff, 1999).....	46
Figure II. 5 : Illustration du déplacement à l'instant "t". Avec la chute de contrainte dynamique $\Delta\sigma_d = \sigma_0 - \sigma_f$ (Kanamori, 1994)	47
Figure II. 6 : Illustration des contraintes avec la combinaison des différentes énergies. Où, E_G : est l'énergie responsable de la création d'une surface de faille, et qui peut être nommée l'énergie de fracture, E_R : est l'énergie qui est rayonnée comme ondes sismiques, et E_H : est l'énergie qui est perdue sous forme de chaleur à cause du frottement. σ_{f0} représente le niveau constant qui est atteint lors de la diminution progressive avec le glissement de la contrainte de frottement σ_f . D_c est le glissement critique dont σ_{f0} est atteinte, et \bar{D} le glissement moyen (Oth, 2007)	53
Figure II. 7 : Libération de contraintes sous différents modèles ((Kanamori, 1994; Oth, 2007))	54
Figure II. 8 : Illustration de la fréquence coin (f_0) et la fréquence maximale (f_{max}).....	57
Figure II. 9 : Schéma d'illustration de la répétition du paramètre de la chute de contrainte sismique (les valeurs sont à titre d'exemple), avec T_R : temps de répétition.	57
Figure II. 10 : a. La zone de faille S en fonction du moment sismique M_0 . b. La zone de source en fonction du moment sismique (Kanamori, 1994).....	58
Figure II. 11 : Comparaison des spectres de réponse, effectuée par Boore and Joyner (1997), entre des GMPEs et le modèle stochastique	59
Figure II. 12 : Mouvements sismiques (PGV et PGA) en fonction de la magnitude, avec un paramètre de chute de contrainte constante égale à 4.64 Mpa (Baltay and Hanks, 2014) ..	60
Figure II. 13 : Effet régional du paramètre de chute de contrainte ($\Delta\sigma$ - M_w) (Edwards and Fäh, 2013).....	61
Figure II. 14 : Paramètres de chute de contrainte sismique utilisés dans Rietbrock, Strasser and Edwards (2013).....	63
Figure II. 15 : Illustration des paramètres de chute de contrainte sismique montrés par Drouet and Cotton (2015).....	64
Figure II. 16 : Dépendance des paramètres de chute de contrainte sismique avec la magnitude. (a) : $\Delta\sigma$ est dépendante de la magnitude locale M_l , (b) : $\Delta\sigma$ est dépendante de la magnitude de moment M_w (Bindi, Spallarossa and Pacor, 2017)	65

Figure II. 17 : Représentation du modèle de la chute de contrainte sismique en fonction de la magnitude, obtenu par Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018)	66
Figure III. 1 : Distribution des ensembles de données considérés dans cette étude. En haut, [magnitude (M_w) - distance (R_{hyp})] ; en bas, [accélération pseudo spectrale (PSA) à 3.33 Hz - R_{hyp}]. Les données sont illustrées pour $3.5 < M_w < 6.5$ et $1 \text{ km} < R_{hyp} < 60 \text{ km}$	71
Figure III. 2 : Architecture de l'ANFIS (cinq couches), utilisée dans cette étude pour prédire PSA. Les paramètres d'entrées sont M_w et $\text{Log}_{10}(R_{hyp})$. Dans la première couche, $\mu_{ai}(X)$ est la fonction d'appartenance ; dans la deuxième couche, ω_j représente les règles de forces de tir dans lesquelles ϖ_j est la normalisation de ω_j dans la troisième couche ; dans la quatrième couche, y_j représente une équation calculée en fonction des paramètres d'entrée pour chaque nœud j qui varient ici de 1 à 4, et la sommation de $(\varpi_j \chi y_j)$ est indiquée dans la dernière couche comme paramètre de sortie $\text{Log}_{10}(PSA)$	74
Figure III. 3 : Modèles de paramètres de chute de contrainte constante / variable versus $M_w = [4.5-6.5]$, utilisés dans SMSIM (SMSIM, (Boore, 2003))	76
Figure III. 4 : Scaling de magnitude des modèles ANFIS sur la base de diverses sélections de données de l'ensemble de données NGA-West 2 pour $R_{hyp} < 30 \text{ km}$, $R_{hyp} < 40 \text{ km}$ et $R_{hyp} < 60 \text{ km}$; les pseudo-spectres de réponse sont prédits à $R_{hyp} = 30 \text{ km}$ avec l'intervalle de M_w comprise entre 4.5 et 6.5	77
Figure III. 5 : Scaling d'intensité du mouvement sismique pour divers modèles du paramètre de chute de contrainte constante ; les spectres de réponse sont prédits pour $R_{hyp} = 30 \text{ km}$	79
Figure III. 6 : Robustesse du scaling du mouvement sismique dérivé de l'approche ANFIS. Les graphiques montrent la dépendance entre PSA à 3.33 Hz et M_w pour divers sous-ensembles des ensembles simulés de données et l'ensemble de données NGA-West 2. Les spectres de réponse sont prédits pour $R_{hyp} = 30 \text{ km}$ avec l'intervalle de M_w entre 4.5 et 6.5	80
Figure III. 7 : Comparaison entre les modèles d'amplitude du mouvement sismique ANFIS. Le modèle ANFIS NGA-West 2 d'une part et les simulations stochastiques utilisant des modèles de paramètres de chute de contrainte constante / variable, d'autre part. a- Comparaison entre le modèle ANFIS NGA-West 2 et les modèles de paramètres de chute de contrainte constante. b- Comparaison entre le modèle ANFIS NGA-West 2 et les modèles de paramètres de chute de contrainte variable. Les spectres de réponse sont prédits pour $R_{hyp} = 30 \text{ km}$ et l'intervalle de M_w de 4.5 à 6.5. Les données NGA-West 2 pour les distances entre 26 et 34 km sont également ajoutées. Une bande de confiance du modèle ANFIS NGA-West 2 entre 84% de prédictions et 16% de prédictions, est représentée sur cette figure	82
Figure III. 8 : Comparaison entre le scaling de magnitude du mouvement sismique du mouvement observé à partir de l'ensemble de données NGA-West 2 et les simulations stochastiques utilisant des modèles de chute de contrainte constante en (a), puis en utilisant	

des modèles de chute de contrainte dépendante de la magnitude en (b), les résultats sont donnés pour $R_{hyp} = 30$ km et l'intervalle de M_w de 4.5 à 6.5 83

Figure III. 9 : PSA vs M_w et $\partial \log_{10}(PSA)/\partial M_w$ vs M_w . Comparaison entre le modèle de référence d'ANFIS et les modèles empiriques classiques et stochastiques de Yoo and Mayeda (2013) et celui de Drouet and Cotton (2015). Les PSA sont calculés pour $R_{hyp} = 30$ km et pour l'intervalle de M_w de 4.5 à 6.5. En (a), les données intensités mesurées de NGA-West 2 sont données pour $26 \text{ km} \leq R_{hyp} \leq 34 \text{ km}$ 85

Figure III. 10 : Calibrage de la mise à l'échelle de la magnitude du mouvement sismique obtenu à partir des simulations stochastiques avec la mise à l'échelle de l'ensemble de données observées NGA-West 2. PSA (à 3.33 Hz) est prédit pour $R_{hyp} = 30$ km et pour l'intervalle de M_w allant de 4.5 à 6.5 87

Figure III. 11 : Modèle proposé du paramètre de chute de contrainte, en plus de l'incertitude entre 16% et 84% des prédictions de ANFIS (NGA-West 2). Ce modèle est valable pour M_w entre 4.5 et 6.5 88

Figure IV. 1 : Mise à l'échelle de magnitude des mouvements sismiques pour l'ensemble de données observées NGA-West 2 et pour les simulations stochastiques, avec la mise à l'échelle à $f = 2.50$ Hz (a et b), à $f = 4.00$ Hz (c et d) et à $f = 5.00$ Hz (e et f). Les prédictions sont illustrées pour $R_{hyp} = 30$ km et pour $M_w = [4.5-6.5]$ en utilisant le modèle du paramètre de chute de contrainte proposé dans le chapitre III (Équa. III. 5) 93

Figure IV. 2 : Distribution de la magnitude M_w avec la distance R_{hyp} pour les données de NGA-West 2, ainsi que pour les données stochastiques. La distribution est illustrée pour $M_w=[4.5-6.5]$ et $R_{hyp}=[1-200 \text{ km}]$ 95

Figure IV. 3 : Variation des PSA avec la distance. Pour le PGA (haute fréquence) et les PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s (fréquences : $f = 10$ Hz, 3.33 Hz et 1 Hz, respectivement), amortis à 5%, en fonction de la distance $R_{hyp} = [1-200 \text{ km}]$. La distribution est donnée pour les données NGA-West 2 dans [a], et pour les simulations stochastiques dans [b]..... 96

Figure IV. 4 : [a] Distribution de la magnitude $M_w = [4.5-6.5]$ vs V_{s30} . [b] Variation du PGA et des PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s avec la V_{s30} . Pour les données NGA-West 2 97

Figure IV. 5 : Architecture du modèle ANFIS pour les trois proxies M_w , R_{hyp} et V_{s30} 98

Figure IV. 6 : Variations des accélérations PGA (haute fréquence) et PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s, estimées pour $R_{hyp} = 30$ km à partir des deux méthodes ANFIS de NGA-West 2 et du modèle stochastique, en fonction de la magnitude $M_w = [4.5-6.5]$. Le calcul est effectué pour $V_{s30} = 620$ m/s (NGA-West 2) et pour un sol rocheux (simulations stochastiques) (appliquant l'Équa. III. 5) 100

Figure IV. 7 : Estimations des PGA (haute fréquence) et PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s en fonction de M_w . Comparaison entre les deux modèles ANFIS et 03 GMPEs classiques. R_{hyp} et $R_{rup} = 30$ km, pour ANFIS et GMPEs, respectivement 101

Figure IV. 8 : Distributions des pentes $\partial \log_{10}(\text{PGA et PSA})/\partial M_w$ en fonction de M_w . Les pentes sont calculées pour les spectres de la Figure IV. 7..... 102

Figure IV. 9 : Variation des estimations du PSA avec la période, pour l'ensemble de données mesurées (NGA-West 2) et le modèle stochastique (appliquant l'Équa. III. 5). Les estimations sont données pour $M_w = 6.0$, $R_{\text{hyp}} = 50$ km et pour un sol rocheux 103

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II. 1 : Paramètres de Edwards and Fäh (2013) utilisés dans leurs simulations stochastiques.....	61
Tableau II. 2 : Paramètres utilisés dans les simulations stochastiques par Rietbrock, Strasser and Edwards (2013).....	62
Tableau III. 1 : Paramétrisation de WNA après Campbell (2003)	72
Tableau III. 2 : Valeurs de Sigma(\log_{10} (PSA) à 3.33 Hz) obtenues par différentes fonctions d'appartenance. Deux types d'ensembles de données sont considérés : NGA-West 2 et stochastique	75
Tableau III. 3 : Coefficients du modèle final ANFIS(M_w) ; voir l'Équa. III. 4.....	86
Tableau III. 4 : Incertitude sur ' $\ln(\Delta\sigma)$ ' prédit (en Pa), calibrée en ajustant les 16% et 84% des prédictions du modèle ANFIS, donnée pour $M_w=4.5$, $M_w=5.5$ et $M_w=6.5$	88

LISTE DES ABRÉVIATIONS

ANFIS : Systèmes adaptatifs d'inférence floue à base neuronale.

ANN : Réseaux de neurones artificiels.

AS : Approche stochastique.

BD : Base de données.

DD : Data-driven.

ED : Ensemble de données.

ENA : Est de l'Amérique du nord.

EXSIM : Méthode des simulations stochastiques (source finie).

FF : Forme fonctionnelle.

FL : Logique floue.

GMIMs : Mesures d'intensité du mouvement sismique.

GMPE : Équation de prédiction du mouvement sismique.

GMPM : Modèle de prédiction du mouvement sismique.

HF : Haute fréquence.

MF : Fonction d'appartenance.

MS : Mouvement sismique ou mouvement du sol.

NGA : Atténuation de nouvelle génération.

PCCS : Paramètre de la chute de contrainte sismique.

PGA : Accélération maximale du sol.

PGV : Vitesse maximale du sol.

PSA : Pseudo-spectres d'accélération.

SMSIM : Méthode des simulations stochastiques (source ponctuelle).

SSGM : Simulations stochastiques du mouvement sismique.

TSK : Règle Takagi-Sugeno-Kang.

TVA : Théorie de la vibration aléatoire.

WNA : Ouest de l'Amérique du nord.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le mouvement sismique (MS) est une donnée nécessaire lors des différentes études liées au génie parasismique. Le plus souvent, cette donnée est représentée par les pseudo-spectres de réponse en accélération (PSA) pour différentes fréquences et pour un amortissement donné.

Pour l'estimation du mouvement sismique, différentes méthodes peuvent être utilisées. Parmi ces méthodes, on trouve la méthode stochastique. Cette méthode présente son utilité dans le cas du manque de données ou d'une disposition des informations lacunaires. La méthode stochastique est utilisée dans plusieurs domaines, tels que les modèles issus de la physique, du calcul mathématique, de scénarios économiques et sociologiques, ...

La décomposition des différents facteurs qui affectent physiquement le mouvement du sol, en formes fonctionnelles simples (équations mathématiques), est une caractéristique de la méthode stochastique dans le domaine de la vibration des ondes sismiques. Les paramètres principaux qui représentent le processus sismique sont les facteurs relatifs aux effets de source, de propagation d'ondes et de site.

Parmi les paramètres importants de l'effet de source lors de l'estimation du mouvement sismique, on trouve le paramètre chute de contrainte sismique ($\Delta\sigma$). Son influence est apparente sur la partie hautes fréquences (HF) (Brune, 1970, 1971 ; Hanks and McGuire, 1981 ; Papageorgiou and Aki, 1983a, 1983b ; Cotton, Archuleta and Causse, 2013 ; Baltay and Hanks, 2014).

Un paramètre de chute de contrainte bien choisi, pour un événement sismique donné, peut améliorer significativement la prédiction du mouvement sismique en particulier pour la méthode stochastique "SMSIM" (Stochastic Method SIMulation, (Boore, 2003)).

Une deuxième approche qui est aussi utile dans les estimations du mouvement sismique, est la méthode empirique avec ou sans, à priori une forme fonctionnelle (FF). Cette méthode est basée sur la collecte et l'utilisation des données. Ces données sont recueillies par le biais des mesures et des enregistrements. Avec ces données nous pouvons trouver des corrélations entre le MS et les paramètres qui

sont censés représenter ce dernier. Parmi eux, le paramètre de la chute de contrainte.

Les modèles empiriques avec FF sont conditionnés par le choix de cette dernière. Un changement de la FF peut significativement changer le niveau et le contenu fréquentielle du MS. C'est pour cette raison que nous utilisons dans cette thèse un modèle empirique sans avoir à choisir, à priori, une FF. Cela signifie que ces types de modèles sont totalement dirigés par les données (Data-Driven : DD) et les différentes variations et tendances sont celles escortées par les enregistrements et les mesures.

Parmi les méthodes de DD les plus répondues et avec lesquelles nous pouvons obtenir une FF mais à posteriori, on trouve les systèmes adaptatifs d'inférence floue à base neuronale (ANFIS). Il s'agit d'une méthode hybride qui utilise à la fois l'architecture (unique) du modèle logique-floue et la capacité d'apprentissage d'un réseau de neurones artificiels (Jang, 1993 ; Ameer, Derras and Zendagui, 2018).

Le fait de caler et calibrer les résultats obtenus (PSA-Magnitude) par la méthode stochastique (en variant à chaque fois le $\Delta\sigma$ et en gardant les autres paramètres constants) aux résultats obtenus par l'ANFIS permet de déduire le paramètre de chute de contrainte optimal et de répondre aussi à la question de sa dépendance avec la magnitude.

Obtenir le $\Delta\sigma$ par cette méthode (le calage), évite de passer par les quantifications conventionnelles de $\Delta\sigma$, qui sont liées à la mesure de la fréquence coin (f_c). La difficulté de mesurer la fréquence coin impacte à la fois l'évaluation de la valeur moyenne du paramètre de chute de contrainte et l'évaluation de sa variabilité. En outre, il est difficile de séparer les effets de source, de propagation d'ondes et de site. Les propriétés d'atténuation de haute fréquence (par exemple, kappa) peuvent biaiser la simulation du spectre de Fourier d'amplitude du mouvement sismique (Drouet, Cotton and Guéguen, 2010), puis la quantification du paramètre de chute de contrainte, d'où l'intérêt de la méthode utilisée dans cette thèse.

Cette thèse est organisée en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on présente des méthodes d'estimation du mouvement du sol, à savoir : la méthode stochastique, empirique avec FF et sans FF (Machine Learning).

Le deuxième chapitre veut un aperçu sur le paramètre de chute de contrainte sismique ainsi que sur les différents modèles présentés dans la littérature.

Dans le troisième chapitre, on étudie les dépendances des mesures d'intensité du mouvement sismique (GMIMs) avec la magnitude, afin d'évaluer l'effet d'échelle de magnitude du paramètre de chute de contrainte. À cet effet, deux types d'ensembles de données sont utilisés. Le premier est un sous-ensemble de la base de données NGA-West 2 (atténuation de nouvelle génération, (Ancheta *et al.*, 2014)). Les autres ensembles de données sont générés à partir de la méthode stochastique Boore (2003), en supposant diverses dépendances de magnitude (constante et variable) du $\Delta\sigma$ avec la magnitude. Nous calibrons à la fin de ce chapitre, une relation entre le paramètre de chute de contrainte et la magnitude.

Le quatrième chapitre est consacré à la validation et l'application du modèle de chute de contrainte sismique proposé dans le chapitre III, dont on élargit ses limites d'utilisation. Deux procédures sont utilisées dans ce quatrième chapitre : la première concerne l'application du modèle de $\Delta\sigma$ dans l'intervalle où les mouvements sismiques sont sensibles principalement aux variations du paramètre de $\Delta\sigma$; et la deuxième procédure concerne l'application du modèle de $\Delta\sigma$ dans un intervalle sortant de la sensibilité des mouvements sismiques qu'aux variations du paramètre de $\Delta\sigma$. À la fin, une comparaison entre les PSA(périodes) obtenus par ANFIS(NGA-West2) et ceux estimés par ANFIS(données synthétiques) avec le modèle de $\Delta\sigma$ (chapitre III), est effectuée.

CHAPITRE I

APERÇU SUR DES

APPROCHES D'ESTIMATION

DU MOUVEMENT SISMIQUE

SOMMAIRE DU CHAPITRE I

CHAPITRE I. APERÇU SUR DES APPROCHES D'ESTIMATION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	4
1 INTRODUCTION.....	5
2 APPROCHE STOCHASTIQUE (BOORE, 2003).....	5
2.1 INTRODUCTION	5
2.2 ÉTAT DE L'ART	5
2.3 DÉMARCHE DE LA MÉTHODE STOCHASTIQUE	8
2.4 OBTENTION DU MOUVEMENT SISMIQUE	20
3 APPROCHE EMPIRIQUE	25
3.1 INTRODUCTION	25
3.2 ÉQUATIONS DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	25
4 APPROCHE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (MACHINE LEARNING)	30
4.1 INTRODUCTION	30
4.2 MODÈLE DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE : GMPM-ANN	30
4.3 MODÈLE DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE : GMPM-ANFIS	32
5 ÉTUDE CRITIQUE ET COMPARAISON.....	35
6 CONCLUSION.....	40

1 INTRODUCTION

Une bonne évaluation de l'aléa sismique passe par une estimation correcte du mouvement sismique (MS). Le moyen le plus sûr pour avoir le MS est le déploiement des denses réseaux accélérométriques. Cependant, ce dispositif reste très couteux et nécessite une technicité de haut niveau. Heureusement qu'il existe d'autres alternatives qu'on trouve dans la littérature sans passer par l'installation des accélérographes.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les approches les plus utilisées qui restent plus ou moins fiables et qui peuvent sous certaines conditions remplacer les enregistrements et les mesures. Il s'agit de l'approche stochastique, empirique et une nouvelle approche qui est basée sur l'apprentissage automatique (Machine Learning). Ces trois approches représentent les principaux outils utilisés dans cette thèse. Le MS, ainsi estimé, est toujours validé et comparé avec les données mesurées sur un site donné.

2 APPROCHE STOCHASTIQUE (Boore, 2003)

2.1 INTRODUCTION

Une approche stochastique sert à résoudre un problème réel, et ceci en faisant usage de l'aléatoire. Ce problème peut être causé par un manque de données ou une disposition des informations lacunaires. La méthode stochastique est utilisée dans plusieurs domaines, y compris des modèles issus de la physique, du calcul mathématique, de scénarios économiques et sociologiques...etc.

Dans le domaine de la vibration des ondes sismiques, les facteurs qui affectent physiquement le mouvement du sol (ou mouvement sismique) sont décomposés et représentés par des formes fonctionnelles (FF) (Boore, 2003).

2.2 ÉTAT DE L'ART

Lorsqu'on parle de l'application de l'approche stochastique pour le calcul du mouvement sismique, on va se baser sur l'analyse physique du phénomène sismique. Il existe différentes études dans lesquelles l'approche stochastique est utilisée, par exemple, Papageorgiou and Aki (1983a) ; Zeng, Anderson and Yu (1994).

D'autres études ont traité principalement l'élaboration de l'approche stochastique comme : Hanks and McGuire (1981) ; Boore (1983, 1984, 1989, 1996, 2000) ; Boore and Joyner (1984) ; Joyner (1984, 1995) ; Silva and Lee (1987) ; TAMURA, WINTERSTEIN and SHAH (1991) ; Liu and Pezeshk (1998, 1999) ; Rathje, Abrahamson and Bray (1998) ; Campbell (1999) ; PEZESHK *et al.* (2001).

Par ailleurs, l'approche stochastique de Boore (2003), qui est basée sur les travaux de Hanks (1979) ; McGuire and Hanks (1980) ; Hanks and McGuire (1981), sert à obtenir le mouvement sismique pour un site donné et ce en considérant une source sismique ponctuelle (Brune, 1970, 1971). Plusieurs études ont utilisé cette méthode de point-source, par exemple, Oth (2007); Yoo and Mayeda (2013) ; Molkenhain *et al.* (2014) ; Drouet and Cotton (2015) ; Bora *et al.* (2017) ; Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018).

D'autre part, Il existe une autre façon pour modéliser la source sismique. À cet effet, la source pourra être représentée comme une source finie (faille finie). Parmi les études qui ont utilisé ce modèle, on cite : Motazedian and Atkinson (2005); Ugurhan and Askan (2010) ; Ghofrani *et al.* (2013) ; Safarshahi, Rezapour and Hamzehloo (2013) ; Zengin and Cakti (2014) ; Mittal and Kumar (2015) ; Zhang *et al.* (2016) ; Kkallas *et al.* (2018) ; Sun, Yu and Li (2018).

Une comparaison entre l'approche stochastique « point-source » et « source-finie » d'une part et l'approche empirique (aussi appelée : équation de prédiction du mouvement sismique : GMPE) de Atkinson and Boore (2006) d'autre part, est représentée par la **Figure I. 1**. Dans cette figure, les Pseudo-Spectres d'Accélération (PSA) amortis à 5 %, obtenus avec les deux simulations stochastiques SMSIM (pour une source ponctuelle : point source) et EXSIM (pour une source finie) sont considérés. Quatre scénarios de la magnitude (M) et la distance (R) sont utilisés, à savoir : $\{M, R\}=\{5, 15 \text{ km}\}$, $\{5, 200 \text{ km}\}$, $\{7, 15 \text{ km}\}$ et $\{7, 200 \text{ km}\}$.

Les courbes de la **Figure I. 1** montrent une diminution des PSA avec la distance (effet d'atténuation), et une augmentation des PSA avec la magnitude (effet lié à l'énergie dissipée). La comparaison est effectuée pour deux valeurs du paramètre de chute de contrainte sismique (stress drop) 140 et 200 bars.

On remarque que les PSA pour M égale à 5, obtenus par SMSIM, convergent vers ceux déterminés par EXSIM. SMSIM peut être utilisée alors pour des magnitudes

modérées. Alors que, les PSA pour $M=7$ (SMSIM) et EXSIM sont différents. Cette différence peut être causée par la considération de source ponctuelle dans SMSIM, dont cette considération commence à perdre sa validité pour les grandes magnitudes.

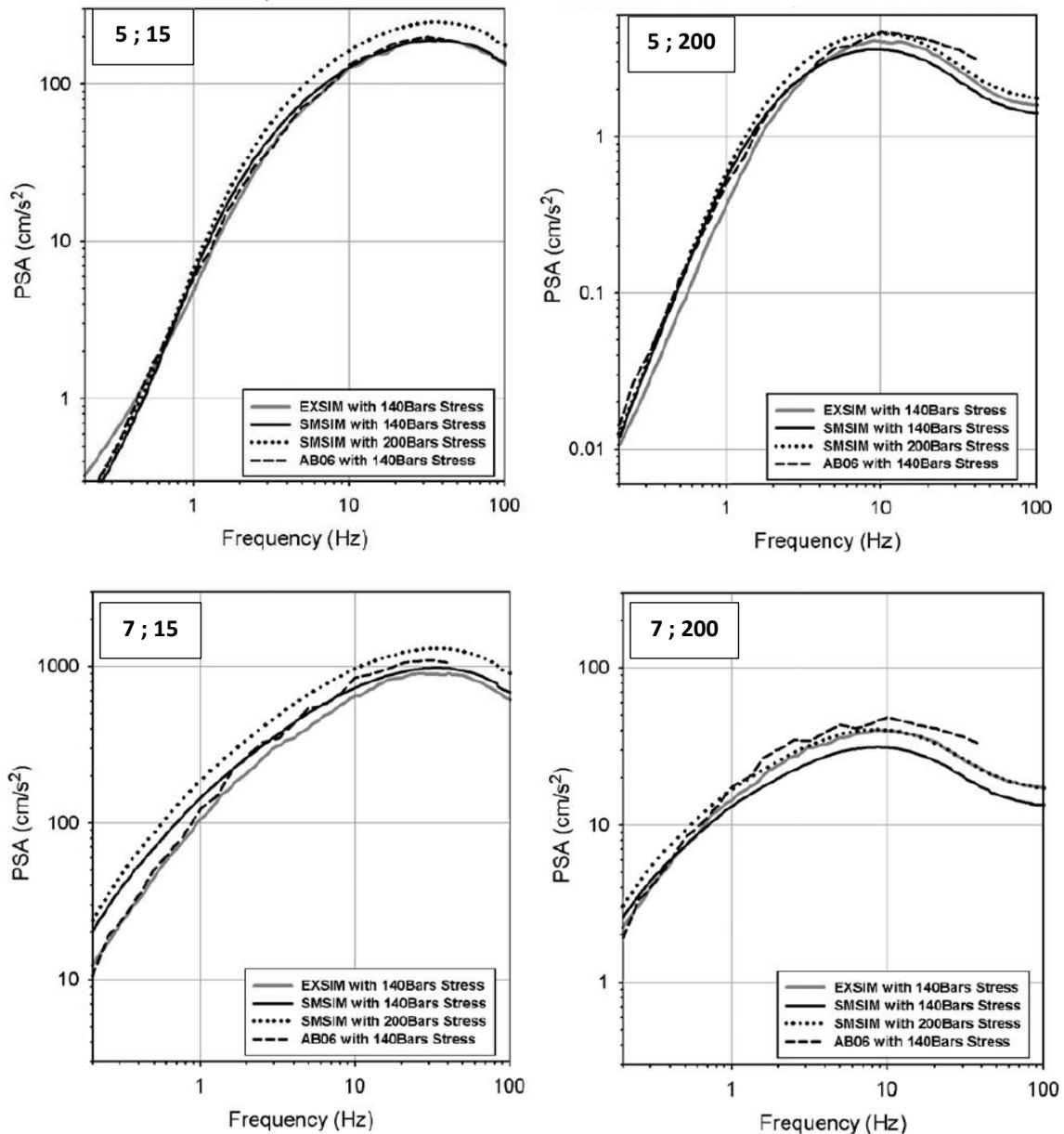


Figure I. 1 : Comparaison du PSA entre les simulations avec EXSIM, SMSIM et la GMPE de Atkinson and Boore (2006), pour différents scénarios de magnitude (M) et distance (R) ; (haut à gauche) : M égale à 5 et R égale à 15 km, (haut à droite) : M égale à 5 et R égale à 200 km, (bas à gauche) : M égale à 7 et R égale à 15 km, (bas à droite) : M égale à 7 et R égale à 200 km (Atkinson *et al.*, 2009)

2.3 DÉMARCHE DE LA MÉTHODE STOCHASTIQUE

Afin d'obtenir le mouvement sismique, la méthode de Boore (2003) point-source est adoptée dans le présent travail. La méthode de Boore repose sur la combinaison des descriptions fonctionnelles du spectre du mouvement sismique avec un spectre d'une phase aléatoire, modifié de telle sorte que le mouvement soit réparti sur une durée liée à la distance à partir de la source sismique et à la magnitude du séisme.

La partie du signal sismique à prédire est celle des ondes de cisaillement S : amplitude plus élevée et fréquence-model propre qui correspond à celle de la majorité des structures.

Le principe de la méthode stochastique de Boore (2003) est représenté schématiquement sur la **Figure I. 2**.

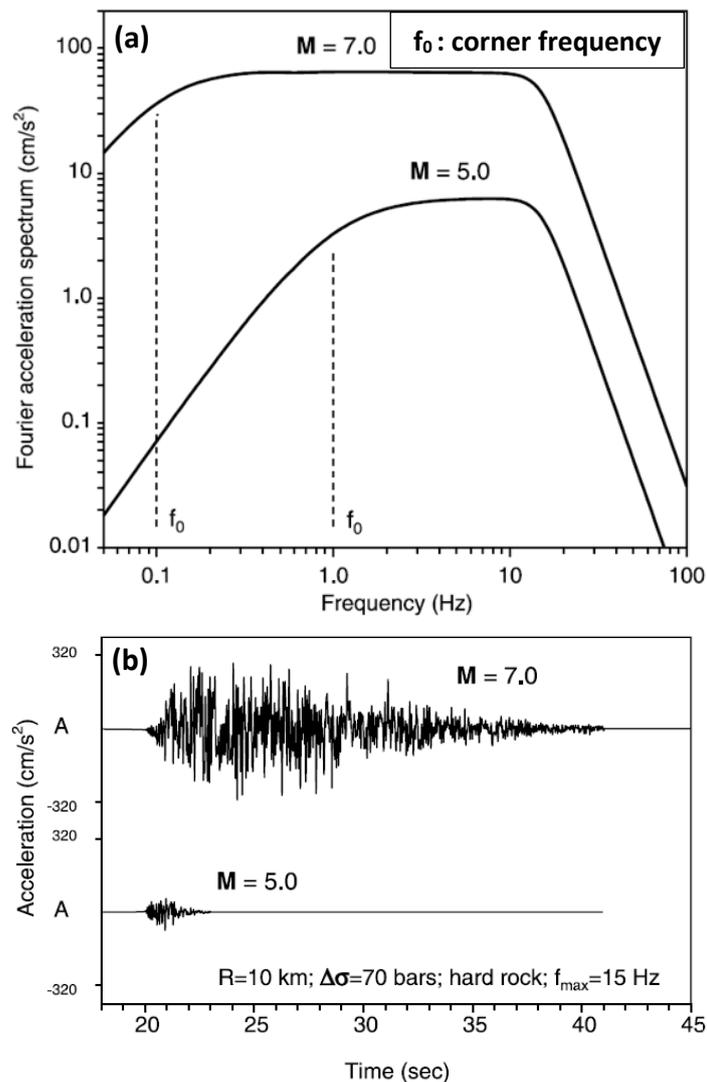


Figure I. 2 : Base de la méthode stochastique de Boore (2003)

Le spectre du mouvement sismique dans la partie (a) de la **Figure I. 2** est représenté pour des séismes de magnitude 5 et 7, avec f_0 qui représente la fréquence coin. Les accélérogrammes illustrés sur la **Figure I. 2(b)** sont produits par la supposition d'une distribution avec une phase aléatoire de ce mouvement sur une durée liée à la distance de propagation et à la taille du séisme.

Selon l'approche stochastique, le spectre d'amplitude (déplacement) respecte un modèle en ω^{-2} (Brune, 1970). Pour un moment sismique donné (M_0) et une distance R , le spectre de Fourier en déplacement $Y(f)$ respecte la description paramétrique suivante (**Équa. I. 1**) :

$$Y(M_0, R, f) = E(M_0, f) \times P(R, f) \times G(f) \times I(f)$$

Équa. I. 1

Où, (E) représente l'effet de source sismique, (P) effet de propagation d'onde, (G) effet de site et (I) le type du mouvement sismique.

M_0 est le moment sismique introduit en sismologie par Aki (1966). Dans son coté, Boore (2003) utilise la magnitude de moment M_w plutôt que le moment sismique M_0 . La relation entre les deux est donnée par Hanks and Kanamori (1979) (**Équa. I. 2**) :

$$M = \frac{2}{3} \log M_0 - 10.7$$

Équa. I. 2

2.3.1 L'effet de source $E(M_0, f)$

En appliquant la méthode stochastique, l'amplitude et la forme du spectre de source sismique doivent représenter la taille du séisme (Boore, 2003). Il s'agit de la tâche la plus délicate lors de l'application de cette méthode. Le modèle pulsation-carré (ω -carré) est le plus utilisé (Aki, 1967).

La **Figure I. 3** représente le spectre de source pour des événements dont $M_w=6.5$ et $M_w=7.5$ (Boore, 2003). Dans le cas des spectres avec des magnitudes différentes, la dépendance entre ces spectres est déterminée par la dépendance qui est entre le moment sismique M_0 et la fréquence coin f_0 (similarité). Cette similarité est représentée par l'équation suivante (**Équa. I. 3**) :

$$M_0 \times f_0^3 = \text{Constante}$$

Équa. I. 3

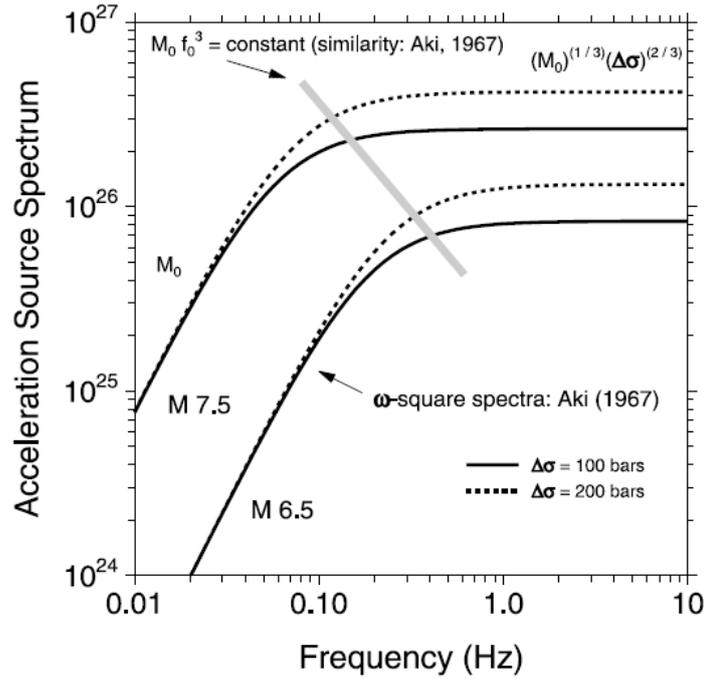


Figure I. 3 : Mise à l'échelle de la source en utilisant le modèle du spectre de source sismique ω -carré avec une unique fréquence coin. $M_0 \times f_0^3$ est constante si le paramètre de la chute de contrainte ($\Delta\sigma$) est constant (Aki, 1967 ; Boore, 2003)

Le paramètre de chute de contrainte ($\Delta\sigma$) peut être lié à la constante $M_0 \times f_0^3$ (Brune, 1970, 1971). Cette liaison est donnée par l'Équa. I. 4 :

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta_s (\Delta\sigma / M_0)^{1/3} \text{ (Hz)}$$

Équa. I. 4

β_s (km/s) est la vitesse des ondes de cisaillement à la proximité de la source.

$\Delta\sigma$, est donnée en bars et M_0 en dyne-cm.

L'équation suivante (Équa. I. 5) représente les spectres de source sismique selon Boore (2003) :

$$E(M_0, f) = C \times M_0 \times S(M_0, f)$$

Équa. I. 5

C est une constante (Équa. I. 6), avec :

$$C = (R_{\theta\phi}) \times V \times F / (4\pi\rho_s\beta_s^3 R_0)$$

Équa. I. 6

R_0 : représente une distance de référence, généralement fixée à 1 km.

F : représente l'effet de surface libre (égale à 2).

$(R_{\theta\phi})$: le facteur associé au diagramme de radiation, qui est calculé selon Boore and Boatwright (1984) en moyenne d'angles de décollage et sur une plage appropriée d'azimuts.

$V = 1/\sqrt{2}$: (valeur usuelle) représente la partition de l'énergie totale de cisaillement entre les deux composantes horizontales.

ρ_s et β_s : représentent la densité et la vitesse de l'onde de cisaillement respectivement, au voisinage de la source.

$S(M_0, f)$: représente le spectre de source de déplacement qui est donné selon le modèle ω -carré par l'équation suivante (**Équa. I. 7**) :

$$S(M_0, f) = \frac{1}{1 + \left(\frac{f}{f_0}\right)^2}$$

Équa. I. 7

En effet, il existe différents modèles du spectre de source sismique. Boore (2003) a illustré certaines d'entre eux (**Figure I. 4**) : Boatwright and Choy (1992) ; Atkinson and Boore (1995) ; Haddon, 1996; Joyner (1997).

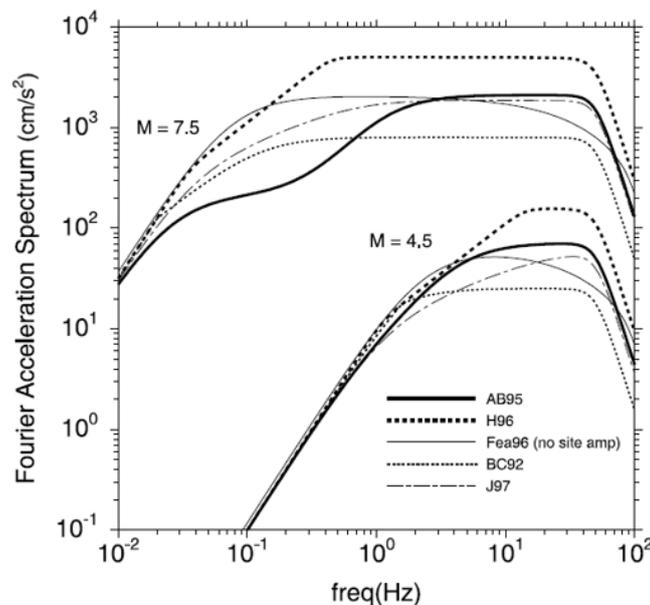


Figure I. 4 : Représentation du spectre de Fourier (FAS) à R = 1 km pour différents modèles de spectre de source sismique (Boore, 2003).

Avec : AB95, H96, Fea96, BC92 et J97 représentent Atkinson and Boore (1995), Haddon (1996), Frankel et al. (1996) (utilisent le modèle ω -carré), Boatwright and Choy (1992) et Joyner (1997), respectivement

2.3.2 L'effet de propagation d'onde [$P(R, f)$] et la durée

L'effet de propagation d'onde $P(R, f)$ (Équa. I. 8) est composé de la dispersion géométrique $Z(R)$ et de l'atténuation anélastique (facteur de qualité) $Q(f)$:

$$P(R, f) = Z(R) \exp \left[-\frac{\pi f R}{Q(f) c_Q} \right]$$

Équa. I. 8

Avec :

R : représente la distance à partir de la source jusqu'au site,

f : la fréquence.

c_Q : représente la vitesse moyenne des ondes S (km/s).

$Z(R)$: représente la fonction de dispersion géométrique qui est donnée selon Boore (2003) par l'équation suivante (Équa. I. 9) :

$$Z(R) = \begin{cases} \frac{R_0}{R} & R \leq R_1 \\ Z(R_1) \left(\frac{R_1}{R} \right)^{p_1} & R_1 \leq R \leq R_2 \\ \vdots & \\ Z(R_n) \left(\frac{R_n}{R} \right)^{p_n} & R_n \leq R \end{cases}$$

Équa. I. 9

Concernant l'application pour $Z(R)$, la **Figure I. 5** montre la dispersion géométrique utilisée par Atkinson and Boore (1995) ; Frankel *et al.* (1996), afin de réaliser des prédictions du mouvement sismique dans le centre et l'est de l'Amérique du Nord avec les données suivantes :

$$R_0 = 1, R_1 = 70, R_2 = 130, p_1 = 0 \text{ et } p_2 = 0.5$$

Généralement, la distance $r = R - R_0$. La durée de propagation d'onde est de l'ordre de r/c_Q .

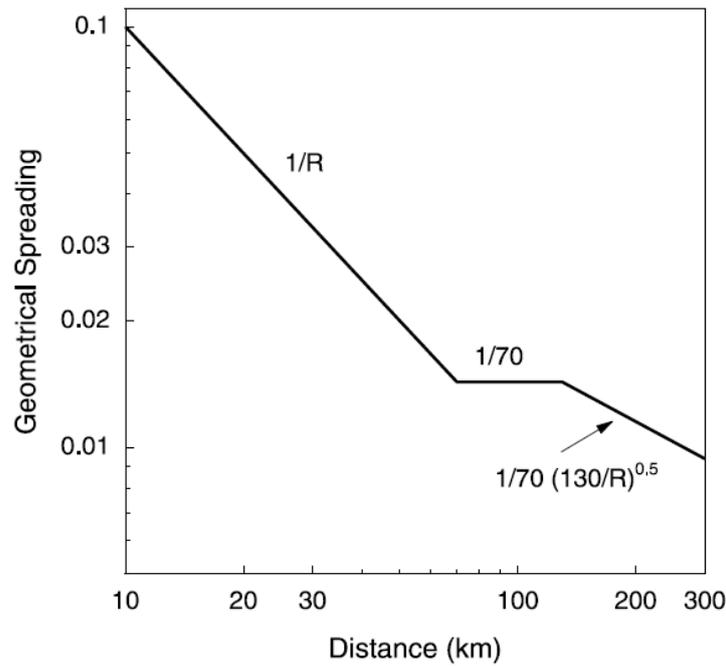


Figure I. 5 : Dispersion géométrique utilisée par Atkinson and Boore (1995) ; Frankel et al. (1996) pour des applications au centre et à l'est de l'Amérique du Nord (Boore, 2003)

La variation de l'atténuation anélastique $Q(f)$ peut être décomposée en trois segments en fonction de la fréquence (Figure I. 6) : deux lignes extérieures et une ligne médiane. Ces lignes sont liées entre elles à des fréquences de référence $ft1$ et $ft2$.

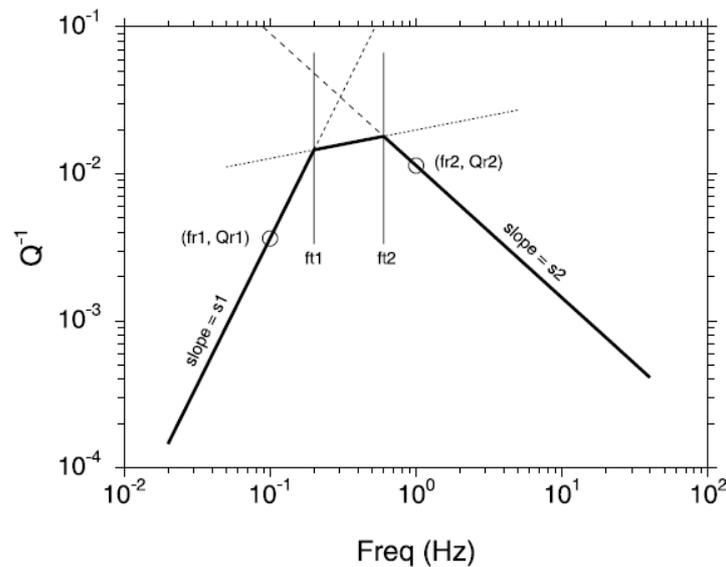


Figure I. 6 : L'atténuation anélastique $Q(f)$ illustrée dans Boore (2003)

Une application pour l'effet de propagation d'onde est donnée par la Figure I. 7 en comparant des amplitudes observées en fonction de la distance. Cet effet est

considéré avec la combinaison de $Z(R)$ donné dans la **Figure I. 5** et $Q(f) = 680 f^{0.38}$ qui appartient au segment avec la pente s2 montrée sur la **Figure I. 6**.

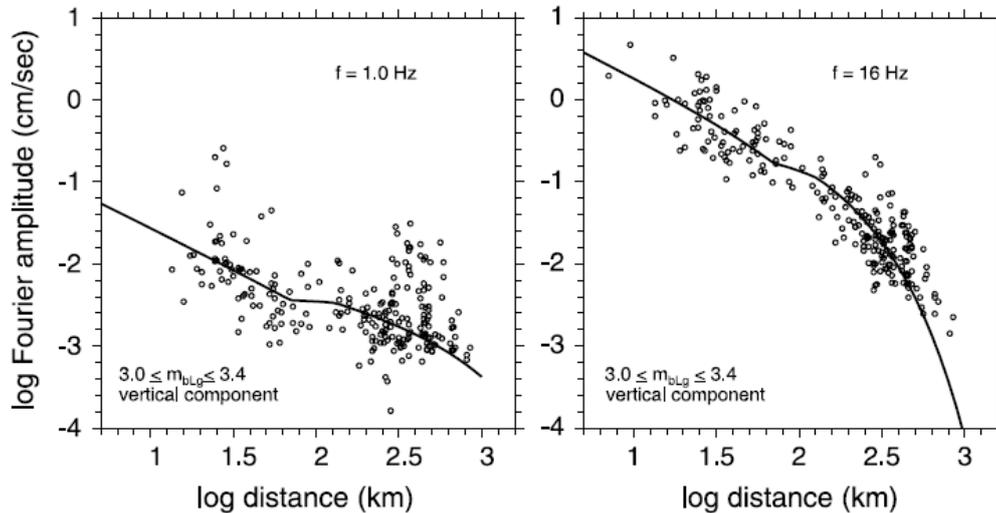


Figure I. 7 : Illustration de l'atténuation observée des mouvements en fonction de la distance, dans l'est de l'Amérique du Nord, avec la combinaison de la dispersion géométrique et l'atténuation anélastique (Boore, 2003)

La **Figure I. 8** montre, dans son côté, la dépendance entre la durée et la distance, dont l'augmentation de la distance implique l'augmentation de la durée. Ainsi, différents scénarios de magnitude sont donnés dans la **Figure I. 8**, à savoir $M_w=4$, 5, 6 et 7. Les courbes de cette figure montre aussi que pour les grandes distances, l'influence de la magnitude commence à diminuer.

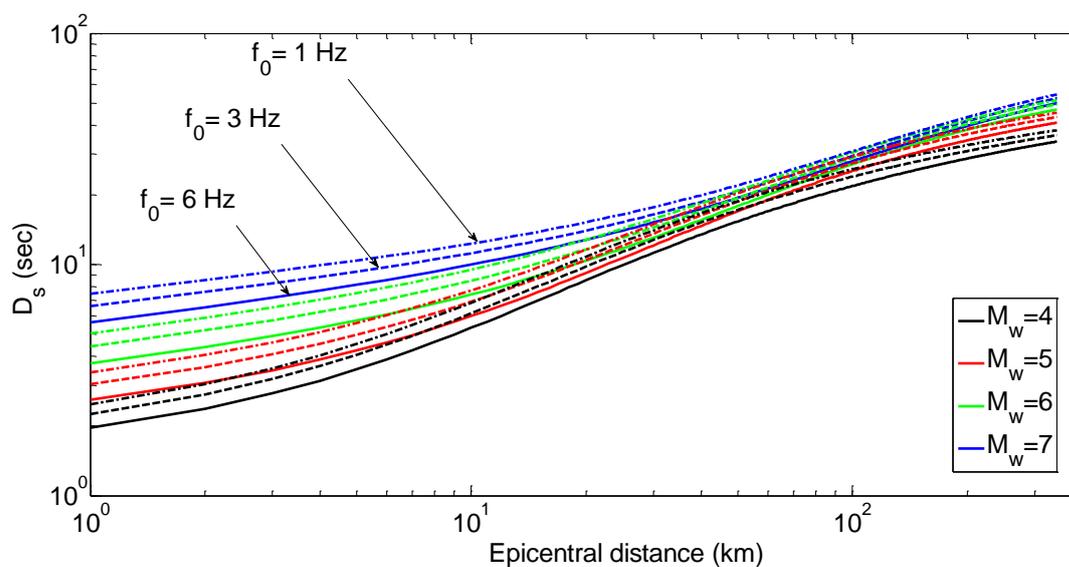


Figure I. 8 : Relation entre la durée et la distance (Derras, 2011)

Selon Boore (2003), la durée du mouvement sismique (t_{gm}) est décomposée en durée de source (liée à l'inverse de la fréquence coin), et en durée dépendante à la propagation d'onde.

2.3.3 L'effet de site $G(f)$

Après avoir vu les deux effets : de source et de propagation d'onde, on analyse l'effet de site.

La géologie d'une région à une autre peut être différente, ce qui donne des intensités sismiques différentes. Les sites peuvent être classés selon leur rigidité : rocheux, ferme, meuble et très meuble, et selon la profondeur du profil : peu profond, moyennement profond et profond ; on parle ainsi des propriétés mécaniques et géométriques, respectivement.

Avec la méthode stochastique. Boore (2003) a donné une fonction simplifiée d'effet de site $G(f)$ (Équa. I. 10) par un produit entre l'amplification $A(f)$ et l'atténuation $D(f)$ qui est indépendante de l'effet de propagation d'onde :

$$G(f) = A(f) \times D(f)$$

Équa. I. 10

Selon Boore (2003), l'effet de l'amplification $A(f)$ est donné par la racine carrée du rapport d'impédance entre la source et la surface, comme il est montré dans l'équation suivante (Équa. I. 11) :

$$A(f(z)) = \sqrt{Z_s / \bar{Z}(f)}$$

Équa. I. 11

Avec :

Z_s : est l'impédance sismique près de la source qui est donnée par l'équation suivante (Équa. I. 12) :

$$Z_s = \rho_s \times \beta_s$$

Équa. I. 12

β_s et ρ_s : représentent la vitesse et la densité de cisaillement près de la source.

Dans la **Figure I. 9**, un exemple de profil de vitesse " β_s " est présenté pour un site rocheux générique.

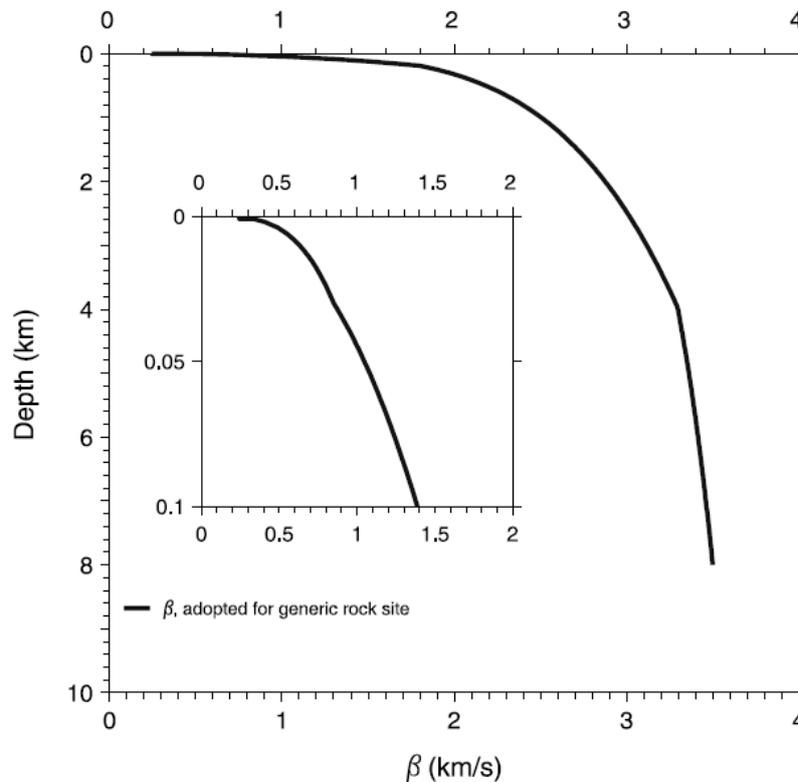


Figure I. 9 : Variation de la vitesse de l'onde S avec la profondeur utilisée par Boore and Joyner (1997) pour déterminer les amplifications de sites de roches génériques (Boore, 2003)

$\bar{Z}(f)$, représente une moyenne d'impédance sismique qui est proche de la surface (Boore, 2003), l'équation suivante (**Équa. I. 13**) donne la forme de cette fonction :

$$\bar{Z}(f) = \frac{\int_0^{t(z(f))} \rho(z) \times \beta(z) dt}{\int_0^{t(z(f))} dt}$$

Équa. I. 13

La limite supérieure de l'intégrale est le temps pour un déplacement des ondes de cisaillement à partir de la profondeur $z(f)$ jusqu'à la surface. Cette profondeur est choisie pour que l'équation (**Équa. I. 14**) soit vérifiée :

$$z = (1/4) \bar{\beta} / f$$

Équa. I. 14

Avec, la vitesse moyenne $\bar{\beta}$ qui est donnée selon l'équation suivante (**Équa. I. 15**) :

$$\bar{\beta} = z(f) / \int_0^{z(f)} [1/\beta(z)] dz$$

Équa. I. 15

Afin d'obtenir l'équation suivante (**Équa. I. 16**) :

$$f(z) = 1 / \left[4 \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz \right]$$

Équa. I. 16

Selon Boore (2003), le calcul de f et \bar{Z} est plus facile pour un z donné, par le changement de la variable du temps par la profondeur afin d'obtenir l'équation (**Équa. I. 17**) de $\bar{Z}(f)$ à partir de l'**Équa. I. 13** :

$$\bar{Z}(f) = \int_0^{z(f)} \rho(z) dz / \int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz$$

Équa. I. 17

Cette équation (**Équa. I. 17**) va donner l'équation simplifiée suivante (**Équa. I. 18**) (Boore, 2003) :

$$\bar{Z}(f) = \bar{\rho} \times \bar{\beta}$$

Équa. I. 18

Avec (**Équa. I. 19**) :

$$\bar{\rho} = \frac{1}{z(f)} \int_0^{z(f)} \rho(z) dz$$

Équa. I. 19

Et (**Équa. I. 20**),

$$\bar{\beta} = z(f) \left[\int_0^{z(f)} \frac{1}{\beta(z)} dz \right]^{-1}$$

Équa. I. 20

Ce qui concerne l'atténuation de l'intensité sismique à haute fréquence $D(f)$, qui est considérée comme indépendante de l'effet de la propagation d'onde, plusieurs auteurs comme : Papageorgiou and Aki, (1983b) ; Hanks, (1982), ont suggéré que

$D(f)$ est due à l'effet de source, ou l'effet de site ou par combinaison des deux effets (Boore, 2003).

Selon Hanks (1982) ; Boore (1983), $D(f)$ peut être représenté par l'équation suivante (Équa. I. 21) :

$$D(f) = \left[1 + (f/f_{\max})^8 \right]^{-1/2}$$

Équa. I. 21

Et selon Anderson and Hough (1984), $D(f)$ est donné par l'équation suivante (Équa. I. 22) :

$$D(f) = \exp(-\pi k_0 f)$$

Équa. I. 22

Dans la **Figure I. 10**, un effet combiné de l'amplification $A(f)$ et de l'atténuation $D(f)$ est montré en utilisant le paramètre kappa (k_0).

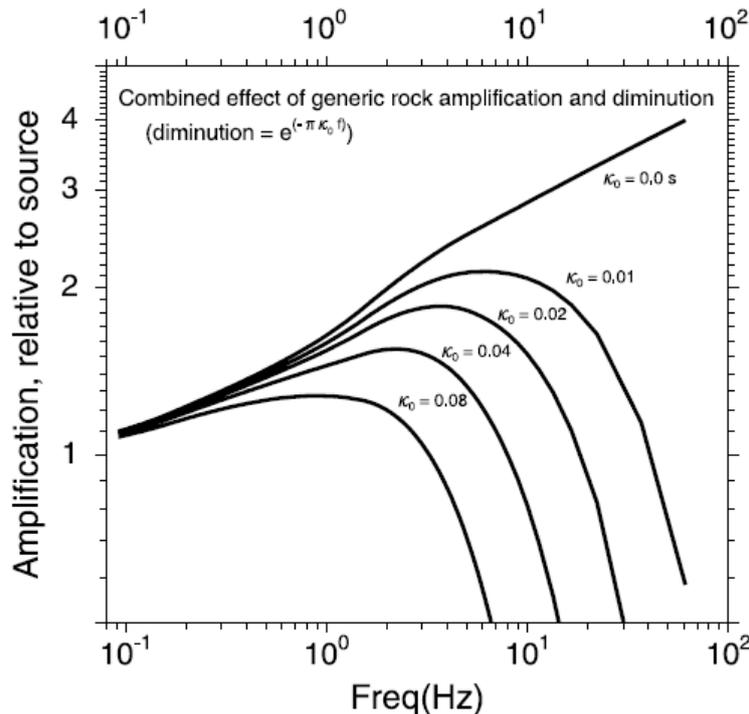


Figure I. 10 : Combinaison de l'amplification de site et de l'atténuation indépendante de l'effet de propagation d'onde, pour un site rocheux. (Boore and Joyner (1997) cité par Boore (2003))

Le paramètre kappa peut avoir plusieurs valeurs comme il a été présenté dans la **Figure I. 10**, selon Boore and Joyner (1997), d'après des comparaisons avec les données réelles, ($k_0 \approx 0.04 s$) est une valeur appropriée. L'effet de site peut être

représenté en variant la valeur de ce qu'on appelle la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur 30 mètres de profondeur (V_{30}) ou (V_{s30}) et chaque intervalle de valeurs concernant V_{s30} représente un type de site qui est différent à l'intervalle qui le suit.

La **Figure I. 11** donne des conditions différentes, représentées par diverses valeurs de V_{s30} concernant différents sites en fixant k_0 à 0.035 s pour tous les types de sites, sauf pour un rocher dur, avec une valeur de k_0 égale à 0.003 s .

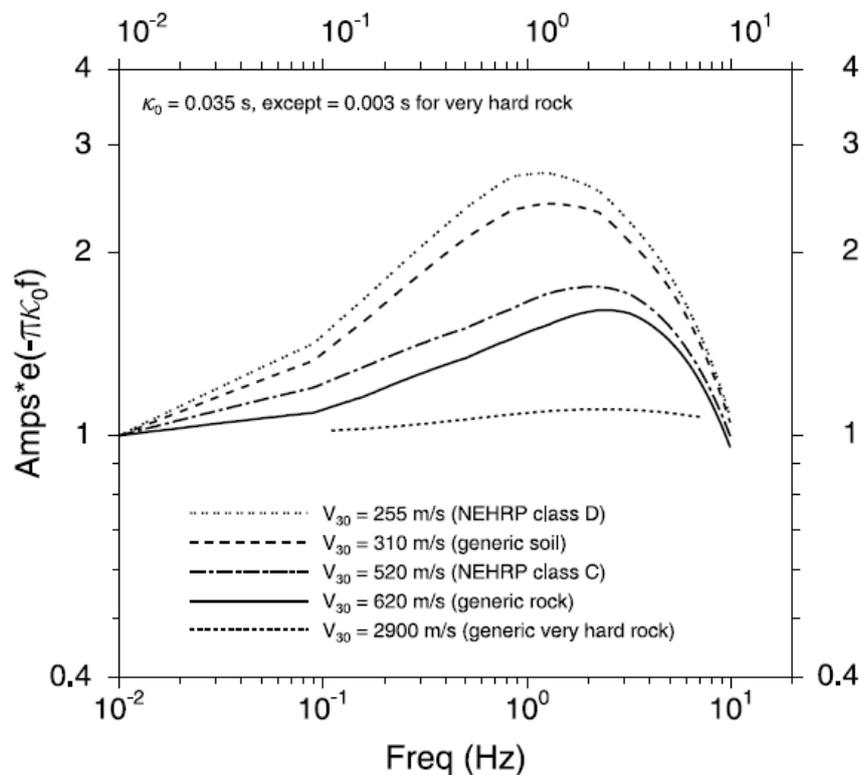


Figure I. 11 : Représentation de diverses conditions de site par différentes valeurs de V_{s30} , pour la simulation du produit entre le facteur d'amplification $A(f)$ et le facteur d'atténuation $D(f) = \exp(-\pi k_0 f)$ (Boore and Joyner (1997) citée par Boore (2003))

2.3.4 L'effet de type du mouvement $I(f)$

Le dernier terme qui compose le spectre total du mouvement sismique en utilisant la méthode stochastique de Boore (2003) est le type du mouvement $I(f)$. S'il s'agit du spectre de Fourier (Équa. I. 23) :

$$I(f) = (2\pi \cdot f \cdot i)^n ; i = \sqrt{-1}$$

Équa. I. 23

Avec :

$n = 0$: dans le cas de simulation du mouvement sismique comme déplacement,

$n = 1$: dans le cas de simulation du mouvement sismique comme pseudo-vitesse,

$n = 2$: dans le cas de simulation du mouvement sismique comme pseudo-accélération.

Pour avoir le spectre de réponse, on utilise l'Équa. I. 24 :

$$I(f) = \frac{-Vf^2}{(f^2 - f_r^2) - 2ff_r\xi i}$$

Équa. I. 24

Avec :

V égale à 1, pour calculer les spectres de réponse,

f_r : représente une fréquence naturelle non amortie,

ξ : est l'amortissement.

2.4 OBTENTION DU MOUVEMENT SISMIQUE

Deux manières sont proposées par Boore (2003) afin d'obtenir le mouvement sismique à un site donné en appliquant l'approche présentée dans la section précédente : la première, par des simulations dans le domaine temporel (séries de temps), et la deuxième, par la théorie de la vibration aléatoire (TVA).

2.4.1 Simulations des séries de temps

La description de cette procédure est donnée par la **Figure I. 12**. Pendant une durée qui est donnée par la durée du mouvement, un bruit blanc est généré comme il est illustré dans la **Figure I. 12a** ; ce bruit est ensuite filtré (**Figure I. 12b**). Après ces deux étapes, la transformation du bruit filtré sera effectuée en domaine fréquentiel comme il est montré dans la **Figure I. 12c** ; une normalisation du spectre est ensuite faite par la racine carrée du spectre d'amplitude carré moyen (**Figure I. 12d**) ; la **Figure I. 12e** illustre la multiplication du spectre normalisé par le spectre du mouvement sismique afin de transformer le spectre qui résulte dans le domaine temporel, comme il est présenté par la **Figure I. 12f**. Plus de détail sur cette procédure des simulations dans le domaine temporel est donné dans Boore (2003).

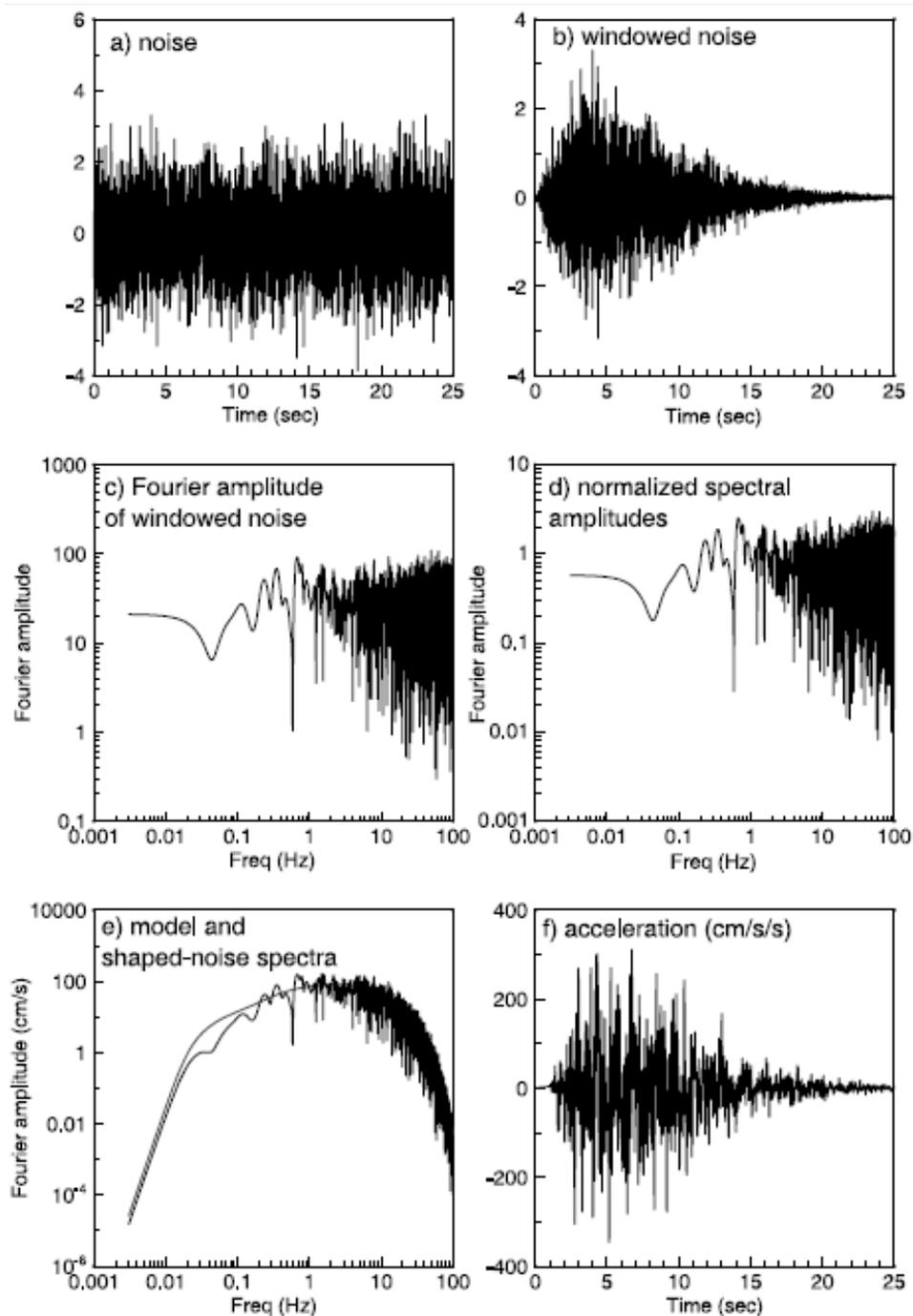


Figure I. 12 : Étapes de base de la méthode stochastique pour le domaine temporel afin d'effectuer des simulations du mouvement sismique (Boore, 2003)

Des exemples des simulations concernant l'accélération et la vitesse ainsi que le déplacement pour des séismes de magnitudes 4 et 7 à une distance de 10 km sont présentés dans la **Figure I. 13**.

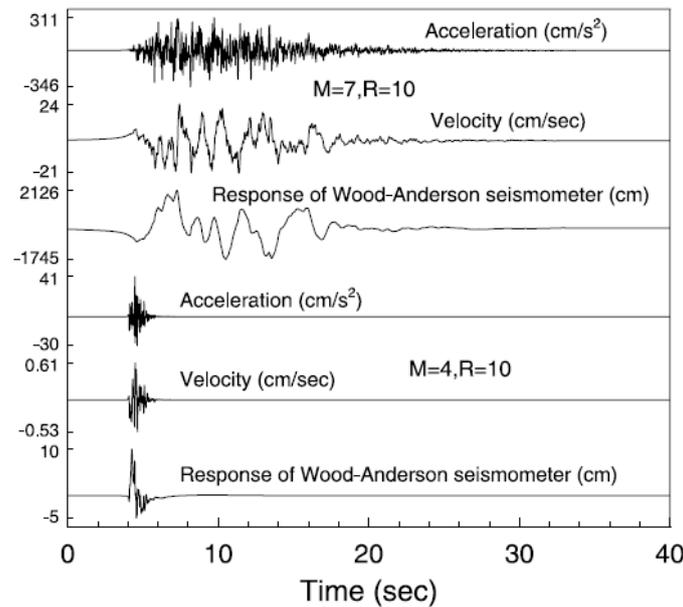


Figure I. 13 : Simulation de séries de temps de magnitudes 4 et 7 (Boore, 2003)

Les séries de temps données dans la **Figure I. 13** ont été simulées en utilisant les paramètres du modèle de Atkinson and Silva (2000). Il est à noter que l'obtention du mouvement sismique par la méthode de séries de temps (ou domaine temporel) se fait pour un certain nombre de simulations individuelles, afin de trouver un spectre moyen calculé à partir de la moyenne des spectres individuelles des différentes simulations.

2.4.2 Mouvements à partir de la théorie de la vibration aléatoire

La théorie de la vibration aléatoire décrite ici (Boore, 2003) est le moyen le plus rapide pour obtenir l'amplitude maximale du mouvement sismique mesuré : spectres de réponse, l'accélération maximale (PGA), la vitesse maximale (PGV) ainsi que le déplacement maximal (PGD).

L'essentiel de la théorie de la vibration aléatoire est montré par l'estimation d'un rapport entre le mouvement maximal (y_{\max}) et le mouvement rms (y_{rms}) à partir des équations de Cartwright and Longuet-Higgins (1956) , ce rapport de mouvements est donné par l'équation suivante (**Équa. I. 25**) :

$$\frac{y_{\max}}{y_{\text{rms}}} = 2 \int_0^{\infty} \left\{ 1 - \left[1 - \xi \exp(-z^2) \right]^{N_e} \right\} dz$$

Équa. I. 25

Avec (Équa. I. 26) :

$$\xi = \frac{N_z}{N_e}$$

Équa. I. 26

N_z, N_e : représentent le nombre de passages à zéro et à l'extrême, respectivement. L'extrême correspond à l'endroit où la première dérivée de la série de temps est égale à zéro.

Si N est grand (Équa. I. 27) :

$$\frac{y_{\max}}{y_{\text{rms}}} = \left[2 \ln(N_z) \right]^{1/2} + \frac{0.5772}{\left[2 \ln(N_z) \right]^{1/2}}$$

Équa. I. 27

N_z et N_e sont liés à des fréquences de passages à zéro (f_z), et d'extrêmes (f_e), et à une durée (t) par l'équation suivante (Équa. I. 28) :

$$N_{z,e} = 2 \tilde{f}_{z,e} \times t$$

Équa. I. 28

Les fréquences \tilde{f}_z et \tilde{f}_e sont représentées par les équations suivantes (Équa. I. 29 et Équa. I. 30), respectivement :

$$\tilde{f}_z = \frac{1}{2\pi} (m_2/m_0)^{1/2}$$

Équa. I. 29

$$\tilde{f}_e = \frac{1}{2\pi} (m_4/m_2)^{1/2}$$

Équa. I. 30

Pour $k = 0, 2, 4$: m_k sont les moments de l'amplitude spectrale quadratique, qui présentent un rôle fondamental dans la TVA (Boore, 2003). Pour tout entier k , m_k est donné en fonction de ($Y(M_0, R, f)$) par l'équation (Équa. I. 31), et ce pour un scénario sismique donné (R, M) :

$$m_k = 2 \int_0^{\infty} (2\pi f)^k |Y(f)|^2 df$$

Équa. I. 31

Concernant y_{rms} , il est donné par l'Équa. I. 32 (Boore, 2003) :

$$y_{rms} = (m_0/t)^{1/2}$$

Équa. I. 32

Selon Boore and Joyner (1984) ; Boore (2003) , la durée (t) à utiliser dans les équations (Équa. I. 28 et Équa. I. 32), peut être déterminée de la manière suivante : une durée du mouvement sismique (t_{gm}) à utiliser dans l'Équa. I. 28 pour déterminer N_z et N_e ; et une deuxième durée (t_{rms}) à utiliser dans l'Équa. I. 32 pour calculer y_{rms} . Une relation entre (t_{gm}) et (t_{rms}) est donnée dans l'Équa. I. 33 (Boore and Joyner, 1984) :

$$t_{rms} = t_{gm} + t_0 \left(\frac{\gamma^n}{\gamma^n + \alpha} \right)$$

Équa. I. 33

Avec :

$n=3$; $\alpha=1/3$ (Boore, 2003)

$$\gamma = t_{gm}/t_0$$

Où, la durée de l'oscillateur (t_0) est donnée par (Équa. I. 34) :

$$t_0 = \frac{1}{(2\pi \cdot f_r \cdot \xi)}$$

Équa. I. 34

2.4.3 Comparaison des simulations du mouvement sismique

Comme il a été discuté précédemment, les deux procédures : séries de temps et théorie de la vibration aléatoire, peuvent être utilisées pour calculer le mouvement sismique (Boore, 2003). Des estimations utilisant les deux procédures sont données à titre d'exemple dans la **Figure I. 14**. Dans cette figure, on illustre une comparaison de PSA en fonction de la période, pour un scénario $\{M, R\} = \{5.5, 30 \text{ km}\}$; les résultats montrent que les deux procédures stochastiques (Boore, 2003) (séries de temps et TVA), peuvent être utilisées pour estimer le mouvement sismique. Ainsi, un nombre de 40 simulations et plus, peut être suffisant pour appliquer la méthode "séries de temps" (qui confirme la supposition de Boore (2003)).

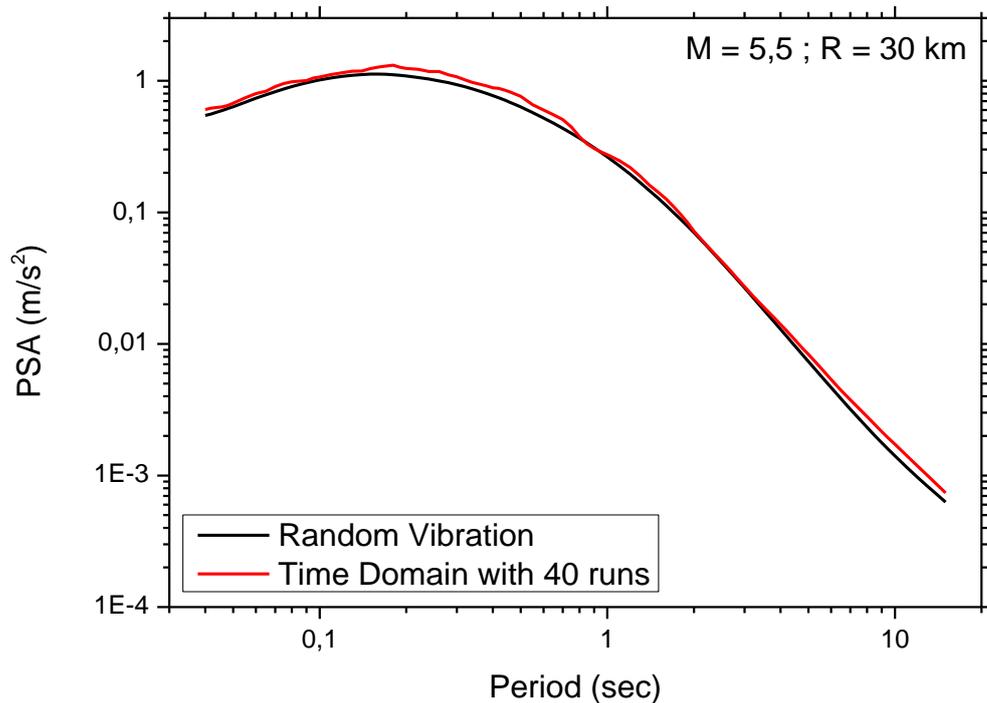


Figure I. 14 : Comparaison entre des simulations à partir de la méthode du domaine temporel (ou séries de temps) pour un nombre de 40 simulations, et des simulations en utilisant la théorie de la vibration aléatoire. Les spectres sont calculés pour une magnitude de 5.5 et à une distance de 30 km

3 APPROCHE EMPIRIQUE

3.1 INTRODUCTION

L'approche empirique est basée sur la collecte et l'utilisation des données qui sont recueillies par le biais de l'expérience, des mesures ou en utilisant des instruments scientifiques calibrés, afin d'obtenir une corrélation entre la variable à expliquer et les paramètres explicatifs du phénomène physique en question.

3.2 ÉQUATIONS DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE

Dans son côté le mouvement sismique peut être estimé par l'approche empirique. Le but est de trouver une corrélation entre l'intensité mesurée pour un scénario et un site donné. L'intensité est généralement représentée par PGA (accélération maximale du sol), PGV (vitesse maximale du sol) et PSA (pseudo-spectres d'accélération). Le scénario est donné par la magnitude et la distance entre la source et le site. Tandis que le site peut être caractérisé par un proxy local de site

tel que V_{s30} . Il en résulte à la fin, un modèle/équation de prédiction du mouvement sismique (ground-motion prediction model/equation : GMPM/GMPE).

Dans cette section, on passe en revue des différentes références des équations classiques de prédiction du mouvement du sol qui dépendent pour leur élaboration du choix, à priori, de la forme fonctionnelle et de la base de données utilisées.

Concernant le choix de la forme fonctionnelle, chaque GMPE présente une forme fonctionnelle élaborée à priori. On trouve dans la littérature différentes formes de GMPEs. Par exemple, les modèles de : Abrahamson and Youngs (1992) ; Campbell (1993) ; Bozorgnia, Campbell and Niazi (2000) ; Atkinson and Boore (2003) ; Beyaz (2004) ; Frisenda *et al.* (2005) ; Atkinson (2006) ; Douglas (2007) ; Boore and Atkinson (2008) ; Abrahamson and Silva (2008) ; Chiou and Youngs (2008) ; Cotton *et al.* (2008) ; Bindi *et al.* (2010) ; Yazdani and Kowsari (2013) ; Ghofrani and Atkinson (2014).

Ces dernières années, on parle des nouvelles générations de GMPEs, qui sont caractérisées par l'utilisation d'un nombre important des paramètres physiques. À cet égard, on peut citer le projet NGA-West 2 qui a donné naissance à plusieurs GMPEs : Abrahamson, Silva and Kamai (2014) ; Boore *et al.* (2014) ; Campbell and Bozorgnia (2014) ; Chiou and Youngs (2014).

Les détails sur ces GMPEs et d'autres, sont disponibles dans le rapport de Douglas (2021). Dans ce rapport, 480 équations donnant PGA, et 314 équations pour la prédiction des Pseudo-spectre de réponse (PSA).

3.2.1 Exemple d'une équation de prédiction du mouvement sismique : Boore et al. (2014)

Un exemple d'illustration d'une équation de prédiction du mouvement sismique est donné par l'Équa. I. 35. Cette équation montre la forme fonctionnelle de Boore *et al.* (2014), utilisée pour prédire "Y", qui représente soit PGA, PGV ou PSA (variables à prédire).

$$\ln Y = F_E(M, mech) + F_P(R_{JB}, M, region) + F_S(V_{s30}, R_{JB}, M, region, z_1) + \varepsilon_n \sigma(M, R_{JB}, V_{s30})$$

Équa. I. 35

Avec,

F_E , F_P , et F_S : représentent les fonctions des effets de source, de propagation d'onde et de site, respectivement (Boore *et al.*, 2014).

ϵ_n : représente un nombre fractionnaire d'écart types,

σ : représente l'écart type total du modèle.

M , $mech$, R_{JB} , $region$, V_{s30} et z_1 : représentent les paramètres prédictifs (ou explicatifs).

Les fonctions F_E , F_P et F_S sont données comme suit (Boore *et al.*, 2014) :

- La fonction d'effet de source F_E (Équa. I. 36) :

$$F_E(M, mech) = \begin{cases} e_0U + e_1SS + e_2NS + e_3RS + e_4(M - M_h) + e_5(M - M_h)^2 & M \leq M_h \\ e_0U + e_1SS + e_2NS + e_3RS + e_6(M - M_h) & M > M_h \end{cases}$$

Équa. I. 36

U , SS , NS et RS : représentent le type de la faille sismique, et qui prennent une valeur égale à 0 ou 1,

e_0 à e_6 : représentent des coefficients du modèle.

- La fonction d'effet de propagation d'onde F_P (Équa. I. 37) :

$$F_P(R_{JB}, M, region) = \left[c_1 + c_2(M - M_{ref}) \right] \ln(R/R_{ref}) + (c_3 + \Delta c_3)(R - R_{ref})$$

Équa. I. 37

Avec,

$$R = \sqrt{R_{JB}^2 + h^2}$$

c_1 , c_2 , c_3 , Δc_3 , M_{ref} , R_{ref} et h : représentent des coefficients du modèle.

- La fonction d'effet de site F_S (Équa. I. 38) :

$$F_S(V_{s30}, R_{JB}, M, region, z_1) = \ln(F_{lin}) + \ln(F_{nl}) + F_{\delta z_1}(\delta z_1)$$

Équa. I. 38

Avec,

F_{lin} , F_{nl} : représentent les composantes : linéaire et non linéaire, respectivement, concernant l'amplification de site,

$F_{\delta z_1}$: est l'effet de la profondeur du bassin.

La forme fonctionnelle était choisie et élaborée, il reste à déterminer ses coefficients. Pour ce faire, la méthode des moindres carrés est généralement utilisée, et ce à l'aide d'un ensemble de données tel que NGA-West 2 ou autres.

La GMPE qu'on a illustrée dans l'Équa. I. 35 s'est développée en se basant sur la base de données, issue du projet "NGA-West 2" (Atténuation de la prochaine génération (Ancheta *et al.*, 2014))

3.2.2 Exemple d'une base de données : NGA-West 2

Un vaste programme de recherche a été lancé par le centre de recherche en génie parasismique dans le pacifique (PEER), pour un but de développer des équations de prédiction du mouvement sismique de nouvelle génération pour les séismes crustaux superficiels dans les régions tectoniquement actives. Ce programme dans sa première génération "NGA-West1", comporte des données du mouvement fort (Chiou *et al.*, 2008). NGA-West1 représente le prédécesseur du projet "NGA-West2" (Ancheta *et al.*, 2014).

Ce dernier a été développé afin d'améliorer la qualité et la cohérence de NGA-West1 par :

- La mise à l'échelle du mouvement sismique concernant les séismes de magnitudes inférieures à 5,
- La possibilité de régionalisation des effets de propagation d'onde et de site, et d'élargir la base de données par des événements qui ont été produits après 2003 (dernière date des événements introduits dans la base de données NGA-West 1).

La sélection des événements ajoutés dans NGA-West 2 a suivi la même procédure que NGA-West 1, en se basant sur les mêmes critères (Ancheta *et al.*, 2014). Le projet de la base de données NGA-West 2 a combiné deux ensembles de données :

- Le premier se concentre sur des séismes dont les magnitudes sont supérieures à 5, il comprend 173 événements qui appartiennent à NGA-West1, et 160 événements qui ont été ajoutés (Ancheta *et al.*, 2014).
- Le deuxième ensemble de données est constitué de 266 événements, faibles à modérés, en provenance de la Californie pour des magnitudes comprises entre 3 et 5.45 (Ancheta *et al.*, 2014).

La **Figure I. 15** montre une comparaison entre NGA-West 1 et 2 en terme d'emplacement de l'épicentre.

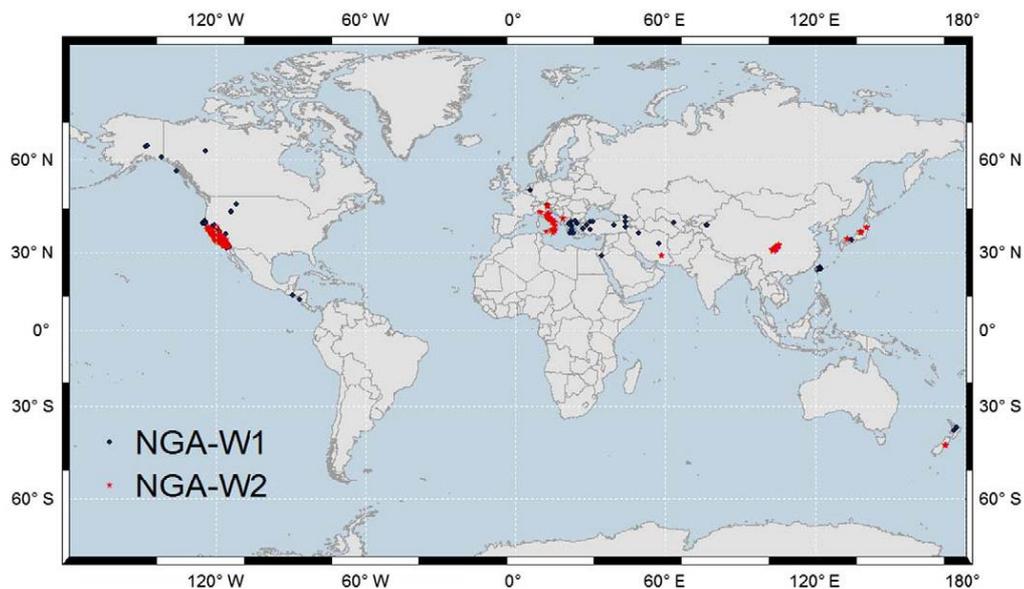


Figure I. 15 : Position des 599 événements (chocs principaux et répliques) de la base de données NGA-West 2 (Ancheta *et al.*, 2014)

La **Figure I. 16** illustre la distribution de la magnitude en fonction de la distance pour les deux bases de données.

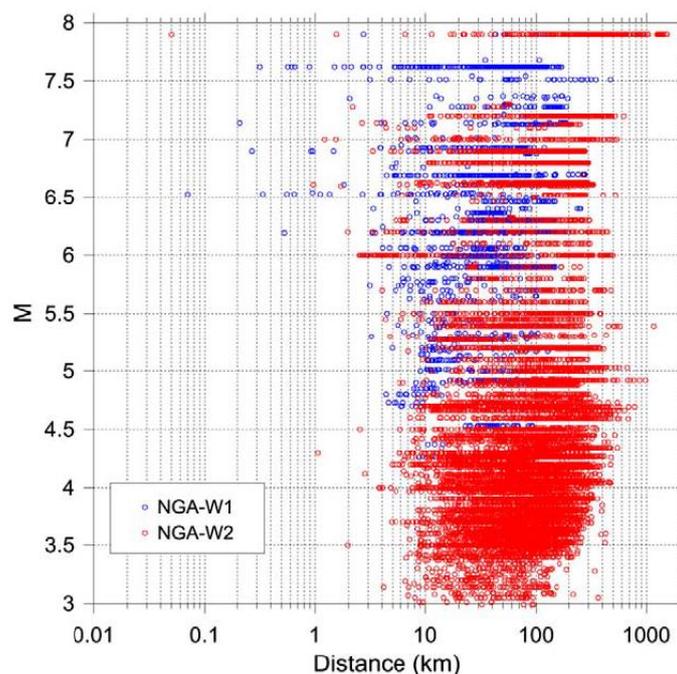


Figure I. 16 : Distribution de la magnitude en fonction de la distance pour les enregistrements inclus dans la base de données NGA-West 2, pour $3.0 < M < 7.9$ (Ancheta *et al.*, 2014)

Par ailleurs, la **Figure I. 17** renseigne sur le nombre de stations dans NGA-West 1 et NGA-West 2 pour différentes régions, où la nouvelle base de données présente plus d'enregistrements par rapport à l'ancienne version.

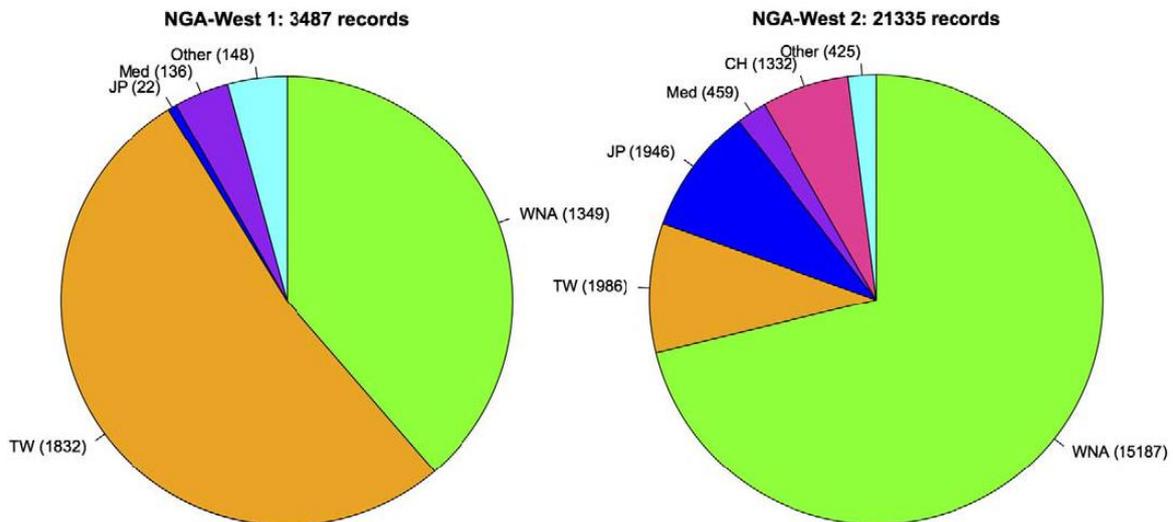


Figure I. 17 : Nombre d'enregistrements pour différentes régions qui composent NGA-West 1 et NGA-West 2. (CH : Chine, JP : Japon, Med : Méditerranée, TW : Taïwan, WNA : Ouest de l'Amérique du Nord (principalement la Californie)) (Ancheta *et al.*, 2014)

4 APPROCHE D'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE (MACHINE LEARNING)

4.1 INTRODUCTION

L'apprentissage automatique ou comme il est aussi appelé apprentissage artificiel est une filière du domaine de l'intelligence artificielle. Il se base sur des approches statistiques et mathématiques, pour faire apprendre aux ordinateurs la résolution des tâches (amélioration des performances), utilisant des données dans la phase d'apprentissage.

Les méthodes d'apprentissage automatique sont basées sur des données pour résoudre un problème de : prédiction, classification ou regroupement (similitude). Cette théorie trouve son origine du système d'apprentissage issu des domaines de l'analyse fonctionnelle, de la statistique et de l'intelligence naturelle.

4.2 MODÈLE DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE : GMPM-ANN

Le modèle de prédiction du mouvement sismique "GMPM-ANN" est basé sur les systèmes de réseaux de neurones artificiels (ANN) dans son développement. Ces

réseaux sont inspirés des réseaux de neurones biologiques, et représentent un système qui sert à traiter l'information. Les ANN ont une description similaire aux caractéristiques des systèmes de neurones biologiques, dont ils sont capables d'analyser des informations complexes et non linéaires.

L'architecture d'un réseau de neurones est composée de plusieurs couches interconnectées entre elles (les neurones de la même couche ne sont pas connectés). Il existe deux différentes couches, en plus des paramètres d'entrées :

- Paramètres d'entrées, dont il y a la réception des différentes données introduites. Pour ce cas, on peut trouver plus qu'un paramètre (magnitude, distance...etc.)
- La première couche, qui est appelée "couche cachée", elle peut contenir plus d'un neurone. Généralement, une couche cachée suffit pour un problème d'approximation de fonction (ou prédiction).
- Les données traitées dans la couche cachée seront propagées vers la "couche de sortie". Cette couche peut contenir un ou plusieurs neurones dont ils représentent les variables à prédire (à classer ou à regrouper).

Un exemple d'architecture d'un ANN est donné dans la **Figure I. 18**.

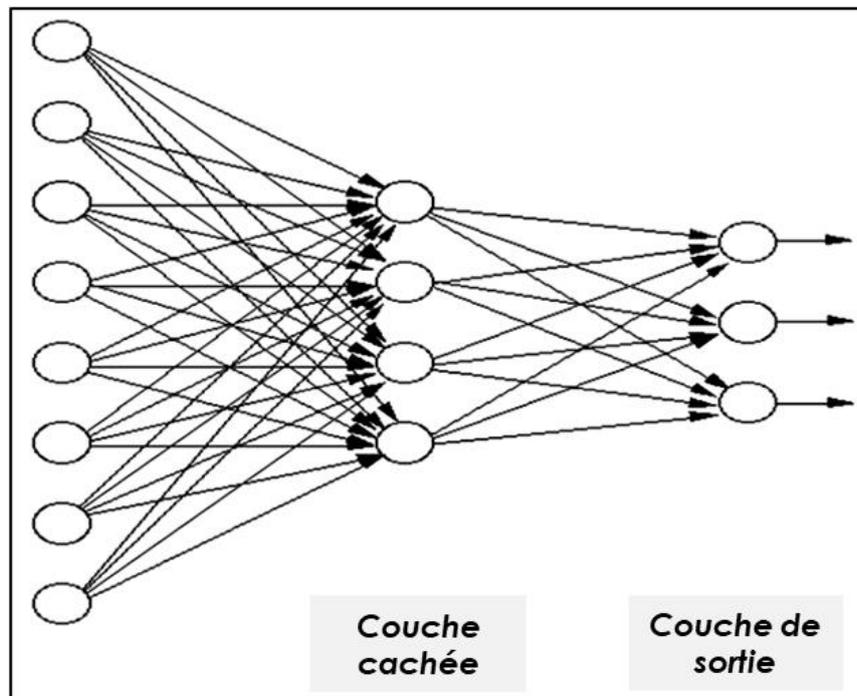


Figure I. 18 : Illustration d'une architecture des réseaux de neurones artificiels

Le processus d'apprentissage dans un réseau de neurones artificiels sert à réduire l'erreur entre la mesure et la simulation par le biais d'une fonction d'erreur ou de coût. Deux classes d'apprentissage peuvent être citées, à savoir : l'apprentissage supervisé et non supervisé (Derras, 2011).

4.2.1 Exemple d'un modèle de prédiction du mouvement sismique basé sur l'ANN : Derras, Bard and Cotton (2016)

L'équation (Équa. I. 39) donne un modèle de prédiction du mouvement sismique (GMPM-ANN). Ce modèle sert à estimer $\log_{10}(P\hat{S}A)$, qui représente la médiane de \log_{10} de PGA, PSV et PSA.

$$\log_{10}(P\hat{S}A) = a(T).f_1 + b(T).f_2 + c(T).f_3 - d(T)$$

Équa. I. 39

Avec,

$$\begin{cases} f_1 = th[-0.321.\ln(R_{JB}) + 0.134.M_w - 0.119.\ln(V_{s30}) + 1.686] \\ f_2 = th[-0.072.\ln(R_{JB}) + 0.554.M_w - 0.115.\ln(V_{s30}) - 1.387] \\ f_3 = th[-0.014.\ln(R_{JB}) + 0.141.M_w - 0.208.\ln(V_{s30}) + 1.515] \end{cases}$$

Ajoutant un modèle d'incertitude aléatoire à la médiane (Équa. I. 39), le modèle résultant est donné comme suit (Équa. I. 40) :

$$\log_{10}(PSA_{ij}) = \log_{10}(P\hat{S}A_{ij}) + \eta_i(M_w) + \varepsilon_{ij}(M_w, R_{JB}, V_{s30})$$

Équa. I. 40

Avec,

η_i : représente le résidu entre-événements pour l'événement i,

ε_{ij} : représente le résidu intra-événements pour l'événement i et l'enregistrement j.

4.3 MODÈLE DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE : GMPM-ANFIS

Le modèle de prédiction du mouvement sismique "GMPM-ANFIS" est basé sur les systèmes adaptatifs d'inférence neuro-floue (ANFIS). Ces systèmes présentent une fusion entre les réseaux de neurones artificiels "ANN" et la théorie de la logique floue "FL".

Le modèle ANFIS (Jang, 1993) comporte cinq couches. Il se base sur le système de Takagi et Sugeno, chaque couche présente une activité. Dans la première couche, les paramètres d'entrées sont associés aux fonctions d'appartenance. Un calcul des paramètres de règles qui s'appellent 'Antécédents', est effectué au niveau de la deuxième couche. Dans la troisième couche, une normalisation des poids de règles est donnée, ainsi qu'un calcul d'autres paramètres qui s'appellent 'Conséquents' qui est effectué dans la quatrième couche. La cinquième et dernière couche concerne le calcul de la somme des données qui résultent des couches précédentes.

Dans la **Figure I. 19** , un exemple d'illustration d'une architecture d'ANFIS est donné.

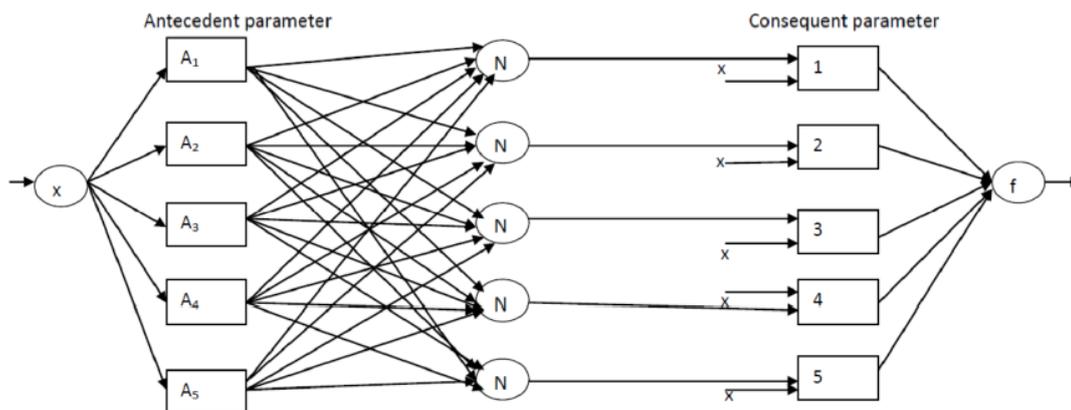


Figure I. 19 : Exemple d'illustration d'une architecture des systèmes ANFIS

Les systèmes ANFIS combinent les deux approches ANN et FL, travaillant sur leurs avantages et surmontant leurs inconvénients.

Sur la base de sa théorie mathématique concernant les ensembles flous, Zadeh (1965) a créé la logique booléenne (classique). Une extension de cette dernière a été formée afin de représenter la logique floue qui généralise la théorie des ensembles classiques. Une valeur ajoutée d'une flexibilité remarquable a été effectuée et donnée aux raisonnements traités par la logique floue, par l'introduction du terme du degré afin de vérifier une condition. La valeur ajoutée ici c'est que cette condition peut être dans un état qui est différent aux deux états classiques : vrai ou faux. Par la suite, les incertitudes et les imprécisions sont prises en compte par l'utilisation de la logique floue.

Une caractéristique très importante de la logique floue représente la fonction d'appartenance $\mu_A(x)$. Cette dernière est la fonction qui définit le sous-ensemble flou A, où il y a une généralisation du concept de la théorie des ensembles classiques.

La valeur de $\mu_A(x)$ associée pour tout élément x est quelconque en désignant son appartenance au sous-ensemble flou A.

La fonction d'appartenance peut prendre différentes formes, dont les plus couramment utilisées sont représentées par : la fonction gaussienne, la fonction triangulaire et la fonction trapézoïdale.

a- La fonction gaussienne : qui est caractérisée par les deux paramètres σ et c , sous la forme de l'équation suivante (Équa. I. 41) :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-c)^2}{2\sigma^2}\right)$$

Équa. I. 41

b- La fonction triangulaire : qui est caractérisée par les trois paramètres a , b et c , selon la forme de l'équation suivante (Équa. I. 42) :

$$\mu(x) = \max\left[\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right]$$

Équa. I. 42

c- La fonction trapézoïdale : qui est caractérisée par les quatre paramètres a , b , c et d , selon la forme de l'équation suivante (Équa. I. 43) :

$$\mu(x) = \max\left[\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c}\right), 0\right]$$

Équa. I. 43

4.3.1 Exemple d'un modèle de prédiction du mouvement sismique basé sur ANFIS : Ameer, Derras and Zendagui (2018)

Dans l'équation (Équa. I. 44), un exemple d'un modèle de prédiction du mouvement sismique (GMPM-ANFIS) est présenté. Ce modèle (Équa. I. 44) sert à estimer " $\log_{10}(Y_{\max})$ ", qui représente la médiane de \log_{10} de PGA, PGV et PSA. Les coefficients (a_1 à a_{28}) représentent des coefficients du modèle.

$$\log_{10}(y_{\max}) = \frac{1}{b} \left(\begin{array}{l} a_{19} + M_w (a_3 + a_8 M_w) + \log_{10} R_{JB} (a_2 + a_{10} \log_{10} R_{JB}) + \log_{10} V_{S30} (a_1 + a_{14} \log_{10} V_{S30}) + \\ M_w \log_{10} R_{JB} (a_7 \log_{10} R_{JB} \log_{10} V_{S30} + a_6 (\log_{10} V_{S30})^2 + a_5 M_w \log_{10} V_{S30} + a_9 M_w + \\ a_{11} \log_{10} R_{JB} + a_{20} \log_{10} V_{S30}) + M_w \log_{10} V_{S30} (a_{16} \log_{10} V_{S30} + a_{12} M_w + a_{18}) \\ + \log_{10} R_{JB} (a_{13} \log_{10} R_{JB} \log_{10} V_{S30} + a_{15} (\log_{10} V_{S30})^2 + a_{17} \log_{10} V_{S30}) \end{array} \right)$$

$$b = \log_{10} R_{JB} (a_{22} + a_{24} \log_{10} V_{S30}) + M_w (a_{23} + a_{25} \log_{10} V_{S30} + a_{26} \log_{10} R_{JB} + a_{28} \log_{10} R_{JB} \log_{10} V_{S30}) + a_{21} \log_{10} V_{S30} + a_{27}$$

Équa. I. 44

5 ÉTUDE CRITIQUE ET COMPARAISON

Différents modèles de prédiction du mouvement sismique, à savoir GMPE conventionnelle, GMPM-ANN, GMPM-ANFIS, ont été présentés dans les sections précédentes, en plus du modèle stochastique.

Dans cette section, des comparaisons entre le modèle de Boore *et al.* (2014) et les deux modèles : d'ANN et ANFIS, sont effectuées. L'objectif est de trouver le modèle le plus adéquat parmi eux. Et qui va servir, par la suite, comme l'outil principal de l'estimation du MS.

La **Figure I. 20** montre une comparaison des PSA prédits (à T=0.0, 0.2, 1.0 et 2.0 s) en fonction de la magnitude, appliquant le modèle GMPM-ANN de Derras, Bard and Cotton (2016) d'une part, et l'équation classique BSSA14 de Boore *et al.* (2014) d'autre part. Cette comparaison montre une similarité de prédictions entre les deux modèles, à l'exception d'une différence pour $M_w=[5.5-6.2]$, qui peut être causée par l'effet de magnitude de charnière (hinge magnitude " M_h "), qui concerne la GMPE classique de Boore *et al.* (2014).

Dans la **Figure I. 21**, des comparaisons de PSA en fonction de la période, sont données pour des magnitudes égales à 3.5, 4.5, 5.5, 6.5 et 7.5. La **Figure I. 21** montre que les deux approches donnent des niveaux de prédictions similaires. Cependant, une différence entre GMPM-ANN et GMPE(BSSA14) est remarquée pour $M_w=5.5$, aux périodes inférieures à T=0.3 s. Cette différence peut être causée par l'effet de M_h qui concerne la forme fonctionnelle des GMPEs, à savoir la GMPE de Boore *et al.* (2014).

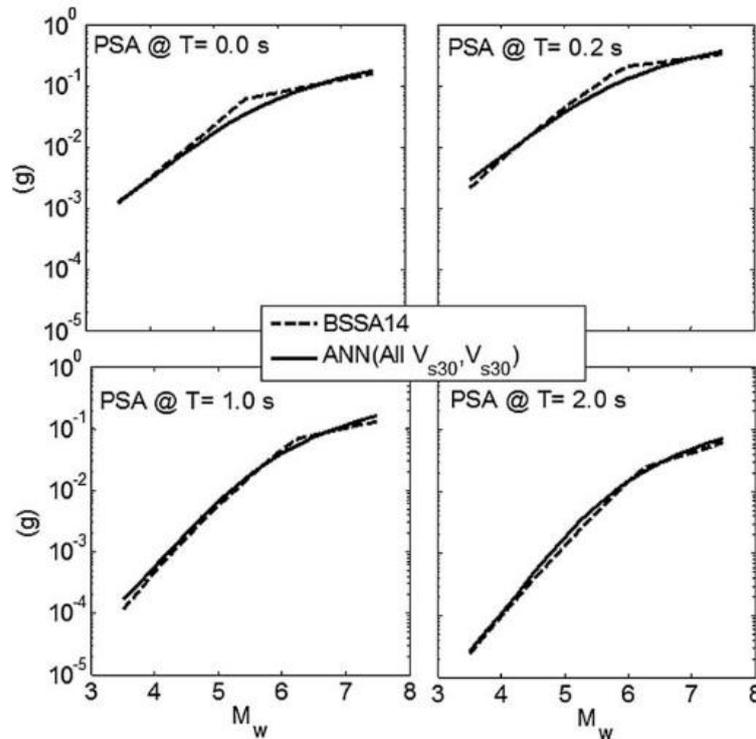


Figure I. 20 : Comparaison des prédictions de PSA (à $T=0.0, 0.2, 1.0$ et 2.0 s) en fonction de la magnitude, utilisant GMPM-ANN (Derras, Bard and Cotton, 2016), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les prédictions sont effectuées pour $V_{s30}=500$ m/s, à $R_{JB}=30$ km et avec un intervalle de M_w entre 3.5 et 7.5 (Derras, Bard and Cotton, 2016)

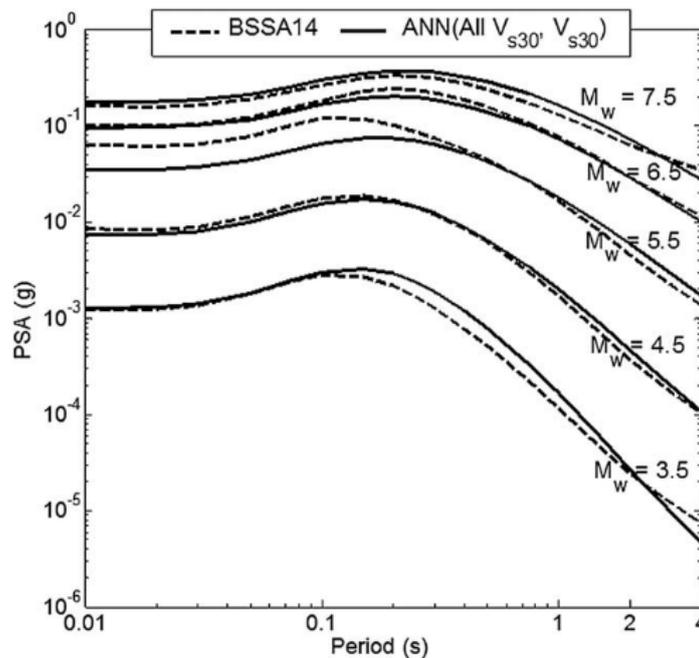


Figure I. 21 : Comparaison des prédictions de PSA en fonction de la période, appliquant GMPM-ANN (Derras, Bard and Cotton, 2016), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les prédictions sont effectuées pour $V_{s30}=500$ m/s, à $R_{JB}=30$ km et les magnitudes : $M_w=3.5, 4.5, 5.5, 6.5$ et 7.5 (Derras, Bard and Cotton, 2016)

Concernant l'application de l'approche ANFIS, des comparaisons du modèle GMPM-ANFIS de Ameer, Derras and Zendagui (2018), avec la GMPE (BSSA14, Boore *et al.* (2014)), sont données dans la **Figure I. 22**. Cette figure montre que les courbes de PSA prédites (à $T=0.0, 0.2, 1.0$ et 2.0 s) en fonction de la magnitude, utilisant les deux modèles, ont des parties similaires, ainsi que quelques différences dans l'intervalle de M_w , à savoir $M_w=[5.5-6.2]$, dont l'équation de (BSSA14, Boore *et al.* (2014)) est influencée par la considération de magnitudes de charnière M_h dans sa forme fonctionnelle.

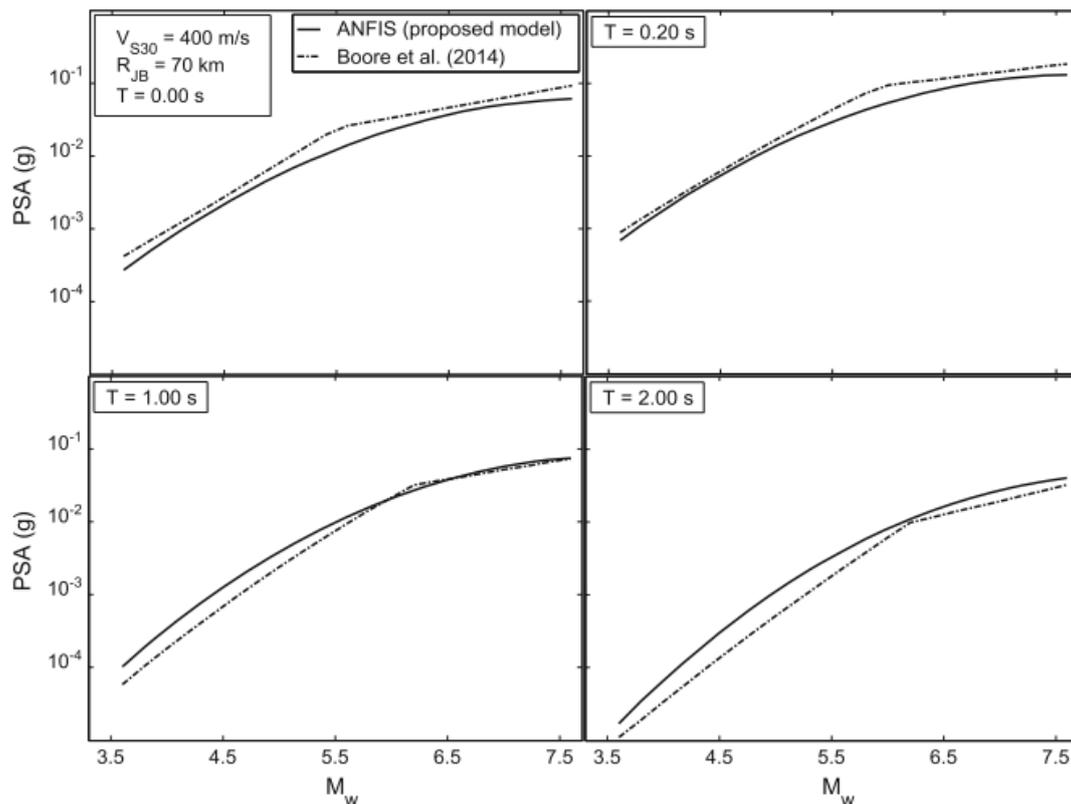


Figure I. 22 : Comparaison des prédictions de PSA (à $T=0.0, 0.2, 1.0$ et 2.0 s) en fonction de M_w , appliquant GMPM-ANFIS (Ameer, Derras and Zendagui, 2018), et GMPE (BSSA14, (Boore *et al.*, 2014)). Les prédictions sont effectuées pour $V_{s30}=400$ m/s, à $R_{JB}=70$ km et avec un intervalle de M_w entre 3.6 et 7.6 (Ameer, Derras and Zendagui, 2018)

Dans la **Figure I. 23**, des comparaisons de PSA en fonction de la période, sont données pour $M_w=4, 5, 6$ et 7 . Les prédictions sont présentées dans cette figure en appliquant le modèle GMPM-ANFIS de Ameer, Derras and Zendagui (2018), et la GMPE (BSSA14, Boore *et al.* (2014)). Les résultats de cette figure illustrent que ces modèles estiment des courbes de PSA similaires.

Cependant, la **Figure I. 23** montre aussi des valeurs de PSA utilisant le modèle GMPM-ANFIS, qui sont inférieures par rapport à GMPE(BSSA14) pour les courtes périodes. Alors que, pour les longues périodes, GMPE(BSSA14) donne des valeurs de PSA inférieures par rapport au GMPM-ANFIS.

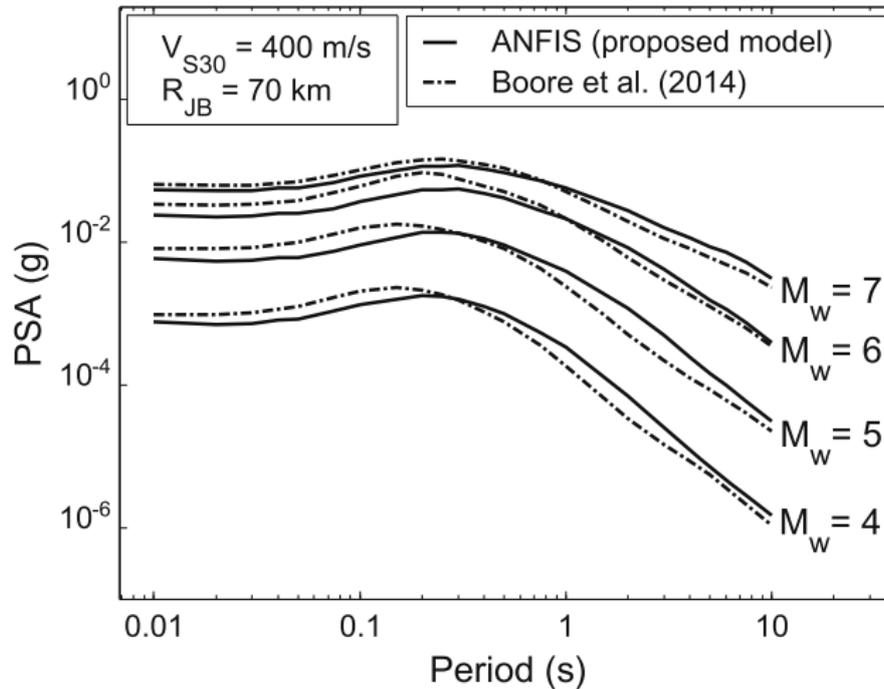


Figure I. 23 : Comparaison de prédictions de PSA en fonction de la période, entre le modèle GMPM-ANFIS (Ameur, Derras and Zendagui, 2018), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Pour M_w égale à : 4, 5, 6 et 7 ; V_{S30}=400 m/s ; R_{JB}=70 km (Ameur, Derras and Zendagui, 2018)

Concernant la variabilité aléatoire du mouvement sismique (Sigma), des comparaisons utilisant les modèles GMPM-ANFIS de Ameur, Derras and Zendagui (2018) et GMPM-ANN de Derras, Bard and Cotton (2016), ainsi que l'équation classique BSSA14 de Boore *et al.* (2014), sont données dans la **Figure I. 24**.

Ces résultats montrent que dans plusieurs cas considérés, les valeurs de Sigma(GMPM-ANFIS) sont inférieures aux autres modèles (GMPM-ANN et BSSA14), à l'exception des cas de M_w=7 (magnitude qui est associée à une faille finie, qui ne concerne pas cette étude), dont les valeurs de Sigma(BSSA14) sont plus faibles que les deux autres modèles.

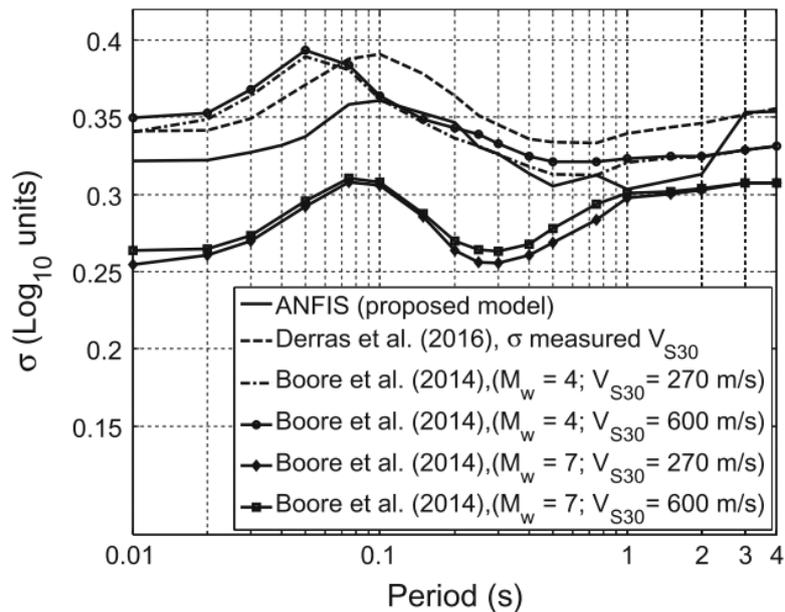


Figure I. 24 : Comparaison de la variabilité aléatoire (Sigma) en fonction de la période, entre GMPM-ANFIS (Ameur, Derras and Zendagui, 2018), GMPM-ANN (Derras, Bard and Cotton, 2016), et GMPE (BSSA14, (Boore et al., 2014)). Les comparaisons sont montrées pour des scénarios de $M_w=4$ et 7 , et de $V_{S30}=270$ et 600 m/s (Ameur, Derras and Zendagui, 2018)

À la lumière des comparaisons effectuées dans cette section, on peut remarquer que l'approche ANFIS a la capacité de prédire des amplitudes du mouvement sismique, qui sont comparables à celles de ANN et BSSA14.

On peut remarquer aussi que la variabilité aléatoire trouvée utilisant l'approche ANFIS, a des valeurs raisonnables dans un grand intervalle de périodes.

La GMPE classique utilisée (BSSA14), donne aussi des valeurs de Sigma qui sont meilleures pour une magnitude de 7, qui peuvent être expliquées par le nombre supérieur des paramètres utilisés dans sa forme fonctionnelle et la dépendance (hétéroscédasticité) existante entre le Sigma d'inter événement et la magnitude. Cependant, la forme fonctionnelle de BSSA14 a été, à priori, choisie, avec un degré de complexité accru.

Concernant l'approche stochastique, qui est basée sur : **(1)** la compréhension du phénomène physique sous-jasant (détaillé précédemment) et **(2)** les modèles des paramètres physiques (tel que *le paramètre de chute de contrainte sismique $\Delta\sigma$*), qui restent difficiles à déterminer à partir de la méthode classique qui est basée sur la règle de similarité (**Équa. I. 3**), dont f_0 est un paramètre difficile à estimer correctement.

$\Delta\sigma$ va être estimée (Chapitre III) par une nouvelle technique. Cette dernière est basée sur le GMPM-ANFIS qui va être considéré comme un modèle de référence. Puisque ce modèle est dirigé par les données et ne représente aucune condition sur le choix de la forme fonctionnelle, donc il est le mieux placé pour représenter les données, tels que NGA-West 2 et synthétiques (chapitre III et IV).

6 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu sur les trois approches d'estimation du mouvement sismique. La première, représente l'approche stochastique, dont des données synthétiques du mouvement sismique sont estimées, en appliquant les programmes (SMSIM) de la méthode de Boore (2003). Cette méthode a été détaillée sur le plan physique et développement mathématique, en prenant la source sismique comme étant une source ponctuelle.

La deuxième approche présentée est l'approche empirique, qui est représentée par les équations classiques de prédiction du mouvement sismique. Ces dernières sont basées sur les données mesurées telles que les données compilées de NGA-West2.

L'approche d'apprentissage automatique d'estimation du mouvement sismique est illustrée comme une troisième approche. Deux modèles de prédiction du mouvement sismique, qui sont entièrement pilotés par les données ont été présentés, à savoir GMPM-ANFIS et GMPM-ANN.

À la fin de ce chapitre, une étude comparative a été effectuée afin d'obtenir le modèle le plus adapté à la détermination des paramètres physiques de l'approche stochastique, tel que le paramètre de chute de contrainte sismique. Des détails sur ce paramètre vont être explicitement développés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

PRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS MODÈLES DU PARAMÈTRE DE LA CHUTE DE CONTRAINTE SISMIQUE

SOMMAIRE DU CHAPITRE II

CHAPITRE II. PRÉSENTATION DE DIFFÉRENTS MODÈLES DU PARAMÈTRE DE LA CHUTE DE CONTRAINTE SISMIQUE	41
1 INTRODUCTION.....	43
2 SIGNIFICATION PHYSIQUE DU PCCS	43
3 ORIGINE DU PCCS	44
3.1 CHUTE DE CONTRAINTE STATIQUE	46
3.2 CHUTE DE CONTRAINTE DYNAMIQUE	46
3.3 DÉPENDANCE ENTRE LA CHUTE DE CONTRAINTE STATIQUE ET DYNAMIQUE	48
4 MÉTHODES D'ESTIMATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE	49
4.1 ESTIMATION DE LA CHUTE DE CONTRAINTE STATIQUE	50
4.2 ESTIMATION DE LA CHUTE DE CONTRAINTE DYNAMIQUE.....	51
5 LE PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE ET LA LIBÉRATION D'ÉNERGIE.....	53
6 QUESTION DE LA DÉPENDANCE ENTRE LA CHUTE DE CONTRAINTE DYNAMIQUE ET LA MAGNITUDE	55
6.1 MODÈLES DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE INDÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE	56

6.2	MODÈLES DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE	60
7	CONCLUSION.....	66

1 INTRODUCTION

Pour la compréhension du comportement physique au niveau de la source sismique, la détermination de l'état de contraintes avant, pendant et après un séisme est très importante. À partir des ondes sismiques qui se propagent à travers des structures complexes, l'état de contraintes est généralement déduit indirectement (Kanamori, 1994). Ainsi, les paramètres de contrainte, obtenus, dépendent des méthodes, des données sismologiques spécifiques et des hypothèses utilisées lors de cette analyse indirecte (Kanamori, 1994).

La différence entre les états de contraintes sur le plan de la faille définit le paramètre de la chute de contrainte sismique (PCCS). Ce dernier est un paramètre fondamental dans la description de la mise à l'échelle (scaling) de la source sismique, et qui est représenté par la chute de contrainte statique d'une part et la chute de contrainte dynamique d'autre part.

Le PCCS et ses différents modèles sont présentés dans le présent chapitre. On commence par donner la signification physique et l'origine des deux PCCS : statique et dynamique, et d'étudier une éventuelle dépendance entre les deux. On présente par la suite les différentes méthodes d'estimation du PCCS. On essaye d'illustrer, aussi, les relations existantes entre le PCCS et la libération d'énergie lors d'un événement sismique afin de montrer l'importance de ce paramètre. Pour arriver à la fin, à la question de la dépendance/indépendance (mise à l'échelle) existante entre le PCCS et la magnitude.

2 SIGNIFICATION PHYSIQUE DU PCCS

Les géologues parlent souvent de la chute de contrainte statique, **le changement de contrainte moyenne** apparu sur la faille avant et après une rupture sismique, qui contrôle la mécanique de la déformation crustale et devrait être lié au glissement sur une faille, ce qui peut alimenter les statistiques d'occurrence du tremblement de terre.

Tandis que la chute de contrainte dynamique est **la modification de la contrainte de cisaillement** entraînant un glissement qui se transforme en énergie sismique de rayonnement. Cette énergie contrôle l'amplitude et le contenu fréquentiel des mouvements sismiques forts. La chute de contrainte dynamique influe

principalement sur le niveau d'accélération (ex. PGA) à haute fréquence (Brune, 1970, 1971).

Dans les modèles sismiques théoriques idéalisés, les chutes de contraintes statiques et dynamiques sont équivalentes. La **Figure II. 1** donne la variation de la contrainte de cisaillement, en illustrant la chute de contrainte statique ainsi que dynamique.

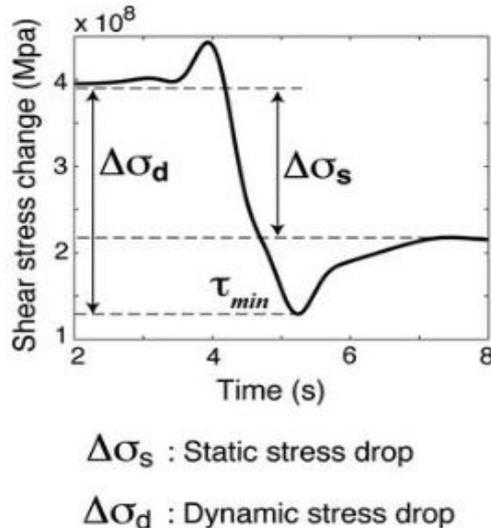


Figure II. 1 : Variation de la contrainte de cisaillement avec le temps (Causse, Dalguer and Mai, 2014)

3 ORIGINE DU PCCS

Lors d'un événement sismique, les zones de rupture sont généralement planes (plan de faille), cependant, parfois on trouve une géométrie complexe. Sur la zone de faille, la distribution des contraintes varie d'une manière complexe en fonction du temps et de l'espace. La contrainte s'accumule progressivement de façon élastique pendant une longue période inter-sismique (**Figure II. 2**), sur une échelle de temps de plusieurs décennies voir plusieurs siècles.

Au cours d'une période inter-sismique, la variation des contraintes peut être considérée comme quasi-statique (Kanamori, 1994). Cette variation dans l'espace présente une concentration de contraintes à proximité d'emplacements à géométrie complexe de faille.

Un relâchement des contraintes accumulées est présenté lors d'un tremblement de terre donnant naissance à un glissement rapide sur le plan de la faille. La contrainte

varie sur une échelle de temps de quelques secondes à quelques minutes lors d'un séisme (période co-sismique (**Figure II. 2**)) (Kanamori, 1994).

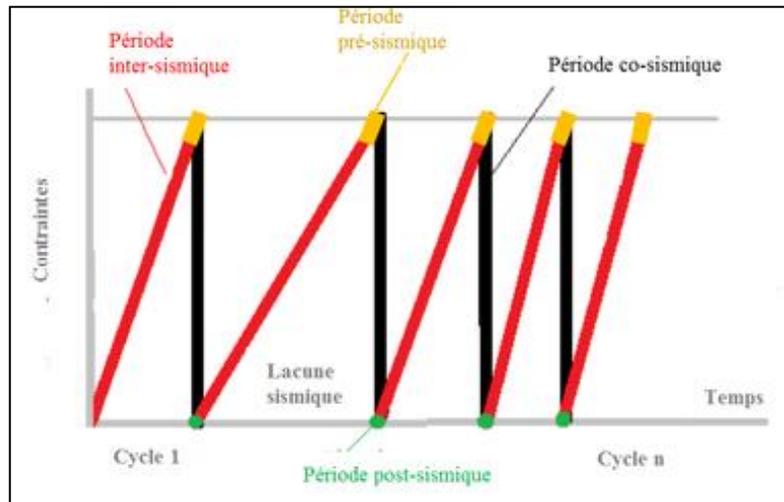


Figure II. 2 : Variations de la contrainte en fonction de l'échelle du temps, pour différents périodes sismiques

Il est à noter que, dans la plupart des endroits du plan de faille, la contrainte (principalement de cisaillement) diminue. Cependant, elle peut augmenter près du bord d'une faille (où il existe une concentration de contraintes) (Kanamori, 1994).

La **Figure II. 3** illustre un exemple d'apparition de faille en surface, après le séisme d'El-Asnam (Algérie en 1980)



Figure II. 3 : Illustration du plan de faille en surface après le séisme d'El-Asnam (Algérie en 1980)

3.1 CHUTE DE CONTRAINTE STATIQUE

La chute de contrainte statique $\Delta\sigma_s$ est la mesure de la réduction globale de la contrainte de cisaillement qui due au glissement existant sur la zone de faille. Elle est définit comme la différence entre la contrainte de cisaillement moyenne sur la zone de faille, avant et après le séisme (Ruff, 1999), comme illustré sur la **Figure II. 4**.

La différence de l'état de contrainte " $\Delta\sigma_s$ " est donnée comme suit (**Équa. II. 1**) :

$$\Delta\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_1$$

Équa. II. 1

σ_0 : est la contrainte de cisaillement tectonique sur la faille avant le séisme,

σ_1 : est la contrainte de cisaillement après la rupture du séisme.

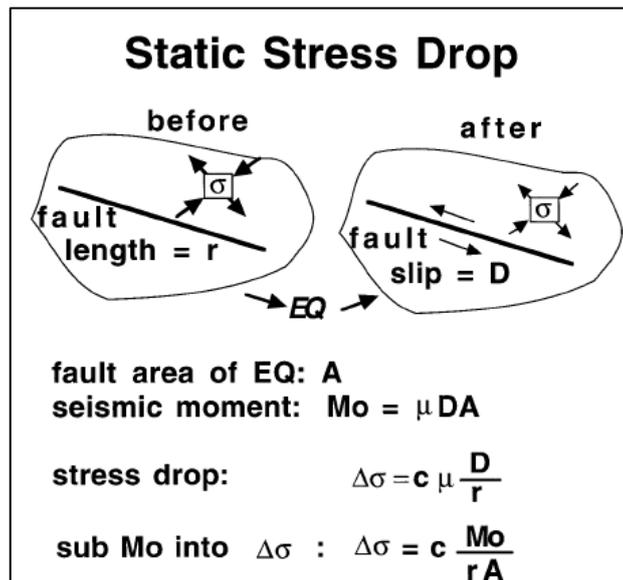


Figure II. 4 : Définitions de la chute de contrainte statique. Avec, M_0 : le moment sismique, μ : le module de cisaillement élastique, D : le glissement moyen sur la zone faillée (A), r : la longueur caractéristique de la zone de faille et c : une constante géométrique proche de 1 (si r est bien choisi) (Ruff, 1999)

3.2 CHUTE DE CONTRAINTE DYNAMIQUE

La contrainte dynamique se change d'une façon très complexe lors de la formation de failles (Kanamori, 1994). Selon Brune (1970), si la faille se rompt à $t=0$, instantanément, sous la contrainte de cisaillement tectonique initiale σ_0 , alors le point qui est juste à côté de la faille se déplace comme il est montré sur la **Figure II. 5**. Le frottement cinétique (ou la contrainte de frottement) σ_f sert à résister au

mouvement de la faille durant le glissement (Kanamori, 1994), et la différence " $\sigma_0 - \sigma_f$ " représente la chute de contrainte dynamique " $\Delta\sigma_d$ " qui est la contrainte effective pour entraîner le mouvement de la faille.

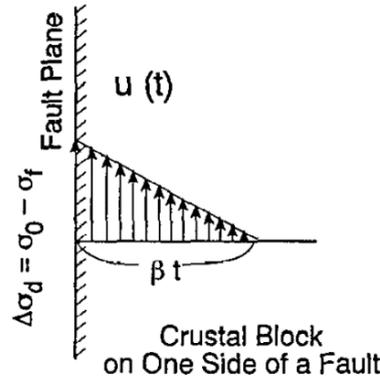


Figure II. 5 : Illustration du déplacement à l'instant "t". Avec la chute de contrainte dynamique $\Delta\sigma_d = \sigma_0 - \sigma_f$ (Kanamori, 1994)

$\Delta\sigma_d$ et la vitesse des particules \dot{U} peuvent être liés entre eux d'un côté de la faille (Brune, 1970). Et la propagation de la perturbation de cisaillement après le début de la rupture est perpendiculaire à la faille, et atteint la distance " $\beta.t$ " au temps t (Figure II. 5). Avec, le déplacement sur la faille noté par $u(t)$ au temps t , la déformation instantanée est $u(t)/\beta.t$ (Kanamori, 1994).

Cela est causé par $\Delta\sigma_d$ (Kanamori, 1994), avec (Équa. II. 2) :

$$\Delta\sigma_d = \mu u(t) / \beta t$$

Équa. II. 2

Où, β est la vitesse de l'onde de cisaillement.

Qui donne (Équa. II. 3),

$$u(t) = \Delta\sigma_d \beta t / \mu$$

Équa. II. 3

Et (Équa. II. 4),

$$\dot{u}(t) = (\Delta\sigma_d / \mu) \beta = \dot{U} = cste$$

Équa. II. 4

Selon Kanamori (1994), basant sur Brune (1970, 1971), la contrainte effective $\Delta\sigma_d$ est donnée sous la forme suivante (Équa. II. 5) :

$$\Delta\sigma_d = c_1 \left(\frac{\mu}{\beta} \right) \dot{U}, \text{ avec } \dot{U} = \frac{D}{(2T_r)}$$

Équa. II. 5

Avec,

c_1 : est une constante proche de 2,

T_r : le temps de montée. T_r , c'est l'intervalle de temps en un point donné de la faille, qui est nécessaire pour atteindre la valeur finale du glissement.

Pour plus de détails sur la chute de contrainte dynamique voir Ruff (1999).

3.3 DÉPENDANCE ENTRE LA CHUTE DE CONTRAINTE STATIQUE ET DYNAMIQUE

Selon Oth (2007), Il existe une dépendance entre la chute de contrainte dynamique et statique, avec une interconnexion qui est dépendante du modèle de la source du séisme. Cette interconnexion peut être donnée comme suit (Équa. II. 6) (Oth, 2007) :

$$\Delta\sigma_d \approx \frac{r}{T_r v_R} \Delta\sigma_s$$

Équa. II. 6

Avec,

r : la longueur de la faille.

v_R : la vitesse de rupture.

$T_r v_R$: est une échelle de longueur.

Selon Oth (2007), les cas suivants peuvent être considérés :

- Si $T_r v_R = r$, le temps de montée T_r est proche au temps de rupture de la faille. Dans ce cas, la chute de contrainte statique $\Delta\sigma_s$ est proche à la chute de contrainte dynamique $\Delta\sigma_d$.

- Si $T_r v_R \ll r$, le temps de rupture est très grand par rapport au temps de montée, ce qui donne que $\Delta\sigma_d$ est plus grande par rapport à $\Delta\sigma_s$.

- Si $T_r v_R \gg r$, $\Delta\sigma_d$ est plus petite par rapport à $\Delta\sigma_s$, ce qui signifie que la durée du glissement est beaucoup plus grande que la durée de la rupture sismique. Dans ce cas, le glissement est très lent dans sa production.

Les conditions discutées ci-dessus ainsi que les définitions de $\Delta\sigma_d$ et $\Delta\sigma_s$ permettent de distinguer entre la chute de contrainte dynamique et statique. La chute de contrainte statique fournit les informations sur la quantité du changement de l'état de contrainte de cisaillement sur la faille, répondant à la question de la quantité du glissement concernant une faille donnée. La chute de contrainte dynamique fournit l'information sur l'échelle de temps du changement de contraintes (vitesse du glissement), ce qui est très important dans l'évaluation du rayonnement sismique (Oth, 2007).

Il y a une différence fondamentale dans le cas du changement de contrainte pendant quelques secondes ou années (Oth, 2007). Le premier cas montre le résultat d'un séisme, et le deuxième cas, un fluage aisé (glissement lent). Ce qui montre l'importance de la chute de contrainte dynamique (vitesse de glissement) pour le rayonnement des ondes sismiques (à haute fréquence), comme étant un paramètre de source.

Dans le premier cas, le résultat est un séisme, alors que dans le second cas, il s'agit d'un fluage aisé. En conséquence, la vitesse du glissement (ou chute de contrainte dynamique) est un paramètre de source très important compte tenu du rayonnement des ondes sismiques. En particulier, à haute fréquence (HF) comme on le verra dans la section suivante.

4 MÉTHODES D'ESTIMATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE

$\Delta\sigma_d$ contrôle le niveau d'accélération maximale du sol (Hanks and Johnson, 1976), ce qui montre que ce paramètre est un paramètre clé dans l'estimation du mouvement sismique HF à forte intensité.

D'abord, l'estimation de la chute de contrainte statique est liée à l'estimation des dimensions de la source. L'estimation de ces derniers dépend de la méthodologie qui est utilisée, et représente une source d'erreurs importante (Oth, 2007).

Dans le processus de détermination de la chute de contrainte dynamique, on trouve une difficulté pour obtenir la fonction du temps de la vitesse du glissement. En générale, des hypothèses de simplifications sur les conditions de site et sur le milieu sont à effectuer, et ce pour la correction des effets de propagation des ondes

sismiques et de site ; ce qui influe sur la vitesse du glissement, qui sera obtenue (Oth, 2007).

4.1 ESTIMATION DE LA CHUTE DE CONTRAINTE STATIQUE

Dans cette section, on présente les méthodes les plus utilisées dans la détermination des dimensions de la source, ce qui donne la chute de contrainte statique, à savoir : *la méthode de distribution des répliques, la méthode de rupture de surface et données géodésiques, la méthode des modèles de rupture de la source finie*, et enfin, *la méthode d'analyse de la fréquence coin*.

4.1.1 Méthode de distribution des répliques

Dans cette méthode, on détermine la zone de rupture totale à partir de la zone de réplique. Une valeur moyenne du paramètre de chute de contrainte sur l'ensemble de la faille est dérivée et estimée à partir des dimensions obtenues (Kanamori, 1994; Oth, 2007).

4.1.2 Méthode de rupture de surface et données géodésiques

Cette méthode est utilisée dans le cas des tremblements de terre crustaux majeurs, l'estimation du plan de faille est effectuée à partir de la surface de rupture. Avec cette méthode, la longueur de la zone de rupture est déterminée, cependant, pour la largeur, son estimation doit se faire en utilisant une autre technique (distribution des répliques par exemple). La valeur moyenne du paramètre de chute de contrainte sur le plan de faille est estimée par la suite utilisant ces dimensions (qui sont déterminées pour la surface de rupture totale) (Kanamori, 1994 ; Oth, 2007).

4.1.3 Méthode des modèles de rupture de la source finie

Cette méthode est considérée comme une méthode puissante qui concerne les tremblements de terre crustaux majeurs. Avec l'utilisation de cette méthode, on estime la taille de la source, le temps de montée, et la distribution spatiale du glissement. La chute de contrainte statique est estimée par la suite (Kanamori, 1994; Oth, 2007).

4.1.4 Méthode d'analyse de la fréquence coin

Pour cette méthode, la taille de la source est estimée en utilisant l'Équa. II. 7, dont la fréquence coin f_c est utilisée. Ensuite, la chute de contrainte statique peut être

estimée en utilisant les dimensions obtenues (Abercrombie, 1995 ; Abercrombie and Rice, 2005).

$$f_c = C \cdot \frac{\beta}{r}$$

Équa. II. 7

Avec,

r : représente le rayon de la faille (ou rayon de source).

β : la vitesse de l'onde de cisaillement.

Et,

Pour le modèle de Brune (1970, 1971), (Équa. II. 8) :

$$C = 2.34/2\pi$$

Équa. II. 8

Pour le modèle de Beresnev (2001), (Équa. II. 9) :

$$C = 0.67/2\pi$$

Équa. II. 9

4.2 ESTIMATION DE LA CHUTE DE CONTRAINTE DYNAMIQUE

Pour la chute de contrainte dynamique, on peut utiliser différentes méthodes, à savoir, Boatwright (1980) ; Oncescu (1989) ; Heaton (1990) ; Kanamori (1994) : *la méthode d'estimation directe à partir de la vitesse des particules, la méthode de la pente initiale*, et enfin, *la méthode d'accélération quadratique moyenne*.

4.2.1 Méthode d'estimation directe à partir de la vitesse des particules

L'estimation de la vitesse des particules est une étape nécessaire dans l'utilisation de cette méthode. La vitesse de glissement est calculée dans ce cas après l'obtention du temps de montée, ainsi que du glissement final (Heaton, 1990 ; Kanamori, 1994).

4.2.2 Méthode de la pente initiale

Cette méthode est basée sur le travail de Boatwright (1980). La rupture est supposée avoir une forme circulaire, avec un processus de source simple. Cette méthode est appliquée pour des événements modérés (voir aussi, Oncescu (1989)).

4.2.3 Méthode d'accélération quadratique moyenne

La chute de contrainte dynamique et l'accélération quadratique moyenne "a_{rms}" sont liées selon Hanks and McGuire (1981) (voir aussi, Oncescu (1989)). L'a_{rms} est définie comment suit (Équa. II. 10) :

$$a_{rms} = \sqrt{\frac{\int_{t_1}^{t_2} a(t)^2 dt}{\Delta t}}$$

Équa. II. 10

Avec,

t₁ et t₂ : sont le début et la fin d'une fenêtre de temps, respectivement.

a(t) : est la série temporaire de l'accélération.

Δt : est la longueur de la fenêtre de temps (t₂-t₁).

La chute de contrainte dynamique peut être calculée, d'après Hanks and McGuire (1981) par l'équation suivante (Équa. II. 11) :

$$\Delta\sigma_d = \frac{106\rho R_{hyp}}{2(2\pi)^2 R_{\theta\phi}} a_{rms} \sqrt{\frac{f_c}{f_{max}}}$$

Équa. II. 11

Avec,

ρ : représente la densité.

R_{hyp} : est la distance hypocentrale.

R_{θφ} : est le diagramme du rayonnement moyen.

f_{max} : représente la fréquence maximale du spectre d'accélération.

Selon Boatwright (1984), l'utilisation du modèle de Brune (1970, 1971) pour estimer le paramètre de chute de contrainte utilisant la méthode d'analyse de la fréquence coin, donne des valeurs proches aux estimations obtenues à partir des méthodes de détermination de la chute de contrainte dynamique. La chute de contrainte de Brune est une chute de contrainte dynamique (Oth, 2007).

5 LE PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE ET LA LIBÉRATION D'ÉNERGIE

D'après Kanamori (1994), la contrainte dynamique est à l'origine du mouvement de la faille, causant, ainsi, une libération d'énergie. La contrainte de cisaillement s'accumule en continu sur un plan de faille prédéfini jusqu'à le commencement du glissement où une valeur critique est atteinte (instabilité de la faille) (Scholz, 2002).

Dans la **Figure II. 6**, différentes contributions des énergies sont présentées.

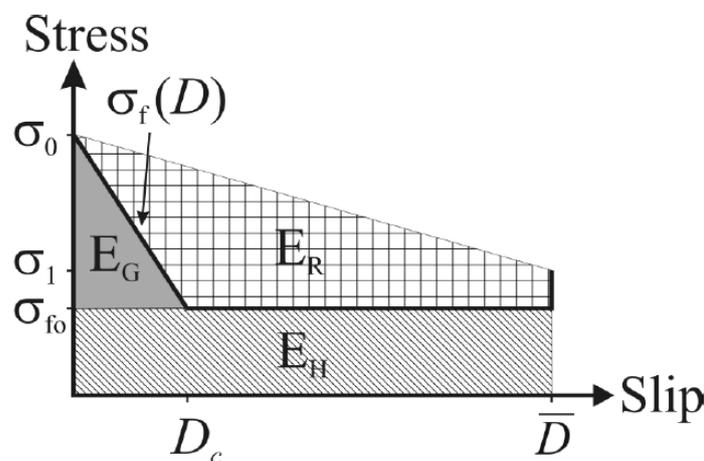


Figure II. 6 : Illustration des contraintes avec la combinaison des différentes énergies. Où, E_G : est l'énergie responsable de la création d'une surface de faille, et qui peut être nommée l'énergie de fracture, E_R : est l'énergie qui est rayonnée comme ondes sismiques, et E_H : est l'énergie qui est perdue sous forme de chaleur à cause du frottement. σ_{f0} représente le niveau constant qui est atteint lors de la diminution progressive avec le glissement de la contrainte de frottement σ_f . D_c est le glissement critique dont σ_{f0} est atteinte, et \bar{D} le glissement moyen (Oth, 2007)

Selon Oth (2007), il n'est pas nécessaire que l'état final de σ_1 est égal à σ_{f0} . Dans la **Figure II. 6**, σ_{f0} est légèrement au-dessous de σ_1 , cela signifie que la chute de contrainte statique ($\Delta\sigma_s$) est plus faible que dynamique ($\Delta\sigma_d$).

Dans la **Figure II. 7**, différents cas des combinaisons des énergies avec les contraintes, sont présentés. Pour plus de détails sur ces cas, voir Kanamori (1994); Oth (2007).

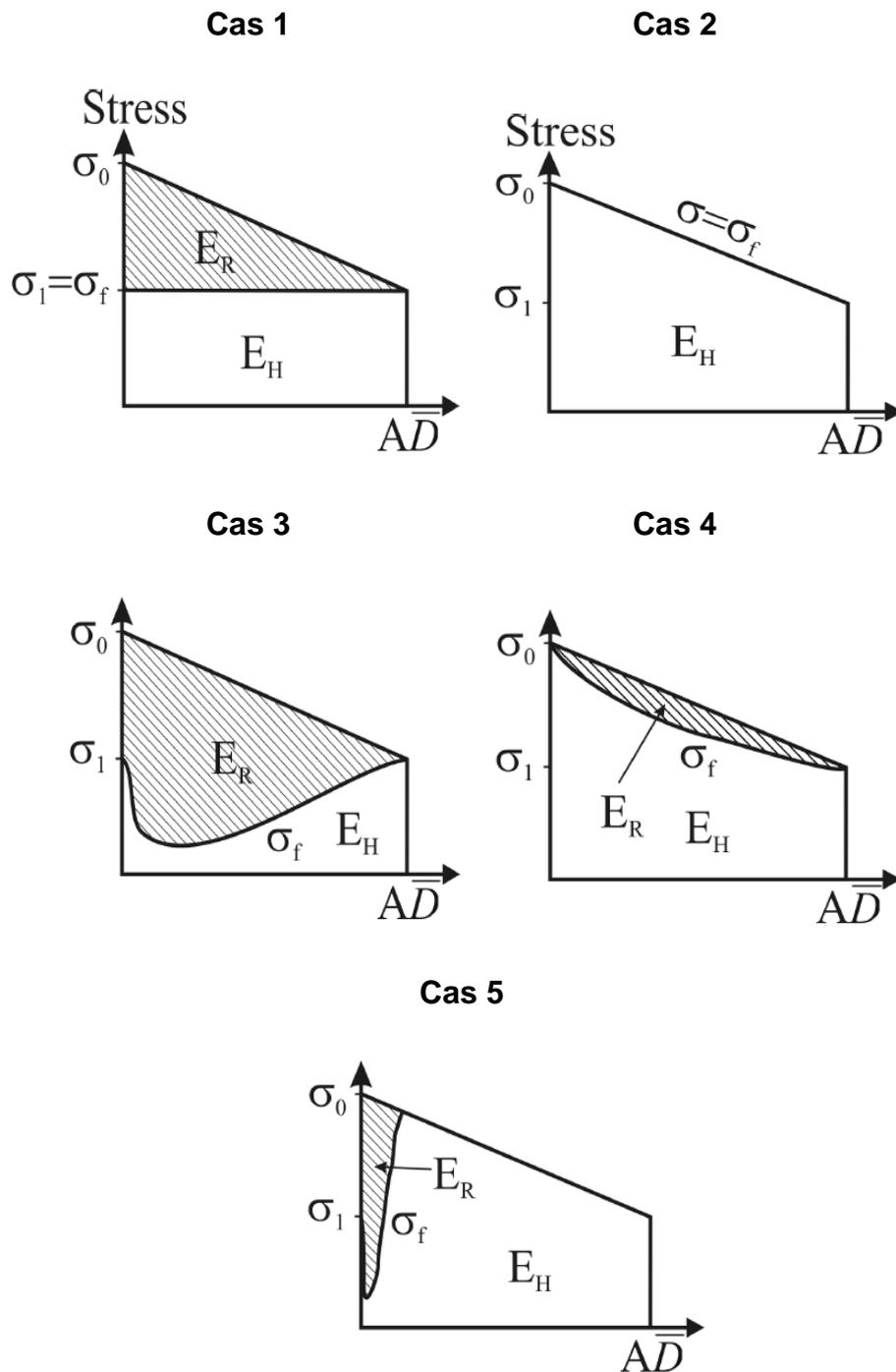


Figure II. 7 : Libération de contraintes sous différents modèles ((Kanamori, 1994; Oth, 2007))

Pour les tremblements de terre crustaux majeurs, Kanamori and Heaton (2000) montrent que E_G peut être négligée en la comparant avec E_H et E_R . Oth (2007) suppose dans son travail que E_G peut être aussi négligeable.

À cet effet, E_H et E_R sont données comme suit :

- E_H est définie par (Équa. II. 12) :

$$E_H = \bar{\sigma}_f \bar{D}A$$

Équa. II. 12

Avec,

A : représente la surface de la faille.

$\bar{\sigma}_f$: est le frottement moyen qui est défini par (Équa. II. 13) :

$$\bar{\sigma}_f = \frac{1}{\bar{D}} \int_0^{\bar{D}} \sigma_f(D) dD$$

Équa. II. 13

- E_R est définie par (Équa. II. 14) :

$$E_R = \bar{D}A \frac{(\sigma_0 + \sigma_1)}{2} - \bar{D}A \bar{\sigma}_f$$

Équa. II. 14

Qui donne (Équa. II. 15) :

$$E_R = M_0 \frac{2\Delta\sigma_d - \Delta\sigma_s}{2\mu}$$

Équa. II. 15

Avec,

$$M_0 = \mu A \bar{D} ; \Delta\sigma_s = \sigma_0 - \sigma_1 ; \Delta\sigma_d = \sigma_0 - \bar{\sigma}_f$$

Dans le cas où $\Delta\sigma_s$ et $\Delta\sigma_d$ sont les mêmes (voir Kanamori (1994)), (Équa. II. 16) :

$$E_R \approx M_0 \frac{\Delta\sigma_s}{2\mu} = \bar{D}A \frac{\Delta\sigma_s}{2}$$

Équa. II. 16

6 QUESTION DE LA DÉPENDANCE ENTRE LA CHUTE DE CONTRAINTE DYNAMIQUE ET LA MAGNITUDE

Deux types d'études sont à retenir de la littérature. Le premier indique que la variation du paramètre de chute de contrainte est constante avec la magnitude (M), dont il n'y a aucune influence sur la valeur de $\Delta\sigma_d$ en variant M, ce qui représente une indépendance entre les deux ($\Delta\sigma_d$ et M). Le deuxième type suppose que, le

paramètre de chute de contrainte dépend de la magnitude. On présente ici une revue de la littérature sur ce sujet.

6.1 MODÈLES DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE INDÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE

Dans cette section, on présente des modèles qui supposent que la chute de contrainte dynamique est constante en variant M.

6.1.1 Modèle de Aki (1967)

Dans le travail de Aki (1967), dont il a traité une loi de mise à l'échelle du spectre sismique, il a bien indiqué que le paramètre de chute de contrainte est constant. Cette constatation a été impliquée selon Aki (1967) à partir de l'hypothèse de similarité. Avec cette hypothèse, le paramètre de source considéré représente la magnitude, dont le paramètre de chute de contrainte est indépendant de la taille de source (Aki, 1967).

Avec la similarité proposée par Aki (1967), le produit entre le moment sismique et la fréquence coin est constant pour différentes magnitudes, selon l'équation suivante (Équa. II. 17) :

$$M_0 \times f_0^3 = \text{Constante}$$

Équa. II. 17

Ce produit (Équa. II. 17) est constant si le paramètre de chute de contrainte est constant (voir aussi la Figure I. 3).

6.1.2 Modèle de Hanks (1979)

L'étude de Hanks (1979) évoque les implications existantes dans l'estimation du mouvement du sol à haute fréquence, et dans les zones de failles crustales actives, lors des variations de la contrainte tectonique. Hanks (1979) indique une constance des paramètres de chute de contrainte sismique.

Le paramètre de chute de contrainte sismique $\Delta\sigma$ est lié à l'accélération quadratique moyenne a_{rms} , selon l'équation suivante (Équa. II. 18) (Hanks, 1979) :

$$a_{rms} = 0.85 \frac{2^{1/2} (2\pi)^2}{106} \frac{\Delta\sigma}{\rho R} \left(\frac{f_{max}}{f_0} \right)^{1/2}$$

Équa. II. 18

f_0 et f_{max} : représentent la fréquence coin et la fréquence maximale, respectivement (voir la **Figure II. 8**). ρ : désigne la densité.

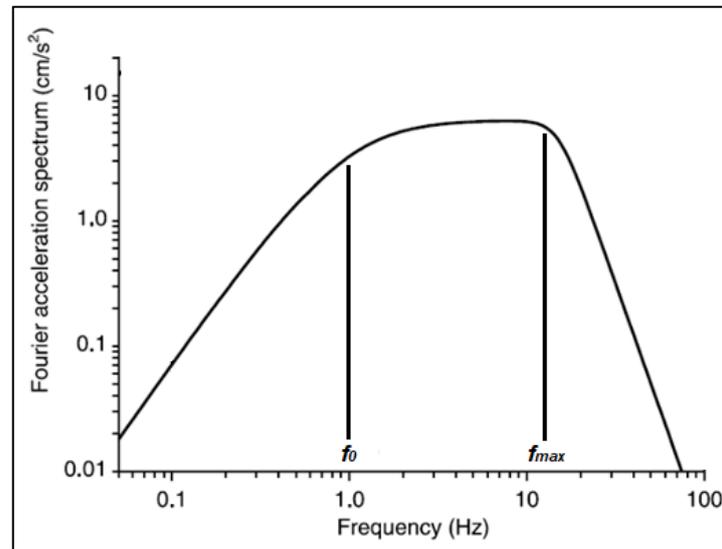


Figure II. 8 : Illustration de la fréquence coin (f_0) et la fréquence maximale (f_{max})

6.1.3 Modèle de Kanamori (1994)

Kanamori (1994) dans son papier, a utilisé des données sismologiques et a présenté des modèles mécaniques simples, il a aussi indiqué que le paramètre de la chute de contrainte est constant. Un exemple d'illustration selon Kanamori (1994) est donné dans la **Figure II. 9**.

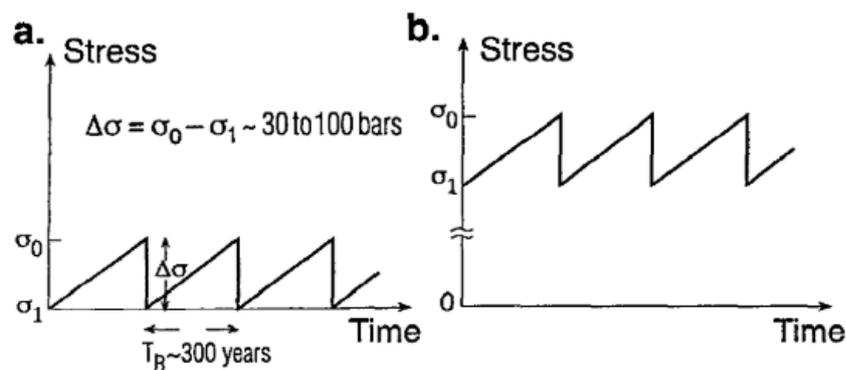


Figure II. 9 : Schéma d'illustration de la répétition du paramètre de la chute de contrainte sismique (les valeurs sont à titre d'exemple), avec T_R : temps de répétition.

a. Mode faible de faille, b. Mode fort de faille (Kanamori, 1994)

Différentes méthodes d'estimation du paramètre de chute de contrainte, utilisées par différents chercheurs, ont été présentées dans Kanamori (1994). La **Figure II. 10** illustre les résultats des paramètres de la chute de contrainte utilisant ces

méthodes, dont la tendance générale des valeurs semble bien établie et indique un paramètre de chute de contrainte constante. Aussi, selon Kanamori (1994), la valeur réelle du paramètre de la chute de contrainte est dépendante de la géométrie de la faille ainsi que d'autres détails ; plus de discussions sur le paramètre de chute de contrainte constante et ses implications ont été traitées par différents chercheurs (voir aussi, Hanks (1979)).

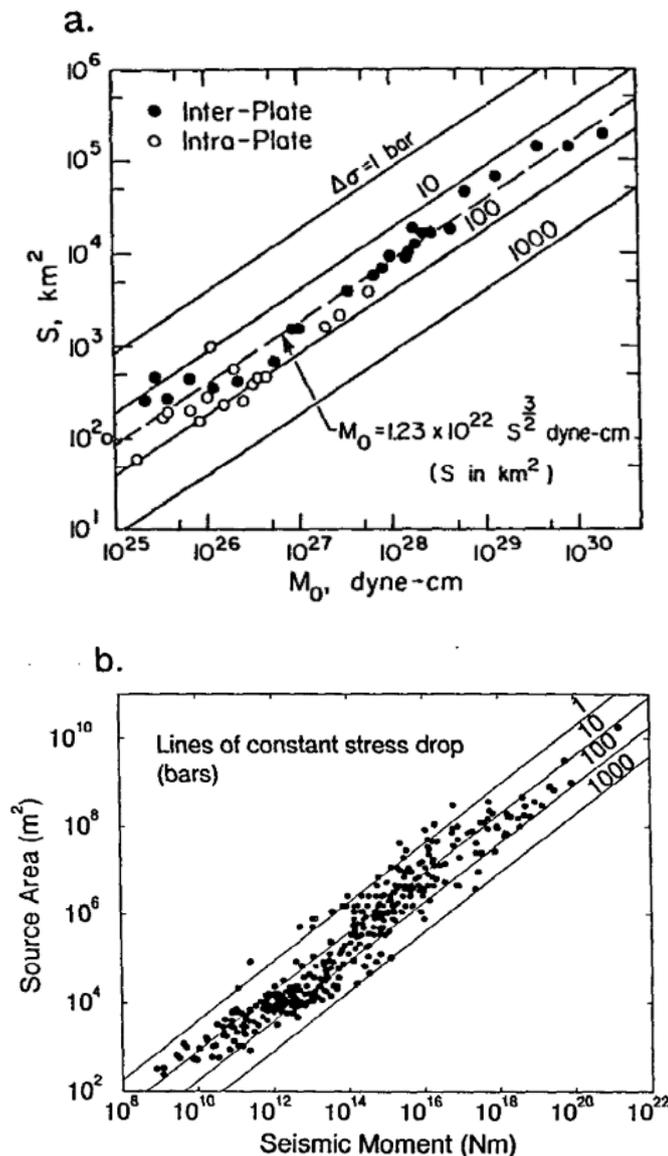


Figure II. 10 : a. La zone de faille S en fonction du moment sismique M_0 . b. La zone de source en fonction du moment sismique (Kanamori, 1994)

6.1.4 Modèle de Boore and Joyner (1997)

Dans le papier de Boore and Joyner (1997), les auteurs ont dérivé des amplifications de site pour les sites rocheux génériques (le site rocheux générique

est un site dont la vitesse à faible profondeur est la moyenne des vitesses des sites rocheux), échantillonnés par les données de forage. Ils considèrent deux sites rocheux génériques : le premier représente la roche, qui correspond aux données essentielles de forage ; et le deuxième site désigne la roche très dure (disponible dans les régions glaciaires de vastes zones de ENA : Est de l'Amérique du Nord ou aussi dans des parties de WNA : Ouest de l'Amérique du Nord).

Boore and Joyner (1997) ont trouvé que le paramètre de chute de contrainte sismique est constant et est égale à 70 bars. Cette valeur a été déterminée par un ajustement entre des simulations des spectres de réponse observés et un modèle stochastique (**Figure II. 11**) ; Boore and Joyner (1997) ont suggéré que la chute de contrainte de 70 bars représente une meilleure valeur qui s'adapte à leurs spectres.

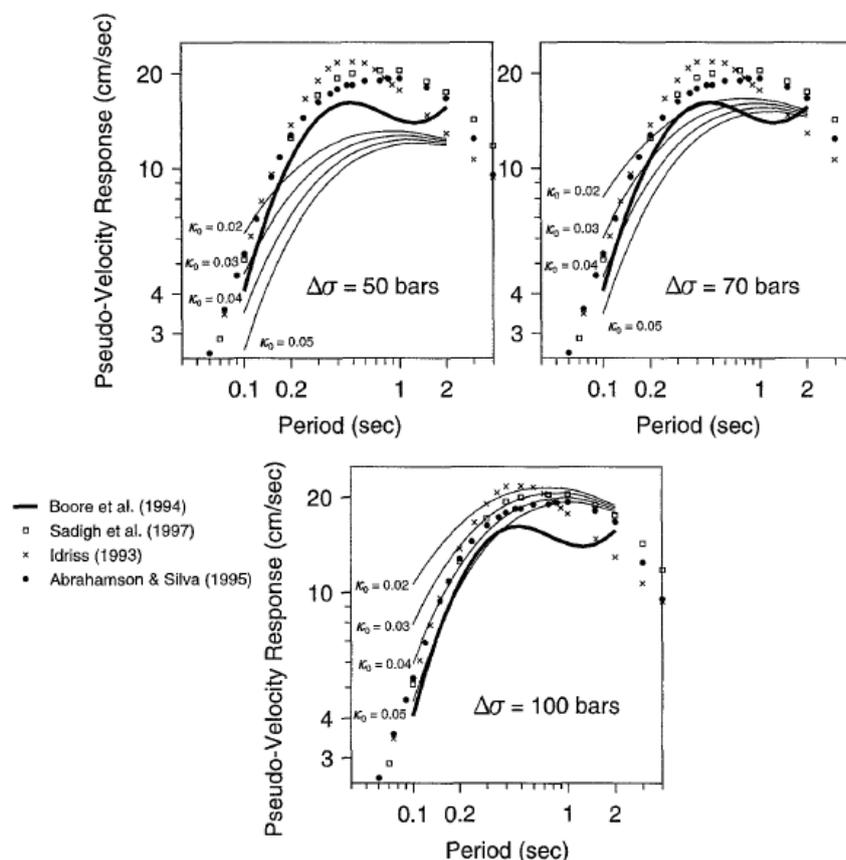


Figure II. 11 : Comparaison des spectres de réponse, effectuée par Boore and Joyner (1997), entre des GMPEs et le modèle stochastique

6.1.5 Modèle de Baltay and Hanks (2014)

Baltay and Hanks (2014), dans leur étude de la dépendance de la magnitude avec le PGV et le PGA, pour les données NGA-West 2, ont déduit que le paramètre de

chute de contrainte sismique est constant, avec une valeur qui égale à 46.4 bars (4.64 Mpa).

Leur travail a été effectué dans le but de comprendre et expliquer les tendances de dépendance de magnitude dans les GMPMs, dont ils ont construit un modèle qui est basé sur la source sismique. Ce GMPM qui est basé sur une valeur de chute de contrainte de 46.4 bars, a fourni selon Baltay and Hanks (2014) un bon ajustement aux données NGA.

Dans la **Figure II. 12**, des estimations du mouvement sismique, en utilisant le model de Baltay and Hanks (2014) ($\Delta\sigma = 46.4$ bars), sont présentées et comparées avec les données observées (NGA-West 2).

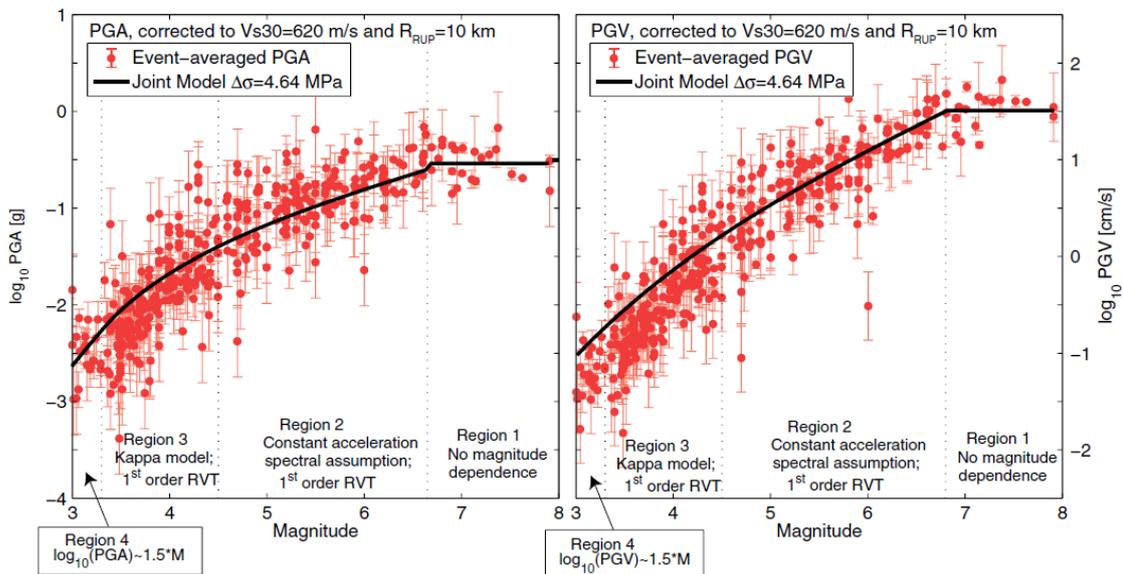


Figure II. 12 : Mouvements sismiques (PGV et PGA) en fonction de la magnitude, avec un paramètre de chute de contrainte constante égale à 4.64 Mpa (Baltay and Hanks, 2014)

6.2 MODÈLES DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE

Dans cette section, on présente quelques modèles existants du paramètre de la chute de contrainte dépendante de la magnitude. Contrairement à ce qui a été présenté dans la section précédente, différents chercheurs ont supposé que le paramètre de chute de contrainte est variable avec la magnitude, ce qui est traduit par une dépendance de ce paramètre avec la magnitude.

6.2.1 Modèle de Edwards and Fäh (2013)

Dans l'étude de Edwards and Fäh (2013), qui traite un modèle stochastique pour la Suisse, les auteurs ont proposé un modèle pour les spectres d'amplitude de Fourier en champ lointain. Les données utilisées sont des intensités des grands événements en Suisse, et d'autres à partir de petits séismes régionaux et locaux. Le modèle proposé a été utilisé dans les simulations stochastiques, afin de prédire PGA, PGV et PSA, amortis à 5%. Le modèle de chute de contrainte sismique proposé par Edwards and Fäh (2013), représente un modèle dépendant de la magnitude. Plus de détails sont données dans (Figure II. 13 et Tableau II. 1) afin d'illustrer la variation de $\Delta\sigma$ avec la magnitude.

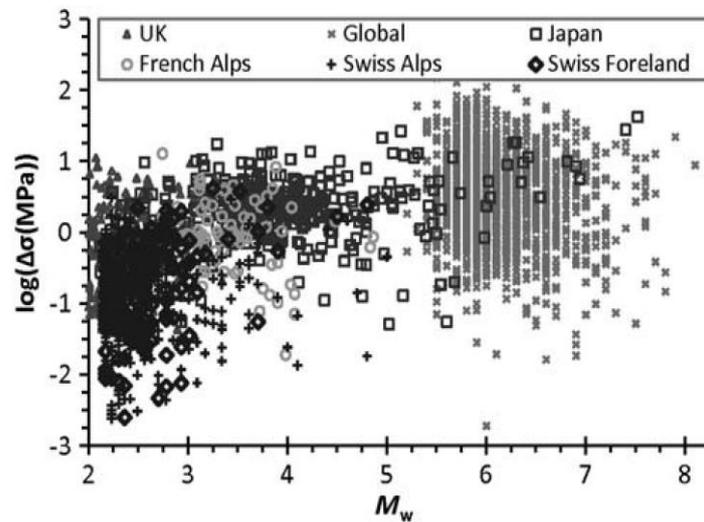


Figure II. 13 : Effet régional du paramètre de chute de contrainte ($\Delta\sigma$ - M_w) (Edwards and Fäh, 2013)

Tableau II. 1 : Paramètres de Edwards and Fäh (2013) utilisés dans leurs simulations stochastiques

Model Parameter	Value or Form
Source type	ω^2 (Brune, 1970; 1971)
Source dimensions	Circular crack using $\Delta\sigma_{3,5}$ (Eshelby, 1957; Brune, 1970, 1971) $M_w \leq 5$ Wells and Coppersmith (1994) (Fault type specific) $M_w > 5$
Stress-parameter ($\Delta\sigma_{3,5}$)	Alpine: 0.1 MPa (at M_w 2.5) to 6.3 MPa (at $M_w = M_c$ 4.5) Foreland: 0.2 MPa (at M_w 2.5) to 6.3 MPa (at $M_w = M_c$ 4.5) Linear interpolation of $\log(\Delta\sigma_{3,5})$ up to M_c , then constant
Attenuation ($Q_{0,3,5}$)	1200
Geometrical Decay	Region specific (see Table 3)
Rock reference profile κ	0.016 s
Rock reference profile amplification	See Table 2
Rock reference profile V_{530}	1105 m/s
Duration (T_d)	$1/f_c + 0.153R_h$ $R_h < 100$ km $1/f_c + 0.02(R_h - 100) + 15.3$ $R_h \geq 100$ km
Radiation, free surface	0.55, 2
Density (ρ), reference velocity for Q and $\Delta\sigma$ (β)	2800 kg/m ³ , 3500 m/s

6.2.2 Modèle de Rietbrock, Strasser and Edwards (2013)

Rietbrock, Strasser and Edwards (2013) ont travaillé sur un modèle stochastique de prédiction du mouvement du sol au Royaume-Uni. Ce modèle représente une équation de prédiction du mouvement sismique du Royaume-Uni, avec des estimations de PGV, PGA et PSA amortie à 5%.

Les simulations stochastiques ont été basées sur un modèle de source ponctuelle, utilisant la méthode de Boore (2003). Les paramètres utilisés par Rietbrock, Strasser and Edwards (2013) dans leurs simulations sont présentés dans le **Tableau II. 2**.

Tableau II. 2 : Paramètres utilisés dans les simulations stochastiques par Rietbrock, Strasser and Edwards (2013)

Parameter	Model
Focal depth	Discrete distribution 5 km [$w = 0.1$], 10 km [$w = 0.25$], 15 km [$w = 0.4$] and 20 km [$w = 0.25$]
Stress parameter $\Delta\sigma$	Model 1 (self-similar): Lognormal, $\mu = 1.8$ MPa, $\sigma = 0.60$ (\log_{10}) at all M_w Model 2 (magnitude-dependent): Lognormal distribution: $\mu = 0.7$ MPa for $M_w \leq 3.0$; $\mu = 10.0$ MPa for $M_w \geq 4.5$; linear interpolation between M_w 3.0 and M_w 4.5 $\sigma = 0.60$ (\log_{10}) for M_w 1.5; $\sigma = 0.45$ (\log_{10}) at M_w 3.0; $\sigma = 0.40$ (\log_{10}) for $M_w \geq 4.5$; linear interpolation between nodes.
Attenuation at depth D :	$Q_D = 990$ at $D = 2.5$ km $Q_D = 1000$ at $D = 20$ km $Q_D = 5500$ at $D = 34$ km Uncertainty controlled by t^* error = 2.66×10^{-4} s
Local variation of attenuation: $\Delta\kappa$	Truncated normal distribution $\mu = 0.0018$ s, $\sigma = 0.0076$ s Min/Max: $-0.019/0.025$ s Note: No overall negative attenuation permitted.
Geometrical spreading	$1/R^{1.0}$ for $R_{\text{hyp}} \leq 50$ km $1/R^{0.0}$ for $50 < R_{\text{hyp}} \leq 100$ km $1/R^{2.2}$ for $R_{\text{hyp}} > 100$ km
Variability of spectral plateau	Truncated lognormal distribution $\mu = 0.0$, $\sigma = 0.2675$ (\log_{10}) Min/Max: $-0.57/0.45$
Duration of shaking: T_d	$0 + 1/f_c$ s at 0 km $7.0 + 1/f_c$ s at 60 km $7.0 + 1/f_c$ s at 150 km $37 + 1/f_c$ s at 400 km
Rock amplification $A(f)$	Quarter-wavelength approximation of amplification from generic UK V_S profile used by BGS (Booth, 2007); depends on the depth of the earthquake

Concernant le paramètre de chute de contrainte sismique, Rietbrock, Strasser and Edwards (2013) ont utilisés deux modèles, dont un modèle de chute de contrainte dépendante de la magnitude, la chose qui présente la variation de $\Delta\sigma$ avec la magnitude. En plus du **Tableau II. 2**, la **Figure II. 14** aussi illustre ce paramètre de chute de contrainte en fonction de la magnitude.

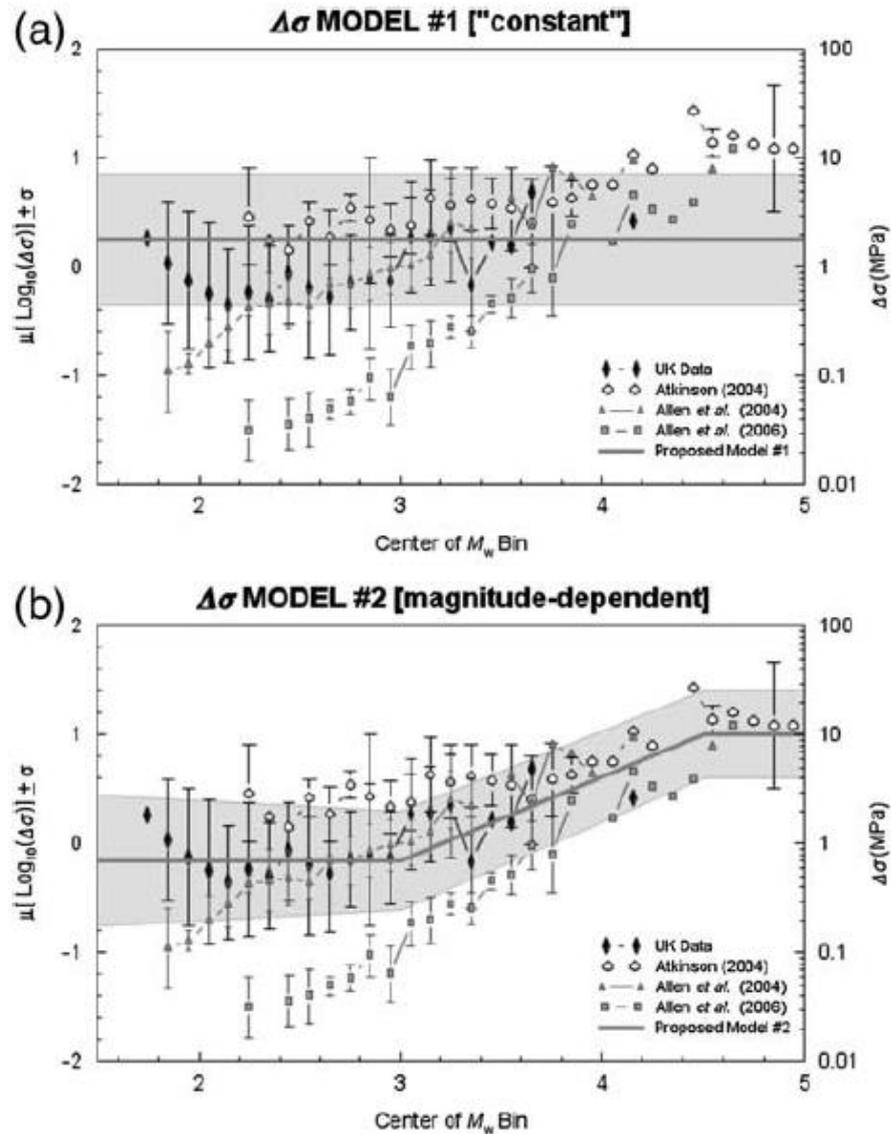


Figure II. 14 : Paramètres de chute de contrainte sismique utilisés dans Rietbrock, Strasser and Edwards (2013)

6.2.3 Modèle de Drouet and Cotton (2015)

L'étude de Drouet and Cotton (2015) traite des GMPEs stochastiques dans les zones à faible sismicité, dont ils ont analysé le scaling et la variabilité aléatoire, avec l'application aux Alpes françaises. Drouet and Cotton (2015) ont construit des modèles sismologiques stochastiques et il ont utilisé la méthode stochastique (SMSIM : Stochastic-Method SIMulation, Boore (2003)), dont les mouvements du sol ont été simulés.

Ainsi, ils ont utilisé dans leurs analyses : des données du mouvement sismique fort de l'Europe à travers RESORCE et de NGA, en plus des données du mouvement du sol faible à travers des enregistrements en France.

Pour la chute de contrainte sismique, Drouet and Cotton (2015) ont montrés que les paramètres de chute de contrainte sont dépendants de la magnitude. Ces modèles de $\Delta\sigma$ sont présentés sur la **Figure II. 15** selon Drouet and Cotton (2015).

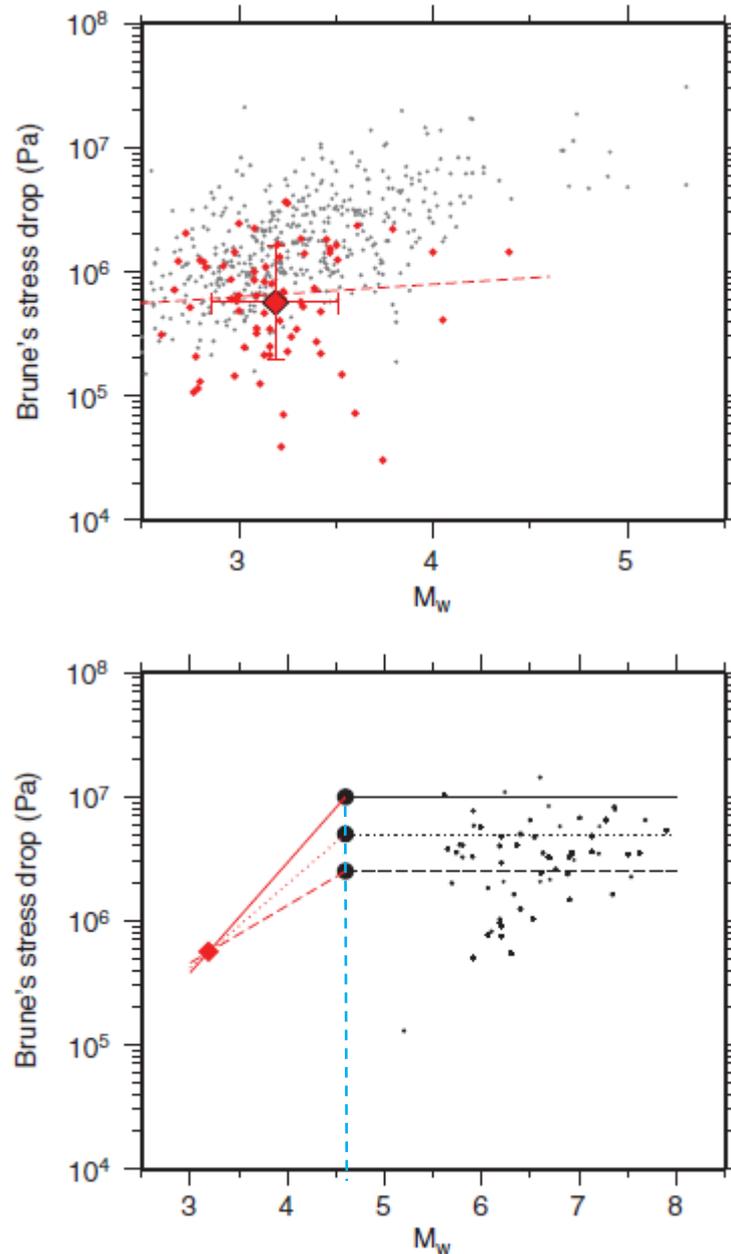


Figure II. 15 : Illustration des paramètres de chute de contrainte sismique montrés par Drouet and Cotton (2015)

6.2.4 Modèle de Bindi, Spallarossa and Pacor (2017)

L'étude de Bindi, Spallarossa and Pacor (2017) concerne la variabilité inter-station et inter-événement, observée dans les domaines des spectres de réponse et de Fourier, dont ils ont effectué une comparaison avec les modèles sismologiques.

Dans cette étude, les auteurs ont analysé des données des tremblements de terre dont les enregistrements viennent du centre de l'Italie. Ensuite, ils ont dérivé un modèle sismologique des paramètres de source, d'atténuation et de site, afin d'expliquer la variabilité du mouvement du sol.

Bindi, Spallarossa and Pacor (2017) ont obtenu et utilisé des paramètres de chute de contrainte sismique dépendante de la magnitude. La **Figure II. 16** montre ces modèles de $\Delta\sigma$ en fonction de la magnitude.

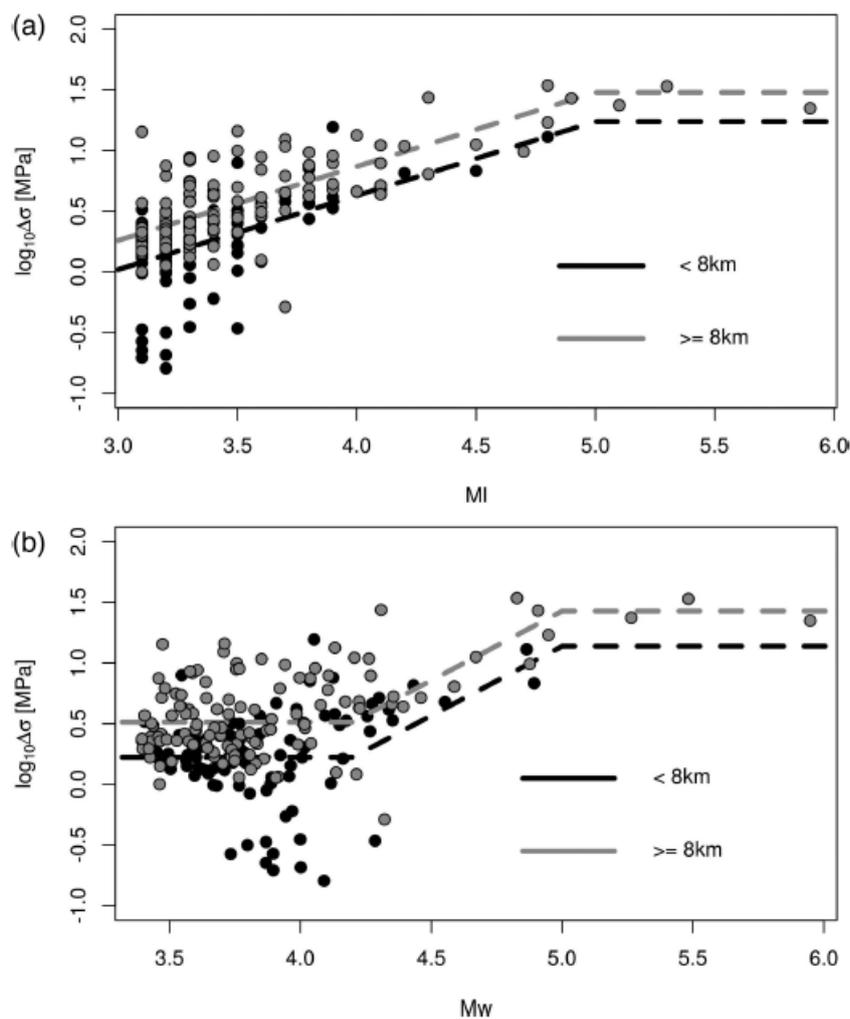


Figure II. 16 : Dépendance des paramètres de chute de contrainte sismique avec la magnitude. (a) : $\Delta\sigma$ est dépendante de la magnitude locale M_l , (b) : $\Delta\sigma$ est dépendante de la magnitude de moment M_w (Bindi, Spallarossa and Pacor, 2017)

6.2.5 Modèle de Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018)

Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018) ont effectué des simulations stochastiques avec la prise en compte d'une source ponctuelle utilisant la méthode stochastique de Boore (2003), dont ils ont élaboré un modèle stochastique équivalent pour une

source ponctuelle. Le mouvement sismique qui a été traité représente les accélérations PGA et PSA pour les données de NGA-West 2.

Le modèle de la chute de contrainte sismique obtenu à travers l'étude de Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018) représente un modèle de $\Delta\sigma$ dépendante de la magnitude. La **Figure II. 17** illustre la variation du paramètre de la chute de contrainte avec la magnitude.

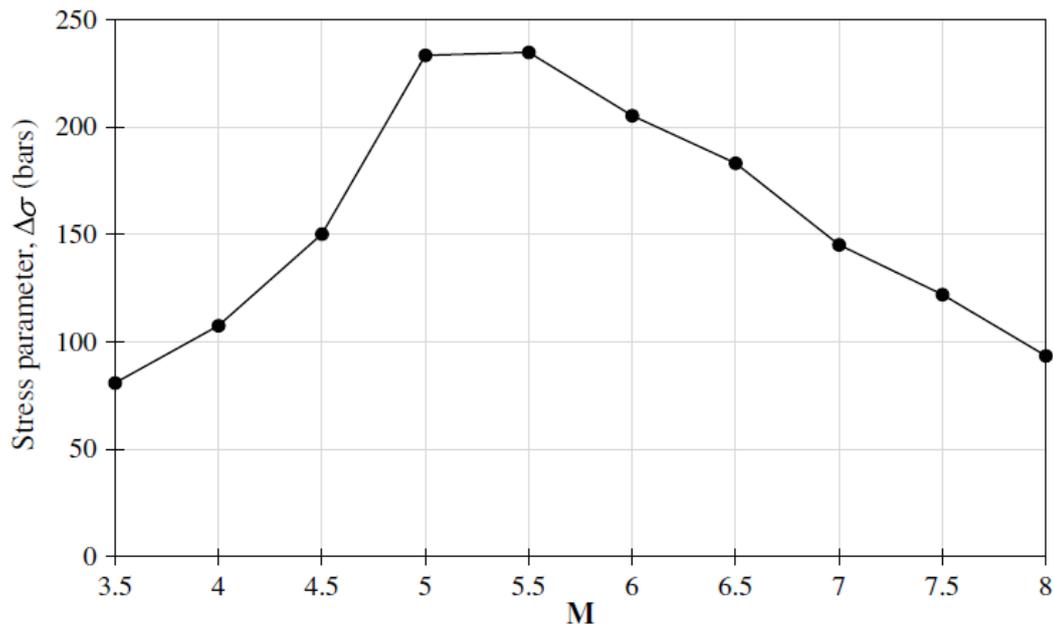


Figure II. 17 : Représentation du modèle de la chute de contrainte sismique en fonction de la magnitude, obtenu par Zandieh, Pezeshk and Campbell (2018)

7 CONCLUSION

Dans ce chapitre, on a essayé de présenter un paramètre de la source des tremblements de terre. Ce dernier représente la chute de contrainte sismique, et qui est un paramètre très important lors de l'estimation du mouvement sismique.

La mise à l'échelle du paramètre de chute de contrainte présente une question très discutée dans la littérature, à travers différentes études. Les propositions de cet effet d'échelle sont divisées en deux grandes familles. La première, considère le paramètre de chute de contrainte comme un paramètre constant avec les variations de la magnitude. Cependant, la deuxième considère une dépendance du paramètre de chute de contrainte avec la magnitude.

À cet effet, on a présenté dans ce chapitre les deux types de considérations de la mise à l'échelle du paramètre de chute de contrainte avec la magnitude, essayant

de montrer différents points de vue concernant ce paramètre. Il en résulte un non-consensus autour de la dépendance de $\Delta\sigma$ avec M .

En se basant sur la recherche bibliographique effectuée dans ce chapitre, et en utilisant la base de données NGA-West 2, la méthode stochastique et avec le modèle ANFIS (chapitre I), on va, dans le chapitre suivant, proposer un modèle de chute de contrainte propre à la région WNA tout en répondant à la question de la dépendance du paramètre de la chute de contrainte avec la magnitude.

CHAPITRE III

CONTRIBUTION DE

L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE

À L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE

DE PRÉDICTION DE LA CHUTE DE

CONTRAINTE : APPLICATION AUX

DONNÉES NGA-WEST 2

SOMMAIRE DU CHAPITRE III

CHAPITRE III. CONTRIBUTION DE L'APPRENTISSAGE AUTOMATIQUE À L'ÉLABORATION D'UN MODÈLE DE PRÉDICTION DE LA CHUTE DE CONTRAINTE : APPLICATION AUX DONNÉES NGA-WEST 2	68
1 INTRODUCTION.....	70
2 DONNÉES	71
2.1 NGA-WEST 2	71
2.2 SIMULATIONS STOCHASTIQUES DES MOUVEMENTS SISMIQUES (SSGM)	72
2.3 DISTRIBUTIONS DES ENSEMBLES DE DONNÉES	73
3 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES ANFIS DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	73
3.1 MODÈLES ANFIS	73
4 CONFIGURATIONS OPTIMALES POUR ANALYSER L'EFFET DE L'ÉCHELLE DE MAGNITUDE	76
4.1 INTERVALLE OPTIMAL DE DISTANCE	76

4.2	INTERVALLE OPTIMAL DE FRÉQUENCE	77
4.3	INTERVALLE DE MAGNITUDE.....	78
4.4	ROBUSTESSE DE L'APPROCHE ANFIS.....	79
5	ÉTUDE COMPARATIVE.....	81
5.1	COMPARAISON ENTRE LE GMPM D'ANFIS (NGA-WEST 2) ET LES GMPMS D'ANFIS (STOCHASTIQUE).....	81
5.2	COMPARAISON ENTRE LE GMPM D'ANFIS (NGA-WEST 2) ET LES GMPES CLASSIQUES	84
6	PROPOSITION D'UN MODÈLE DE PARAMÈTRE DE CHUTE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE POUR NGA-WEST 2	85
6.1	FORME FONCTIONNELLE DU MODÈLE D'APPRENTISSAGE PILOTÉ PAR LES DONNÉES BASÉ SUR DES ENSEMBLES DE DONNÉES SYNTHÉTIQUES ET NGA-WEST 2.....	86
6.2	MODÈLE PROPOSÉ DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE	88
7	CONCLUSION.....	89

1 INTRODUCTION

Dans ce chapitre, on analyse les éventuelles dépendances entre le mouvement sismique (MS) et la magnitude (M). L'objectif est d'étudier la variation de la chute de contrainte dynamique avec la magnitude $\Delta\sigma(M)$. Pour ce faire, deux bases de données (BD) sont utilisées : un jeu de données de la BD NGA-West 2 : 1700 enregistrements, 426 sites et 271 évènements, comme étant une BD de référence (Chapitre I). Les autres jeux de données sont générés artificiellement à partir de l'approche stochastique (AS) de Boore (2003) en supposant que la faille sismique est un point-source (Chapitre I).

Notre investigation se focalise sur les deux modèles : $\Delta\sigma(M)$ et $\Delta\sigma(M)=cte$, présentés dans le chapitre précédent. Une méthode d'apprentissage automatique représentée par ANFIS (voir le chapitre I) est utilisée pour dériver les différents modèles de prédiction du mouvement sismique censés être pilotés par les données NGA-West 2 (Ameur, Derras and Zendagui, 2018). Seuls les sites avec $V_{s30} > 500$ m/s sont sélectionnés afin de réduire l'effet de site.

Les modèles de prédiction des pseudo-spectres d'accélération à 5 % d'amortissement (PSA) élaborés, dépendent ainsi de deux paramètres physiques : la magnitude du moment (M_w) et la distance hypocentrale (R_{hyp}). Notre étude est basée sur les suppositions de Molkenhain et al., (2014) : $\Delta\sigma$ contrôle le mouvement sismique à des distances voisinant les 30 km, pour une fréquence (f) = 3.33 Hz et pour des $M_w = [4.5-6.5]$. Les autres paramètres de l'AS sont compatibles à la région Ouest des Etats-Unis (Campbell, 2003).

Les résultats obtenus dans ce chapitre confirment que la relation entre la magnitude et le paramètre de chute de contrainte $\Delta\sigma(M)$, semble mieux contrôler l'effet d'échelle des mouvements sismiques. Notre investigation montre que le modèle de la chute de contrainte qui dépend de la magnitude correspond le mieux aux modèles de prédiction du mouvement sismique issus des données de NGA-West 2.

On donne à la fin de ce chapitre le modèle de prédiction des PSA et la nouvelle relation de $\Delta\sigma(M)$ qu'on propose aux utilisateurs qui veulent estimer le mouvement sismique de la région Ouest des Etats-Unis.

2 DONNÉES

2.1 NGA-WEST 2

Dans cette étude, notre investigation est basée sur un ensemble de données (ED) développé par Derras, Bard and Cotton (2016). Cet ED est un sous-ensemble de la base de données globale NGA-West 2 (Ancheta *et al.*, 2014) (voir chapitre I). Les distributions des ED utilisés, en fonction de la magnitude du moment (M_w), de la distance hypocentrale (R_{hyp}) et du PSA sont représentées sur la **Figure III. 1**.

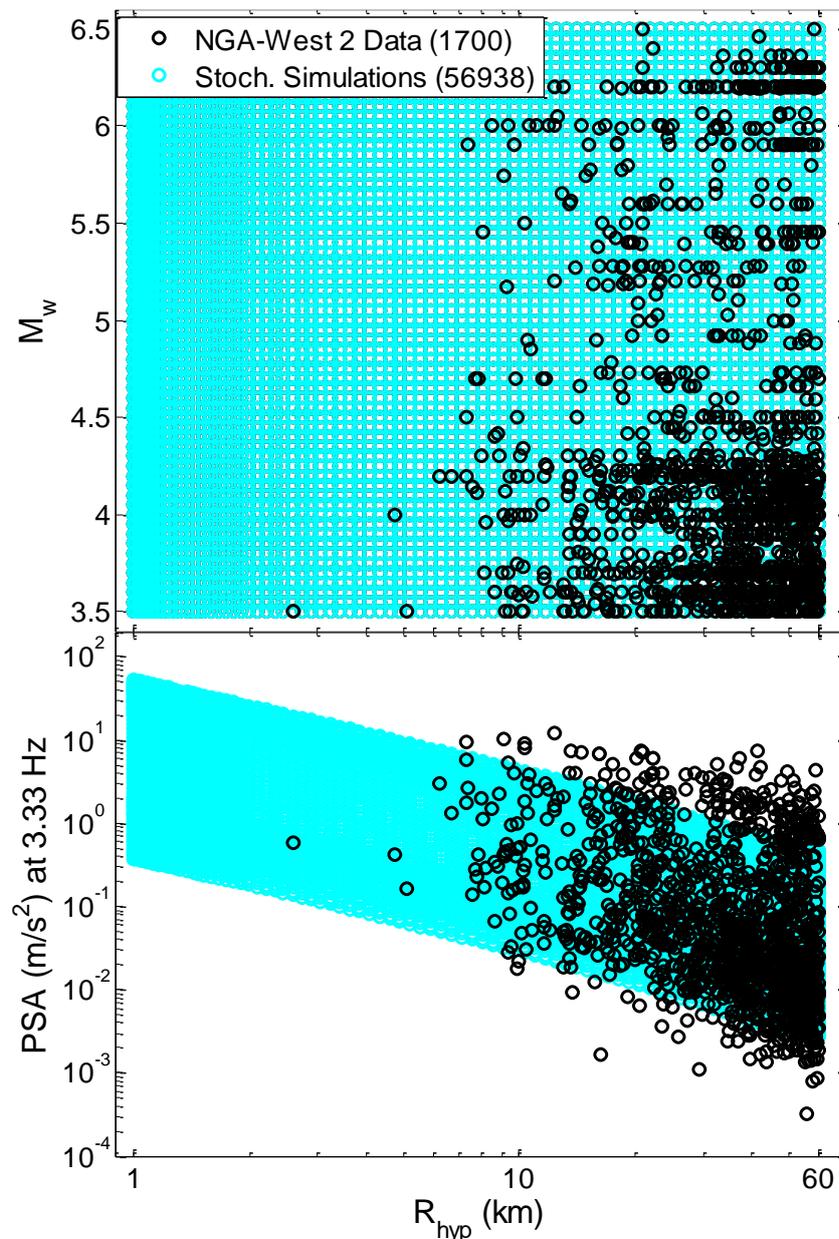


Figure III. 1 : Distribution des ensembles de données considérés dans cette étude. En haut, [magnitude (M_w) - distance (R_{hyp})] ; en bas, [accélération pseudo spectrale (PSA) à 3.33 Hz - R_{hyp}]. Les données sont illustrées pour $3.5 < M_w < 6.5$ et $1 \text{ km} < R_{hyp} < 60 \text{ km}$

Pour limiter l'impact des effets de site, seuls les sites dont la vitesse de l'onde de cisaillement pour une profondeur de 30 m (V_{s30} , largement utilisée comme proxy d'effet de site), est supérieure à 500 m/s, sont sélectionnés.

2.2 SIMULATIONS STOCHASTIQUES DES MOUVEMENTS SISMIQUES (SSGM)

En plus de l'ED NGA-West 2, on utilise la méthode stochastique à travers les programmes SMSIM (Boore, 2003) (détaillée dans le chapitre I), pour établir plusieurs ED pour M_w de 3.5 à 6.5 et à des distances hypocentrales entre 1 et 60km.

Les paramètres des entrées de la méthode stochastique sont issus des paramètres sismologiques utilisés dans les modèles stochastiques de l'Ouest de l'Amérique du Nord (Tableau III. 1) (Campbell, 2003). Différents ensembles de données ont été établis pour différents modèles de $\Delta\sigma$, qui représentent des modèles du paramètre de chute de contrainte constante et variable.

Tableau III. 1 : Paramétrisation de WNA après Campbell (2003)

Paramètre	Ouest de l'Amérique du Nord (WNA)
Spectre de source	Brune ω -carré, source ponctuelle
Diagramme de rayonnement moyen, $R_{\theta\phi}$	0.55
Partition de l'énergie totale des ondes de cisaillement, V	$1/\sqrt{2}$
Effet de surface libre, F	2
Étalement géométrique, η	$1/R^n = 1/R$
Durée de source, T_s (s)	$1/f_c$
Durée de chemin, T_p (s)	0.05R
Durée du mouvement sismique, D_{gm} (s)	$1/f_c + 0.05R$
Atténuation de chemin, facteur de qualité, Q	$180f^{0.45}$
Vitesse de cisaillement, β_S (km/s)	3.5
Densité, ρ_S (g/cc)	2.8
Atténuation de site, k_0 (s)	0.04
Amplification de site	Site rocheux générique, $V_{s30} = 620$ m/s Approximation du quart de longueur d'onde

2.3 DISTRIBUTIONS DES ENSEMBLES DE DONNÉES

Les distributions des ED de NGA-West 2 et des simulations stochastiques reliant M_w - R_{hyp} et PSA - R_{hyp} sont affichées sur la **Figure III. 1**. Les intervalles sélectionnés de magnitude et de distance sont : $M_w = [3.5-6.5]$ et R_{hyp} inférieure à 60 km. Au-delà de cette distance, les variations régionales d'atténuation anélastique sont importantes. $M_w = 6.5$ est également une limite raisonnable de magnitudes élevées pour un modèle de source ponctuelle (Edwards and Fäh, 2013).

3 DÉVELOPPEMENT DE MODÈLES ANFIS DU MOUVEMENT SISMIQUE

Afin de capturer l'effet d'échelle lié à la magnitude du mouvement sismique montré par les ensembles de données de NGA-West 2 et des simulations stochastiques, un modèle du mouvement sismique piloté par les données a été développé en suivant la méthode établie par Ameer, Derras and Zendagui (2018) (Chapitre I).

3.1 MODÈLES ANFIS

Pour prédire les PSA , on utilise l'approche ANFIS (chapitre I). Qui est une combinaison entre la capacité d'apprentissage supervisé des réseaux de neurones artificiels et l'architecture unique de la logique floue basée, ici, sur la règle Takagi-Sugeno-Kang (TSK) (Takagi and Sugeno, 1985 ; Sugeno and Kang, 1986).

Ce modèle (ANFIS) a montré sa capacité de prédire les mouvements sismiques (Ameer, Derras and Zendagui, 2018), avec une variabilité aléatoire relativement faible par rapport au Perceptron Multicouche utilisé par Derras, Bard and Cotton, 2016). Plus d'informations sur l'aspect théorique de cette approche sont présentées par Ameer, Derras and Zendagui, (2018).

L'architecture utilisée des ANFIS est illustrée sur la **Figure III. 2**. Les paramètres d'entrées (Input Parameters : IP) sont M_w et $\log_{10}(R_{hyp})$.

Pour la fonction d'appartenance (MF) (voir chapitre I), deux ($j=2$) MFs associées ont été supposées pour chaque paramètre d'entrée ($j=2$ a été trouvé comme le choix optimal dans cette étude et dans d'autres études (par exemple, Ameer, Derras and Zendagui (2018)).

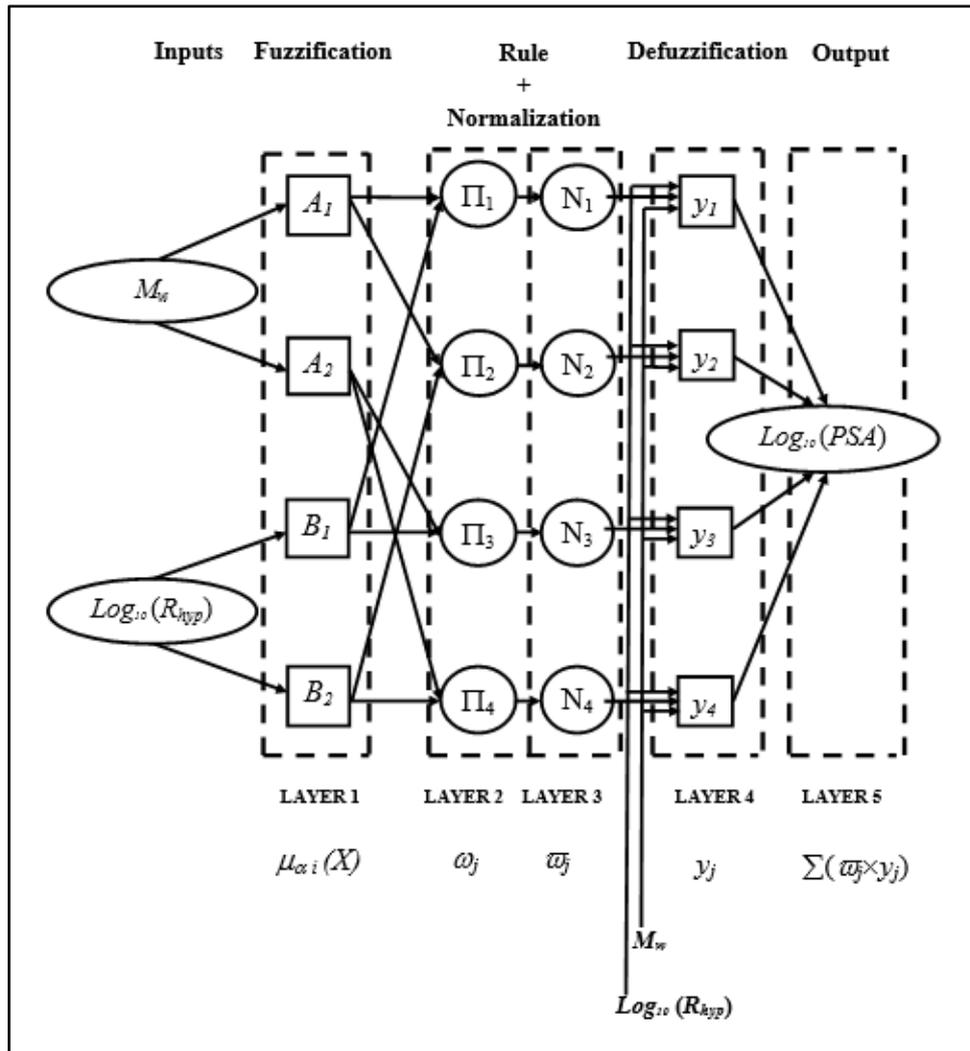


Figure III. 2 : Architecture de l'ANFIS (cinq couches), utilisée dans cette étude pour prédire PSA. Les paramètres d'entrées sont M_w et $\text{Log}_{10}(R_{hyp})$. Dans la première couche, $\mu_{ai}(X)$ est la fonction d'appartenance ; dans la deuxième couche, ω_j représente les règles de forces de tir dans lesquelles ϖ_j est la normalisation de ω_j dans la troisième couche ; dans la quatrième couche, y_j représente une équation calculée en fonction des paramètres d'entrées pour chaque nœud j qui varie ici de 1 à 4, et la sommation de $(\varpi_j \chi y_j)$ est indiquée dans la dernière couche comme paramètre de sortie $\text{Log}_{10}(PSA)$

Les MFs choisies (Tableau III. 2) sont celles qui donnent le plus faible écart type résiduel (Sigma) (Équa. III. 1) :

$$\text{Sigma} = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_1^L (PSA_{obs} - PSA_{pred})^2}$$

Équa. III. 1

où, 'L' est le nombre d'échantillons de l'ensemble de données (NGA-West 2 ou simulations stochastiques du mouvement sismique (SSGM)) pour $f = 3.33$ Hz et pour tous les M_w et R_{hyp} .

Tableau III. 2 : Valeurs de Sigma(log₁₀(PSA) à 3.33 Hz) obtenues par différentes fonctions d'appartenance. Deux types d'ensembles de données sont considérés : NGA-West 2 et stochastique

	Types de la fonction d'appartenance		
	Triangulaire	Trapézoïdale	Gaussienne
	Sigma de log ₁₀ (PSA) à 3.33 Hz		
Données NGA-West 2	0.3793	0.3808	0.3788
Données Stochastiques	Δσ = 2.5 MPa	0.0085	0.0103
	Δσ = 5.0 MPa	0.0091	0.0117
	Δσ = 10.0 MPa	0.0118	0.0123
	Δσ = 15.0 MPa	0.0099	0.0130
	Yoo et Mayeda, 2013	0.0602	0.0780
	Drouet et Cotton, 2015	0.0223	0.0285

Sept ANFIS sont construits, se différencient par le type de l'ED ou par le modèle Δσ choisi. Le premier modèle est établi avec l'ensemble de données NGA-West 2 et nommé NGA-West 2 ; il est considéré comme le modèle de référence.

Les autres modèles sont construits avec des ensembles de données de SSGM. Quatre modèles ANFIS sont établis avec des paramètres de chute de contrainte constante : Δσ = 2.5 MPa, Δσ = 5.0 MPa, Δσ = 10.0 MPa et Δσ = 15.0 MPa (**Figure III. 3**). Les deux derniers modèles ANFIS sont pour Δσ dépendante de la magnitude. Ces modèles de Δσ dépendante de la magnitude sont choisis selon les modèles de Yoo and Mayeda (2013) et de Drouet and Cotton (2015). Ces deux derniers modèles sont également illustrés sur la **Figure III. 3**, et leurs équations (**Équa. III. 2** et **Équa. III. 3**, respectivement ; avec, Δσ en Pa) sont représentées par :

$$\ln(\Delta\sigma) = \begin{cases} \ln(10^6) & M_w \leq 4.6 \\ 1.99084 \times M_w + 4.65763 & 4.6 < M_w < 5.5 \\ \ln(6 \times 10^6) & M_w \geq 5.5 \end{cases}$$

Équa. III. 2

$$\ln(\Delta\sigma) = \begin{cases} 2.0467 \times M_w + 6.7032 & M_w < 4.6 \\ \ln(10^7) & M_w \geq 4.6 \end{cases}$$

Équa. III. 3

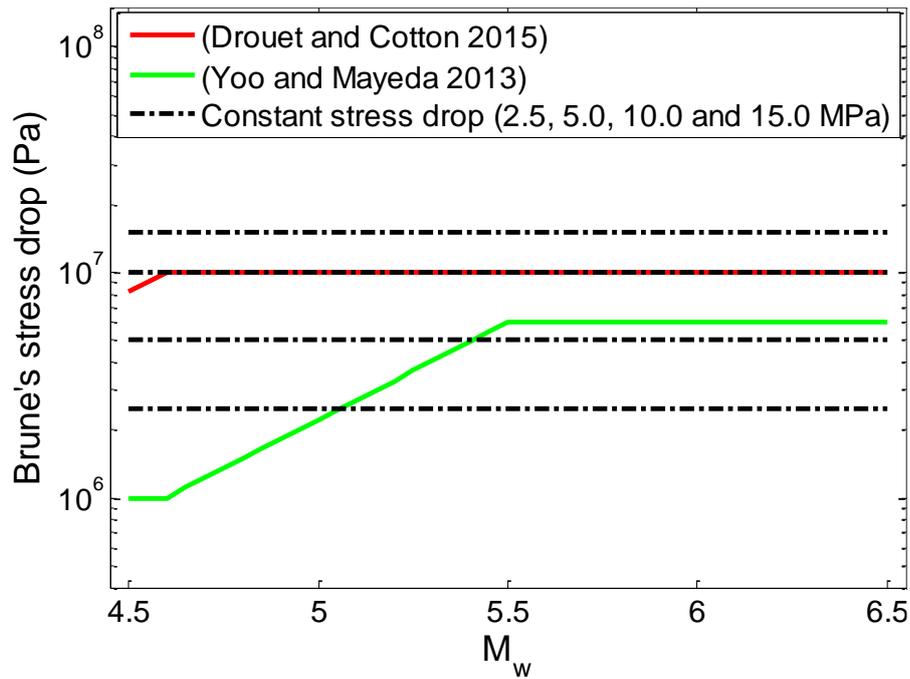


Figure III. 3 : Modèles de paramètres de chute de contrainte constante / variable versus $M_w = [4.5-6.5]$, utilisés dans SMSIM (SMSIM, (Boore, 2003))

4 CONFIGURATIONS OPTIMALES POUR ANALYSER L'EFFET DE L'ÉCHELLE DE MAGNITUDE

Pour analyser l'effet de $\Delta\sigma$ sur la mise à l'échelle de la magnitude à travers les sept modèles (cités ci-dessus), on doit spécifier les intervalles de distance, de fréquence et de magnitude pour lesquelles les variations de $\Delta\sigma$ dominant les mouvements sismiques par rapport à d'autres facteurs (par exemple, les variations régionales de l'atténuation anélastique, l'effet de site et l'atténuation des hautes fréquences).

4.1 INTERVALLE OPTIMAL DE DISTANCE

On a d'abord évalué l'intervalle optimal de distance pour analyser l'impact du paramètre de chute de contrainte sur le mouvement sismique. Boore and Thompson (2014) et Kotha, Bindi and Cotton (2016) ont montré que l'impact des variations régionales d'atténuation anélastique commence à être important pour des distances supérieures à 60–70 km.

Pour limiter l'influence des variations potentielles de l'atténuation anélastique, on analysera les données NGA-West 2 à une distance inférieure à 60 km. La **Figure III. 4** montre la variation du PSA à 3.33 Hz avec la magnitude, à une distance de

30 km. Il en résulte que, les limites de distance (30, 40 et 60 km) n'affectent pas l'estimation des PSA(3.33 Hz).

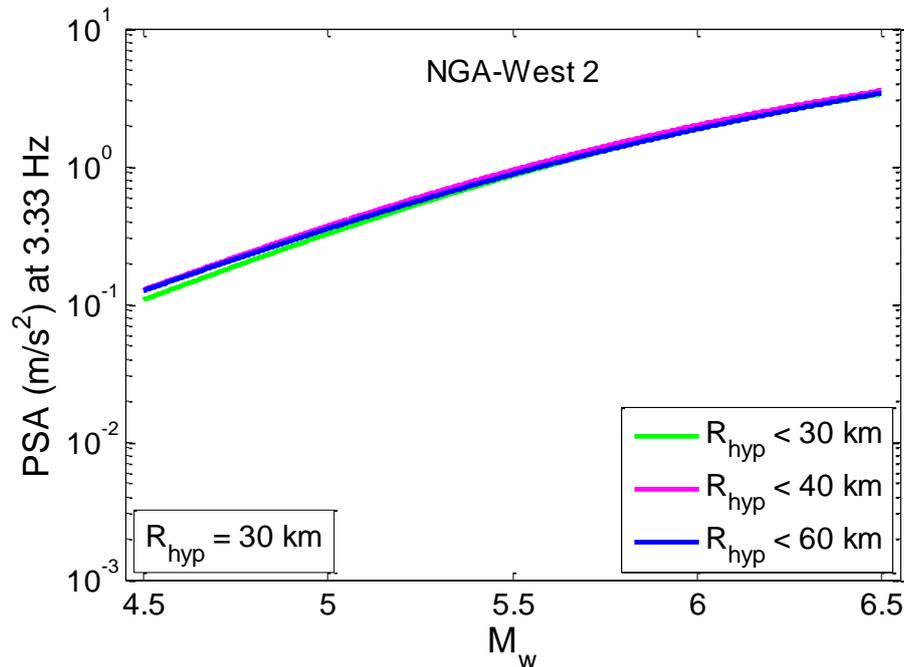


Figure III. 4 : Scaling de magnitude des modèles ANFIS sur la base de diverses sélections de données de l'ensemble de données NGA-West 2 pour $R_{hyp} < 30$ km, $R_{hyp} < 40$ km et $R_{hyp} < 60$ km ; les pseudo-spectres de réponse sont prédits à $R_{hyp} = 30$ km avec l'intervalle de M_w comprise entre 4.5 et 6.5

En champ proche (en dessous d'une distance égale à la longueur de rupture), le mouvement sismique peut être dominé par des effets de source finie qui ne sont pas pris en compte par l'approximation source-punctuelle qui sera utilisée dans cette étude.

Une distance hypocentrale égale à 30 km est alors une distance optimale pour analyser le scaling de magnitude du mouvement sismique et éviter à la fois les effets de source finie et les effets des variations d'atténuation régionale. À 30 km, la distance hypocentrale et la distance de rupture (R_{rup}) des séismes modérés ($M_w < 6.5$) sont similaires, ce qui permet une comparaison directe des simulations stochastiques (réalisées avec des distances hypocentrales) avec des modèles NGA-West 2 (développés à partir de la distance à la rupture).

4.2 INTERVALLE OPTIMAL DE FRÉQUENCE

L'étape suivante, consiste à déterminer l'intervalle optimal de fréquence dans lequel l'effet de $\Delta\sigma$ est dominant sur la mise à l'échelle de la magnitude du mouvement

sismique. L'analyse est basée sur l'étude de Molkenthin *et al.* (2014). Molkenthin *et al.* (2014) illustrent les sensibilités (sur la magnitude du moment, le paramètre de chute contrainte, l'étalement géométrique, l'atténuation anélastique et kappa) d'un modèle stochastique simple du mouvement sismique pour la Californie (WNA) à différentes magnitudes du moment.

L'étalement géométrique « η » a toujours une forte influence. Cependant, l'influence de η ne varie pas avec la magnitude, et par conséquent, il n'a aucune influence sur l'effet d'échelle de magnitude de $\partial(\ln Y)/\partial(M_w)$. Dans l'intervalle de fréquences entre 2 et 5 Hz, les mouvements sismiques sont principalement sensibles aux variations du paramètre de chute de contrainte. Dans cet intervalle de fréquences, les paramètres d'atténuation anélastique (Q_0 , kappa) ont un impact beaucoup plus faible.

Selon ces résultats, une fréquence cible égale à 3.33 Hz a été choisie pour analyser l'effet du paramètre de chute de contrainte sur la mise à l'échelle de magnitude du mouvement sismique, et parce que cette fréquence de 3.33 Hz est une fréquence optimale, le paramètre de chute de contrainte ne doit pas trop changer pour d'autres fréquences.

4.3 INTERVALLE DE MAGNITUDE

La **Figure III. 5** montre la mise à l'échelle d'intensité du mouvement sismique (spectre de réponse d'accélération à 3.33 Hz) d'un modèle stochastique simple de Californie (Campbell, 2003), à une distance de 30 km. L'impact de diverses valeurs de $\Delta\sigma$ sur les mouvements sismiques n'est visible que pour des magnitudes sismiques supérieures à 3.5. Pour des magnitudes sismiques inférieures à 3.5 (à 3.33 Hz), $\Delta\sigma$ n'est plus, le facteur qui contrôle le mouvement sismique par rapport aux effets d'atténuation (kappa, facteur de qualité).

Les effets d'atténuation (principalement kappa) sont plus importants que les effets de $\Delta\sigma$ pour des faibles magnitudes sismiques ($M_w < 4.5$). Pour des magnitudes plus importantes ($M_w > 6.5$), les séismes ne peuvent plus être représentés par des sources ponctuelles à aspérité unique, et les distances hypocentrales sont différentes des distances de rupture. L'intervalle sélectionné de magnitudes pour effectuer cette analyse est alors $M_w = [4.5 \text{ à } 6.5]$.

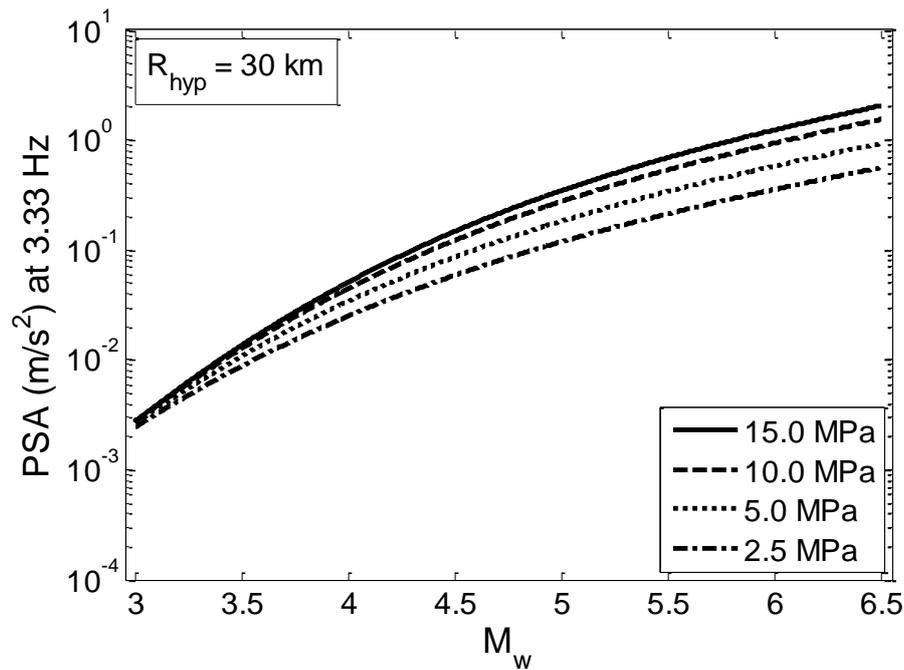


Figure III. 5 : Scaling d'intensité du mouvement sismique pour divers modèles du paramètre de chute de contrainte constante ; les spectres de réponse sont prédits pour $R_{hyp} = 30$ km

4.4 ROBUSTESSE DE L'APPROCHE ANFIS

La physique des méthodes d'apprentissage automatique est essentiellement captée par les ED utilisés. Pour s'assurer que la quantité des données utilisées lors de l'entraînement n'influe pas trop sur l'estimation du mouvement sismique, on a comparé les résultats obtenus avec la totalité des données (100 % de l'ED) et ceux obtenus en utilisant la moitié des données (50 % de l'ED).

La sélection des 50 % est faite d'une manière aléatoire. À cet effet, trois tests sont effectués, la Figure III. 6 compare les courbes $PSA(M_w)$ obtenues lors de l'utilisation de 100% et 50% de l'ensemble total de données.

Les résultats montrent que, soit avec 100 % des données ou avec deux fois 50 % des données, le résultat est le même. Ce qui montre que, physiquement, la méthode est robuste.

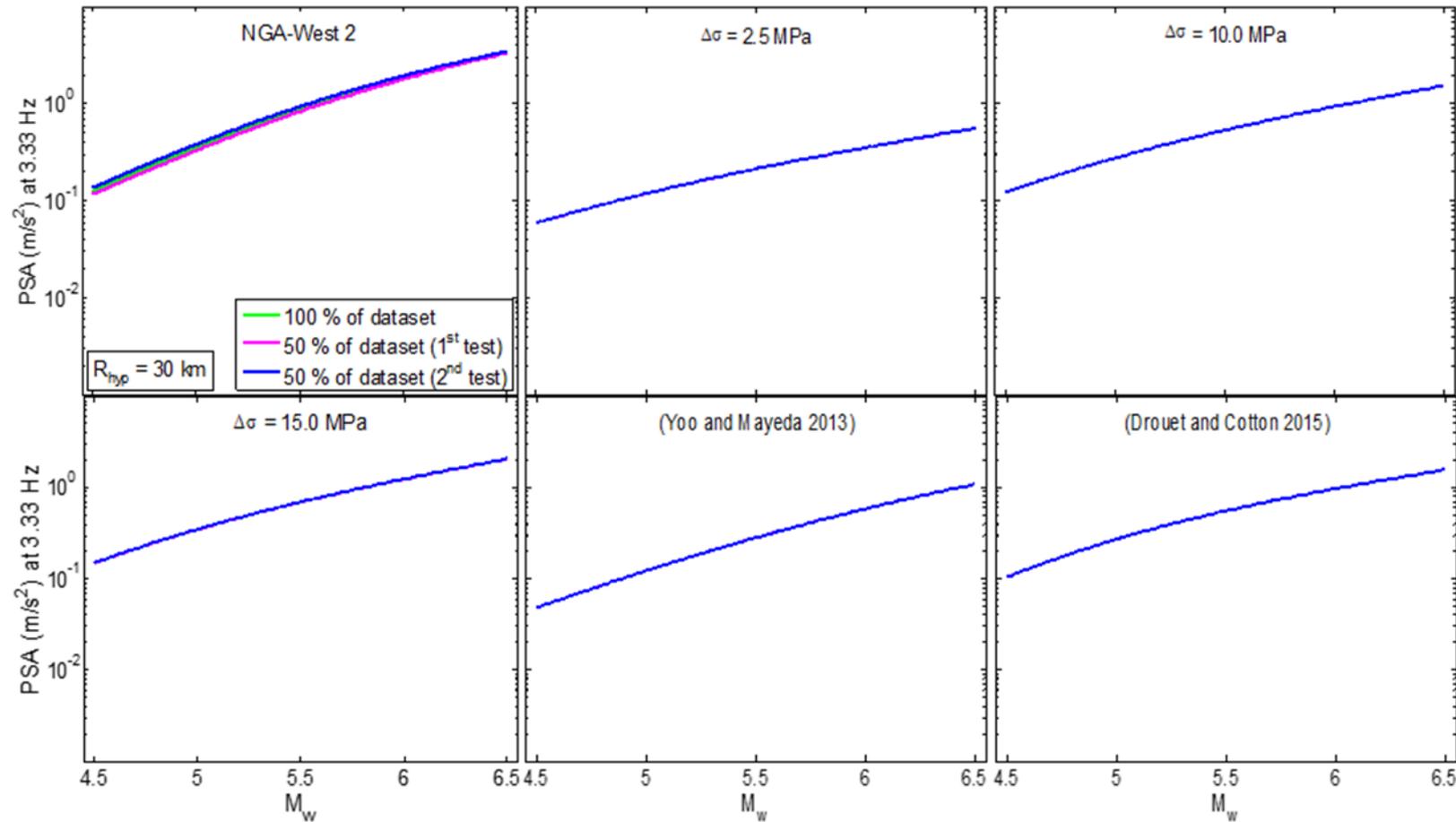


Figure III. 6 : Robustesse du scaling du mouvement sismique dérivé de l'approche ANFIS. Les graphiques montrent la dépendance entre PSA à 3.33 Hz et M_w pour divers sous-ensembles des ensembles simulés de données et l'ensemble de données NGA-West 2. Les spectres de réponse sont prédits pour R_{hyp} = 30 km avec l'intervalle de M_w entre 4.5 et 6.5

5 ÉTUDE COMPARATIVE

Les modèles de prédiction des mouvements sismiques déjà élaborés auparavant Yoo and Mayeda (2013); Abrahamson, Silva and Kamai (2014); Boore *et al.* (2014); Campbell and Bozorgnia (2014); Chiou and Youngs (2014); Drouet and Cotton (2015), sont comparés, dans ce qui suit, avec le modèle dirigé par les données, obtenu par l'ANFIS. Le but est de voir s'il existe un modèle stochastique ($\Delta\sigma$ cte ou variable) ou empirique, qui converge vers les données de l'ED de NGA-West 2.

5.1 COMPARAISON ENTRE LE GMPM D'ANFIS (NGA-WEST 2) ET LES GMPMS D'ANFIS (STOCHASTIQUE)

Dans cette section, et en utilisant ANFIS, on analyse la variation du PSA et son gradient avec la magnitude. Le modèle de référence ANFIS issu de l'ED NGA-West 2 est comparé avec les modèles ANFIS construits à partir des simulations stochastiques à paramètres de chute de contrainte constante (15.0, 10.0, 5.0 et 2.5 MPa) et variables avec la magnitude (Yoo and Mayeda, 2013 ; Drouet and Cotton, 2015).

La **Figure III. 7** illustre cette comparaison (PSA à 3.33 Hz versus M_w). Toutes les prédictions sont effectuées avec l'approche ANFIS et pour une distance hypocentrale égale à 30 km.

Sur **Figure III. 7a**, on représente les mesures (ED de NGA-West 2), le modèle ANFIS NGA-West 2 avec son intervalle de confiance et les modèles de paramètres de chute de contrainte constante. Aucun des modèles ne converge vers les données ; tous les modèles sous-estiment le mouvement sismique (ANFIS NGA-West 2), hormis le modèle avec $\Delta\sigma = 15.0$ MPa, qui est proche de l'intensité mesurée et ce pour $M_w = [4.5-5]$.

Sur **Figure III. 7b**, on représente, en plus des PSA mesurées, les modèles de paramètres de chute de contrainte dépendante de la magnitude. Là aussi les courbes médianes des deux modèles Yoo and Mayeda (2013) et Drouet and Cotton (2015) sont au-dessous de la courbe médiane de ANFIS (NGA-West 2).

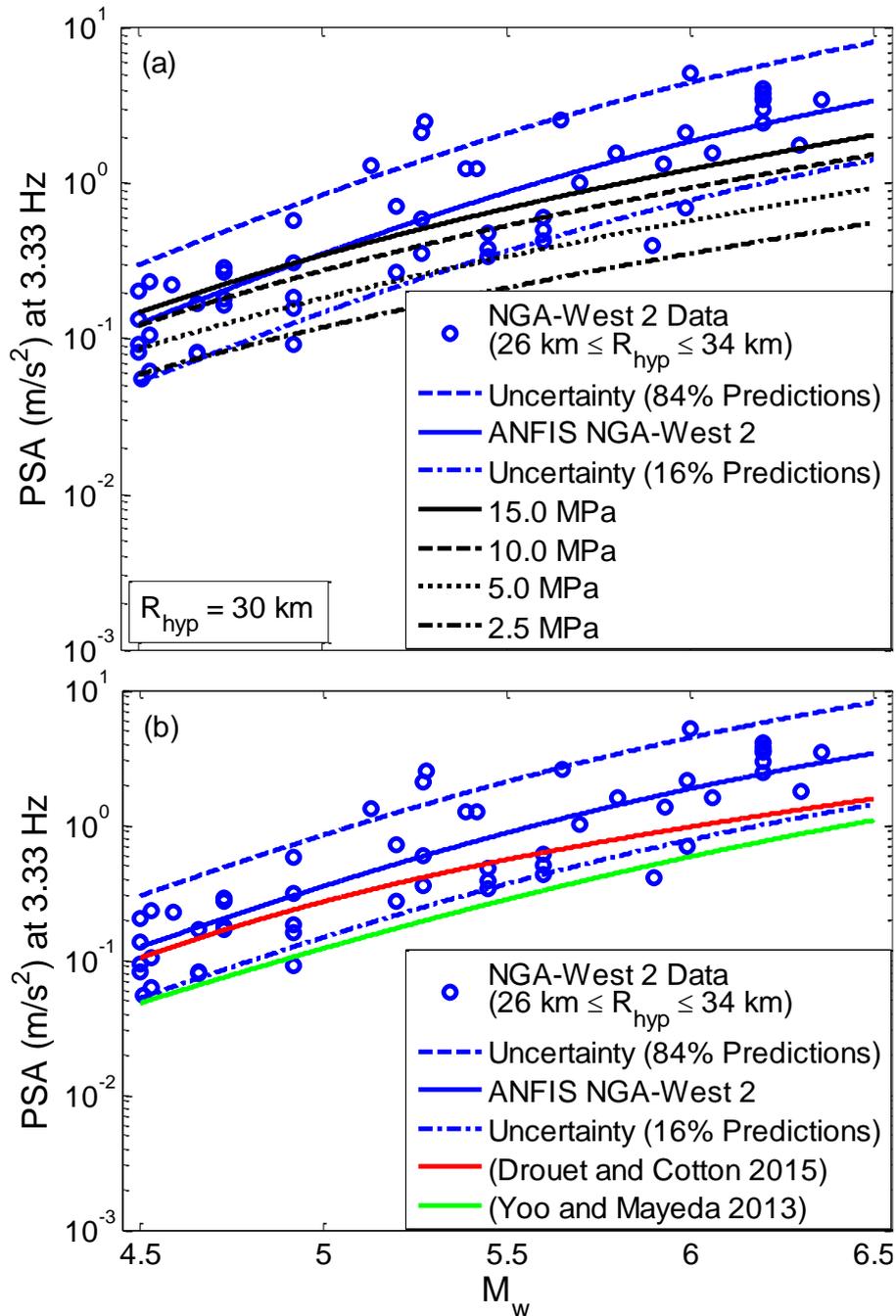


Figure III. 7 : Comparaison entre les modèles d'amplitude du mouvement sismique ANFIS. Le modèle ANFIS NGA-West 2 d'une part et les simulations stochastiques utilisant des modèles de paramètres de chute de contrainte constante / variable, d'autre part. a- Comparaison entre le modèle ANFIS NGA-West 2 et les modèles de paramètres de chute de contrainte constante. b- Comparaison entre le modèle ANFIS NGA-West 2 et les modèles de paramètres de chute de contrainte variable. Les spectres de réponse sont prédits pour $R_{hyp} = 30$ km et l'intervalle de M_w de 4.5 à 6.5. Les données NGA-West 2 pour les distances entre 26 et 34 km sont également ajoutées. Une bande de confiance du modèle ANFIS NGA-West 2 entre 84% de prédictions et 16% de prédictions, est représentée sur cette figure

La **Figure III. 8** montre également que les paramètres de chute de contrainte ont un impact sur la pente du mouvement sismique : $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$. Tous les modèles (à l'exception du modèle de Yoo and Mayeda (2013) pour $M_w \geq 6$) sous-estiment $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$.

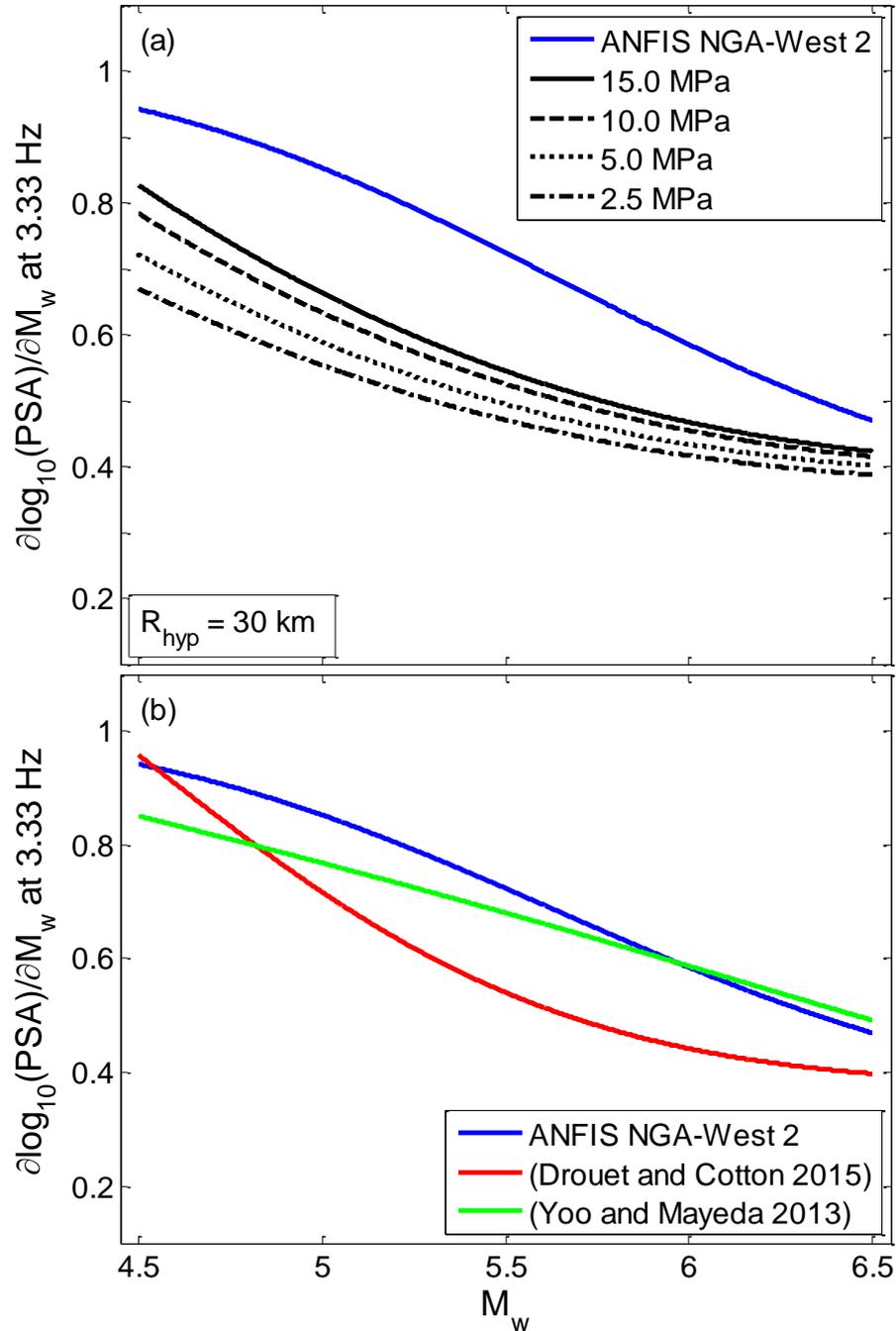


Figure III. 8 : Comparaison entre le scaling de magnitude du mouvement sismique du mouvement observé à partir de l'ensemble de données NGA-West 2 et les simulations stochastiques utilisant des modèles de chute de contrainte constante en (a), puis en utilisant des modèles de chute de contrainte dépendante de la magnitude en (b), les résultats sont donnés pour $R_{\text{hyp}} = 30 \text{ km}$ et l'intervalle de M_w de 4.5 à 6.5

5.2 COMPARAISON ENTRE LE GMPM D'ANFIS (NGA-WEST 2) ET LES GMPEs CLASSIQUES

Dans cette section, on compare le mouvement sismique mesuré (NGA-West 2) et les modèles empiriques de NGA-West 2 classiques (GMPEs, voir chapitre I) (Abrahamson, Silva and Kamai (2014) : ASK14; Boore *et al.* (2014) : BSSA14; Campbell and Bozorgnia (2014) : CB14; Chiou and Youngs (2014) : CY14).

Les résultats sont présentés sur la **Figure III. 9** ; la prédiction est indiquée pour R_{hyp} et R_{rup} égale à 30 km. Cette comparaison inclut également les deux modèles stochastiques de Yoo and Mayeda (2013) et de Drouet and Cotton (2015).

Figure III. 9a (PSA versus M_w) et **Figure III. 9b** ($\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$ versus M_w) montrent qu'aucun des modèles existants (empiriques ou stochastiques) ne converge avec le modèle de référence (ANFIS). De plus, contrairement aux modèles stochastiques, dont on a observé une sous-estimation, les deux GMPEs ASK14 et CB14 estiment des intensités plus élevées que celles du modèle de référence (**Figure III. 9a**).

À partir de la **Figure III. 9b**, trois caractéristiques intéressantes sont à mentionner :

- 1) Le modèle de Drouet and Cotton (2015) converge vers ASK14.
- 2) CB14 et CY14 se rapprochent l'un de l'autre.
- 3) Pour des magnitudes inférieures à $M_w = 6$, la mise à l'échelle du modèle de Yoo and Mayeda (2013) converge vers la mise à l'échelle du modèle BSSA14 ; pour des magnitudes supérieures à $M_w = 6$, le modèle de Yoo and Mayeda (2013) converge vers les données NGA-West 2.

Malgré ces convergences partielles, les résultats montrent l'existence de forte incertitude épistémique et l'absence d'un rapprochement avec les données NGA-West 2 pour $M_w = [4.5-6.5]$.

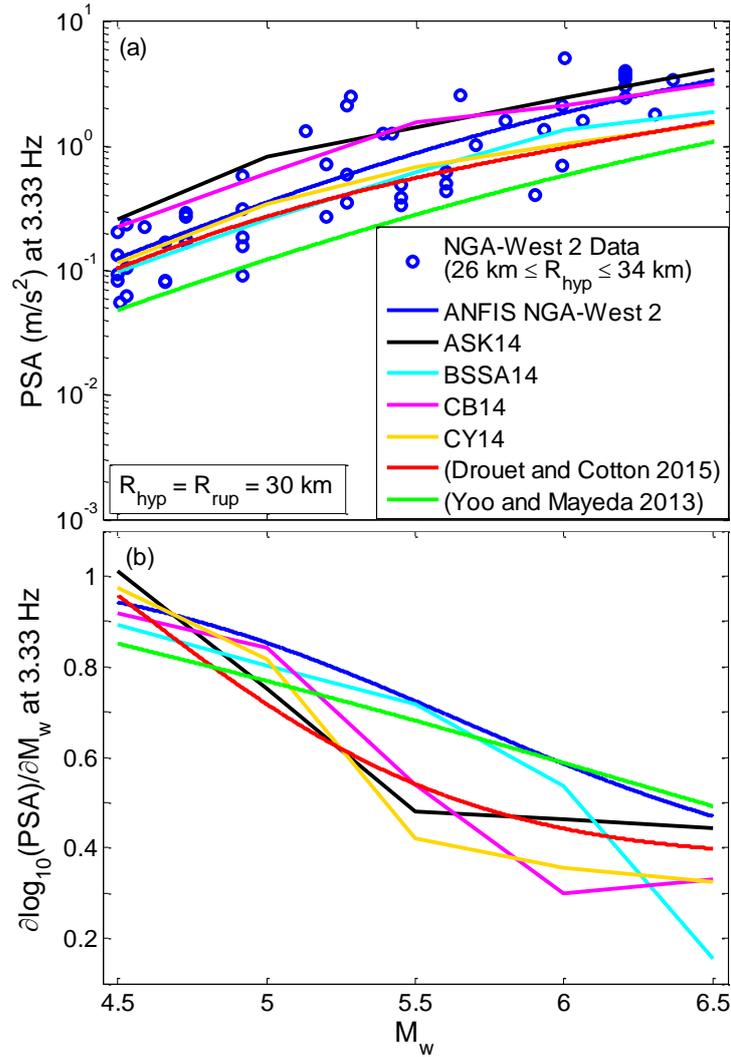


Figure III. 9 : PSA vs M_w et $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$ vs M_w . Comparaison entre le modèle de référence d'ANFIS et les modèles empiriques classiques et stochastiques de Yoo and Mayeda (2013) et celui de Drouet and Cotton (2015). Les PSA sont calculés pour $R_{hyp} = 30$ km et pour l'intervalle de M_w de 4.5 à 6.5. En (a), les données intensités mesurées de NGA-West 2 sont données pour $26 \text{ km} \leq R_{hyp} \leq 34 \text{ km}$

6 PROPOSITION D'UN MODÈLE DE PARAMÈTRE DE CHUTE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE POUR NGA-WEST 2

On a vu dans la section précédente qu'aucun des modèles proposés ne peut présenter l'effet d'échelle lié à la magnitude pour les données NGA-West 2. La raison pour laquelle, on propose, dans cette section, un modèle de paramètre de chute de contrainte en utilisant l'apprentissage automatique et l'approche stochastique. Ce modèle est forcé de prédire le même niveau de PSA (GMIM) et la même pente de $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$. Le modèle actuel est développé à partir de la

base de données stochastiques (Tableau III. 1) en faisant varier le modèle ' $\Delta\sigma$ ' (les autres paramètres restent constants, Tableau III. 1) jusqu'à un ajustement parfait avec le modèle construit à partir des données NGA-West 2. Ce dernier modèle représente la médiane de NGA-West 2. Le résultat du calibrage/calage est illustré sur la Figure III. 10a. Cette figure présente le PSA à 3.33 Hz en fonction de M_w pour le modèle ANFIS (données NGA-West 2) et pour le modèle stochastique, déterminé à $R_{hyp} = 30$ km. Cette figure montre que la convergence (forcée) est parfaite. Sur la Figure III. 10b, on représente $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$ et note que les deux modèles donnent la même mise à l'échelle.

6.1 FORME FONCTIONNELLE DU MODÈLE D'APPRENTISSAGE PILOTÉ PAR LES DONNÉES BASÉ SUR DES ENSEMBLES DE DONNÉES SYNTHÉTIQUES ET NGA-WEST 2

Avec l'approche ANFIS, une équation de prédiction du mouvement sismique est établie. Il s'agit d'une équation polynomiale relativement simple (Équa. III. 4). La forme fonctionnelle de ANFIS est utilisée ici pour prédire la médiane de $\log_{10}(\text{PSA})$ à 3.33 Hz et pour une distance égale à 30 km ; le PSA correspondant (c'est-à-dire le modèle stochastique (NGA-West 2)) est illustré sur la Figure III. 10a.

$$\log_{10} [PSA(M_w)] = \frac{\sum_{i=1}^4 [(a_i M_w + b_i) \times \exp(c_i M_w^2 + d_i M_w + e_i)]}{\sum_{i=1}^4 \exp(c_i M_w^2 + d_i M_w + e_i)} \quad \begin{cases} f = 3.33 \text{ Hz} \\ R_{hyp} = 30 \text{ km} \end{cases}$$

Équa. III. 4

Les différents coefficients (de a_1 à e_4) sont donnés sur le Tableau III. 3. L'équation (Équa. III. 4) présente une sommation de quatre parties car ce nombre de 4 se trouve en calculant : j^P , où ($j=IP=2$, comme indiqué ci-dessus).

Tableau III. 3 : Coefficients du modèle final ANFIS(M_w) ; voir l'Équa. III. 4

i	1	2	3	4
Coeff.				
Modèle stochastique (NGA-West 2)				
a_i	1.7034	1.7522	0.9446	1.0760
b_i	-6.5308	-7.5141	-8.1386	-9.8604
c_i	-0.0549	-0.0549	-0.0276	-0.0276
d_i	0.3565	0.3565	0.5035	0.5035
e_i	-1.1605	-2.6337	-2.8780	-4.3512

L'intervalle d'applicabilité d'un tel modèle entièrement basé sur les données dépend profondément de l'ensemble de données choisi. Un tel modèle ne doit jamais être utilisé en dehors de l'intervalle de M_w de l'ED d'origine. On recommande alors de ne pas utiliser ce modèle ANFIS (Équa. III. 4) en dehors de l'intervalle de $M_w = [4.5-6.5]$.

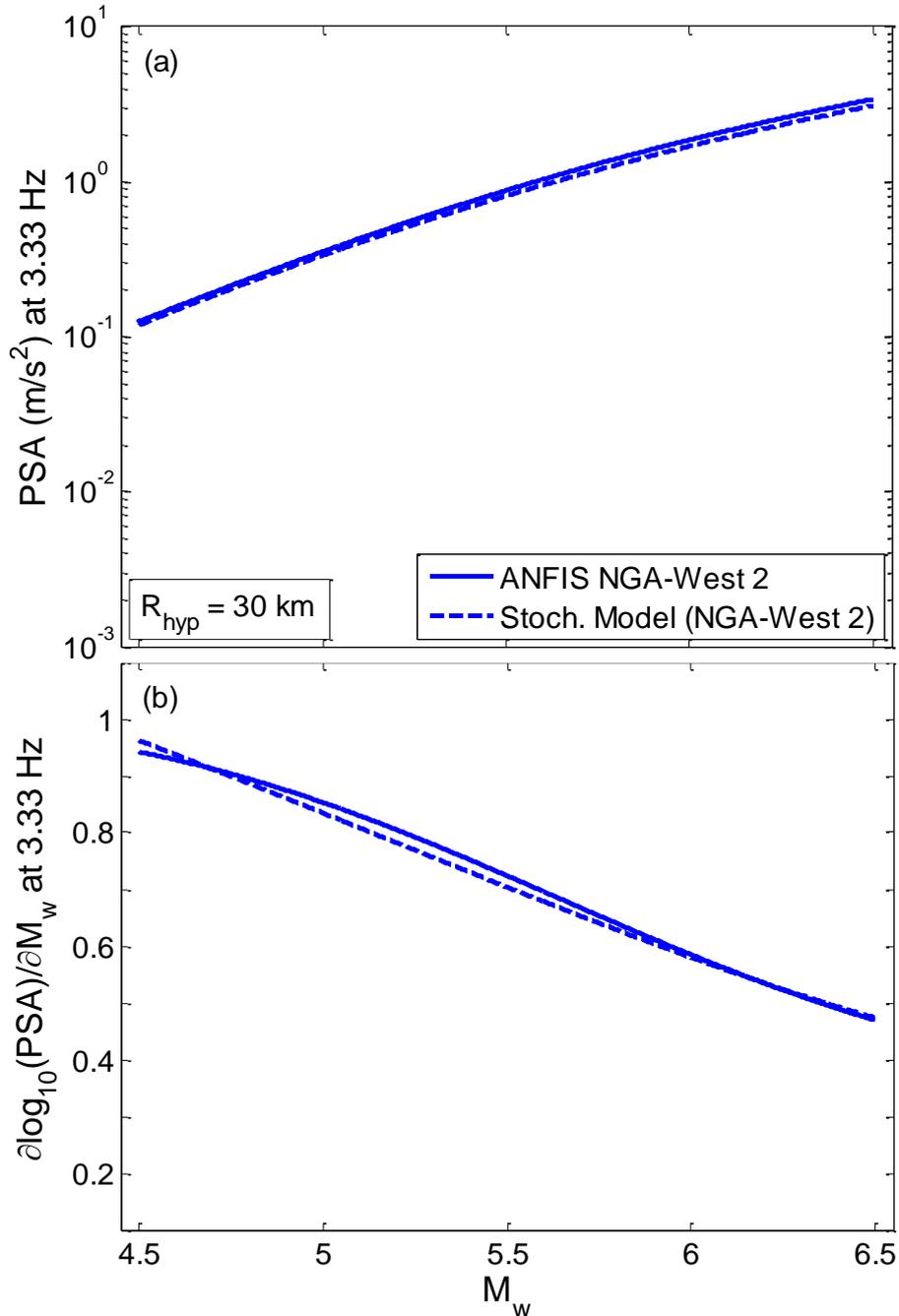


Figure III. 10 : Calibrage de la mise à l'échelle de la magnitude du mouvement sismique obtenu à partir des simulations stochastiques avec la mise à l'échelle de l'ensemble de données observées NGA-West 2. PSA (à 3.33 Hz) est prédit pour $R_{hyp} = 30$ km et pour l'intervalle de M_w allant de 4.5 à 6.5

6.2 MODÈLE PROPOSÉ DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE DÉPENDANTE DE LA MAGNITUDE

Le modèle proposé dans cette étude, du paramètre de chute de contrainte dépendante de la magnitude, et qui donne l'Équa. III. 4 (résultat du calibrage (Figure III. 10)), est défini comme suit (Équa. III. 5) ($\Delta\sigma$ en Pa) :

$$\ln(\Delta\sigma) = \begin{cases} 1.15818 \times M_w + 10.66439 & 4.5 \leq M_w < 5.5 \\ 17.03439 & 5.5 \leq M_w \leq 6.5 \end{cases}$$

Équa. III. 5

L'incertitude sur 'ln($\Delta\sigma$)' prédit a été calibrée aussi, en ajustant les 16% et 84% des prédictions du modèle ANFIS. Cette incertitude est dépendante de la magnitude et ses valeurs pour $M_w=4.5$, $M_w=5.5$ et $M_w=6.5$ sont données dans le Tableau III. 4.

Tableau III. 4 : Incertitude sur 'ln($\Delta\sigma$)' prédit (en Pa), calibrée en ajustant les 16% et 84% des prédictions du modèle ANFIS, donnée pour $M_w=4.5$, $M_w=5.5$ et $M_w=6.5$

Incertitude de ln($\Delta\sigma$)	$M_w = 4.5$	3.46
	$M_w = 5.5$	2.36
	$M_w = 6.5$	2.36

La forme fonctionnelle du modèle qui est montré dans l'Équa. III. 5 est également illustrée sur la Figure III. 11.

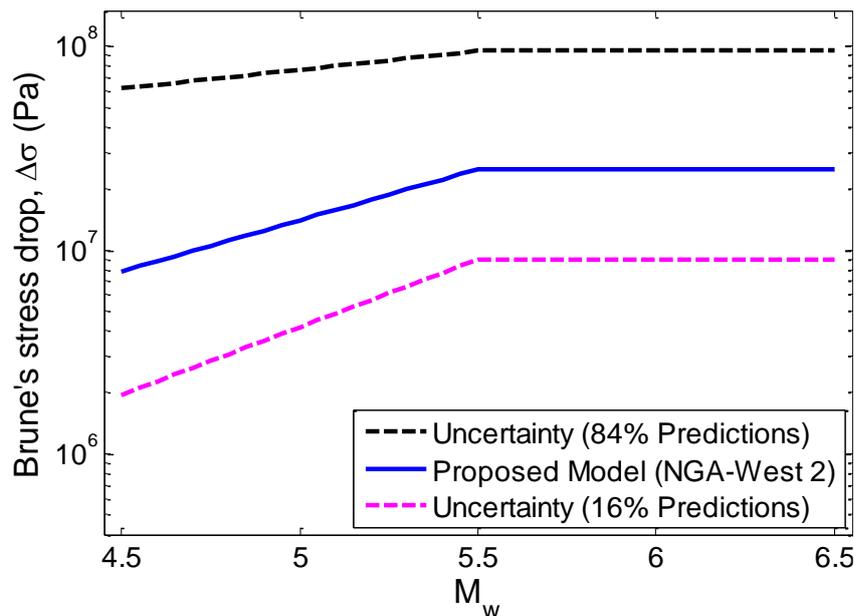


Figure III. 11 : Modèle proposé du paramètre de chute de contrainte, en plus de l'incertitude entre 16% et 84% des prédictions de ANFIS (NGA-West 2). Ce modèle est valable pour M_w entre 4.5 et 6.5

7 CONCLUSION

Pour analyser l'effet d'échelle lié à la magnitude des mouvements sismiques, dans ce chapitre, on a utilisé un ensemble de données de la base de données NGA-West 2 (Ancheta *et al.*, 2014). En suivant les méthodes d'analyse de sensibilité, développées par Molkenthin *et al.* (2014), on suppose que les variations du paramètre de chute contrainte, sont le facteur dominant qui contrôle le mouvement sismique (pour les spectres de réponse d'accélération à une fréquence de 3.33 Hz, pour les événements à des magnitudes allant de 4.5 à 6.5, et à une distance de 30 km).

On a ensuite analysé la mise à l'échelle du paramètre de chute de contrainte avec la magnitude à travers des comparaisons entre la mise à l'échelle des mesures et des simulations. Les résultats de ces comparaisons suggèrent que la relation entre le paramètre de chute de contrainte et la mise à l'échelle de magnitude du mouvement sismique n'est pas linéaire. En outre, les modèles existants de GMPEs, ou stochastiques montrant des modèles de paramètres de chute de contrainte constante ou variable, ne sont pas cohérents avec la mise à l'échelle du modèle ANFIS intégralement basé sur les données, calibré avec NGA-West 2, développé dans cette étude.

Ce manque de convergence peut s'expliquer par plusieurs problèmes. Les simulations stochastiques utilisées dans cette étude sont basées sur l'hypothèse de source ponctuelle, et ces simulations peuvent ne pas être en mesure de reproduire des termes de champ proche et intermédiaire, à des courtes distances. Les GMPEs testées dans cette étude sont basées sur des formes fonctionnelles traditionnelles qui n'incluent pas explicitement la chute de contrainte comme paramètre d'entrée. Ces formes fonctionnelles dépendent des choix a priori des modélisateurs qui peuvent avoir un impact sur la mise à l'échelle de magnitude.

Étant donné que les modèles existants n'ont pas pu reproduire la mise à l'échelle mesurée, un modèle du paramètre de chute de contrainte dépendante de la magnitude est finalement développé. Notre approche est basée sur le concept de calage : le modèle ANFIS(données stochastiques) a été forcé de prédire le même niveau de PSA et la même pente de $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$ que le modèle ANFIS(données NGA-West 2). Il reste donc la validation du modèle.

Dans le chapitre suivant, on appliquera le modèle proposé, de chute de contrainte sismique, pour des intervalles plus larges par rapport aux intervalles dans lesquelles ce modèle a été déterminé, et pour un ensemble de fréquences spectrales.

CHAPITRE IV

APPLICATIONS ET VALIDATIONS DU MODÈLE PROPOSÉ DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE SISMIQUE

SOMMAIRE DU CHAPITRE IV

CHAPITRE IV. APPLICATIONS ET VALIDATIONS DU MODÈLE PROPOSÉ DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE SISMIQUE	91
1 INTRODUCTION.....	92
2 ESTIMATIONS DU MOUVEMENT SISMIQUE : UTILISATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE POUR DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES.....	93
3 ESTIMATIONS DU MOUVEMENT SISMIQUE : UTILISATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE POUR DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES DE L'INTERVALLE $F = [2 - 5 \text{ Hz}]$ ET POUR DES DONNÉES PLUS LARGES.....	94
3.1 APPLICATION AUX DONNÉES NGA-WEST 2.....	94
3.2 SIMULATIONS STOCHASTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	98
3.3 ÉQUATIONS CLASSIQUES DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	99
3.4 ANALYSES DU MOUVEMENT SISMIQUE.....	99
4 CONCLUSION.....	103

1 INTRODUCTION

Le mouvement sismique est une donnée importante pour l'étude parasismique des structures, son estimation représente un objectif pour les différents chercheurs. Comme il a été donné dans les chapitres précédents (chapitres I et III), les paramètres les plus utilisés sont les ordonnées spectrales tels que le PGA et les PSA pour différentes périodes.

Pour prédire le mouvement sismique, différentes méthodes peuvent être utilisées (voir chapitre I). Parmi ces méthodes, l'approche d'ANFIS (chapitres I et III) (Takagi and Sugeno, 1985 ; Sugeno and Kang, 1986). Avec un ensemble de données plus large que celui utilisé dans le chapitre précédent (4272 enregistrements, 1677 sites et 100 événements), on essaye de proposer un modèle de prédiction du mouvement sismique. Les proxies qui caractérisent l'effet de source, de propagation d'ondes et de site, sont représentés par M_w , R_{hyp} et V_{s30} , respectivement.

En second lieu, la méthode qui décrit la physique du processus sismique (SMSIM, Boore (2003)) (détaillée dans le chapitre I), est utilisée pour produire des sous-ensembles de données synthétiques utilisées par la suite dans ANFIS. L'objectif est de valider et d'appliquer le modèle du paramètre de chute de contrainte sismique ($\Delta\sigma$) obtenu dans le chapitre III. En d'autres mots, de voir si ce modèle est capable de prédire les intensités sismiques en tenant en compte de l'effet d'échelle lié à la magnitude.

La troisième méthode qui est utilisée, est représentée par les GMPEs (voir chapitre I). On utilise également ces dernières dans ce chapitre pour estimer le mouvement sismique à différentes fréquences, en comparant leurs estimations avec les deux méthodes montrées précédemment.

Deux procédures sont utilisées dans ce chapitre : la première concerne l'application du modèle de $\Delta\sigma$ dans l'intervalle où les mouvements sismiques sont sensibles principalement aux variations du paramètre de $\Delta\sigma$ (expliqué dans le chapitre III) ; et la deuxième procédure concerne l'application du modèle de $\Delta\sigma$ dans un intervalle sortant de la sensibilité des mouvements sismiques qu'aux variations du paramètre de $\Delta\sigma$ (par exemple, à une fréquence qui n'appartient pas à [2 - 5 Hz]).

2 ESTIMATIONS DU MOUVEMENT SISMIQUE : UTILISATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE POUR DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES

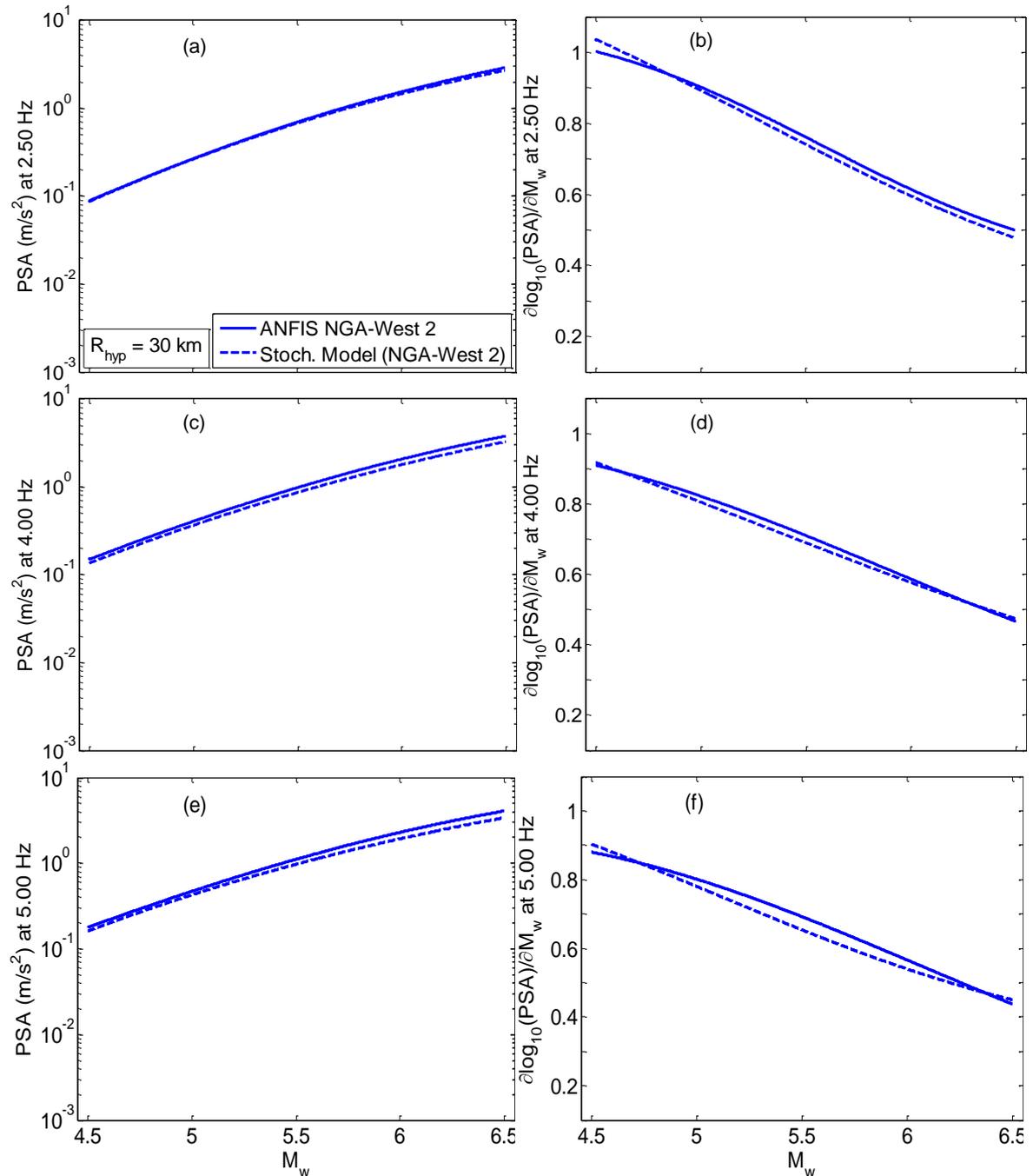


Figure IV. 1 : Mise à l'échelle de magnitude des mouvements sismiques pour l'ensemble de données observées NGA-West 2 et pour les simulations stochastiques, avec la mise à l'échelle à $f = 2.50$ Hz (a et b), à $f = 4.00$ Hz (c et d) et à $f = 5.00$ Hz (e et f). Les prédictions sont illustrées pour $R_{hyp} = 30$ km et pour $M_w = [4.5-6.5]$ en utilisant le modèle du paramètre de chute de contrainte proposé dans le chapitre III (Équa. III. 5)

Le modèle du paramètre de chute de contrainte dépendante de la magnitude proposé (à $f = 3.33$ Hz, (chapitre III)), est appliqué pour prédire le mouvement sismique à d'autres fréquences ($f = 2.50$ Hz, $f = 4.00$ Hz et $f = 5.00$ Hz), tout en gardant les mêmes données utilisées pour l'apprentissage de ANFIS (c.-à-d., pour des distances R_{hyp} inférieures à 60 km et pour des vitesses V_{s30} supérieures à 500 m/s, comme indiqué dans le chapitre III).

Ces fréquences sont choisies pour tester le modèle de $\Delta\sigma$ à des fréquences qui appartiennent à l'intervalle dont les mouvements sismiques sont sensibles principalement aux variations du paramètre $\Delta\sigma$ (intervalle donné dans le chapitre III).

Sur les figures (**Figure IV. 1a**, **Figure IV. 1b**, **Figure IV. 1c**, **Figure IV. 1d**, **Figure IV. 1e** et **Figure IV. 1f**), on présente les intensités mesurées du mouvement sismique et les pentes $\partial \log_{10}(PSA)/\partial M_w$, pour les trois fréquences : $f = 2.50$ Hz, $f = 4.00$ Hz et $f = 5.00$ Hz, qui sont (GMIMs et pentes) calculées et illustrées lors de l'utilisation de l'Équa. III. 5 (calibrée à $f = 3.33$ Hz). Ces figures montrent des convergences de la mise à l'échelle des modèles stochastiques appliquant le paramètre de chute de contrainte (Équa. III. 5) vers la mise à l'échelle des données mesurées (ANFIS NGA-West 2), cela confirme la validité de l'Équa. III. 5 pour les trois fréquences utilisées.

3 ESTIMATIONS DU MOUVEMENT SISMIQUE : UTILISATION DU PARAMÈTRE DE CHUTE DE CONTRAINTE POUR DES FRÉQUENCES DIFFÉRENTES DE L'INTERVALLE $f = [2 - 5$ HZ] ET POUR DES DONNÉES PLUS LARGES

3.1 APPLICATION AUX DONNÉES NGA-WEST 2

À partir de la BD NGA-West 2 (voir chapitre I), on sélectionne un ED en utilisant les critères de sélection de Derras, Bard and Cotton (2016). Les proxies utilisés comme entrées dans cette section sont M_w , R_{hyp} et V_{s30} . Les mouvements sismiques sélectionnés représentent PGA (haute fréquence) ainsi que PSA amortis à 5% pour les périodes $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s (c.-à-d., $f = 10$ Hz, 3.33 Hz et 1 Hz, respectivement).

Dans la **Figure IV. 2**, on présente la distribution de la relation M_w - R_{hyp} , avec les intervalles : $M_w = [4.5-6.5]$ et $R_{hyp} = [1-200 \text{ km}]$. La distribution des mouvements sismiques avec R_{hyp} est donnée dans la **Figure IV. 3a**.

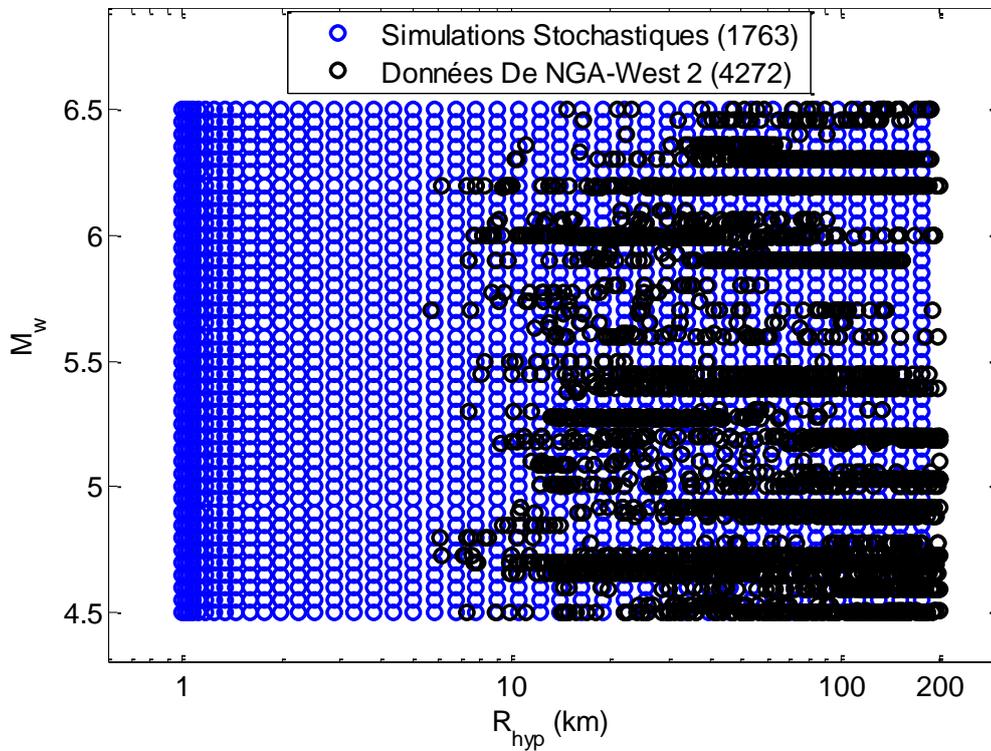


Figure IV. 2 : Distribution de la magnitude M_w avec la distance R_{hyp} pour les données de NGA-West 2, ainsi que pour les données stochastiques. La distribution est illustrée pour $M_w=[4.5-6.5]$ et $R_{hyp}=[1-200 \text{ km}]$

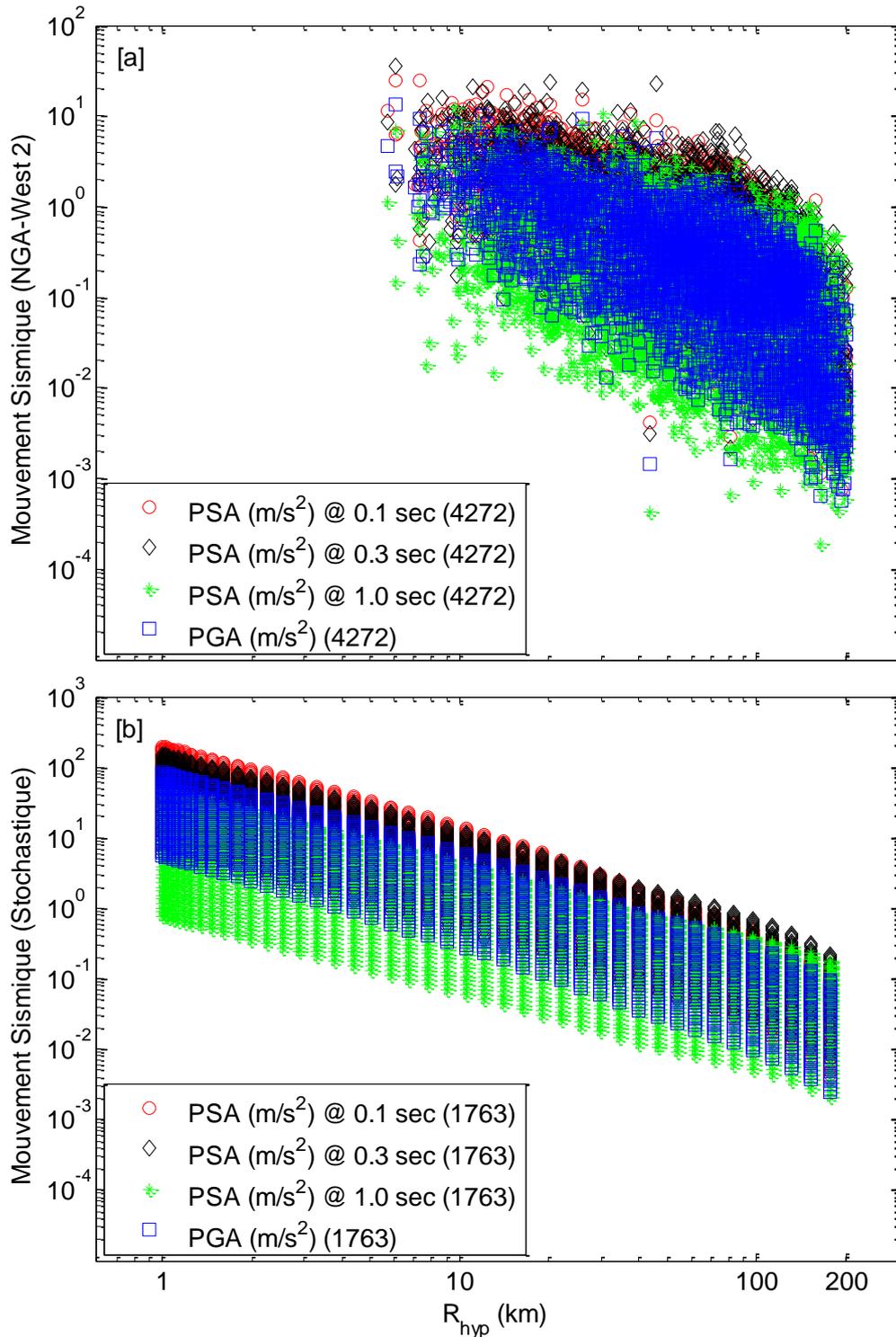


Figure IV. 3 : Variation des PSA avec la distance. Pour le PGA (haute fréquence) et les PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s (fréquences : $f = 10$ Hz, 3.33 Hz et 1 Hz, respectivement), amortis à 5%, en fonction de la distance $R_{hyp} = [1-200$ km]. La distribution est donnée pour les données NGA-West 2 dans [a], et pour les simulations stochastiques dans [b]

Ici, toutes les valeurs de V_{s30} sont utilisées comme un proxy de l'effet local de site. La relation M_w - V_{s30} est illustrée sur la **Figure IV. 4a**, la distribution des mouvements sismiques en fonction de V_{s30} est donnée par la **Figure IV. 4b**.

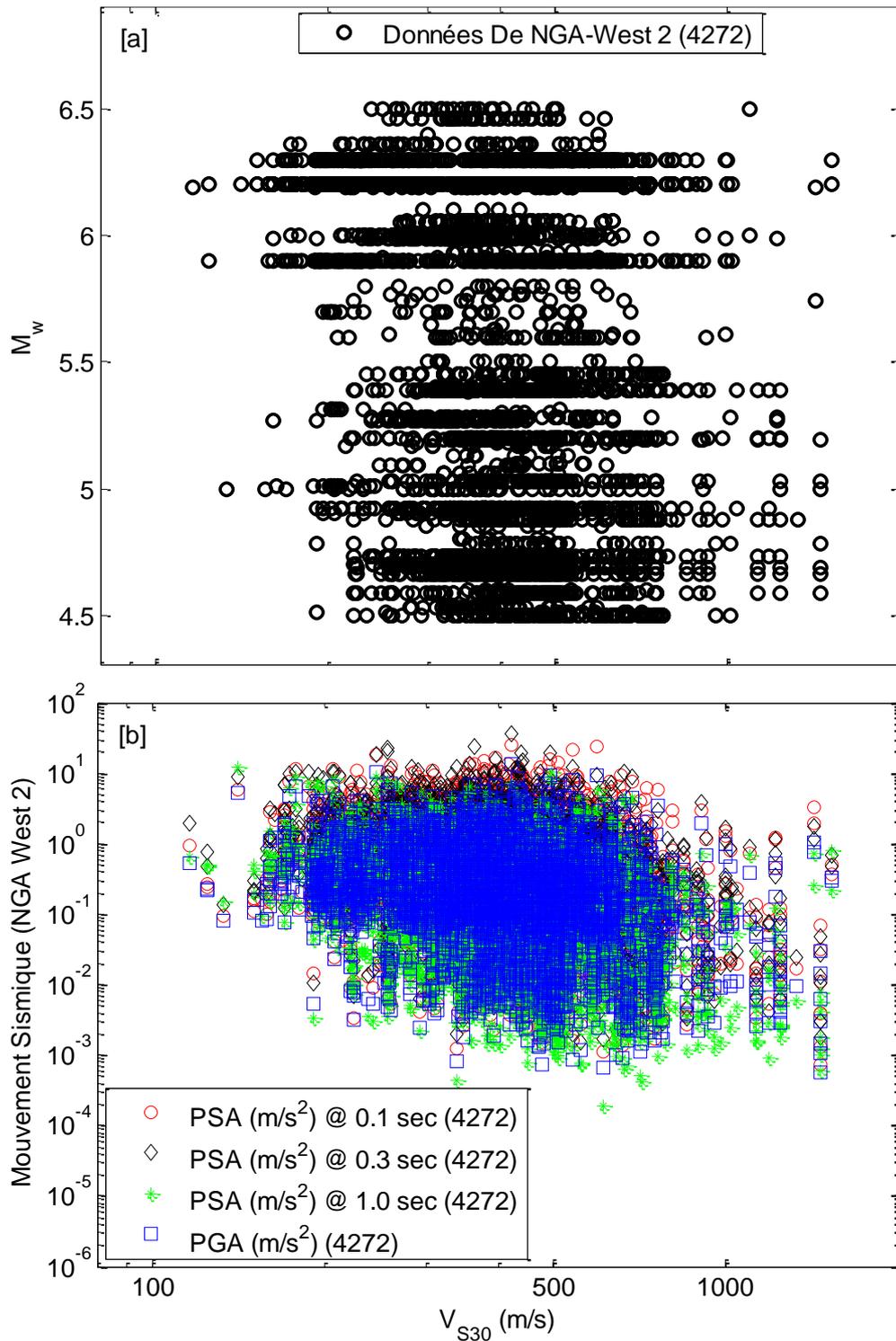


Figure IV. 4 : [a] Distribution de la magnitude $M_w = [4.5-6.5]$ vs V_{s30} . [b] Variation du PGA et des PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s avec la V_{s30} . Pour les données NGA-West 2

Pour estimer le mouvement sismique, on utilise comme dans le chapitre III, l'approche ANFIS et des ED de NGA-West 2. L'architecture de l'ANFIS est illustrée par la Figure IV. 5. On estime ici le PGA et les PSA amortis à 5% pour $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s.

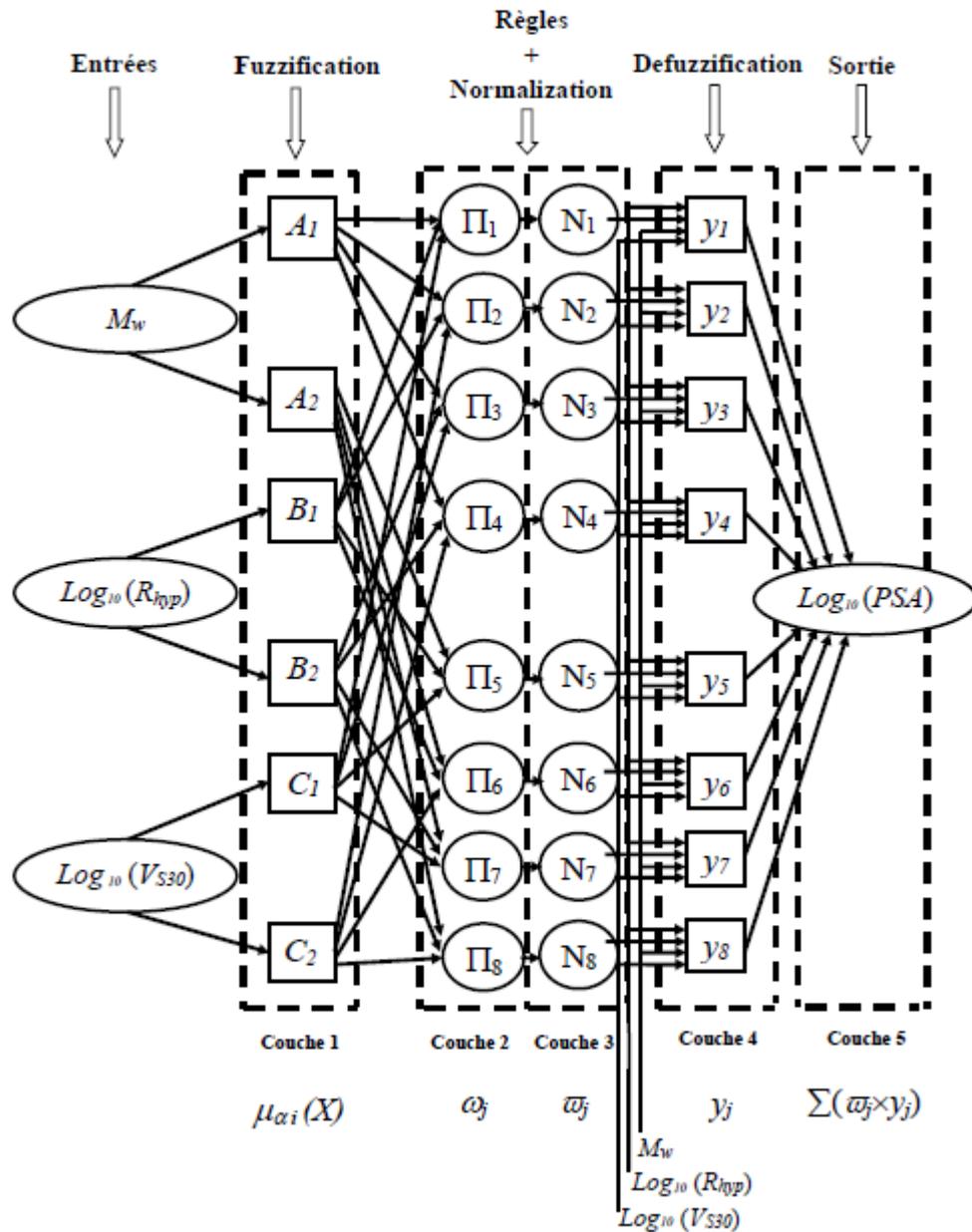


Figure IV. 5 : Architecture du modèle ANFIS pour les trois proxies M_w , R_{hyp} et V_{s30}

3.2 SIMULATIONS STOCHASTIQUES DU MOUVEMENT SISMIQUE

Dans le chapitre I, on a présenté en détail la méthode stochastique établie par Boore (2003) pour le calcul du mouvement sismique. Dans le chapitre III, on l'a utilisée pour obtenir le modèle $\Delta\sigma$. Ici, elle est de nouveau utilisée pour valider et argumenter le choix du modèle $\Delta\sigma$ (Dif *et al.*, 2020 ; Équa. III. 5)

Des simulations stochastiques pour produire le PGA, et les PSA ($T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s : $f = 10$ Hz, 3.33 Hz et 1.0 Hz, respectivement) sont réalisées aussi pour établir des sous-ensembles de données synthétiques.

Les résultats des simulations sont représentés dans la **Figure IV. 2** avec la distribution de la relation des deux paramètres M_w - R_{hyp} . La distribution des mouvements sismiques, en fonction de R_{hyp} est illustrée par la **Figure IV. 3b**. Ces données stochastiques sont utilisées pour avoir un modèle de prédiction d'ANFIS des PGA et PSA amortis à 5% pour $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s.

3.3 ÉQUATIONS CLASSIQUES DE PRÉDICTION DU MOUVEMENT SISMIQUE

Dans le chapitre I, plusieurs GMPEs ont été évoquées, en montrant le principe de leur développement (voir l'exemple de Boore *et al.* (2014)). On choisit dans cette section les trois modèles de GMPEs déterminées utilisant la BD NGA-West 2, qui sont représentées par : Abrahamson, Silva and Kamai (2014) : ASK14 ; Campbell and Bozorgnia (2014) : CB14 ; Chiou and Youngs (2014) : CY14). On utilise ces GMPEs classiques afin de calculer PGA (haute fréquence) et PSA amortis à 5% pour $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s ($f = 10$ Hz, 3.33 Hz et 1.0 Hz, respectivement), pour les paramètres M_w , $R_{hyp} = 30$ km et $V_{s30} = 620$ m/s.

Dans ce qui suit, les PSA- M_w sont tracés. Des comparaisons sont effectuées entre les GMPEs, ANFIS (NGA-West 2) et le modèle stochastique ($\Delta\sigma$ de l'Équa. III. 5)

3.4 ANALYSES DU MOUVEMENT SISMIQUE

En utilisant les trois méthodes d'estimation du mouvement sismique (expliquées précédemment, voir chapitres I et III), on trace ici les PGA et PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s, amortis à 5%, en fonction de M_w (mise à l'échelle)

Ces 04 ordonnées spectrales sont importantes pour l'aléa sismique et l'analyse des structures. En effet, PGA représente l'accélération maximale du sol (PGA). $T = 0.1$ s est une période pivot entre les deux effets : source-propagation d'ondes (valeur spectrale maximale avec une grande incertitude : Derras, Bard and Cotton (2016), elle représente aussi la période de résonance pour les structures rigides. À $T = 0.3$ s, $\Delta\sigma$ est le paramètre qui influe le plus sur le mouvement sismique (Molkenthin *et al.*, 2014). $T = 1.0$ s est la période de résonance pour les structures plus souples.

Dans les figures (Figure IV. 6a, Figure IV. 6b, Figure IV. 6c et Figure IV. 6d), on présente les estimations (GMIMs) des PGA et PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s, des modèles des données mesurées (NGA-West 2) d'une part et des modèles stochastiques d'autre part. Les estimations sont effectuées à $R_{hyp} = 30$ km, pour $V_{s30} = 620$ m/s (ANFIS NGA-West 2) et pour un sol rocheux (ANFIS stochastique). Les données mesurées NGA-West 2 pour $25 \text{ km} \leq R_{hyp} \leq 35 \text{ km}$ sont aussi ajoutées dans ces figures.

Les valeurs du PGA et des PSA, obtenues par les deux méthodes (ANFIS (NGA-West 2 ; simulations stochastiques)) sont très proches les unes des autres (Figure IV. 6).

À cet effet, on peut déduire que les deux méthodes utilisées peuvent servir à reproduire les données mesurées de NGA-West 2.

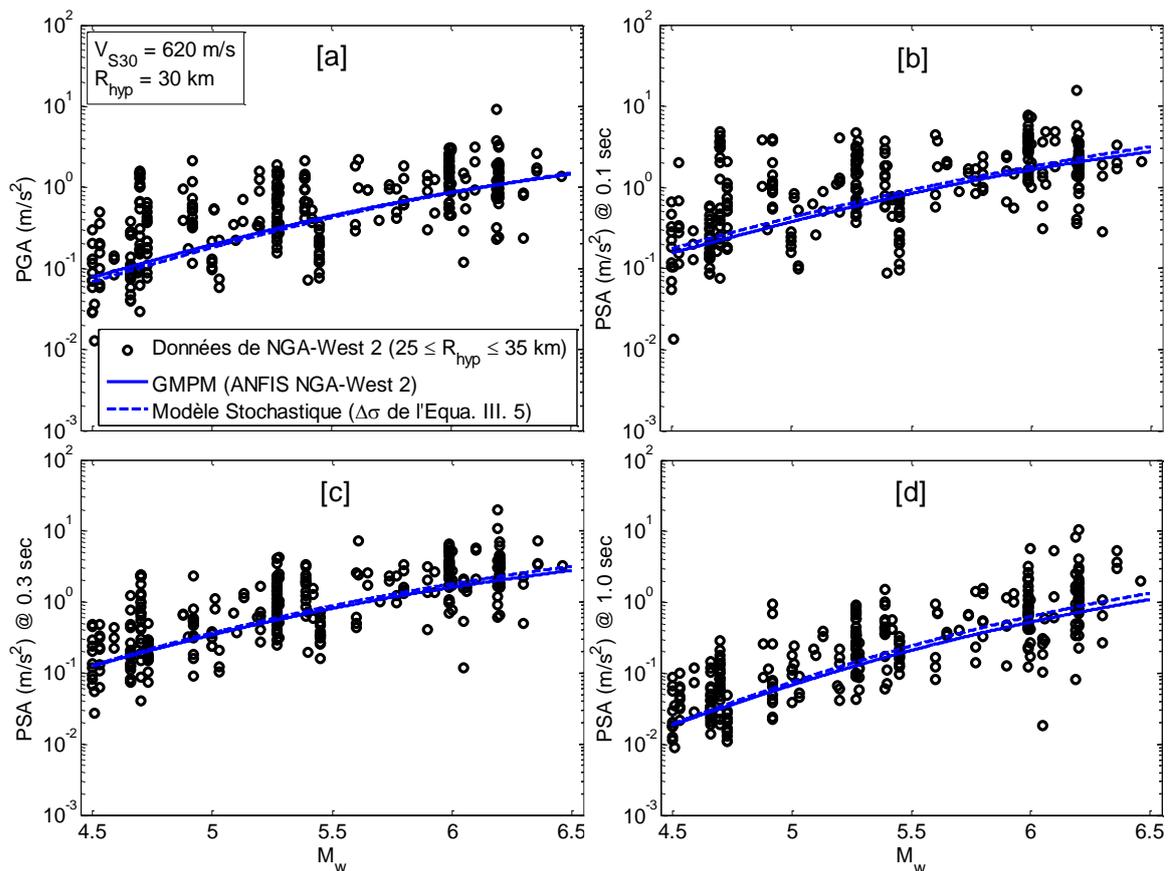


Figure IV. 6 : Variations des accélérations PGA (haute fréquence) et PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s, estimées pour $R_{hyp} = 30$ km à partir des deux méthodes ANFIS de NGA-West 2 et du modèle stochastique, en fonction de la magnitude $M_w = [4.5-6.5]$. Le calcul est effectué pour $V_{s30} = 620$ m/s (NGA-West 2) et pour un sol rocheux (simulations stochastiques) (appliquant l'Équa. III. 5)

Ajoutant à ces deux modèles ANFIS, les estimations du mouvement sismique (GMPEs, voir chapitres I et III), à savoir : (ASK14 : Abrahamson, Silva and Kamai (2014) ; CB14 : Campbell and Bozorgnia (2014) et CY14 : Chiou and Youngs (2014)). Les résultats sont présentés sur les figures (Figure IV. 7a, Figure IV. 7b, Figure IV. 7c et Figure IV. 7d) pour $R_{hyp} = 30$ km (ANFIS) et pour la distance de rupture $R_{rup} = 30$ km (GMPEs). C'est dans cette intervalle de distance que $\Delta\sigma$ influe le plus (Molkenthin *et al.*, 2014). $V_{s30} = 620$ m/s (site raide) ; $R_{hyp} = R_{rup}$ du moment où M_w maximale ≤ 6.5 .

Les modèles ANFIS issus des données mesurées de NGA-West 2, représentent les modèles de référence, du moment où aucune forme fonctionnelle n'est utilisée pour leur élaboration.

La Figure IV. 7 montre que les modèles stochastiques sont les modèles qui convergent le mieux vers les modèles de ANFIS NGA-West 2 (modèles de référence). Tandis que les trois GMPEs classiques surestiment ou sous-estiment les GMIMs dans l'intervalle $M_w = [4.5-6.5]$.

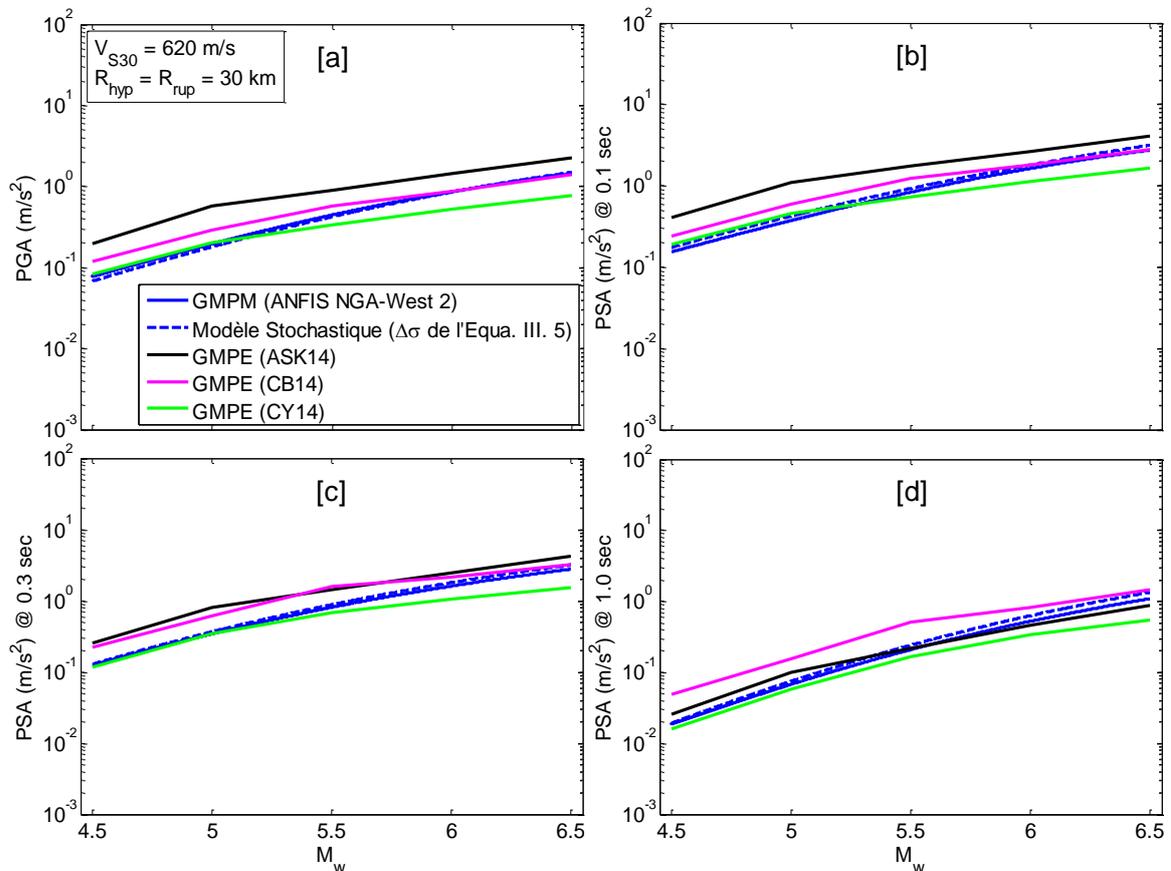


Figure IV. 7 : Estimations des PGA (haute fréquence) et PSA à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s en fonction de M_w . Comparaison entre les deux modèles ANFIS et 03 GMPEs classiques. R_{hyp} et $R_{rup} = 30$ km, pour ANFIS et GMPEs, respectivement

Les figures (Figure IV. 8a, Figure IV. 8b, Figure IV. 8c et Figure IV. 8d) de leurs côtés donnent $\partial \log_{10}(\text{PGA et PSA})/\partial M_w$. Ces résultats illustrent les pentes des spectres de PSA et PGA montrés sur la Figure IV. 7. On remarque que ANFIS NGA-West 2 est mieux représenté par le modèle stochastique ($\Delta\sigma$ de l'Équa. III. 5) que par les GMPEs classiques.

Finalement, on peut confirmer que le paramètre de chute de contrainte sismique (Équa. III. 5) (appliqué dans les modèles stochastiques) est valable aussi pour les PGA et PSA (à $T = 0.1$ s, 0.3 s et 1.0 s) (fréquences plus larges).

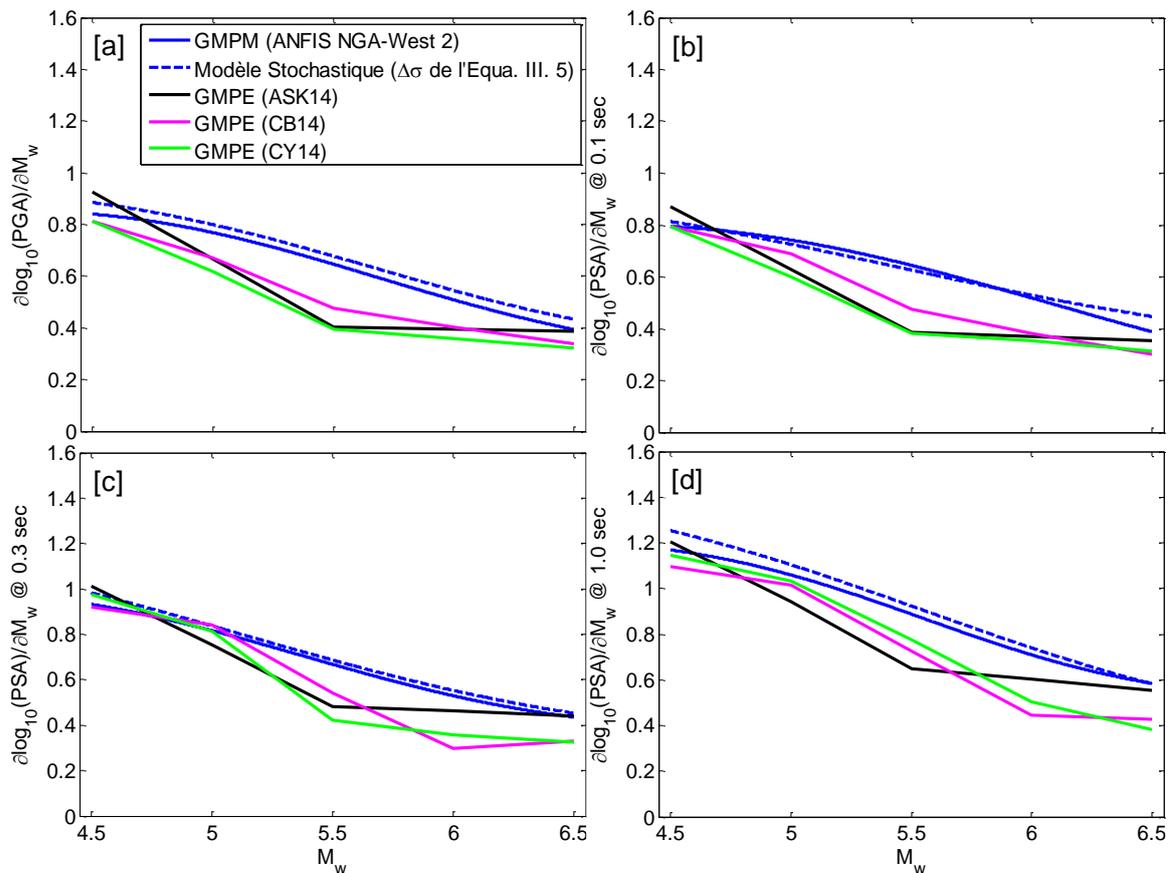


Figure IV. 8 : Distributions des pentes $\partial \log_{10}(\text{PGA et PSA})/\partial M_w$ en fonction de M_w . Les pentes sont calculées pour les spectres de la Figure IV. 7

Enfin, des estimations des PSA(T) sont illustrées sur la Figure IV. 9. Les estimations sont effectuées pour ANFIS de NGA-West 2 et pour le modèle stochastique (en appliquant l'Équa. III. 5 du paramètre de chute de contrainte), pour un sol rocheux. La Figure IV. 9 montre une convergence acceptable entre le spectre stochastique et les données mesurées (ANFIS NGA-West 2). À cet effet, on peut déduire que l'Équa. III. 5 peut être utilisée pour la prédiction du mouvement sismique.

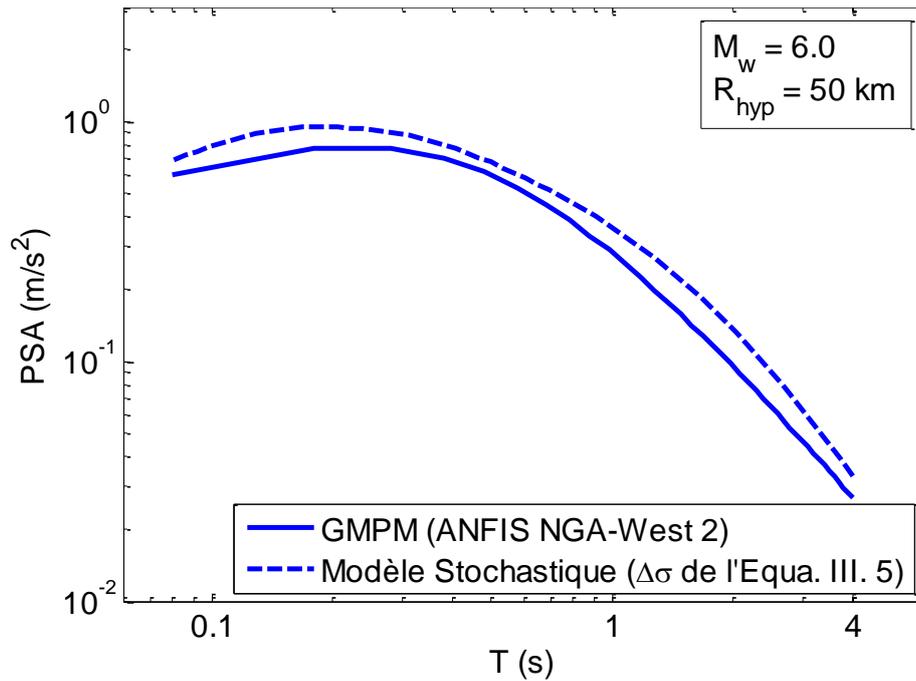


Figure IV. 9 : Variation des estimations du PSA avec la période, pour l'ensemble de données mesurées (NGA-West 2) et le modèle stochastique (appliquant l'Équa. III. 5). Les estimations sont données pour $M_w = 6.0$, $R_{hyp} = 50$ km et pour un sol rocheux

4 CONCLUSION

Le mouvement sismique représenté par PSA amorti à 5%, pour différentes périodes (différentes fréquences) a été estimé dans ce chapitre. Cette estimation est effectuée en utilisant l'approche ANFIS, qui est basée totalement sur les données. Premièrement, on a utilisé un sous-ensemble de la BD observées NGA-West 2 (Ancheta *et al.*, 2014). Le deuxième type de données utilisées dans cette étude représente les données synthétiques, estimées par le biais de la méthode stochastique de Boore (2003). Aussi, trois modèles de GMPEs classiques ont été choisis afin de les comparer avec les deux premières approches : ANFIS (NGA-West2) et le modèle stochastique ($\Delta\sigma$ de l'Équa. III. 5).

Ce dernier (modèle de $\Delta\sigma$ (Équa. III. 5)) a été utilisé pour différentes périodes (différentes fréquences) et pour des données plus larges par rapport au chapitre III.

Les résultats trouvés montrent que le modèle proposé de chute de contrainte (Équa. III. 5) est valable pour toutes les nouvelles données utilisées dans ce chapitre IV, et il est le mieux placé, parmi les GMPEs actuelles, pour avoir une estimation des mouvements sismiques optimales. Il reste, cependant, indispensable de tester ce résultat pour d'autres paramètres du mouvement sismique et pour d'autres BD.

CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif de cette thèse est d'étudier la mise à l'échelle du paramètre de chute de contrainte sismique ($\Delta\sigma$) avec la magnitude et ce pour avoir une estimation adéquate du mouvement sismique (MS). Pour atteindre cet objectif, on a commencé par déterminer les plages optimales de la distance, la fréquence et la magnitude dont le $\Delta\sigma$ est le facteur dominant qui contrôle le plus le MS. À cet effet, la démarche d'analyse de sensibilité, développée par Molkenthin *et al.* (2014) est utilisée. On a trouvé que pour une distance 30 km et une fréquence égale à 3.33 Hz et pour $M=[4.5-6.5]$ (faille modélisée comme étant un point), le MS est très sensible à $\Delta\sigma$. Il est à noter que, le paramètre de source « $\Delta\sigma$ » est l'un des facteurs importants de la méthode stochastique (SMSIM : point-source, Boore (2003))

On a analysé la mise à l'échelle du paramètre de $\Delta\sigma$ avec la magnitude par le biais des comparaisons entre des données enregistrées et simulées. À cet effet, deux autres méthodes (empirique et d'analyse automatique) d'estimation du MS ont été utilisées et comparées avec la méthode stochastique.

Les résultats des comparaisons suggèrent que la relation entre le $\Delta\sigma$ et la mise à l'échelle de magnitude du mouvement sismique n'est pas linéaire. En outre, les modèles existants des équations classiques de prédiction du mouvement sismique (méthode empirique), ou stochastiques montrant des modèles de paramètres de $\Delta\sigma$ constante ou variable, ne sont pas cohérents avec la mise à l'échelle du modèle ANFIS (méthode d'apprentissage automatique) intégralement basé sur les données, calibré et calé avec l'ensemble de données mesurées (NGA-West 2, Ancheta *et al.* (2014))

Cette divergence peut s'expliquer par les simulations stochastiques utilisées dans cette étude qui sont basées sur l'hypothèse de source ponctuelle, dont ces simulations peuvent ne pas être en mesure de les reproduire en champ proche et intermédiaire, et à des courtes distances. Aussi, les équations classiques testées dans cette étude sont basées sur des formes fonctionnelles (FF) traditionnelles qui n'incluent pas explicitement le $\Delta\sigma$. Ces FF dépendent d'un choix a priori qui peuvent avoir un impact sur l'effet d'échelle lié à la magnitude.

Du moment où les modèles existants n'ont pas pu reproduire la mise à l'échelle des données réelles, on a développé notre propre modèle de $\Delta\sigma$ qui s'est avérée

dépendante de la magnitude. Notre approche est basée sur le concept de calage : le modèle stochastique (où le paramètre de chute de contrainte est utilisé) a été forcé de prédire le même niveau de PSA et la même pente de $\partial \log_{10}(\text{PSA})/\partial M_w$ que le modèle des données enregistrées.

Le modèle proposé de $\Delta\sigma$ a été testé par la suite pour différentes fréquences, et pour un ensemble de données plus large (Derras *et al.*, 2016) par rapport aux configurations optimales dont ce modèle a été calibré (Dif *et al.*, 2020). Les résultats obtenus montrent que le modèle proposé de $\Delta\sigma$, est en adéquation avec les nouvelles données testées.

Perspectives

Comme perspectives, et pour donner suite aux résultats trouvés dans ce travail, d'autres tâches peuvent être traitées, à savoir :

- L'utilisation et l'application d'autres bases de données mesurées, à savoir, ESM, Kik-Net, RESORCE, ...etc.
- L'estimation d'autres modèles de chute de contrainte pour ces bases de données (ESM, Kik-Net, ...etc.)
- L'élaboration des équations de prédiction du mouvement sismique en se basant sur ces nouveaux modèles de chute de contrainte.
- L'utilisation de la méthode stochastique à base d'une faille finie, pour l'estimation du mouvement sismique.
- Le test d'autres algorithmes de l'apprentissage automatique : réseau de neurones, forêt aléatoire, support vector machine, gaussian process régression, réseau mémétique, algorithme génétique, apprentissage profond...etc.
- L'étude comparative entre le modèle de $\Delta\sigma$ choisi pour les mouvements sismiques issus des chocs principaux et des répliques.
- Effectuer le même travail (Dif *et al.*, 2020) mais pour d'autres paramètres de la méthode stochastique : kappa, facteur de qualité...etc.
- Même étude pour estimer les spectres de Fourier, intensité d'Arias, ...etc.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abercrombie, R. E. (1995) 'Earthquake source scaling relationships from– 1 to 5 ML using seismograms recorded at 2.5-km depth', *Journal of Geophysical Research*. Wiley Online Library, 100, pp. 24015–24036.
- Abercrombie, R. E. and Rice, J. R. (2005) 'Can observations of earthquake scaling constrain slip weakening?', *Geophysical Journal International*. Blackwell Publishing Ltd Oxford, UK, 162(2), pp. 406–424.
- Abrahamson, N. A., Silva, W. J. and Kamai, R. (2014) 'Summary of the ASK14 ground motion relation for active crustal regions', *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1025–1055. doi: 10.1193/070913EQS198M.
- Abrahamson, N. A. and Youngs, R. R. (1992) 'A stable algorithm for regression analyses using the random effects model', *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 82(1), pp. 505–510.
- Abrahamson, N. and Silva, W. (2008) 'Summary of the Abrahamson & Silva NGA ground-motion relations', *Earthquake spectra*, 24(1), pp. 67–97.
- Aki, K. (1966) 'Generation and Propagation of G Waves from the Niigata Earthquake of June 16, 1964.: Part 2. Estimation of earthquake moment, released energy, and stress-strain drop from the G wave spectrum', *東京大學地震研究所彙報= Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*. 東京大学地震研究所, 44(1), pp. 73–88.
- Aki, K. (1967) 'Scaling law of seismic spectrum', *Journal of Geophysical Research*, 72(4), pp. 1217–1231. doi: 10.1029/JZ072i004p01217.
- Ameur, M., Derras, B. and Zendagui, D. (2018) 'Ground motion prediction model using adaptive neuro-fuzzy inference systems: An example based on the NGA-West 2 data', *Pure and Applied Geophysics*. doi: 10.1007/s00024-017-1743-3.
- Ancheta, T. D. *et al.* (2014) 'NGA-West2 database', *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 989–1005. doi: 10.1193/070913EQS197M.
- Anderson, J. G. and Hough, S. E. (1984) 'A MODEL FOR THE SHAPE OF THE FOURIER AMPLITUDE SPECTRUM OF ACCELERATION AT HIGH FREQUENCIES', *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), pp. 1969–1993.
- Atkinson, G. M. (2006) 'Single-station sigma', *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 96(2), pp. 446–455.
- Atkinson, G. M. *et al.* (2009) 'A guide to differences between stochastic point-source and stochastic finite-fault simulations', *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 99(6), pp. 3192–3201.
- Atkinson, G. M. and Boore, D. M. (1995) 'Ground-motion relations for eastern North America', *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 85(1), pp. 17–30.
- Atkinson, G. M. and Boore, D. M. (2003) 'Empirical ground-motion relations for subduction-zone earthquakes and their application to Cascadia and other regions', *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 93(4), pp. 1703–1729.
- Atkinson, G. M. and Boore, D. M. (2006) 'Earthquake ground-motion prediction equations

- for eastern North America’, *Bulletin of the seismological society of America*. GeoScienceWorld, 96(6), pp. 2181–2205.
- Atkinson, G. M. and Silva, W. (2000) ‘Stochastic modeling of California ground motions’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 90(2), pp. 255–274.
- Baltay, A. S. and Hanks, T. C. (2014) ‘Understanding the magnitude dependence of PGA and PGV in NGA-West 2 data’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(6), pp. 2851–2865. doi: 10.1785/0120130283.
- Beresnev, I. A. (2001) ‘What we can and cannot learn about earthquake sources from the spectra of seismic waves’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 91(2), pp. 397–400.
- Beyaz, T. (2004) ‘Development of a new attenuation relationship of seismic energy for Turkey using the strong motion records free of soil effects’, *PhD, Ankara University, Ankara, Turkey (in Turkish)*.
- Bindi, D. *et al.* (2010) ‘Horizontal and vertical ground motion prediction equations derived from the Italian Accelerometric Archive (ITACA)’, *Bulletin of earthquake engineering*. Springer, 8(5), pp. 1209–1230.
- Bindi, D., Spallarossa, D. and Pacor, F. (2017) ‘Between-event and between-station variability observed in the Fourier and response spectra domains: Comparison with seismological models’, *Geophysical Journal International*, 210, pp. 1092–1104. doi: 10.1093/gji/ggx217.
- Boatwright, J. (1980) ‘A spectral theory for circular seismic sources; simple estimates of source dimension, dynamic stress drop, and radiated seismic energy’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 70(1), pp. 1–27.
- Boatwright, J. (1984) ‘Seismic estimates of stress release’, *Journal of Geophysical Research*. Wiley Online Library, 89, pp. 6961–6968.
- Boatwright, J. and Choy, G. L. (1992) ‘Acceleration source spectra anticipated for large earthquakes in northeastern North America’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 82(2), pp. 660–682.
- Boore, D. M. (1983) ‘Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 73(6A), pp. 1865–1894.
- Boore, D. M. (1984) ‘Use of seismoscope records to determine ML and peak velocities’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 74(1), pp. 315–324.
- Boore, D. M. (1989) ‘The Richter scale: its development and use for determining earthquake source parameters’, *Tectonophysics*. Elsevier, 166(1–3), pp. 1–14.
- Boore, D. M. (1996) *SMSIM: Fortran programs for simulating ground motions from earthquakes: Version 1.0*. Citeseer.
- Boore, D. M. (2000) *SMSIM, Fortran Programs for Simulating Ground Programs from Earthquakes, Version 2.0., a Revision of OFR 96-80A*. US Geological Survey.
- Boore, D. M. (2003) ‘Simulation of ground motion using the stochastic method’, *Pure and Applied Geophysics*, 160, pp. 635–676. doi: 10.1007/PL00012553.

- Boore, D. M. *et al.* (2014) ‘NGA-West2 equations for predicting PGA , PGV , and 5 % damped PSA for shallow crustal earthquakes’, *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1057–1085. doi: 10.1193/070113EQS184M.
- Boore, D. M. and Atkinson, G. M. (2008) ‘Ground-motion prediction equations for the average horizontal component of PGA, PGV, and 5%-damped PSA at spectral periods between 0.01 s and 10.0 s’, *Earthquake Spectra*, 24(1), pp. 99–138.
- Boore, D. M. and Boatwright, J. (1984) ‘AVERAGE BODY-WAVE RADIATION COEFFICIENTS’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), pp. 1615–1621.
- Boore, D. M. and Joyner, W. B. (1984) ‘A note on the use of random vibration theory to predict peak amplitudes of transient signals’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 74(5), pp. 2035–2039. Available at: <http://www.bssaonline.org/content/74/5/2035.short>.
- Boore, D. M. and Joyner, W. B. (1997) ‘Site amplifications for generic rock sites’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 87(2), pp. 327–341.
- Boore, D. M. and Thompson, E. M. (2014) ‘Path durations for use in the stochastic-method simulation of ground motions’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), pp. 2541–2552. doi: 10.1785/0120140058.
- Bora, S. S. *et al.* (2017) ‘Stochastic source, path and site attenuation parameters and associated variabilities for shallow crustal European earthquakes’, *Bulletin of Earthquake Engineering*. Springer Netherlands, 15(11), pp. 4531–4561. doi: 10.1007/s10518-017-0167-x.
- Bozorgnia, Y., Campbell, K. W. and Niazi, M. (2000) ‘Observed spectral characteristics of vertical ground motion recorded during worldwide earthquakes from 1957 to 1995’, in *Proceedings of the 12th world conference on earthquake engineering*. New Zealand:[sn].
- Brune, J. N. (1970) ‘Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes’, *Journal of Geophysical Research*, 75(26), pp. 4997–5009. doi: 10.1029/JB075i026p04997.
- Brune, J. N. (1971) ‘Seismic sources , fault plane studies and tectonics’, *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 52(5), pp. 178–187. doi: 10.1029/EO052i005pIU178.
- Campbell, K. W. (1993) ‘Empirical prediction of near-source ground motion from large earthquakes’, in *Proc. International Workshop on Earthquake Hazard and Large Dams in the Himalaya*, pp. 15–16.
- Campbell, K. W. (1999) ‘Hybrid empirical model for estimating strong ground motion in regions of limited strong-motion recordings’, in *Proc. of the OECD/NEA Workshop on the Engineering Characterization of Seismic Input*, pp. 15–17.
- Campbell, K. W. (2003) ‘Prediction of strong ground motion using the hybrid empirical method and its use in the development of ground-motion (attenuation) relations in eastern north America’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 93(3), pp. 1012–1033. doi: 10.1785/0120020002.
- Campbell, K. W. and Bozorgnia, Y. (2014) ‘NGA-West2 ground motion model for the average horizontal components of PGA , PGV , and 5 % damped linear acceleration response spectra’, *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1087–1115. doi: 10.1193/062913EQS175M.
- Cartwright, D. E. and Longuet-Higgins, M. S. (1956) ‘The statistical distribution of the maxima of a random function’, *Proceedings of the royal society of london. series a*.

- mathematical and physical sciences*. The Royal Society London, 237(1209), pp. 212–232.
- Causse, M., Dalguer, L. A. and Mai, P. M. (2014) ‘Variability of dynamic source parameters inferred from kinematic models of past earthquakes’, *Geophysical Journal International*, 196, pp. 1754–1769. doi: 10.1093/gji/ggt478.
- Chiou, B.-J. and Youngs, R. R. (2008) ‘An NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra’, *Earthquake Spectra*, 24(1), pp. 173–215.
- Chiou, B. *et al.* (2008) ‘NGA project strong-motion database’, *Earthquake Spectra*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 24(1), pp. 23–44.
- Chiou, B. S. and Youngs, R. R. (2014) ‘Update of the Chiou and Youngs NGA model for the average horizontal component of peak ground motion and response spectra’, *Earthquake Spectra*, 30(3), pp. 1117–1153. doi: 10.1193/072813EQS219M.
- Cotton, F. *et al.* (2008) ‘On the discrepancy of recent European ground-motion observations and predictions from empirical models: Analysis of KiK-net accelerometric data and point-sources stochastic simulations’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 98(5), pp. 2244–2261.
- Cotton, F., Archuleta, R. and Causse, M. (2013) ‘What is sigma of the stress drop?’, *Seismological Research Letters*, 84(1), pp. 42–48. doi: 10.1785/0220120087.
- Derras, B. (2011) *Contribution des données accélérométriques de KiKNet à la prédiction du mouvement sismique par l’approche neuronale avec la prise en compte des effets de site*. Université de Tlemcen.
- Derras, B., Bard, P. Y. and Cotton, F. (2016) ‘Site-condition proxies, ground motion variability, and data-driven GMPEs: Insights from the NGA-West2 and RESORCE data sets’, *Earthquake Spectra*, 32(4), pp. 2027–2056. doi: 10.1193/060215EQS082M.
- Dif, Z. *et al.* (2020) ‘Data-driven testing of the magnitude dependence of earthquake stress parameters using the NGA-West 2 dataset’, *Journal of Seismology*, 24, pp. 1095–1107. doi: <https://doi.org/10.1007/s10950-020-09952-1>.
- Douglas, J. (2007) ‘On the regional dependence of earthquake response spectra’, *ISET Journal of Earthquake Technology*. Indian Society of Earthquake Technology, 44(1), pp. 71–99.
- Douglas, J. (2021) ‘Ground motion prediction equations 1964-2021’, <http://www.gmpe.org.uk>, pp. 1–673.
- Drouet, S. and Cotton, F. (2015) ‘Regional stochastic GMPEs in low-seismicity areas: Scaling and aleatory variability analysis—application to the French Alps’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 105(4), pp. 1883–1902. doi: 10.1785/0120140240.
- Drouet, S., Cotton, F. and Guéguen, P. (2010) ‘VS30, κ , regional attenuation and Mw from accelerograms: Application to magnitude 3-5 French earthquakes’, *Geophysical Journal International*, 182, pp. 880–898. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04626.x.
- Edwards, B. and Fäh, D. (2013) ‘A stochastic ground-motion model for Switzerland’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(1), pp. 78–98. doi: 10.1785/0120110331.
- Frankel, A. D. *et al.* (1996) *National seismic-hazard maps: documentation June 1996*. US Geological Survey Reston, VA.

- Frisenda, M. *et al.* (2005) ‘Attenuation relationship for low magnitude earthquakes using standard seismometric records’, *Journal of Earthquake Engineering*. World Scientific, 9(01), pp. 23–40.
- Ghofrani, H. *et al.* (2013) ‘Stochastic finite-fault simulations of the 2011 Tohoku, Japan, earthquake’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 103(2B), pp. 1307–1320.
- Ghofrani, H. and Atkinson, G. M. (2014) ‘Ground-motion prediction equations for interface earthquakes of M7 to M9 based on empirical data from Japan’, *Bulletin of earthquake engineering*. Springer, 12(2), pp. 549–571.
- Haddon, R. A. W. (1996) ‘Earthquake source spectra in eastern North America’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 86(5), pp. 1300–1313.
- Hanks, T. C. (1979) ‘b Values and w-gama Seismic Source Models: Implications for Tectonic Stress Variations Along Active Crustal Fault Zones and the Estimation of High-Frequency Strong Ground Motion’, *Journal of Geophysical Research*, 84(B5), pp. 2235–2242. doi: 10.1029/JB084iB05p02235.
- Hanks, T. C. (1982) ‘f max’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 72(6A), pp. 1867–1879.
- Hanks, T. C. and Johnson, D. A. (1976) ‘Geophysical assessment of peak accelerations’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 66(3), pp. 959–968.
- Hanks, T. C. and Kanamori, H. (1979) ‘A Moment Magnitude Scale’, *Journal of Geophysical Research*, 84(9), pp. 2348–2350.
- Hanks, T. C. and McGuire, R. K. (1981) ‘The character of high-frequency strong ground motion’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 71(6), pp. 2071–2095.
- Heaton, T. H. (1990) ‘Evidence for and implications of self-healing pulses of slip in earthquake rupture’, *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. Elsevier, 64(1), pp. 1–20.
- Jang, J. S. R. (1993) ‘ANFIS: Adaptive-network-based fuzzy inference system’, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 23(3), pp. 665–685. doi: 10.1109/21.256541.
- Joyner, W. (1997) ‘Ground motion estimates for the northeastern US or southeastern Canada’, *Recommendations for Probabilistic Seismic Hazard Analysis: Guidance on Uncertainty and Use of Experts*.
- Joyner, W. B. (1984) ‘A scaling law for the spectra of large earthquakes’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 74(4), pp. 1167–1188.
- Joyner, W. B. (1995) ‘Stochastic simulation of near-source earthquake ground motion’, *In Proceedings: Modeling Earthquake Ground Motion at Close Distances, Electric Power Research Institute report EPRI TR-104975*, pp. 8–1–8–24.
- Kanamori, H. (1994) ‘Mechanics of earthquakes’, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 22, pp. 207–237.
- Kanamori, H. and Heaton, T. H. (2000) ‘Microscopic and macroscopic physics of earthquakes’, *Geophysical Monograph-American Geophysical Union*. Wiley Online Library, 120, pp. 147–164.

- Kkallas, C. *et al.* (2018) ‘Stochastic Strong Ground Motion Simulation of the Southern Aegean Sea Benioff Zone Intermediate-Depth Earthquakes Stochastic Strong Ground Motion Simulation of the Southern Aegean Sea Intermediate-Depth Earthquakes’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. GeoScienceWorld, 108(2), pp. 946–965.
- Kotha, S. R., Bindi, D. and Cotton, F. (2016) ‘Partially non-ergodic region specific GMPE for Europe and Middle-East’, *Bulletin of Earthquake Engineering*. Springer Netherlands. doi: 10.1007/s10518-016-9875-x.
- Liu, L. J. and Pezeshk, S. (1998) ‘A stochastic approach in estimating the pseudo-relative spectral velocity’, *Earthquake spectra*. SAGE Publications Sage UK: London, England, 14(2), pp. 301–317.
- Liu, L. and Pezeshk, S. (1999) ‘An improvement on the estimation of pseudoresponse spectral velocity using RVT method’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 89(5), pp. 1384–1389.
- McGuire, R. K. and Hanks, T. C. (1980) ‘RMS accelerations and spectral amplitudes of strong ground motion during the San Fernando, California earthquake’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. The Seismological Society of America, 70(5), pp. 1907–1919.
- Mittal, H. and Kumar, A. (2015) ‘Stochastic finite-fault modeling of M w 5.4 earthquake along Uttarakhand–Nepal border’, *Natural hazards*. Springer, 75(2), pp. 1145–1166.
- Molkenthin, C. *et al.* (2014) ‘A Study of the sensitivity of response spectral amplitudes on seismological parameters using algorithmic differentiation’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), pp. 2240–2252. doi: 10.1785/0120140022.
- Motazedian, D. and Atkinson, G. M. (2005) ‘Stochastic Finite-Fault Modeling Based on a Dynamic Corner Frequency’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(3), pp. 995–1010. doi: 10.1785/0120030207.
- Oncescu, M. C. (1989) ‘Investigation of a high stress drop earthquake on August 30, 1986 in the Vrancea region’, *Tectonophysics*. Elsevier, 163, pp. 35–43.
- Oth, A. P. H. (2007) *Source processes and spectral ground motion models of intermediate-depth Vrancea (Romania) earthquakes*. Université de Karlsruhe (TH).
- Papageorgiou, A. S. and Aki, K. (1983a) ‘A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. I. Description of the model’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(3), pp. 693–722.
- Papageorgiou, A. S. and Aki, K. (1983b) ‘A specific barrier model for the quantitative description of inhomogeneous faulting and the prediction of strong ground motion. Part II. Applications of the model’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 73(4), pp. 953–978.
- PEZESHK, S. *et al.* (2001) ‘Site Specific Analysis Program (SSAP), version 1.06’, *Dept. of Civil Eng., U. of Memphis, Memphis, TN*.
- Rathje, E. M., Abrahamson, N. A. and Bray, J. D. (1998) ‘Simplified frequency content estimates of earthquake ground motions’, *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*. American Society of Civil Engineers, 124(2), pp. 150–159.
- Rietbrock, A., Strasser, F. and Edwards, B. (2013) ‘A stochastic earthquake ground-motion prediction model for the United Kingdom’, *Bulletin of the Seismological Society of America*,

103(1), pp. 57–77. doi: 10.1785/0120110231.

Ruff, L. J. (1999) ‘Dynamic Stress Drop of Recent Earthquakes: Variations within Subduction Zones’, *Pure and Applied Geophysics*, 154, pp. 409–431. doi: 10.1007/s000240050237.

Safarshahi, M., Rezapour, M. and Hamzehloo, H. (2013) ‘Stochastic Finite-Fault Modeling of Ground Motion for the 2010 Rigan Earthquake, Southeastern Iran’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 103(1), pp. 223–235.

Scholz, C. H. (2002) ‘The Mechanics of Earthquakes and Faulting, 2nd edition’, *Cambridge University Press, Cambridge*.

Silva, W. J. and Lee, K. (1987) *WES RASCAL code for synthesizing earthquake ground motions*. Department of the Army, US Army Corps of Engineers.

Sugeno, M. and Kang, G. T. (1986) ‘Fuzzy modelling and control of multilayer incinerator’, *Fuzzy Sets and Systems*, 18, pp. 329–346.

Sun, J., Yu, Y. and Li, Y. (2018) ‘Stochastic finite-fault simulation of the 2017 Jiuzhaigou earthquake in China’, *Earth, Planets and Space*. Springer, 70(1), p. 128.

Takagi, T. and Sugeno, M. (1985) ‘Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control’, *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, SMC-15(1), pp. 116–132. doi: 10.1109/TSMC.1985.6313399.

TAMURA, K., WINTERSTEIN, S. R. and SHAH, H. C. (1991) ‘Spatially varying ground motion models and their application to the estimation of differential ground motion’, *Doboku Gakkai Ronbunshu*. Japan Society of Civil Engineers, 1991(437), pp. 59–67.

Ugurhan, B. and Askan, A. (2010) ‘Stochastic strong ground motion simulation of the 12 November 1999 Düzce (Turkey) earthquake using a dynamic corner frequency approach’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 100(4), pp. 1498–1512.

Yazdani, A. and Kowsari, M. (2013) ‘Earthquake ground-motion prediction equations for northern Iran’, *Natural hazards*. Springer, 69(3), pp. 1877–1894.

Yoo, S. H. and Mayeda, K. (2013) ‘Validation of non-self-similar source scaling using ground motions from the 2008 Wells, Nevada, earthquake sequence’, *Bulletin of the Seismological Society of America*, 103(4), pp. 2508–2519. doi: 10.1785/0120120327.

Zadeh, L. A. (1965) ‘Fuzzy sets’, *Information and control*. Elsevier, 8(3), pp. 338–353.

Zandieh, A., Pezeshk, S. and Campbell, K. W. (2018) ‘An Equivalent Point-Source Stochastic Simulation of the NGA-West2 Ground-Motion Prediction Equations’, *Bulletin of the Seismological Society of America*. Seismological Society of America, 108(2), pp. 815–835.

Zeng, Y. H., Anderson, J. G. and Yu, G. A. (1994) ‘Composite source model for computing realistic synthetic strong ground motions’, *Geophys. Res. Lett.*, 21, pp. 725–728.

Zengin, E. and Cakti, E. (2014) ‘Ground motion simulations for the 23 October 2011 Van, Eastern Turkey earthquake using stochastic finite fault approach’, *Bulletin of earthquake engineering*. Springer, 12(2), pp. 627–646.

Zhang, L. *et al.* (2016) ‘Stochastic ground-motion simulations for the 2016 Kumamoto, Japan, earthquake’, *Earth, Planets and Space*. Springer, 68(1), p. 184.

ANNEXES

Annexe A. 1 : Événements sélectionnés à partir de la base de données NGA-West 2

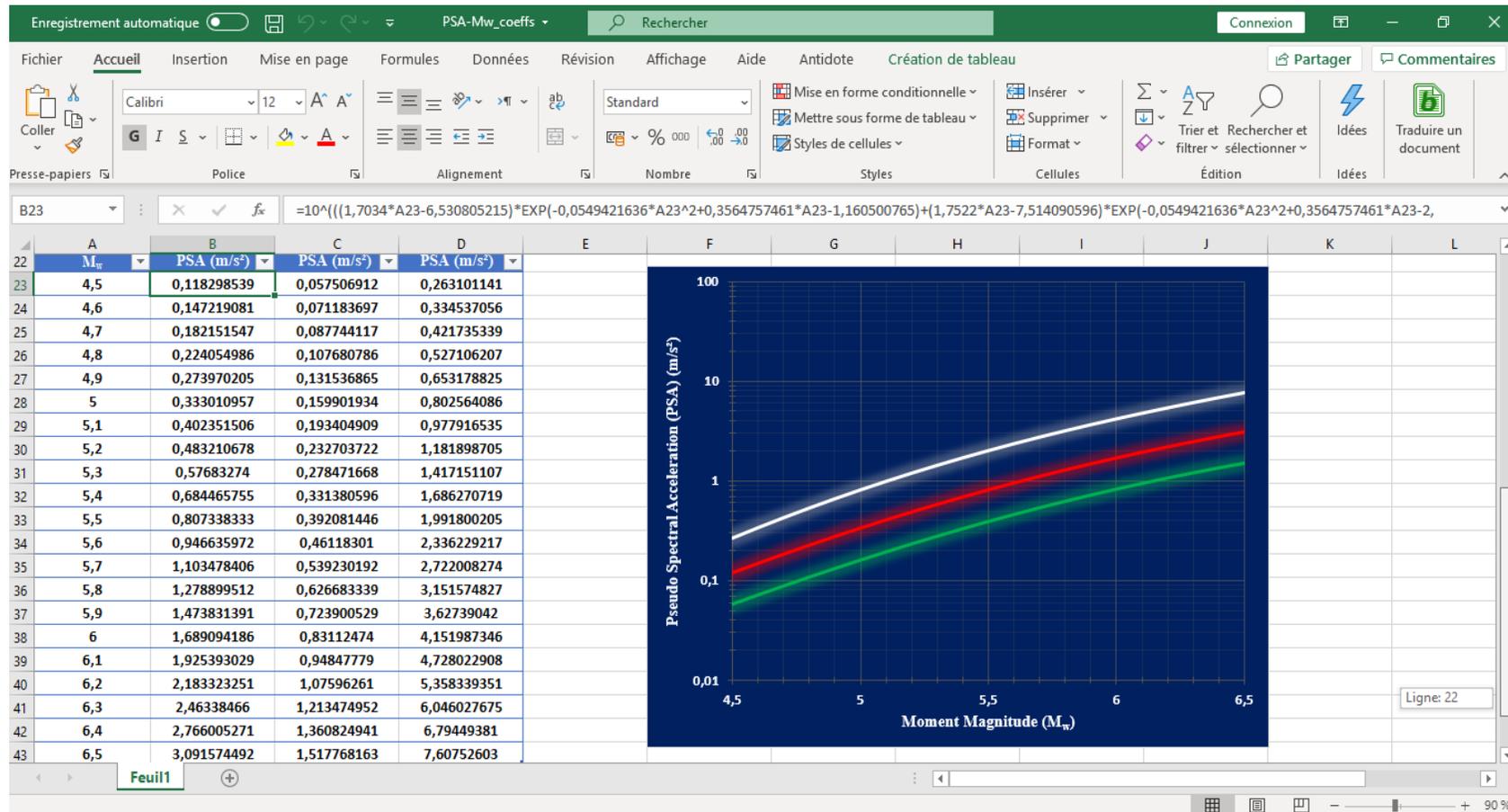
Ce tableau montre l'identification du tremblement de terre (EQID), la magnitude du moment (M_w) et le nombre des enregistrements par tremblement de terre, correspondant à chaque tremblement de terre.

EQID	M_w	Nombre des enregistrements par séisme	EQID	M_w	Nombre des enregistrements par séisme	EQID	M_w	Nombre des enregistrements par séisme
25	6.19	1	127	6.69	24	224	5.6	3
30	6.61	7	129	6.9	2	233	5.7	2
35	5.2	1	130	6.4	1	234	6	1
39	4.7	4	136	7.51	2	237	5.5	1
40	6.5	1	137	7.62	23	241	5.2	2
42	5.5	2	138	7.14	7	243	5.6	4
43	5.91	1	144	7.37	1	251	5.1	1
46	7.35	1	145	5.61	3	254	5.7	2
48	5.74	2	147	6.05	3	262	7.1	1
49	5.9	1	148	5.2	1	274	6.3	8
53	5.8	2	149	5.93	1	275	5.6	10
54	5.42	2	150	5.13	2	276	5.4	7
55	5.19	2	151	5.28	13	277	7.9	1
61	5.94	1	152	5.65	1	278	6.8	24
65	4.85	1	157	5.17	1	279	6.9	24
68	6.9	3	158	7.13	1	281	7	2
69	6.2	3	160	5	1	346	6.2	2
76	6.36	6	161	4.53	3	1001	5.45	21
77	5.09	1	163	4.92	9	1002	5.39	10
78	5.38	1	166	4.9	3	1003	5.2	5
79	5.18	1	167	4.27	7	1006	5.03	2
80	5.77	1	170	4.92	4	1007	4.88	4
88	5.1	1	171	5.9	32	1011	4.7	4
90	6.19	6	172	6.2	24	1013	4.6	2
91	5.8	1	173	6.2	21	1014	4.59	3
97	6.76	3	174	6.2	20	1015	4.18	12
101	6.06	4	175	6.3	23	1016	4.34	1
102	5.77	1	176	6.61	10	1018	4.45	13
103	6.19	2	177	6.5	1	1019	4.66	12
104	5.65	1	178	6.6	1	1020	4.26	4
113	5.99	12	179	6	11	1021	4.3	11
114	5.27	7	180	6.63	7	1023	4.5	25
118	6.93	10	189	4.7	1	1024	4.4	3
123	7.01	6	191	4	1	1025	4.42	8
125	7.28	3	199	5.5	1	1026	4.39	2
126	6.46	1	202	6	2	1027	4.78	1

1028	4.73	15	1084	4.02	5	1138	3.5	32
1029	4.51	1	1085	3.94	1	1139	3.61	5
1030	4.3	2	1086	4.19	5	1140	3.69	6
1031	4.25	4	1087	3.75	5	1141	3.79	3
1032	4.2	9	1088	4.14	2	1142	3.73	8
1033	4.3	11	1089	4.05	2	1143	3.72	2
1034	4.5	1	1090	4.01	3	1145	3.49	1
1035	4.26	13	1091	3.78	5	1146	3.6	7
1036	4.24	1	1093	4.11	4	1147	3.63	3
1038	4.27	3	1094	3.9	2	1148	3.59	4
1039	4.37	1	1095	3.84	5	1149	3.45	4
1040	4.42	3	1096	3.58	12	1150	3.43	6
1043	4.12	12	1097	3.67	5	1151	3.52	3
1044	4.14	22	1098	3.68	8	1152	3.53	7
1045	4.2	39	1100	3.7	4	1153	3.55	7
1046	4.23	28	1101	3.7	25	1154	3.53	4
1048	4.27	5	1103	3.74	5	1156	3.56	4
1049	4	23	1104	3.52	1	1157	3.56	3
1050	4.18	7	1106	3.97	1	1158	3.66	1
1051	4.1	30	1107	3.78	7	1159	3.73	2
1052	4.11	8	1108	3.9	5	1160	3.4	11
1053	4.34	4	1110	3.86	5	1161	3.4	3
1054	4.26	7	1111	3.74	2	1162	3.59	1
1056	4.02	5	1112	3.87	4	1163	3.62	6
1057	4.11	5	1113	3.99	8	1166	3.4	7
1058	4.41	1	1114	3.88	2	1167	3.52	2
1059	4	10	1115	3.77	5	1168	3.47	4
1060	4	24	1116	3.68	3	1169	3.59	2
1061	4.11	2	1118	4.06	2	1170	3.41	30
1062	4.06	3	1119	3.87	4	1171	3.63	1
1063	4.11	4	1120	3.59	8	1172	3.08	8
1064	4.19	2	1121	3.81	1	1174	3.25	6
1065	4.2	8	1122	3.81	3	1175	3.14	2
1066	3.9	9	1123	3.6	22	1176	3.14	8
1067	4.29	3	1124	3.57	13	1178	4.04	4
1068	4.06	1	1125	3.6	10	1182	5	4
1069	3.9	26	1126	3.6	1	1186	5.19	4
1070	3.96	30	1127	3.96	1	1188	4.08	3
1071	3.9	1	1128	3.64	6	1190	4.2	3
1072	3.97	5	1129	3.73	2	1193	3.47	4
1073	3.88	3	1130	3.71	19	1194	3.05	5
1074	4.06	5	1131	3.58	2	1195	3.34	5
1075	4.17	2	1132	3.64	7	1214	3.3	8
1076	3.79	6	1133	3.63	1	1215	3.5	9
1079	3.7	30	1134	3.64	5	1216	3.69	9
1081	3.8	3	1135	3.74	2	1217	3.2	3
1082	3.81	4	1137	3.5	25	1218	3.49	6

1219	3.5	6
1220	3.39	2
1221	4.05	30
1222	3.73	6
1223	3.37	3
1224	3.22	2
1237	3.16	2
1239	3.36	1
1241	4	2
1243	3.6	3
1245	3.54	2
1246	3.7	2
1247	3.9	4
1248	3.8	4
1250	3.8	3
1251	3.5	2
1258	3.8	3
1260	3.64	2
1261	3.09	3
1264	3.43	7
1265	3.6	13
1266	3.5	3

Annexe A. 2 : Équation de prédiction du mouvement sismique via ANFIS (PSA (amortis à 5%), à la période T = 0.3 s et à la distance hypocentrale $R_{hyp} = 30$ km), illustrée sous Excel (version 2016)



Annexe A. 3 : Productions scientifiques durant la préparation de la thèse

1- Article dans une revue scientifique de catégorie A : (1)

(Première page)

J Seismol (2020) 24:1095–1107
<https://doi.org/10.1007/s10950-020-09952-1>

ORIGINAL ARTICLE



Data-driven testing of the magnitude dependence of earthquake stress parameters using the NGA-West 2 dataset

Zouheyr Dif · Boumédienne Derras · Fabrice Cotton · Christian Molkenthin

Received: 7 May 2019 / Accepted: 12 August 2020 / Published online: 20 August 2020
 © Springer Nature B.V. 2020

Abstract In this study, we investigate the dependencies between ground-motion intensity measures (GMIM) and earthquake magnitudes (M), in order to evaluate the dynamic stress parameter ($\Delta\sigma$) magnitude scaling. To achieve this, two types of datasets are used: a large subset of the NGA-West 2 (next generation attenuation) dataset including 1700 records from 426 sites and 271 earthquakes. The other datasets are generated through the stochastic method (Boore 2003) assuming various magnitude dependencies (constant and variable) of the stress parameter with magnitude. Adaptive neuro-fuzzy

inference systems (ANFIS) are used to derive data-driven ground-motion prediction models (Amear et al. 2018). Soft soil ($V_{s30} > 500$ m/s) data are selected and the ground-motion models are depending on two input parameters: the moment magnitude (M_w) and the hypocentral distance (R_{top}). Following Molkenthin et al. (2014), we assume that $\Delta\sigma$ is the dominating controlling factor of GMIM for stiff site conditions at $R_{top} = 30$ km, at the frequency (f) = 3.33 Hz for moderate earthquakes in the magnitude range $M_w = [4.5-6.5]$. This study confirms that the relations between magnitude and stress parameter control the scaling of ground motions. We show that the magnitude-dependent stress drops better fit the latest generation of NGA-West 2 datasets and empirical ground-motion equations. We finally calibrate a relation between dynamic stress parameter and earthquake magnitude in the magnitude range $M_w = [4.5-6.5]$.

Electronic supplementary material The online version of this article (<https://doi.org/10.1007/s10950-020-09952-1>) contains supplementary material, which is available to authorized users.

Z. Dif (✉) · B. Derras
 RISAM laboratory, University of Abou Bekr Belkaid, Tlemcen,
 Algeria
 e-mail: zouheyr.dif@univ-ilemcen.dz

B. Derras
 Department of Civil Engineering and Hydraulic, University of
 Saida, Saida, Algeria

F. Cotton
 Helmholtz Centre Potsdam, German Research Centre for
 Geosciences (GFZ), Potsdam, Germany

F. Cotton
 Institute of Earth and Environmental Sciences, University of
 Potsdam, Potsdam, Germany

C. Molkenthin
 Institute of Mathematics, University of Potsdam, Potsdam,
 Germany

Keywords Stress parameter · Ground motion ·
 Magnitude scaling · NGA-West 2 · Stochastic method ·
 ANFIS

1 Introduction

The dynamic stress parameter or Brune stress drop ($\Delta\sigma$) is an important source proxy in the prediction of ground motion, as it influences the high-frequency domain (e.g., Brune 1970, 1971; Hanks and McGuire 1981; Papageorgiou and Aki 1983a, b; Cotton et al. 2013; Baltay and Hanks 2014).

2- Conférence internationale : (1)

THE 8 TH IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON SMART COMMUNICATIONS IN NETWORK TECHNOLOGIES (SACONET'19)
 21, 22 ET 23 DÉCEMBRE 2019
 UNIVERSITÉ AHMED BENBELLA - ORAN 1



Utilisation d'un Système Hybride Composé de Réseaux de Neurones Artificiels et de la Logique Floue pour l'Estimation du Mouvement Sismique

Préparé par:
Mr. DIF Zouheyr ⁽¹⁾ & Pr. DERRAS Boumédiène ^(1,2)





⁽¹⁾ Laboratoire RISAM, Département de génie civil, Université de Tlemcen, Algérie
⁽²⁾ Département de génie civil et hydraulique, Université de Saïda, Algérie



Problématique & objectifs

- Les intensités du mouvement sismique 'IMS' sont des données essentielles pour le dimensionnement des structures parasismiques.
- Ces 'IMS' sont disponibles dans des bases de données réelles (enregistrements).
- Cependant, il existe un manque aux niveaux de ces données observées.

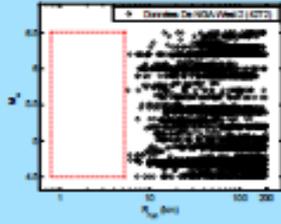


Figure 1: Distribution des observations 'NGA-West2'

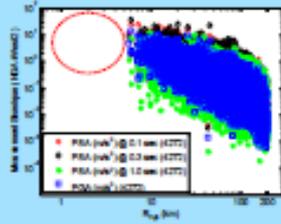


Figure 2: Distribution des observations 'NGA-West2'

- Ce manque est remarqué en champ proche où les 'IMS' sont relativement importantes et très utiles entre autre dans l'évaluation de l'aléa sismique.
- Donc, l'objectif est de combler ce manque de données.

Méthodologie

- Un modèle élaboré à partir de deux approches: les réseaux de neurones artificiels et la logique floue est utilisé dans cette étude pour estimer les 'IMS' en surface.
- Il s'agit de 'ANFIS' (Adaptive Neuro Fuzzy Inference System (Ameur, et al. 2017)).

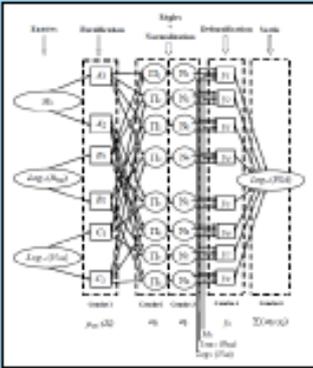


Figure 3: Architecture du modèle 'ANFIS'

- Pour l'apprentissage de ce modèle, deux jeux de données sont utilisés, le premier est artificiel, simulé en utilisant la méthode stochastique (Boore, 2003), et le deuxième est réel, sélectionné à partir de la base de données 'NGA-West 2' (Next Generation Attenuation (Ancheta, et al. 2014)).
- Par la suite, les IMS représentées par les ordonnées pseudo-spectrales d'accélération 'PSA', amortis à 5%, sont estimées avec 'ANFIS', et comparées avec les observations 'NGA-West 2'.

Résultats & Conclusions

- ⇒ Les résultats obtenus représentent les prédictions des 'PSA'. Ils montrent la convergence des simulations vers les données observées (Figure 4).

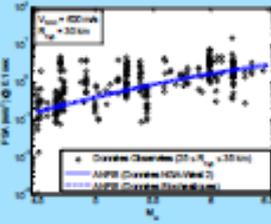


Figure 4: Estimation des 'IMS' avec 'ANFIS'

- ⇒ L'utilisation du modèle 'ANFIS' pour les deux différents sous ensembles de données (artificiel et réel) a donné des résultats similaires.
- ⇒ Les simulations par la méthode stochastique de Boore peuvent être utilisées pour surmonter le manque de données, surtout en champ proche.
- ⇒ 'ANFIS' peut servir pour reproduire les données réelles.

Références bibliographiques

- Ameur, M., B. Derras, et D. Zedagui. «Ground motion prediction model using adaptive neuro-fuzzy inference systems: An example based on the NGA-West 2 data». *Pure and Applied Geophysics*, 2017.
- Ancheta, T. D., et al. «NGA-West2 database». *Earthquake Spectra* 30, n° 3 (2014): 989-1005.
- Boore, D. M. «Simulation of ground motion using the stochastic method». *Pure and Applied Geophysics* 160 (2003): 635-676.

3- Conférence nationale : (1)

Rencontres Nationales de Génie Civil et d'Hydraulique. Skikda, les 13 et 14 novembre 2019

Utilisation du modèle totalement conduit par les données pour l'estimation des paramètres sismiques de l'approche stochastique

Zouheyr Dif¹, Boumediène Derras^{1,2}

1. Laboratoire de recherche RISAM, Département de génie civil, Université de Tlemcen, Tlemcen 13000, Algérie
2. Département de génie civil et hydraulique, Université de Saïda, Saïda 20000, Algérie

Résumé :

Deux approches complètement différentes sont utilisées dans cette étude pour estimer le mouvement sismique susceptible d'être comparable à celui enregistré en surface. Ce dernier est présenté par les ordonnées pseudo-spectrales d'accélération (PSA) amortis à 5%. L'estimation est effectuée pour les quatre périodes suivantes : 0.0, 0.1, 0.3 et 1.0 s à l'aide de deux approches. La première est totalement conduite par les données. Il s'agit des systèmes adaptatifs d'inférence floue à base neuronale (ANFIS) (Ameur, Derras et Zendagui 2017). La base de données utilisée dans la phase d'apprentissage de ANFIS est un sous-ensemble de NGA-West 2 (Next Generation Attenuation (Anchet, et al. 2014)). Ce sous-ensemble de données compte 100 événements, 4272 enregistrements et 1677 sites. Les méta-données utilisées comme proxies caractérisant l'effet de source, de propagation d'onde et de site dans l'approche ANFIS sont : la magnitude du moment (M_w), la distance hypocentrale (R_{wp}) et la vitesse moyenne des ondes de cisaillement sur 30 mètres de profondeur (V_{30}). La deuxième approche, quant à elle, est basée sur la compréhension des phénomènes physiques sous-jacents (méthode stochastique : (Boore 2003)). Les résultats montrent que les modèles d'estimation du mouvement sismique ANFIS ainsi développés convergent vers les données réelles. C'est une manière efficace de présenter les données. Par conséquent, ces types de modèles peuvent servir à ajuster les paramètres sismiques du modèle stochastique tels que la chute de contrainte sismique au niveau de la source.

Mots clés : ANFIS, Base de données, Magnitude, Mouvement sismique, NGA-West 2

1. Introduction

Le mouvement sismique (MS) est une donnée essentielle en génie parasismique. Ce MS peut être représenté par les pseudo-spectres d'accélération (PSA) pour différentes périodes (T), l'accélération maximale de site (PGA) ainsi que la vitesse maximale de site (PGV). Pour estimer le MS, l'approche empirique avec une forme fonctionnelle définie a priori, reste la plus utilisée. Pour éviter le choix d'une forme fonctionnelle (en général difficile), nous utilisons ici deux approches. La première est totalement dirigée par les données. C'est un système adaptatif d'inférence floue à base neuronale (ANFIS) proposé initialement par (Takagi et Sugeno 1985) ; (Sugeno et Kang 1986), et qui a été utilisé entre autres part par (Ameur, Derras et Zendagui 2017) pour l'élaboration d'une équation de prédiction du mouvement sismique à l'aide d'un sous-ensemble de la base de données réelles NGA-West 2 (Next Generation Attenuation (Anchet, et al. 2014)). Tandis que la deuxième approche est censée, décrire la physique du processus de la propagation d'onde de la source au site. Il s'agit de la méthode stochastique de Boore (SMSM) (Boore 2003).

Cependant, une bonne estimation du mouvement sismique en utilisant cette méthode stochastique passe par un bon choix et ajustement des méta paramètres. Parmi eux, la chute de contrainte sismique ($\Delta\sigma$), qui a été supposée, initialement, indépendante de la magnitude (Aki 1967). En revanche, d'autres auteurs (Edwards et Felt 2013) ; (Drouot et Cotton 2015) ; (Bindi, Spallarossa et Pacor 2017) jugent que $\Delta\sigma$ est dépendante de la magnitude. Le but principal de cette étude est de déterminer un modèle de « $\Delta\sigma$ » qui peut améliorer la prédiction du mouvement sismique dans les approches physiques telles que l'approche stochastique « point-source » proposée par (Boore 2003).

Nous commençons cette étude par la présentation d'un sous-ensemble de la base de données NGA-West 2 (Anchet, et al. 2014). Le modèle ANFIS (Ameur, Derras et Zendagui 2017) est utilisé par la suite pour générer les modèles d'estimation du mouvement sismique. Après, des simulations stochastiques à l'aide de la méthode (Boore 2003) sont effectuées. Nous comparons à la fin, les mouvements sismiques estimés par le biais des deux approches, en représentant des spectres de PGA et de PSA pour T=0.1, 0.3 et 1.0 s, amortis à 5%, et en montrant la capacité de ces modèles à reproduire les données réelles NGA-West 2 (Anchet, et al. 2014).

2. Méthodes d'estimation du mouvement sismique

2.1. Base de données NGA-West 2

La base de données des mouvements forts « NGA-West 2 » a été établie par (Anchet, et al. 2014). Dans laquelle on trouve les intensités (scalaires et spectrales) mesurées du mouvement sismique, ainsi que les proxies représentant la source

4- Autres :

RUGC 2020

AJCE, vol. 38 (1)

Apport de l'intelligence artificielle et de l'approche stochastique à la prédiction du mouvement sismique

Zouheyr DIF¹, Boumédiène DERRAS^{1,2}

¹ Laboratoire de recherche RISAM, Département de génie civil, Université de Tlemcen, Tlemcen, Algérie

² Département de génie civil et hydraulique, Université de Saïda, Saïda, Algérie

RÉSUMÉ Deux modèles d'estimation du mouvement sismique (MS) basés sur l'intelligence artificielle (IA) sont établis dans cette étude. Sans forme fonctionnelle (FF) a priori, ces types de modèles sont censés reproduire les mêmes estimations que celles des GMPEs classiques (Ground Motion Prediction Equations). Le MS est présenté par les ordonnées pseudo-spectrales d'accélération (PSA) avec un amortissement égal à 5%, pour les périodes (T) : 0.0, 0.1, 0.3 et 1.0 s. Deux sous-ensembles de données sont utilisés. Le premier issu de la base de données NGA-West 2 (Next Generation Attenuation). Il compte 100 événements, 4272 enregistrements et 1677 sites. Le deuxième est construit à l'aide de l'approche stochastique (Boore, 2003). Les PSA sont estimés par l'approche ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) avec les deux sous-ensembles de données suscités. Les deux modèles issus de cette étude sont comparés avec trois GMPEs classiques. Les résultats montrent que les modèles ANFIS ainsi développés peuvent estimer, convenablement, le mouvement sismique sans passer par une forme fonctionnelle définie au préalable. Ils peuvent aussi être utilisés pour ajuster les paramètres sismiques du modèle stochastique tels que la chute de contrainte sismique.

Mots-clés ANFIS, Base de données, GMPE, Magnitude, NGA-West 2

1. INTRODUCTION

Le mouvement sismique (MS) est une donnée essentielle en génie parasismique. Pour estimer le MS, l'approche empirique avec une forme fonctionnelle (FF) définie a priori reste la plus utilisée. Afin d'éviter le choix d'une FF à la base difficile et complexe, nous utilisons ici deux autres méthodes d'estimation du MS. La première est totalement dirigée par les données : ANFIS (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems) ; (Sugeno and Kang, 1986; Aneur, Derras and Zendagui, 2017). La deuxième est basée sur le comportement physique du processus de la propagation d'onde de la source au site : il s'agit de la méthode stochastique de Boore (SMSIM, (Boore, 2003)). Cette dernière est utilisée afin de construire un sous-ensemble de données artificielles. Parmi les méta paramètres dans SMSIM, la chute de contrainte sismique ($\Delta\sigma$). Cette dernière a été supposée initialement indépendante de la magnitude (Aki, 1967). Par la suite, d'autres auteurs tels que (Drouet and Cotton, 2015), jugent que $\Delta\sigma$ est dépendante de la