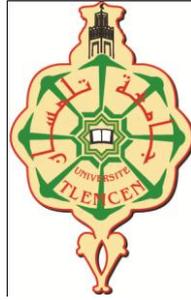


الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
REpubLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعلیم العالی و البعث العلمی  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
جامعة أبي بكر بلقايد- تلمسان  
Université Aboubakr Belkaïd- Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE



## THESE

Présentée pour l'obtention du grade de DOCTORAT 3<sup>ème</sup> Cycle

En : Génie Civil  
Spécialité : Sols et structures

Par : SOULIMANE Ilyas

Sujet

**Evaluation du risque sismique associé aux conduites de gaz : Exemple d'application pour la ville de Tlemcen (Algérie)**

Soutenue le 13/03/2017 devant le jury composé de :

Abdellatif MEGNOUNIF	Président	UAB. Tlemcen
Djawad ZENDAGUI	Directeur	UAB. Tlemcen
Nasser LAOUAMI	Examineur	CGS Alger
Youcef HOUMADI	Examineur	C.U Ain Temouchent

## Remerciements

A travers les quelques mots qui suivent, je me lance dans une tâche à la fois difficile puisque je suis dans l'obligation de n'oublier personne et remercier chacun à sa juste valeur ; agréable car c'est le moment de dire merci, merci à celles et ceux qui m'ont permis d'obtenir le statut de docteur.

Je saisis donc cette occasion pour exprimer ma gratitude et mes vifs remerciements à mon directeur de thèse Mr Djawad Zendagui pour la confiance qu'il m'a placée en moi, chose qui m'a incitée à multiplier mes efforts pour être à la hauteur de ses attentes.

Je remercie également le Pr Pierre Yves Bard, chercheur au laboratoire ISTERre de GRENOBLE, qui m'a permis d'effectuer des stages au sein de son laboratoire dans le cadre du projet Tassili. Son aide inestimable m'a permis de découvrir et d'aimer le goût de la recherche pour finaliser mes travaux de recherche ainsi que toute l'équipe de recherche qui m'a accueilli dans les meilleures conditions qui soient.

Je remercie Monsieur Abdellatif Megnounif au département de Génie Civil d'avoir généreusement accepté de présider mon jury.

Mes remerciements aux examinateurs le Dr Nasser Laouami et le Dr Youcef Houmadi, qui ont eu la bonneté de prendre sur leur temps pour examiner mon mémoire et participer à la soutenance.

Je voudrais adresser mes sincères remerciements à toute ma famille, à leur tête mes chers parents ainsi que mes frères et sœur pour leur soutien et conseils le long de ma thèse.

Je remercie bien sûr mon épouse pour ses encouragements qui m'ont permis de tenir le coup dans les moments les plus difficiles et d'aller vers l'avant.

Je remercie mon adorable Younes qui ne m'a jamais laissé travailler chez moi.  
Un grand salut adressé à mes amis et mes collègues.

# Table des Matières

ملخص.....	vi
Résumé.....	vii
Abstract .....	viii
Liste des Tableaux .....	ix
Liste des Figures .....	x
Liste des abréviations.....	xiv
<b>Chapitre 1 .....</b>	<b>1</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introduction .....	1
1.2 Objectifs – Contributions .....	3
1.3 Plan de la thèse .....	3
<b>Chapitre 2 .....</b>	<b>5</b>
<b>Revue bibliographique et présentation de la problématique .....</b>	<b>5</b>
2.1 Introduction .....	5
2.2 Estimation de la vulnérabilité des conduites par le paramètre RR .....	5
2.2.1 Définition du paramètre RR .....	5
2.2.2 Méthodes d'estimation du paramètre RR .....	6
2.2.3 Analyse critique des modèles d'estimation du paramètre RR .....	15
2.3 Problématique .....	18
2.4 Conclusion.....	19
<b>Vulnérabilité des conduites de gaz .....</b>	<b>20</b>
2.5 Introduction .....	20
2.6 Dispersion du réseau de gaz .....	20
2.7 Les Composants des réseaux de distribution du gaz .....	21
2.8 Caractéristiques des conduites utilisées .....	22
2.8.1 Matériaux.....	22
2.8.2 Dimensions des conduites de gaz .....	23
2.9 Causes (indicateurs) des dommages des conduites :.....	24
2.9.1 Tendances des conduites : .....	24
2.9.2 Affaissement du sol : .....	25
2.9.3 La mise en place des conduites : .....	26
2.9.4 L'âge et la corrosion : .....	26
2.10 Taux de dommage.....	27
2.11 Vulnérabilité des conduites de gaz.....	27
2.11.1 Exemples des dommages relatifs aux conduites de gaz :.....	27

2.11.2	Principes des méthodes existantes pour l'analyse de la vulnérabilité.....	29
2.11.3	Calcul du dommage .....	31
2.12	Conclusion.....	31
<b>Chapitre 3</b>	.....	<b>33</b>
<b>Mise en place de la méthodologie GUARR</b>	.....	<b>33</b>
3.1	Introduction .....	33
3.2	Hypothèses de base de la problématique .....	33
3.3	Mise en place de la méthodologie "GUARR" .....	36
3.3.1	Détermination des Taux de réparations.....	36
3.3.2	Mesure de la variabilité des taux de réparations.....	41
3.4	Procédure de calcul .....	42
3.4.1	Etape 1.....	42
3.4.2	Etape 2.....	43
3.4.3	Etape 3.....	43
3.4.4	Etape 4.....	43
3.4.5	Etape 5.....	43
3.4.6	Etape 6.....	43
3.5	Conclusions .....	43
<b>Chapitre 4</b>	.....	<b>45</b>
<b>Application de la méthodologie</b>	.....	<b>45</b>
4.1	Introduction .....	45
4.2	Cas du modèle de Pineda .....	45
4.2.1	Modèle de Pineda.....	45
4.2.2	Estimation du $\sigma_{RR}$ .....	46
4.2.3	Méthode de calcul du $\sigma \log PGV^2 PGA$ .....	52
4.2.4	Modèles correspondants de GMPE .....	53
4.2.5	Estimation des poids .....	56
4.2.6	Résultats .....	57
4.2.7	Conclusion .....	68
4.3	Cas du modèle de Piccinelli .....	68
4.3.1	Modèle de Piccinelli.....	68
4.3.2	Estimation du $\sigma_{RR}$ .....	68
4.3.3	Modèles correspondants de GMPE .....	70
4.3.4	Estimation des poids .....	71
4.3.5	Résultats .....	72
4.3.6	Discussion des résultats .....	78
4.4	Validation des résultats pour le cas du séisme de Boumerdes (2003) .....	79
4.4.1	Méthodologie.....	79
4.4.2	Description des données.....	79
4.4.3	Utilisation des nouveaux poids .....	82
4.4.4	Résultats .....	83
4.4.5	Conclusion .....	91
4.5	Conclusion.....	92

<b>Chapitre 5 .....</b>	<b>93</b>
<b>Application pour la ville de Tlemcen.....</b>	<b>93</b>
5.1 Introduction .....	93
5.2 SIG .....	93
5.2.1 Définitions des SIG : .....	93
5.2.2 Instruments de modélisation des dommages sismiques .....	96
5.2.3 Superposition des couches sous SIG .....	96
5.3 Prédiction des séismes : .....	100
5.3.1 La magnitude du séisme .....	100
5.3.2 La distance à partir de la source de libération d'énergie .....	100
5.4 Sismicité de la région de TLEMCCEN.....	101
5.4.1 Contexte national .....	101
5.4.2 Classement RPA : .....	102
5.4.3 Séismes historiques : quelques cas .....	103
5.5 Input.....	104
5.5.1 Localisations des failles à proximité de TLEMCCEN.....	104
5.5.2 Calcul des magnitudes maximales.....	106
5.6 Présentation des résultats .....	109
5.6.1 Estimation des RR d'après Pineda et al. considérant la GMPE d'Akkar et al. ....	109
5.6.2 Estimation des RR moyen en utilisant le modèle 4 pour la plus grande faille.....	113
5.6.3 Estimation des risques en considérant la variabilité par rapport aux données .....	116
5.7 Conclusion.....	118
<b>Conclusion.....</b>	<b>120</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>123</b>

## ملخص

يتم قياس تعرض الأنابيب للضرر بمعدل إصلاحات (R.R) والذي يحدد مجموع الإصلاحات بالكيلومتر الواحد تبعا لزلزال ما. تمنح نماذج تحديد مجموع الإصلاحات بدلالة معايير التربة. تم إنشاء هذه النماذج دون ارتداد و لا يؤخذ بعين الاعتبار الارتداد الذي يقوم بتمييز معايير التربة إن الهدف من هذه الأطروحة الأخذ بعين الاعتبار الارتدادات المذكورة أعلاه عن طريق المنهجية المسماة (GUARR) التي تسمح أيضا بإدماج عدة نماذج لتكهنات معايير التربة. تم إنشاء أربعة مناهج لتقديرات (R.R).

تبين النتائج المتحصل عليها أنه عن طريق منهجية (GUARR)، المنهجية التي تأخذ بعين الاعتبار مجموع الارتدادات هي الأكثر ثباتا و تتميز بتغيرات ضئيلة. قمنا فيما بعد بتطبيق منهجية (GUARR) لحالة المركز الحضري مستخدمين تقنية (ن.م.ج) **الكلمات المفتاحية:**

الأنابيب، قابلية الضرر تبعا لزلزال ما، ذروة التسارع الأرضي (PGA)، ذروة السرعة الأرضية (PGV)، معدل الإصلاحات (R.R).

## Résumé

La vulnérabilité des conduites se mesure par le taux de réparation RR (Repair Rate) qui traduit le nombre de réparations par kilomètre suite à un séisme. Les modèles d'estimation du taux de réparations donnent le RR en fonction des paramètres du sol. Ces modèles sont établis sans incertitude et ne prennent pas en considération l'incertitude qui caractérise les paramètres du sol.

L'objectif de cette thèse est de prendre en considération les incertitudes citées plus haut à travers une méthodologie nommée GUARR qui permet en plus d'intégrer plusieurs modèles de prédiction des paramètres du sol avec leurs incertitudes. Quatre méthodes d'estimations du RR sont établies.

Les résultats obtenus montrent qu'à travers la méthodologie GUARR, la méthode qui prend en considération l'ensemble des incertitudes est la plus stable et se caractérise par une faible variation. Nous avons ensuite appliqué la méthodologie GUARR pour le cas d'un centre urbain et ce en utilisant la technique du SIG.

### Mots clés :

Conduites, vulnérabilité sismique, accélération maximale du sol (PGA), vitesse maximale du sol (PGV), taux de réparation RR.

## Abstract

The vulnerability of pipelines is measured by RR (Repair Rate) which reflects the number of repairs per kilometer following an earthquake. The estimation of the repair rate models give the RR based on soil parameters. These models are established without uncertainty and do not take into account the uncertainties of soil parameters.

The objective of this thesis is to take into account the uncertainties mentioned above through a methodology named GUARR which, in addition, allows the incorporation of several models of soil parameters prediction models with their uncertainties. Through this methodology, RR is estimated by four methods.

The results show that through the methodology GUARR the method that takes into account all the uncertainties is the most stable and is characterized by a small variation. We then applied the methodology to GUARR the case of an urban center and using GIS technology.

**Keywords:** Lifelines, seismic vulnerability, Peak ground acceleration (PGA), Peak ground velocity (PGV), Repair rate (RR).

## Liste des Tableaux

Tableau 1 Valeurs des coefficients pour le calcul de PGA.....	7
Tableau 2 Références des études.....	10
Tableau 3 Caractéristique technique (physiques et mécaniques) du matériau P.E.H.D.....	23
Tableau 4 Disponibilité des diamètres GROUPE CHIALI (Selon EN 1555 - 2).....	23
Tableau 5 Taux de dommage pour les composantes des conduites .....	27
Tableau 6 Dérivation des taux de réparations $RR_{ijk}$ avec $j, k = 1, 2, 3$ .....	38
Tableau 7 Valeurs médianes des $PGV^2/PGA$ et leur RR correspondant pour un sol meuble. ....	58
Tableau 8 Valeurs de $RR_{ijk}$ , $W_{ijk}$ .....	60
Tableau 9 Valeurs médianes des $PGV^2/PGA$ et leur RR correspondant pour un sol rocheux. ....	61
Tableau 10 Valeurs de $RR_m$ , $\Delta m$ , $m = 1, \dots, 4$ (cas sol meuble). ....	63
Tableau 11 Valeurs de $RR_m$ , $\Delta m$ , $m = 1, \dots, 4$ (cas sol rocheux).....	63
Tableau 12 Valeurs de $\Delta M_m$ , $m = 2, 3, 4$ .....	68
Tableau 13 Valeurs des coefficients de l'équation (4-38) .....	71
Tableau 14 valeurs médianes des PGV et leur RR correspondant pour un sol meuble .....	72
Tableau 15 valeurs médianes des PGV et leur RR correspondant pour un sol rocheux.....	74
Tableau 16 Valeurs médianes des $PGV^2/PGA$ et leur RR correspondant pour un sol meuble. ....	83
Tableau 17 Valeurs médianes des $PGV^2/PGA$ et leur RR correspondant pour un sol rocheux.....	85
Tableau 18 Valeurs de $RR_m$ , $\Delta m$ , $m = 1, \dots, 4$ (cas sol meuble). ....	87
Tableau 19 Valeurs de $RR_m$ , $\Delta m$ , $m = 1, \dots, 4$ (cas sol rocheux).....	87
Tableau 20 Valeurs de $\Delta M_m$ , $m = 2, 3, 4$ .....	91
Tableau 21 Répartition des accélérations par zone selon PRA 99/V03.....	103
Tableau 22 Coefficients en relation avec le type de la faille. ....	106
Tableau 23 Estimation des magnitudes pour la simulation des cartes de risques sismiques.....	108

## Liste des Figures

Figure 2-1 Taux de réparation empirique (symboles) comparé aux algorithmes de dommages proposés par Ballantyne et al (1990).....	11
Figure 2-2 Taux de réparations des conduites (Maison et al. 1995).....	11
Figure 2-3 Taux de réparation ALA.....	13
Figure 2-4 Comparaison des fonctions de vulnérabilité.....	14
Figure 2-5 Comparaison des taux de réparations en fonction du PGA.....	15
Figure 2-6 Comparaison des taux de réparations en fonction du PGV.....	16
Figure 2-7 Processus d'estimation des RR à partir d'un certain nombre de GMPE.....	17
Figure 2-8 Comparaison de 4 différents modèles d'estimation de GMPE.....	17
Figure 2-9 Comparaison de 3 différents modèles d'estimation de GMPE « PGV ».....	18
Figure 2-10 Disparité des résultats des GMPE en fonction de <i>VS30</i> .....	18
Figure 2-11 : Exemple de carte de transport de gaz Réseau urbain Tlemcen (Sonelgaz 2012).....	21
Figure 2-12 : Modèle d'impact de l'affaissement différentiel du sol concernant les pipelines enterrés.....	25
Figure 2-13 : (a) Raccordements particulièrement sollicités (zone plus rigide de la conduite). San Fernando,1971. (b) : Réparation rapide d'une avarie sur conduite. Loma Prieta, 1989.....	28
Figure 2-14 : Ecartement des conduites au niveau du raccordement San Fernando,1971.....	28
Figure 2-15 : Fuite de gaz suite au cisaillement du sol. San Fernando, 1971.....	29
Figure 2-16 : Cisaillement d'une conduite souterraine. Kóbé,1999.....	29
Figure 3-1: Diagramme des estimations de RR pour un certain niveau d'incertitude.....	38
Figure 4-1: Corrélation entre les valeurs de PGV et PGA considérant la base de données NGA2.....	48
Figure 4-2: Corrélation entre les valeurs de $\log(\text{PGV}^2/\text{PGA})$ et $\log(\text{PGA})$ pour la base de données NGA2.....	49
Figure 4-3: Corrélation entre les valeurs de $\log(\text{PGV}^2/\text{PGA})$ et $\log(\text{PGV})$ pour la base de données NGA2.....	49
Figure 4-4: Comparaison entre le RR prédit et le RR observé pour les données de ALA.....	50
Figure 4-5: Comparaison des taux de réparations prédit en fonction de RR mesuré tenant compte de plus ou moins l'incertitude pour les valeurs observé de ALA.....	51

Figure 4-6: Variation du $PGV^2/PGA$ pour les 4 modèles en fonction de la distance $R_{jb}$ .....	57
Figure 4-7: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 1 .....	59
Figure 4-8: Distribution statistique de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 1 .....	59
Figure 4-9: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 2.....	62
Figure 4-10: Distribution statistique de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 2.....	62
Figure 4-11: Résumé de la comparaison de 125 cas entre différent RR pour chaque modèle (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4 .....	65
Figure 4-12: Distribution des rangs entre les 4 méthodes pour l'ensemble de 125 cases. (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4 .....	66
Figure 4-13: Comparaison de $\Delta j_m \equiv \Delta m$ pour les 125 cas entre différents RR de chaque méthode :(a) Méthode#2;(b) Méthode#3; (c) Méthode#4 .....	67
Figure 4-14: Comparaison entre le RR prédit et le RR observé pour les données de ALA .....	69
Figure 4-15: Comparaison des taux de réparations prédits en fonction de RR observés avec plus ou moins l'incertitude pour les valeurs observées de ALA.....	69
Figure 4-16: Comparaison de l'estimation de $PGV$ pour les trois modèles.....	71
Figure 4-17: Résultats obtenus à travers les 27 valeurs de RR pour le cas d'étude 1.....	73
Figure 4-18: Résultats obtenus à travers les 27 valeurs de RR pour le cas d'étude 2.....	75
Figure 4-19: Résumé de la comparaison de 125 cas entre différent RR pour chaque modèle (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4 .....	77
Figure 4-20: Comparaison de $\Delta m$ pour les 125 cas.....	78
Figure 4-21: Présentation des valeurs de $PGV^2/PGA$ prédites et observées en fonction de $R_{jb}$ pour le modèle d'Akkar. ....	80
Figure 4-22: Présentation des valeurs de $PGV^2/PGA$ prédites et observées en fonction de $R_{jb}$ pour le modèle Neuronal. ....	80
Figure 4-23: Présentation des valeurs de $PGV^2/PGA$ prédites et observées en fonction de $R_{jb}$ pour le modèle Hybride 1. ....	81
Figure 4-24: Présentation des valeurs de $PGV^2/PGA$ prédites et observées en fonction de $R_{jb}$ pour le modèle Hybride 2. ....	81
Figure 4-25: Processus de calculs des différences entre les valeurs prédites et observées.....	82
Figure 4-26: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 1 .....	84
Figure 4-27: Distribution statistique de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 1 .....	85
Figure 4-28: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 2.....	86

Figure 4-29: Distribution statistique de $RR_{ijk}$ pour le cas d'étude 2.....	86
Figure 4-30: Résumé de la comparaison de 125 cas entre différent RR pour chaque modèle (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4.....	89
Figure 4-31: Distribution des rangs entre les 4 méthodes pour l'ensemble de 125 cases. (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4.....	90
Figure 4-32: Comparaison de $\Delta j m \equiv \Delta m$ pour les 125 cas entre différents RR de chaque méthode :(a) Méthode#2;(b) Méthode#3; (c) Méthode#4.....	91
Figure 5-1: Equipements et méthodes nécessaires pour l'utilisation de SIG.....	94
Figure 5-2: Fonctionnement du SIG, superposition des couches.....	95
Figure 5-3: Numérisation des géométries sous SIG.....	96
Figure 5-4: Localisation des communes à étudier.....	97
Figure 5-5: Esquisse géotechnique des catégories de sol du groupement.....	98
Figure 5-6: Carte géotechnique adaptée avec les lois d'atténuations d'Akkar et al.....	98
Figure 5-7: Distribution du réseau de conduites avec les conditions géotechniques.....	99
Figure 5-8: définition de la distance épacentrale $R_{jb}$ .....	101
Figure 5-9: Sismicité de l'Algérie entre 1365 et 2009 (BELDJOUUDI 2011).....	101
Figure 5-10: Séisme ressenti dans le Nord algérien du 25/10/2004 au 11/08/2016 (Source EMSC <a href="http://www.emsc-csem.org/">http://www.emsc-csem.org/</a> Site consulté le 21/08/2016). .....	102
Figure 5-11: Zonage de la sismicité en Algérie selon PRA 1999/VERSION 2003.....	102
Figure 5-12: carte géologique du groupement (Chetouane, Tlemcen, Mansourah, Beni Mester) ANAT.....	105
Figure 5-13: Paléogéographie des Monts de Tlemcen-Ghar Roubane et de la bordure nord des Hautes Plaines.....	105
Figure 5-14: Carte des principales failles actives dans la région d'Oran. ....	106
Figure 5-15: Faille existante au centre de TLEMCEM (Faille 1).....	107
Figure 5-16: Faille existante au Monts de Terni, TLEMCEM (Faille 2).....	108
Figure 5-17: Carte d'estimation des dégâts avec $M_w = 6$ (Faille 1).....	109
Figure 5-18: Carte d'estimation des dégâts avec $M_w = 5.5$ (Faille 1).....	110
Figure 5-19: Carte d'estimation des dégâts avec $M_w = 5$ (Faille 1).....	110
Figure 5-20: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 6.5$ (Faille 2).....	111
Figure 5-21: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 6$ (Faille 2).....	112
Figure 5-22: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 5.5$ (Faille 2).....	112
Figure 5-23: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 5$ (Faille 2).....	113
Figure 5-24: Carte d'estimation de RR moyen utilisant la méthode#4 et le $PGV^2/PGA$ pour la ville de TLEMCEM à travers un scénario sismique de $M = 6.5$ (Faille 2).....	114
Figure 5-25: Carte d'estimation de RR moyen utilisant la méthode 4 et le $PGV$ pour la ville de TLEMCEM à travers un scénario sismique de $M = 6.5$ (Faille 2).....	115

Figure 5-26: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 6.5$ (Faille 2) par les données Algérienne. ....	116
Figure 5-27: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 7$ (Faille 3). ....	117
Figure 5-28: Carte d'estimation des dégâts avec $M = 7.5$ (Faille 4). ....	117

# Liste des abréviations

- PGA: Accélération maximale du sol (peak ground acceleration).
- PGV: Vitesse maximale du sol (peak ground velocity).
- PGD: Déplacement maximale du sol (peak ground displacement).
- MMI: Intensité de Mercalli modifié (Modified Mercalli Intensity).
- RR: Taux de réparations (Repair rate) .
- $RR_{obs}$  : Taux de réparations observé.
- $RR_{pre}$  : Taux de réparations prédit.
- GMP: Paramètre de prédiction de mouvement de sol (Ground Motion parameters).
- GMPE: Equations de prédiction de mouvement de sol (Ground Motion Prediction Equation).
- TDC: Type de conduites .
- NGA: Next generation attenuation .
- BDD: Base de données.
- DGS : Déplacement différentiel du sol (Differential Ground Subsidence).
- $\frac{\overline{PGV^2}}{PGA}$ : Paramètre complexe moyen d'estimation des taux de réparation.
- $\overline{PGV}$ : Paramètre moyen d'estimation des taux de réparation.
- GUARR : Global Uncertainty Analysis of Repair Rate.
- LADWP: Los Angeles Department of Water and Power.
- FEMA : Federal Emergency Management Agency.
- HAZUS: Hazards United States.
- BRGM : Bureau de recherches géologiques et minières
- ALA: American Lifelines Alliance.
- EMS98 : échelle macrosismique européenne.
- AFPS : Association Française de Génie Parasismique.
- IV : Indice de vulnérabilité.
- SIG : système d'information géographique.
- $V_{S30}$ : vitesse moyenne estimée pour les 30 premiers mètres de sol.
- $R_{jb}$  : Distance de Joyner Boor .
- $\sigma_{GMP_i}$ : Incertitude d'un Paramètre de prédiction de mouvement de sol.
- $\sigma_{RR}$ : Incertitude d'un taux de réparation.
- $N_{obsALA}$ : Nombre d'observation de la base de donnée ALA.

# Chapitre 1

## Introduction

### 1.1 Introduction

Les actions sismiques sont considérées comme le risque naturel le plus destructeur puisqu'il change souvent la forme d'une ville et même d'un pays de façon considérable, c'est la raison pour laquelle l'estimation du risque sismique pour chaque type de structures est nécessaire pour éviter les causalités. La réaction structurelle fragile face aux séismes est généralement le résultat d'une mauvaise conception, d'une mauvaise réalisation, d'une sous-estimation de l'aléa ou carrément de la négligence d'un type d'ouvrage, on parle donc d'une vulnérabilité trop élevée. Pendant presque un demi-siècle, le risque sismique a été évalué seulement pour les structures ponctuelles telles que les bâtiments et les ouvrages d'art et quelques investigations de ce risque ont été réalisées pour les structures continues qui englobent les conduites de vie (alimentation en eau potable et assainissement) et les réseaux de distribution de gaz. L'estimation globale du risque sismique de conduites enterrées en raison de la défaillance totale ou partielle du réseau est très importante.

Il est connu que l'estimation du risque sismique liée aux dommages des structures ne peut être effectuée sans la connaissance de la vulnérabilité sismique de ces structures. Dans le cas des conduites enterrées cette vulnérabilité n'a pas été très étudiée car peu de données ont été collectées après les séismes. Cependant durant les dernières décennies plusieurs études ont été menées pour évaluer cette

vulnérabilité mais ce sont souvent confrontées à la rareté des données. Associé à cette contrainte s'est dressée une autre problématique : quel outil doit-on utiliser pour mesurer la vulnérabilité ? En effet, le consensus sur l'outil ne s'est manifesté que récemment et surtout se distingue des outils qui sont utilisés pour les autres structures. Cet outil se nomme le Repair Rate (noté RR) qui signifie le taux de réparation par unité de mesure (surfaccique ou linéaire) des conduites. Dans la plupart des cas, ce RR est estimé par unité de longueur (kilomètre, mile ou pied) et seulement peu d'études évaluent les taux de réparation par unité de surface (Pineda-Porras et Ordaz 2010). RR est donc le nombre nécessaire de réparations des conduites enterrées suite à un séisme par une unité de longueur. Ce paramètre est considéré comme le moyen le plus simple (et surtout le plus pratique) pour décrire la fragilité sismique ou vulnérabilité, puisque son utilisation est adoptée dans la plupart des études au cours des dernières décennies. L'estimation de RR est liée aux paramètres de mouvement de sol (GMP) à travers des relations qui ont été formulées en utilisant des données enregistrées après les séismes. Il est connu que ces données sont très rares, ce qui implique une différence entre les taux de réparations estimés et observés.

Comme l'ensemble des études utilisent des paramètres sismiques pour l'évaluation des dommages des conduites, il est évident que le degré de confiance de ces approches qui fournissent ce paramètre doit être pris en compte. Ces approches sont données par les relations d'atténuations également connu par GMPE. La considération de la variabilité de la GMPE à la fois épistémique et aléatoire a reçu un intérêt particulier de la part des chercheurs. Paradoxalement cette variabilité n'a été prise en compte dans l'évaluation des taux de réparation pour les conduites enterrées. Ainsi, il semble que l'évaluation du dommage sismique liée aux conduites dépend seulement de la valeur moyenne des équations de prédiction de mouvement du sol sans pour autant prendre en compte la variabilité inhérente des GMPE.

## **1.2 Objectifs – Contributions**

Cette thèse vise à développer une méthodologie qui tient compte de la variabilité inhérente des GMPE et de la variation du taux de réparation lors de l'évaluation des dommages liés aux conduites souterraines. A travers cette méthodologie, nous essayons de comprendre comment cette variabilité va influencer l'allure des taux de réparation. En raison de la rareté des données disponibles relatives aux taux de réparations, nous proposons une méthode simplifiée dans le but d'obtenir une estimation approximative de cette variabilité. Cette méthodologie sera développée en supposant connaître une relation particulière entre un paramètre de mouvement de sol « GMP » et une relation d'estimation du dommage des conduites « RR », avec un certain nombre de GMPE qui fournissent les GMP avec leurs incertitudes respectives.

Cette méthodologie dénommée GUARR (Global Uncertainty Analysis of Repair Rate) aura pour objectif de définir un nouveau paramètre de la moyenne pondérée des taux de réparations au lieu d'utiliser un taux de réparation unique obtenu à partir d'une seule estimation de RR issue d'une seule GMPE et qui ne tient pas compte des incertitudes.

Il reste entendu que la mesure de la variabilité d'un modèle GMPE peut être intrinsèque c'est-à-dire par rapport au modèle GMPE mais aussi par rapport aux données. Dans le but de tester la méthodologie GUARR nous avons dans le présent travail considéré les deux types de variabilité.

## **1.3 Plan de la thèse**

Le présent document est organisé en six chapitres avec une conclusion. Le Chapitre 1 est une introduction pour présenter les objectifs de cette thèse. Nous présentons dans le Chapitre 2 de cette thèse un aperçu général sur les différentes approches utilisées pour l'estimation du dommage sismique des conduites enterrées et aussi les équations de prédiction du mouvement de sol applicable dans le domaine du parasismique. Quelques applications illustrées par les

travaux de recherches antérieurs sont présentées ainsi que leurs avantages et inconvénients. Le 0 est dédié à la présentation de la vulnérabilité des conduites à savoir les caractéristiques des conduites utilisées, les causes de dommages des conduites ainsi que les méthodes existantes pour l'analyse de la vulnérabilité. Le Chapitre 3 est consacré à l'établissement de la méthodologie adoptée, en précisant les fragilités des conduites enterrées choisies avec les équations de prédiction de mouvement de sol pour le calcul des accélérations et vitesses maximales du sol ; tenant compte de l'influence de l'effet de site sur la résistance des conduites. Le Chapitre 4 est consacré à l'application de la méthodologie évoquée dans le Chapitre 3. Pour cela nous choisissons le modèle de Pineda (Section 4.2, page 45) qui estime le RR en fonction de la valeur de  $PGV^2/PGA$ . Ce modèle est reconnu comme l'un des plus intéressants puisque le taux de réparation estimé est proche de celui observé. Toutefois le choix de ce modèle nous a menés à la détermination d'une nouvelle méthode qui donne la variation du GMP décrit par le  $PGV^2/PGA$  en fonction des paramètres sismiques. Afin de confirmer (ou d'infirmer) les résultats obtenus avec le modèle de Pineda, nous appliquons la méthodologie pour le modèle de Piccinelli (Section 4.3 page 68).

Afin de mettre en évidence les résultats déduits de cette méthodologie, on se propose de l'appliquer dans le Chapitre 5 au niveau de la zone urbaine (Région de Tlemcen, Algérie), et ceci en utilisant les systèmes d'informations géographique pour une meilleure représentation des résultats.

## Chapitre 2

# Revue bibliographique et présentation de la problématique

### 2.1 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de mettre en évidence les différentes méthodes d'estimation de la vulnérabilité des conduites à travers en particulier le paramètre Repair Rate (RR) (ou Taux de Réparation). Les détails concernant ces méthodes seront largement développés dans le chapitre 3. Une analyse critique de l'approche actuellement utilisée pour l'ensemble de ces méthodes va permettre de mettre en évidence la problématique posée dans le présent travail de recherche.

### 2.2 Estimation de la vulnérabilité des conduites par le paramètre RR

#### 2.2.1 Définition du paramètre RR

Le dommage sismique des conduites enterrées est généralement représenté dans des courbes donnant l'allure d'un indicateur de performance en fonction d'un paramètre d'intensité sismique. Ces courbes sont vues comme la meilleure interprétation des données disponibles issue d'une reconnaissance post-sismique. En général, l'indicateur de performance est le taux de réparation, noté RR, ce qui représente un nombre de réparations par unité de longueur de conduites suite à un mouvement sismique (nombre de réparations par kilomètre ...). Un autre

paramètre très peu utilisé en terme de nombre de réparations par unité de surface (Trifunac et Todorovska 1997), actuellement, ce dernier n'est pratiquement plus utilisé. Le  $RR$  est généralement sous la forme suivante:

$$RR = f(GMP, TCD) \quad (2-1)$$

Où

$GMP$  décrit le paramètre sismique qui peut être l'accélération maximale ou un autre paramètre et  $TCD$  décrit le type de conduite.

Dans le présent travail de recherche, notre intérêt s'est porté sur l'identification des effets de la variabilité inhérente qui caractérise les  $GMP$  sur la variation du  $RR$ . Par conséquent, le paramètre  $TCD$  n'a pas été considéré et l'équation (2-1) est réécrite comme suit :

$$RR = f(GMP) \quad (2-2)$$

## **2.2.2 Méthodes d'estimation du paramètre $RR$**

### **2.2.2.1 Equation de prédiction du mouvement de sol**

Les approches disponibles dans la littérature pour l'estimation du dommage sismique sont très nombreuses, elles sont le plus souvent en fonction d'un  $GMP$  à savoir ( $PGA$ ,  $PGV$ ,  $PGD$ ,  $MMI$ ...) ou d'une combinaison entre deux d'entre eux, tel que ( $PGV^2/PGA$ ). Aussi la recherche de la valeur de  $RR$  revient à connaître d'abord la valeur du  $GMP$  à travers la  $GMPE$ . (Atkinson, G et M. Boore 2003)

Quelle est la forme générale de la  $GMPE$  ? En d'autres termes quels sont les paramètres à introduire pour obtenir le  $GMP$  ? Il est actuellement admis que l'obtention de la valeur du  $GMP$  dépend de trois paramètres :

- ✓ Caractéristiques sismiques : Magnitude, profondeur, type de faille,...
- ✓ Caractéristiques du trajet sismique : Distance épacentrale, type de sol traversé,...

- ✓ Caractéristiques de site : effet de site, comportement mécanique du sol,  
...

Il est donc très difficile sinon impossible d'affirmer qu'une GMPE est meilleure qu'une autre. En fait chaque GMPE est entachée d'une certaine incertitude que chaque modèle essaie de minimiser. J Douglas, a résumé l'ensemble des équations de prédiction du mouvement de sol (Douglas, Akkar et al. 2014). A titre d'exemple on cite ci-après quelques modèles.

Modèle d'(Akkar et Bommer 2010). Les auteurs ont utilisé une base de données qui se compose de 532 accélérogrammes enregistrés à des distances allant jusqu'à 100 km depuis 131 séismes de magnitude  $M_w$  entre 5 à 7,6 et tirent les équations de prédiction pour la pseudo accélération à 5% d'amortissement (PSA), en  $\text{cm/s}^2$  comme suit:

$$\log_{10}(PSA) = b_1 + b_2 M_w + b_3 M_w^2 + (b_4 + b_5 M_w) \text{Log} \sqrt{R_{JB}^2 + b_6^2} + b_7 S_s + b_8 S_A + b_9 F_N + b_{10} F_R + \varepsilon \sigma \quad (2-3)$$

Où

$S_s$  et  $S_A$  sont des constantes pour décrire les types de sol,

$F_N$  et  $F_R$  qui sont introduit pour décrire les types de failles.

$\varepsilon \sigma$  caractérise la variabilité du modèle.

Les valeurs des coefficients  $b_i, i = 1, \dots, 10$  sont présentées dans le Tableau 1 pour le calcul du PGA (c'est-à-dire pour le PSA avec une période pratiquement nulle)

Tableau 1 Valeurs des coefficients pour le calcul de PGA

GMP	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$b_4$	$b_5$	$b_6$	$b_7$	$b_8$	$b_9$	$b_{10}$	$\sigma_1$	$\sigma_2$
PGA	1.0415	0.9133	-0.0814	-2.9272	0.2812	7.8663	0.0875	0.0152	-0.0418	0.0801	0.261	0.099

De la même façon les auteurs ont proposé une autre formule pour calculer la vitesse maximale du sol (PGV) en utilisant les mêmes variables.

$$\begin{aligned} \log_{10}(PGV) = & -2.12833 + (1.21448)M_w - (0.08137)M_w^2 \\ & - (2.46942 - 0.22349M_w)\log\sqrt{R_{JB}^2 + 6.41443^2} + (0.20354)S_S \\ & + (0.08484)S_A - (0.05856)F_N + 0.01305F_R \end{aligned} \quad (2-4)$$

Ces équations de prédiction sont très utiles puisqu'elles sont applicables dans la région méditerranéenne et aussi pour leur large intervalle de validités.

Modèle de (Pétursson et Vogfjörd 2009) considère une grande fourchette de validité pour la magnitude dans un champ proche qui ne dépasse pas les 50 km en moyenne ; ces relations ne tiennent compte que de la magnitude de moment et de la distance épacentrale comme input, le paramètre de l'effet de site est négligé. Le résultat des équations permettant de calculer l'accélération et la vitesse maximale du sol comme suit :

$$\log_{10}(PGV) = -1.69. \log_{10}(R + 0.00299. 10^{0.621.M}) + 1.05. M - 4.96 \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} \log_{10}(PGA) = & -2.26. \log_{10}(R + 0.0309. 10^{0.569.M - 0.0194.M^2}) - 0.0437. M^2 \\ & + 1.28. M \end{aligned} \quad (2-6)$$

Où :  $R$  est la distance épacentrale

$M$  est la magnitude.

Des relations d'atténuations du mouvement de sol pour des séismes peu profond ont été proposées par (Margaris, Papazachos et al. 2001) basées sur un ensemble de 744 enregistrements des composantes horizontales pour le déplacement, vitesse et accélération maximale du sol. La fourchette de validité de ces équations pour la magnitude est entre 4.5 et 7, la distance épacentrale de 1 à 150 km. Les auteurs ont proposés les équations de prédiction du mouvement de sol suivant :

$$\ln(PGA) = -4.16 + 0.69M_w - 1.24. \ln(R + 6) + 0.12. S \pm 0.70 \quad (2-7)$$

$$\ln(PGA) = 3.52 + 0.70M_w - 1.14. \ln(R^2 + 7^2)^{1/2} + 0.12. S \pm 0.70 \quad (2-8)$$

$$\ln(PGV) = 1.51 + 1.11M_w - 1.20 \cdot \ln(R + 5) + 0.29 \cdot S \pm 0.80 \quad (2-9)$$

$$\ln(PGV) = 2.08 + 1.13M_w - 1.11 \cdot \ln(R^2 + 6^2)^{1/2} + 0.29 \cdot S \pm 0.80 \quad (2-10)$$

Les équations de prédictions de mouvement de sol sont multiples, le choix d'utilisation dépend essentiellement du nombre de paramètre d'entrée à considérer et du domaine d'application pour chaque paramètre en fonction du besoin. L'écart type est une information très importante pour l'adoption des GMPE.

### **2.2.2.2 Estimation du dommage des conduites**

La corrélation empirique entre les dommages relatifs aux canalisations enterrées et les paramètres d'intensité des mouvements du sol a été étudiée depuis le milieu des années 1970. Le Tableau 2 donne une liste non exhaustive des modèles mis en place pour la détermination du RR en fonction du *GMP*. A titre indicatif, nous présentons ci-après quelques modèles parmi ceux décrits dans le Tableau 2.

Ballantyne et al. (1990) ont proposé des courbes de fragilité pour les conduites enterrées par type de conduites à savoir l'acier, la fonte et amiante-ciment et ceci à partir de données enregistrées suite au séisme de Loma Prieta 1989. Ces derniers ont été archivés tenant compte du type de matériaux des conduites endommagées. Avec si peu de données collectées, les auteurs ont pu proposer des algorithmes de dommages qui proposent un nombre de réparations de conduites par unités de longueur (réparation/1000 pieds dans cette étude) connaissant les valeurs de PGV. Les auteurs ont dû modifier la forme de données pour mener cette étude, puisque les informations étaient disponibles en fonction de l'échelle d'Intensité de Mercalli Modifié à travers les relations disponibles pour estimer des valeurs de PGV à partir des valeurs de MMI. (Ballantyne et al 1990) ont noté que l'estimation du dommage des canalisations exposées aux séismes est généralement approximative en ce qui concerne les matériaux, les joints et la longueur totale du tuyau (Figure 2-1). Les données disponibles reliant l'âge des conduites avec la corrosivité du sol qui peut engendrer des dégâts sont très rares. Le taux de dommages des conduites dans une

région donnée est répertorié à partir de la mémoire des travailleurs présents lors des interventions. L'hypothèse de la distribution des fuites-cassures pour les conduites dues à la liquéfaction du sol est de 50% pour les cassures et 50 % pour les fuites.(Nyman 1984) (Eguchi, Chrostowski et al. 1991) (Toprak and Taskin 2007) (Pitilakis, Crowley et al. 2014) (Pineda-Porras O et Najafi M 2010)

Tableau 2 Références des études

<i>GMP</i>	Modèles
PGA	Katayama et al. (1975) Isoyama and Katayama (1982) ASCE-TLCEE (1991) T. D. O'Rourke et al. (1991) Hamada (1991) Hwang and Lin (1997) T. D. O'Rourke et al. (1998) Isoyama et al. (2000)
MMI	Eguchi (1983) Ballantyne et al. (1990) Eguchi (1991) T. D. O'Rourke et al. (1998)
PGV	Piccinelli (2013) Barenberg (1988) M. J. O'Rourke and Ayala (1993) Eidinger et al. (1995) Eidinger (1998) T. D. O'Rourke et al. (1998) T. D. O'Rourke and Jeon (1999) Isoyama et al. (2000) ALA (2001) Pineda and Ordaz (2003) M. J. O'Rourke and Deyoe (2004) Jeon and O'Rourke T. D. (2005)
PGD	Eidinger et al (1995)
PGD, AI, SA, and SI	T. D. O'Rourke et al. (1998)
Eg	M. J. O'Rourke and Deyoe (2004)
PGV <sup>2</sup> /PGA	Pineda and Ordaz (2007) Pineda and Ordaz (2010)

Une autre étude menée par (Maison et al. 1995) a permis d'établir une relation entre *RR* (notée *n*) et le *PGD* par l'équation suivante :

$$RR = n = 1.03.PGD^{0.53} \quad (2-11)$$

Avec *n* le nombre de réparations par 1000 pieds de conduites est la *PGD* en pouces. La variation de *RR* est donnée dans la Figure 2-2.

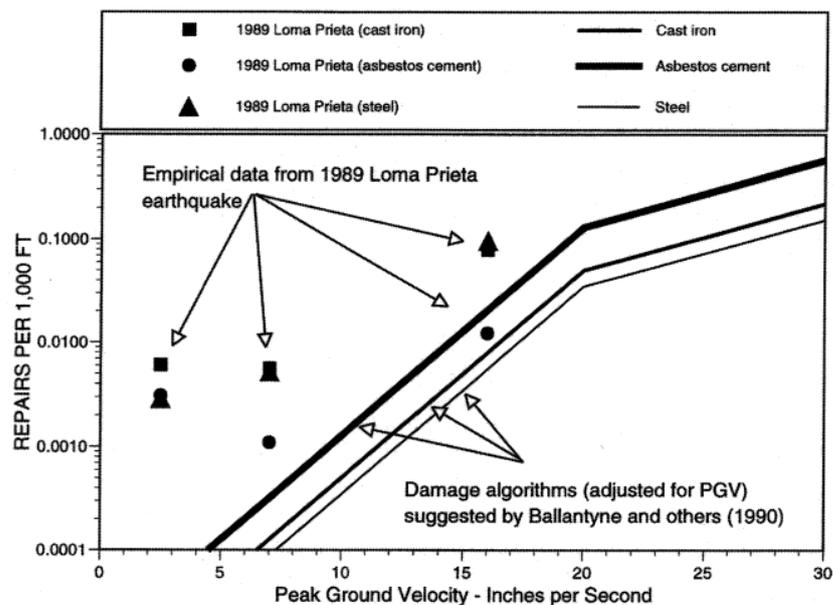


Figure 2-1 Taux de réparation empirique (symboles) comparé aux algorithmes de dommages proposés par Ballantyne et al (1990).

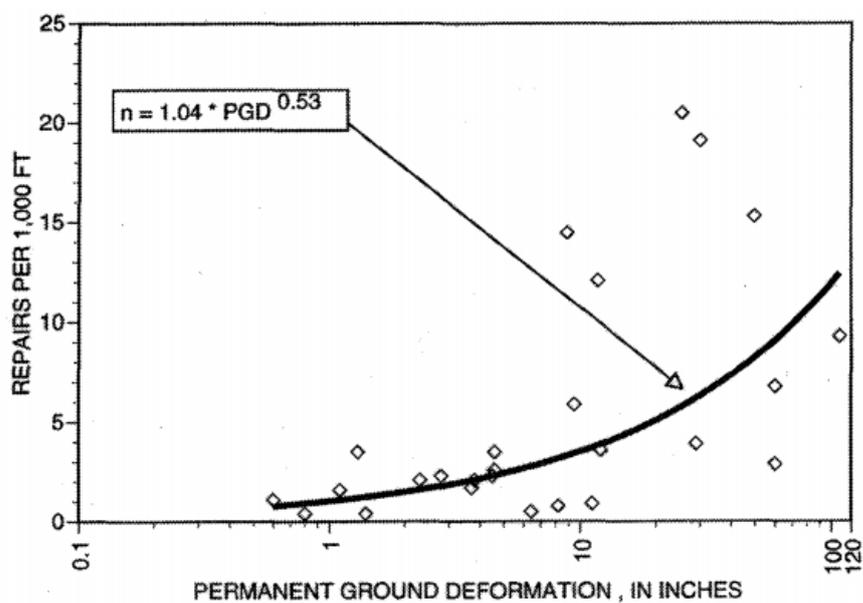


Figure 2-2 Taux de réparations des conduites (Maison et al. 1995)

Les données d'endommagement des conduites avec la courbe de tendance correspondante sont représentées sur la Figure 2-2. A noter que les données collectées dans cette étude issue de conduites en fonte seulement.

Une autre étude menée par ALA (Eidinger 2001) [Part 1(Guideline) et part 2(Appendices)] a permis d'établir des relations entre le RR et le PGV. Les dommages considérés pour les fonctions de vulnérabilité présentées dans cette étude sont causées par la propagation des ondes sismiques seulement. La collecte des données proviennent de diverses sources, ils montrent 164 points de données de 18 tremblements de terre différents, en identifiant l'année du séisme, le lieu, les matériaux relatifs aux conduites, diamètres, longueurs des conduites, taux de réparations ainsi que la source d'information. Beaucoup de statistiques de dégâts cités étaient dans des formats différents qui ont nécessité des ajustements pour la cohérence; cette base de données "brute" est disponible dans le tableau A.1-2 (voir article ALA Part 2, 2001).

La hausse des taux de réparation est en relation directe avec l'augmentation de PGV, ils suggèrent que les fonctions de vulnérabilité des conduites enterrées basées sur les PGV sont viables. (Laucelli D., Berardi L. et al 2013)

Deux modèles différents ont été formulés pour l'estimation des taux de réparations des conduites avec l'accroissement du PGV de la manière suivante :

-Le modèle linéaire (médian) : RR est une fonction linéaire de PGV.

$$RR = 0.00187 * PGV \tag{2-12}$$

-Le modèle de puissance : RR est aussi fonction de PGV:

$$RR = 0.00108 * PGV^{1.173} \tag{2-13}$$

La Figure 2-3 donne les variations de RR pour les deux équations (2-12) et (2-13).

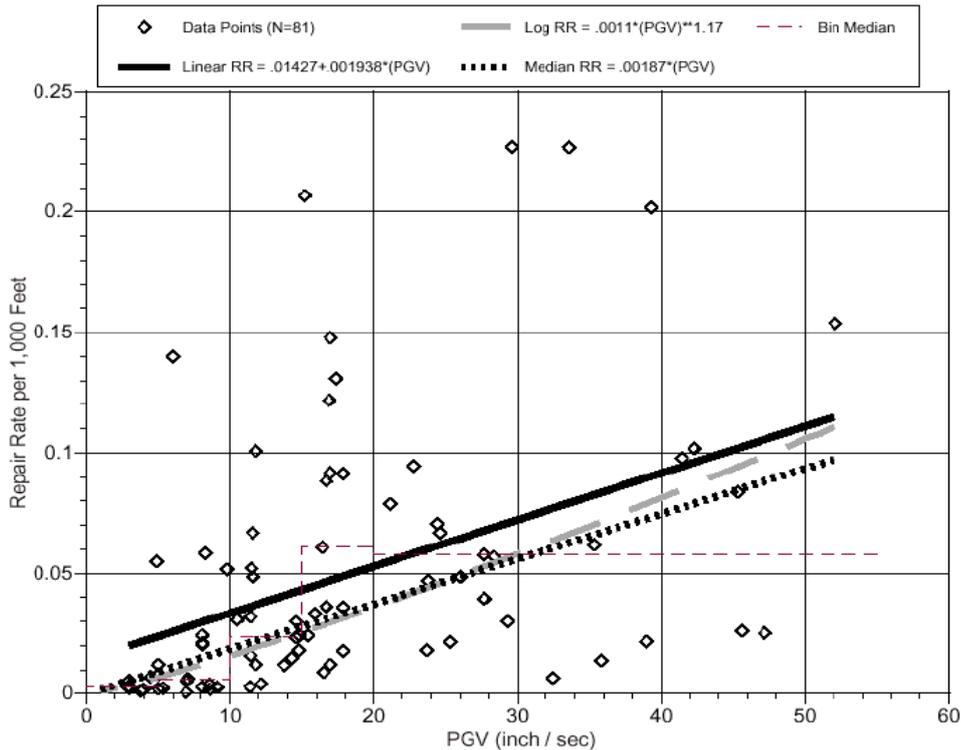


Figure 2-3 Taux de réparation ALA

La Figure 2-3, montre que les deux modèles sont sensiblement les mêmes, surtout lorsque on considère la dispersion des points de données. Des analyses supplémentaires ont été effectuées pour évaluer l'influence du matériau et du diamètre de la conduite, ainsi que la magnitude du séisme. Pour différents matériaux de tuyaux, la vulnérabilité a été explorée par le calcul de modèles linéaires pour chaque matériau et en prenant les rapports des coefficients de décantation.

Les conduites en fonte ductile et en acier ont été trouvées moins vulnérables que la fonte, d'au moins un facteur de deux, en plus celles en amiante-ciment étaient le plus performant. Ces résultats ne sont pas conforme à la réflexion classique, qui classe les matériaux fragiles tels que la fonte ou l'amiante-ciment, plus vulnérables que les matériaux ductiles comme l'acier ou la fonte ductile par un facteur de plus de trois.

De la même manière, des analyses ont été réalisées pour évaluer l'effet du diamètre d'une conduite à l'aide de la base de données dans le Tableau A.1-2 (article ALA Part 2, 2001), avec seulement 8 points de données pour les tuyaux de grand diamètre, les résultats ne montrent pas beaucoup de différence dans la vulnérabilité relative en comparant les conduites de distribution avec les tuyaux de petit diamètre. Enfin, la durée de la secousse pendant un séisme peut causer des dommages cycliques cumulés, dans lequel plusieurs manières de déformation conduisent à plus de dégâts. La magnitude d'un séisme est un substitut pour la durée d'une secousse forte, mais les séismes indiqués dans le tableau A.1-2 sont pour la plupart entre de 6 et 7. Aucune évaluation statistique significative d'un effet de la durée ne peut être faite, même si elle est intuitivement raisonnable de supposer que cet effet existe.

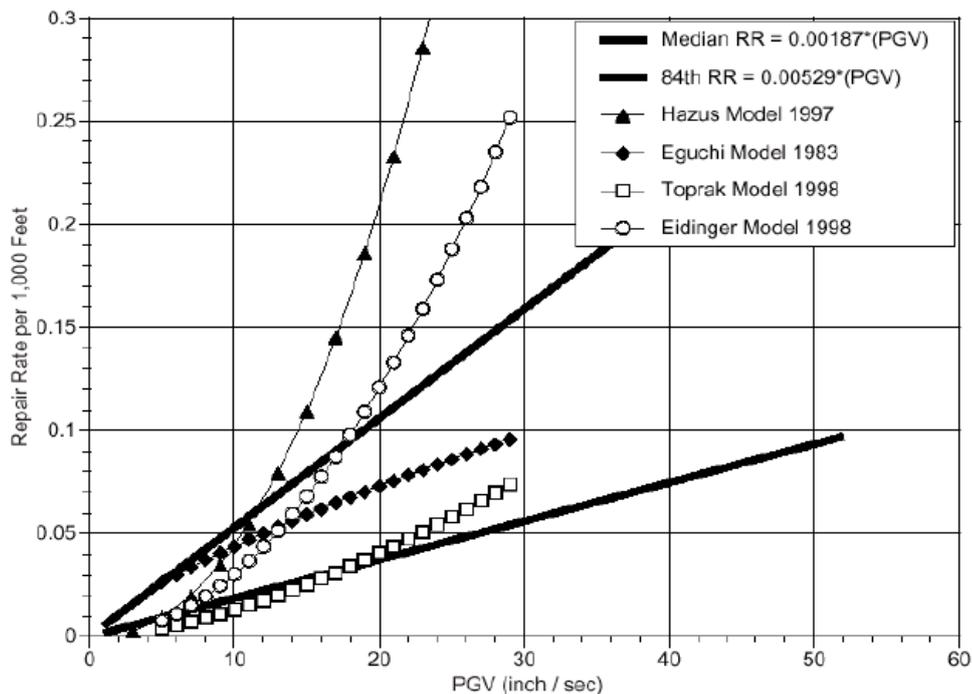


Figure 2-4 Comparaison des fonctions de vulnérabilité

La Figure 2-4 compare le modèle linéaire avec d'autres, HAZUS conduites fragiles (O'Rourke, Toprak et al. 1999), (Eguchi 1983) conduites en fonte, (Eidinger 1998) conduites en fonte, et (Toprak 1998) conduites en fonte. Le modèle d'HAZUS est utilisé dans la méthodologie de l'estimation des pertes nationales FEMA US. Le modèle d'Eguchi est parmi les premiers, il distinct le

dommage dû à la propagation des ondes de l'échec du sol, avec le besoin de convertir MMI au PGV en utilisant l'équation de (Wald, Quitoriano et al. 1999). Le modèle de Toprak est récent, il s'est basé sur une analyse sophistiquée du système d'information géographique (SIG) relatif aux dommages des conduites à Northridge.

## 2.2.3 Analyse critique des modèles d'estimation du paramètre RR

### 2.2.3.1 Disparité des valeurs de RR à partir d'une même GMPE

Les études décrites dans la section précédentes montrent clairement que les résultats des estimations de RR varient d'une approche à une autre quel que soit le paramètre de prédiction considéré à sa voir PGA, PGV, MMI ou autres.

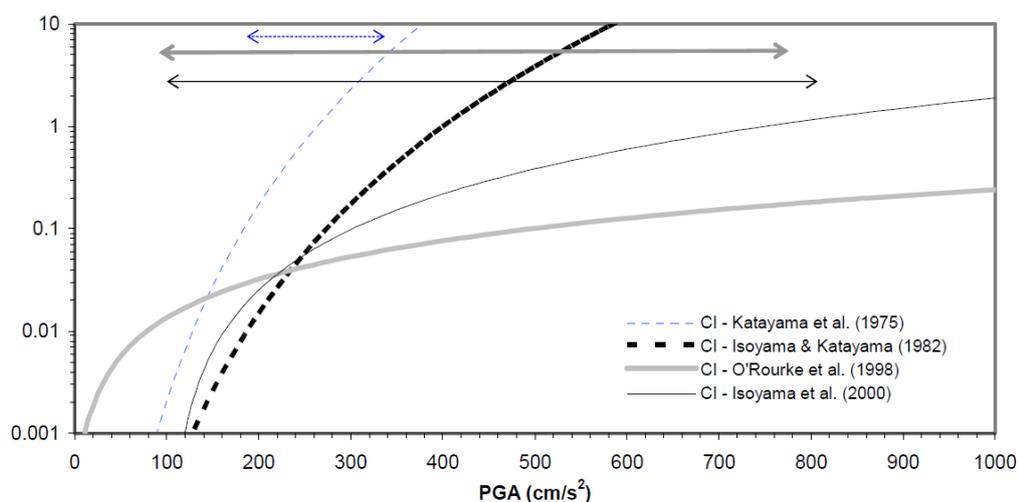


Figure 2-5 Comparaison des taux de réparations en fonction du PGA

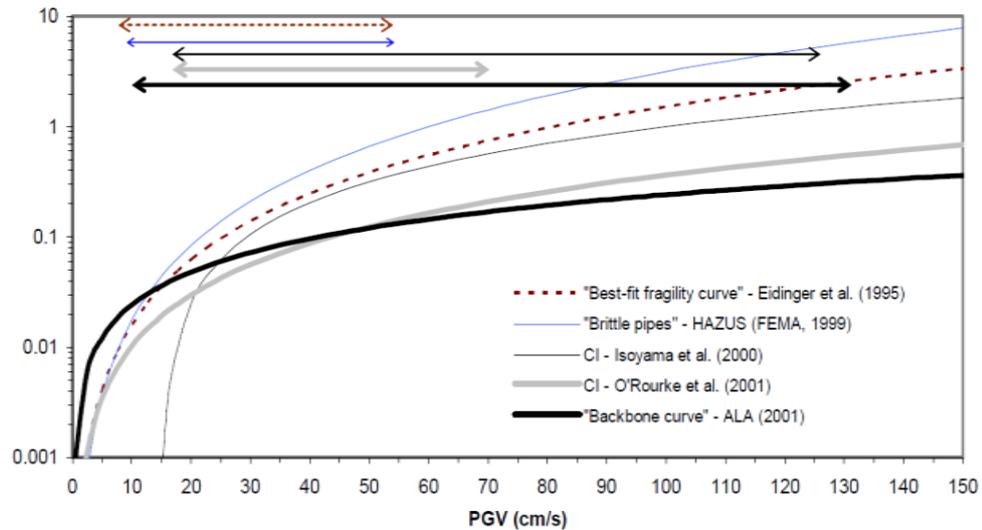


Figure 2-6 Comparaison des taux de réparations en fonction du PGV

La Figure 2-5 et Figure 2-6 donnent un aperçu sur cette disparité d'estimations (Tromans 2004). Dans certains intervalles des GMPE, les valeurs de RR sont très proches et pour d'autres les valeurs divergent en fonction des approches de prédiction utilisées.

### 2.2.3.2 Disparité des valeurs de RR à partir de plusieurs GMPE et pour la même formulation RR.

L'estimation des GMPE est effectuée en fonction d'un certain nombre de paramètres d'input tel que la distance de Joyner et Boore,  $V_{S30}$ , magnitude, type de faille...etc. L'utilisation de ces GMPE pour les mêmes paramètres d'entrée donnent aussi une disparité de résultats ce qui implique une variabilité de l'estimation des taux de réparations de conduites enterrées pour la même relation d'estimation de dommages. La Figure 2-7 montre le processus d'estimation des RR à partir de  $n$  GMPE. Le processus commence par identifier des inputs sismiques qui seront incorporés dans  $n$  GMPE qui doivent donner le même type de GMP (PGA ou PGV ou autres). Cette incorporation va donner des  $GMP_i$   $i = 1, \dots, n$  lesquels en utilisant une équation de type Equation (2-2) nous donne  $n$  valeurs de RR. Les figures Figure 2-8, Figure 2-9 et Figure 2-10 révèlent la différence des résultats pour un certain nombre de modèle de GMPE connaissant

les mêmes paramètres d'entrés. Notons que les modèles décrits dans ces figures seront présentés dans le Chapitre 4.

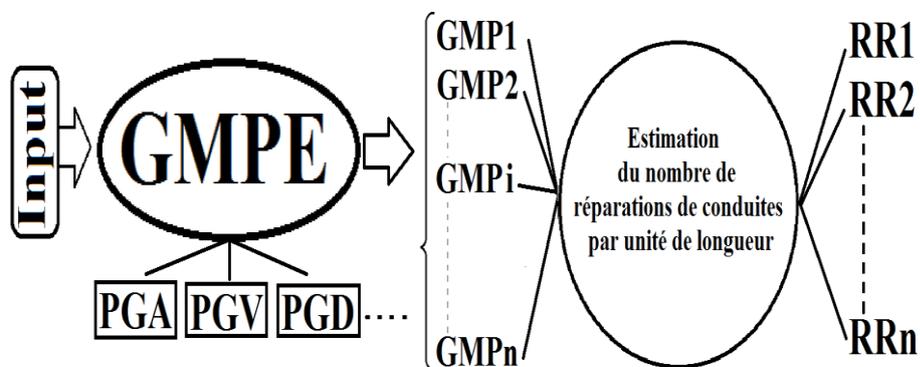


Figure 2-7 Processus d'estimation des RR à partir d'un certain nombre de GMPE

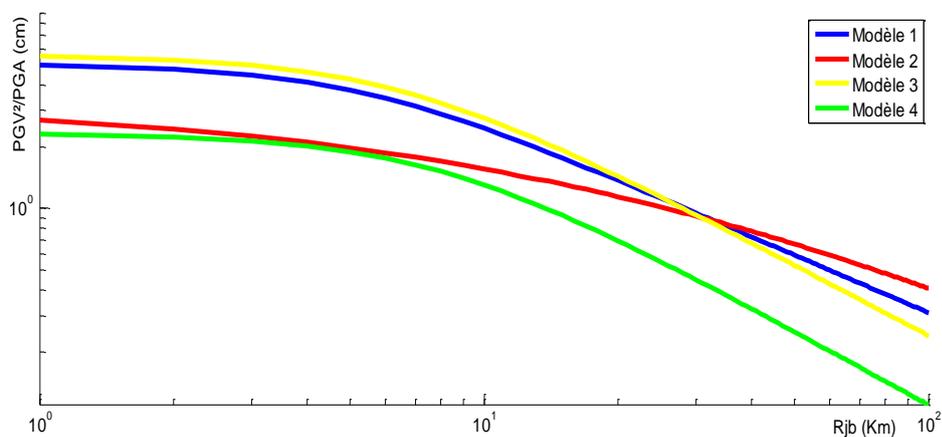


Figure 2-8 Comparaison de 4 différents modèles d'estimation de GMPE

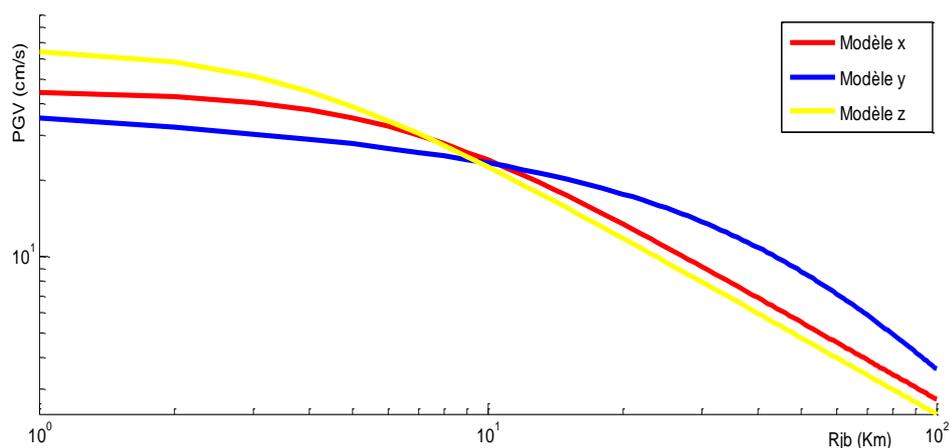


Figure 2-9 Comparaison de 3 différents modèles d'estimation de GMPE « PGV »

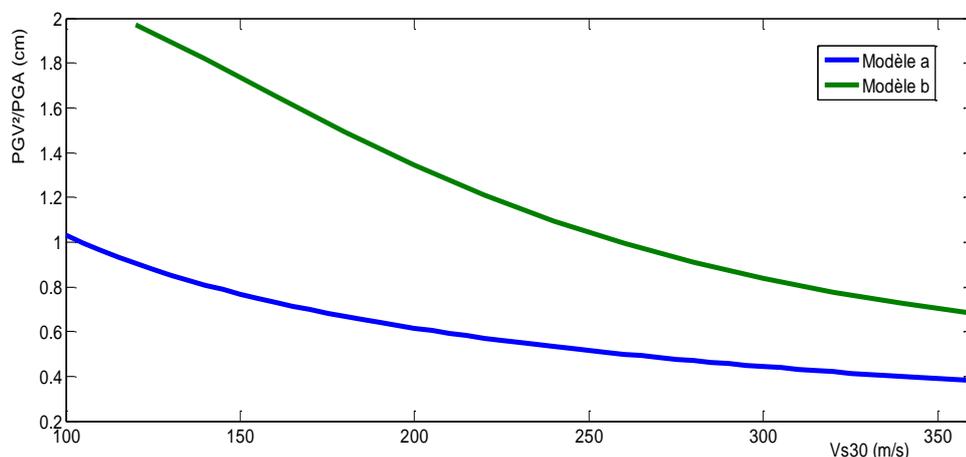


Figure 2-10 Disparité des résultats des GMPE en fonction de  $V_{S30}$

Les études décrites dans la section précédente montrent clairement que les résultats des estimations de RR varient d'une approche à une autre quel que soit le paramètre de prédiction considéré à sa voir PGA, PGV, MMI ou autres.

## 2.3 Problématique

A la lumière de ce qui précède, il s'avère clairement qu'un consensus n'existe pas autour de la meilleure méthode de détermination du RR. De plus, certains auteurs ont pour la même base de données établie plusieurs relations. La problématique est en tout point identique à celle de l'évaluation des GMP à partir

des GMPE. En effet, cette dernière requiert des données pour l'identification d'une relation avec une certaine incertitude.

Le point commun entre les différentes méthodes d'estimation du RR réside dans le fait que l'incertitude des inputs (c'est-à-dire le GMP) n'est pas prise en compte. En effet, toutes les GMPE sont entachées d'une certaine incertitude qui doit être prise en compte. De plus les relations de type Equation (2-2) ne font pas appel à la notion d'incertitude alors qu'elles ne représentent qu'une relation médiane.

L'objectif principal du présent travail de recherche vise à développer une méthodologie qui tient compte de la variabilité inhérente des GMPE et de la variation du taux de réparation lors de l'évaluation des dommages liés aux conduites souterraines.

## **2.4 Conclusion**

Ce chapitre nous a permis de mettre en évidence les différentes méthodes d'estimation de la vulnérabilité des conduites à travers le paramètre RR. L'analyse critique de l'approche actuellement utilisée pour l'ensemble de ces méthodes montre que l'incertitude inhérente aux GMPE n'est pas prise en compte. De plus l'incertitude des modèles qui donnent le RR en fonction d'un GMP n'est pas introduite. Ces deux points vont sûrement influencer la variation du RR. Afin de résoudre ce problème une méthodologie dont le développement sera présenté dans le chapitre 4 sera mise en place. Le prochain chapitre sera consacré à la présentation de la vulnérabilité des conduites.

# Vulnérabilité des conduites de gaz

## 2.5 Introduction

Ce chapitre a pour objectif de décrire les différentes approches pour mesurer la vulnérabilité des conduites de gaz (Azevedo, Guerreiro et al. 2010) (Pitilakis, Alexoudi et al. 2005) (Pitilakis, Anastasiadis et al. 2007) (Pitilakis, Alexoudi et al. 2008). Les études de la vulnérabilité sismique sont très répandues dans le but d'estimer le dommage moyen sur des structures en général tels que les bâtiments et les ouvrages d'arts, une région, ou sur une ville. Le dommage peut être traduit suivant une échelle de dommages (Michel 2007) (Mouroux et Le Brun 2006), en dollars (Aleskerov, Say et al. 2005) ou encore être converti en pertes en vies humaines (Coburn, Spence et al. 1992); pour les conduites souterraines et à partir d'un mouvement sismique donné, l'estimation du dommage moyen est exprimée en nombre de réparation par kilomètre de conduite. L'analyse de la vulnérabilité sismique des conduites enterrées nécessite une étude beaucoup plus approfondi en la comparant avec celle des bâtiments, du simple fait qu'elles s'étendent sur des linéaires très important, on parle donc des installations continues contrairement au bâtiments qui sont des structures ponctuels.

## 2.6 Dispersion du réseau de gaz

La disposition d'un réseau de gaz dans une région est très aléatoire, à savoir leur orientation sinueuse. Il s'étend de quelque dizaines de kilomètres jusqu'à des milliers de kilomètres. La Figure 2-11 donne une vue de ce réseau pour le groupement urbain de TLEMCEM et montre sa grande dispersion. Par conséquent la réponse sismique des conduites de gaz est très difficile à prédire. Donc

contrairement aux structures classiques (Bâtiment, ponts, ...) les conduites présentent une vulnérabilité bien plus difficile à évaluer.

### **Réseau de transport de gaz a TLCEMCEN**

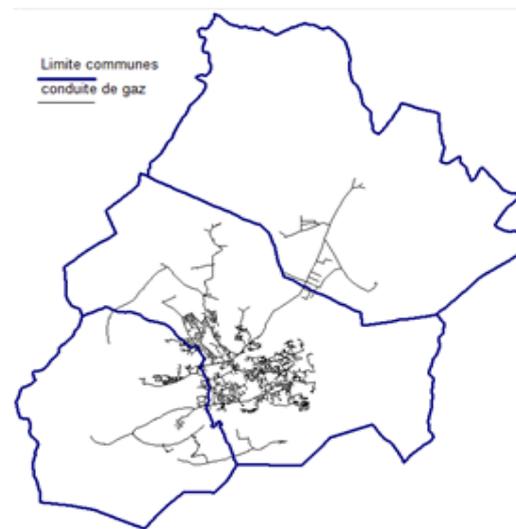


Figure 2-11 : Exemple de carte de transport de gaz Réseau urbain Tlemcen (Sonelgaz 2012)

## **2.7 Les Composants des réseaux de distribution du gaz**

Les réseaux de transport par canalisation d'une ville sont composés de tronçons de conduites et d'ouvrages connexes, remplissant des fonctions précises :

- Les stations d'injection ou de départ constituent les points d'entrée du réseau de transport.

- Les stations de compression (pour les gaz) ou stations de pompage (pour les liquides) sont réparties régulièrement le long des réseaux de transport pour maintenir la pression et la vitesse du fluide dans les canalisations.

- Les postes de livraison permettent de mettre la matière transportée à disposition des consommateurs.

- Les postes de sectionnement ont pour objectif d'isoler un tronçon de canalisation afin d'assurer sa maintenance ou de limiter les conséquences néfastes en cas de fuite suite à un séisme ou autre évènement moteur. Ces postes sont parfois équipés de coupures, destinées à contrôler les différents paramètres

d'intégrité de la canalisation : géométrie, propreté, fissuration, etc. La distance entre deux postes de sectionnement consécutifs dépend de la réglementation applicable, elle varie d'une dizaine de kilomètres à quelques centaines de kilomètres pour les grandes canalisations.

- Les postes de détente ou poste de régulation permettent de diminuer la pression des fluides à l'aval. Ils peuvent aussi séparer des portions de réseau exploités à des pressions différentes.

- Les stations d'arrivée marquent l'extrémité d'un réseau de transport. Ceci peut être un réservoir de stockage ou le début d'un réseau aval de transport ou de distribution.

Dans notre travail, nous nous intéresserons uniquement aux canalisations enterrées diamètres et matériaux confondus.

## **2.8 Caractéristiques des conduites utilisées**

### **2.8.1 Matériaux**

Entre 1815 à 1845, pour l'alimentation en gaz de l'éclairage public, les conduites utilisées étaient en bois et en plomb, avant l'apparition de la tôle bitumée. Il s'agissait de troncs d'arbres évidés. Après les conduites en tôle bitumée ont pris place à partir 1861. Début 1906, l'inventaire du réseau parisien collationne environ 1200 km de conduits de diamètre 27 à 1000 mm à une pression de 8 mbar jusqu'à 1979, pour passer à 20 mbar suite à la conversion du gaz naturel au remplacement du gaz manufacturé. Depuis 1963 ce matériau a été progressivement remplacé par d'autres matériaux comme la fonte et l'acier, à partir de 1974 jusqu'à présent on a découvert le polyéthylène à haute densité (PEHD), le Tableau 3 résume ses caractéristiques techniques. Toute cette variété à travers le temps a été désignée seulement pour offrir une résistance nécessaire et suffisante aux conduites pour non seulement résister aux pressions des liquides à l'intérieur, mais aussi une autre résistance du aux conditions de la nature telles que les chocs, glissements de terrain, séismes...etc.

Tableau 3 Caractéristique technique (physiques et mécaniques) du matériau P.E.H.D

Caractéristique	Méthode d'essai	Exigence	Paramètres d'essai
Résistance hydrostatique	EN 921	Aucune rupture d'éprouvette pendant toute la durée de l'essai	80°C-165h- 4.5 et 5.4 MPa
Allongement à la rupture	EN ISO 6259 -1/3	≥ 350%	e < 13mm - 100mm/min e ≥ 13mm - 25mm/min
Résistance à la propagation lente de fissure e≤5mm (essai à la virole)	ISO 13480	V ≤ 10mm/jour	80°C - Milieu tensio actif
Résistance à la propagation lente de fissure e>5mm (essai sur tube entaillé)	EN ISO 13479	Pas de rupture pendant la durée de l'essai	80°C-165h- 8 et 9.2 bar
Temps d'induction à l'oxydation	EN 728	> 20 min	200°C
Indice de fluidité à chaud	EN ISO 1133 -T	Valeur composition ±20%	5kg - 190°C - 10min
Retrait longitudinal à chaud	EN 743	≤3%. Apparence initiale du tube doit être conservée	110°C - 01h

## 2.8.2 Dimensions des conduites de gaz

Les diamètres des conduites utilisés pour le transport du gaz sont de l'ordre de 20 millimètres jusqu'aux environs de 250 mm .Toute cette variété de proportions est utilisée spécialement pour des fins de transport de matières en fonctions des besoins des débits ; donc, dans la pratique, l'augmentation des calibres joue un rôle important en matières de moments d'inertie ce qui donne à réfléchir pour ce qui est résistance dans le cas d'un séisme. Le Tableau 4 propose les diamètres disponibles pour ce nouveau matériau

Tableau 4 Disponibilité des diamètres GROUPE CHIALI (Selon EN 1555 -2)

Ø	PE 80 SDR 11	Ø	PE 100 SDR 17.6
20	3.0	200	11.4
40	3.7	250	14.2
63	5.8		
90	8.2		
125	11.4		



## **2.9 Causes (indicateurs) des dommages des conduites :**

### **2.9.1 Tendances des conduites :**

Théoriquement, l'orientation des tuyaux joue un rôle très important dans les dommages causés aux conduites par la propagation des ondes sismiques. Par exemple, si un segment droit de conduite est orienté dans la même direction que la propagation d'un groupe d'ondes de Rayleigh, les dégâts sont maximum. Par contre si le même segment de conduite est perpendiculaire à la direction de propagation du même groupe d'ondes de Rayleigh, le dommage est de zéro.

La plupart des relations de fragilité voir tous, fournissent l'estimation moyenne des dommages prenant en considération l'orientation des conduites. C'est par ce que, en général, les relations de fragilité, sont calculées à partir des scénarios de dommage concernant les réseaux de conduites avec leurs géométrie complexe. Dans ce contexte, un réseau à géométrie complexe, signifie un réseau avec des segments de conduite orienté dans à peu près toutes les directions. Théoriquement, le calcul d'une relation de fragilité, à partir d'un scénario de dommages pour un réseau de conduite à géométrie complexe, doit fournir les mêmes estimations totales de dommages, indépendamment de la direction de propagation des ondes sismiques.

Le défi avec l'estimation des dommages qui prend en compte l'orientation des conduites est de répondre à la question suivante : Quels sont les dégâts attendus pour un segment de conduite droit (ou un système avec une tendance visible d'orientation des tuyaux) employant les relations de fragilité actuelles ?

Indépendamment du modèle sismique utilisé dans les analyses, les relations de fragilité actuelle donnent une estimation intermédiaire de dommages causés aux conduites, situées entre le zéro et le maximum de dégâts, d'après la théorie. Cela pourrait conduire à rendre une sous-estimation ou surestimation du dommage susceptible selon l'orientation du réseau de conduite à étudier. (Omar Pineda-Porras 2010).

## 2.9.2 Affaissement du sol :

Avant le calcul d'un modèle de fragilité, il est important d'analyser comment le phénomène de DGS (Affaissement différentiel du sol) pourrait influencer sur la réponse sismique des canalisations enterrées (Figure 2-12) qui illustrent comment un système de canalisation peut devenir plus vulnérable en raison de la DGS.

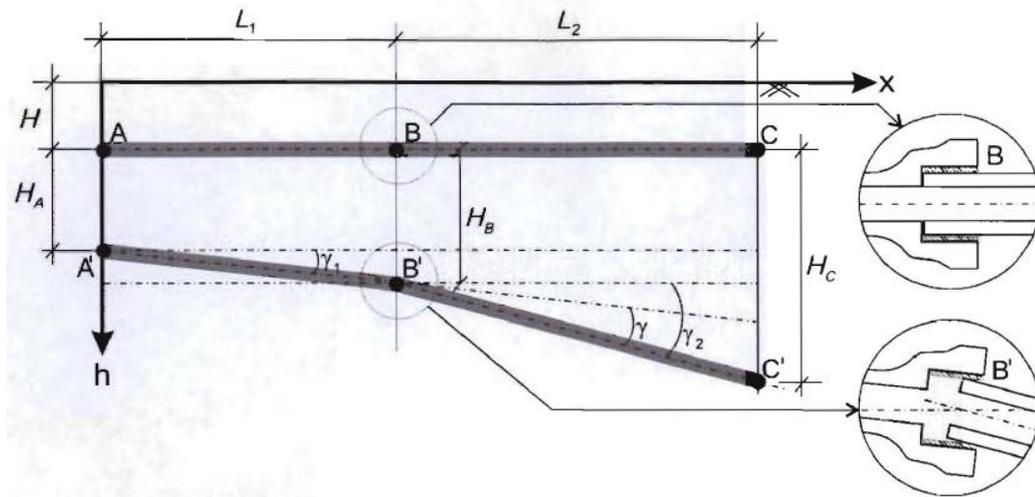


Figure 2-12 : Modèle d'impact de l'affaissement différentiel du sol concernant les pipelines enterrés

Deux tuyaux, avec des longueurs  $L_1$  et  $L_2$  (segments AB et BC, respectivement), raccordés par une liaison de cloche robinet (voir détail au point B) sont enterrés horizontalement à une profondeur constante  $H$ , après un DGS modifiant leurs emplacements d'origines (points  $A'$ ,  $B'$  et  $C'$ ), les tubes ont maintenant des pentes  $\gamma_1$  et  $\gamma_2$ , et une profondeur variable  $h(x)$ . En comparant l'état initial avec l'état final des conduites (les coordonnées des points B et  $B'$ , respectivement), on observe que la flexion du système « bitube » réduit la surface de contact du joint ; d'où, la capacité de réponse sismique des liaisons est affectée.

Bien que la Figure 2-12 montre un cas extrême de l'impact de la DGS dans le système, son but n'est que l'illustration des causes de dommages, car dans le cas où  $\gamma$  est nul on aura :

- L'enfoncement qui est uniforme ( $H_A = H_B = H_C$ ).
- et, après l'affaissement deux tubes ont aura la même pente ( $\gamma_1 = \gamma_2$ ).

Dans ces cas-là, la vulnérabilité du système à deux tubes n'est pas affectée par la DGS, et il est important de noter que la vulnérabilité d'un système multi-segment pourrait être affectée par la DGS, si  $\gamma$  est différent de zéro dans au moins un joint. (Pineda-Porras, O. et M. Ordaz 2010).

### **2.9.3 La mise en place des conduites :**

L'établissement des conduites souterraines joue un rôle très important en matière d'influences sur les facteurs de dommages sur ces derniers, pour le faire il est impérativement nécessaire de suivre quelques règles de sécurité afin de minimiser la dégradation des réseaux de transport du gaz et d'assurer la sécurité des biens et des personnes avec un risque résiduel acceptable, en commençant par la pose d'un lit de sable sous les conduites de l'ordre de 15 centimètres; puis la profondeur minimal nécessaire à respecter par rapport au niveau du sol qui doit être entre 80 cm et peut aller jusqu'à 4 mètres, afin d'éviter les déplacements. (Eidinger 2001)

### **2.9.4 L'âge et la corrosion :**

L'âge et la corrosion accentuent les dommages, particulièrement en acier segmenté, acier et fonte filetés. Les conduites âgées semblent avoir une plus grande incidence de l'échec par rapport aux tubes les plus récents. Les dommages des conduites suite au séisme de Whittier Narrows dans la région de Los Angeles (1987), a montré une tendance à l'augmentation des ruptures de canalisations par rapport à l'âge de la conduite (Schiff 1988). Des tendances similaires ont été observées pour le tremblement de terre de Loma Prieta (1989) pour des tuyaux en acier (Holzer 1998).

Le comportement de vieillissement peut-être fortement dépendant des effets de la corrosion causée par l'impact croissant de la corrosion dans le temps. La corrosion affaiblit les tuyaux en diminuant l'épaisseur de la matière et en créant des concentrations de contraintes. Les tubes en acier filetés et vissés semblent échouer à un taux plus élevé que les autres types de tubes en acier. Certains tuyaux en fonte

ont également connus un taux plus élevé d'échec de la corrosion (Isenberg 1978) (Isenberg 1979) (Isenberg et Taylor 1984).

## **2.10 Taux de dommage**

Concernant les proportions du dysfonctionnement des conduites, HAZUS et LADWP (Los Angeles Department of Water and Power) ont évoqué ce sujet et l'évaluer tenant compte de deux paramètres seulement dit Rupture-Fuite connu sous (Leak/Break). Pour cela les taux d'endommagements en raison de l'échec du sol est susceptible de présenter 80% ruptures, 20% fuites. Or un séisme peut induire des fuites à des dommages de l'ordre de 20% ruptures, 80% fuites. Par conséquent le Tableau 5 propose des taux de dommage pour les composantes des conduites enterrées. Pour tenir compte de ces deux paramètres par rapport à l'estimation des dommages des conduites, on compte une réparation par kilomètre, que ce soit pour une fuite ou une cassure. (Whitman et Lagorio 1998)

Tableau 5 Taux de dommage pour les composantes des conduites

<b>Niveau de dommage</b>	<b>Etat de dommage</b>	<b>Description du dommage</b>	<b>Entretien</b>
1	Pas de dommage	Pas de rupture ni de fuites	Opérationnel
2	Fuite	au moins une fuite le long de la longueur du tuyau considéré	Diminution du débit
3	Rupture	au moins une cassure le long de la longueur du tuyau considéré	Rupture du débit

## **2.11 Vulnérabilité des conduites de gaz**

### **2.11.1 Exemples des dommages relatifs aux conduites de gaz :**

Suite à des séismes, les dégâts engendrés ne sont pas connus immédiatement; pour cela les autorités responsables ferment instantanément les vannes qui permettent le transport des liquides. Le but de la mise en place de ces composants est justement d'éviter les explosions si c'est du gaz au contact avec la moindre étincelle, ou alors une contamination des eaux, s'il s'agit d'un réseau d'alimentation

en eau potable. Les figures mentionnées ici-bas montrent des dégâts sur les installations au niveau du réseau adopté dans différentes villes.



(a)

(b)

Figure 2-13 : (a) Raccordements particulièrement sollicités (zone plus rigide de la conduite). San Fernando, 1971. (b) : Réparation rapide d'une avarie sur conduite. Loma Prieta, 1989



Figure 2-14 : Ecartement des conduites au niveau du raccordement San Fernando, 1971



Figure 2-15 : Fuite de gaz suite au cisaillement du sol. San Fernando, 1971

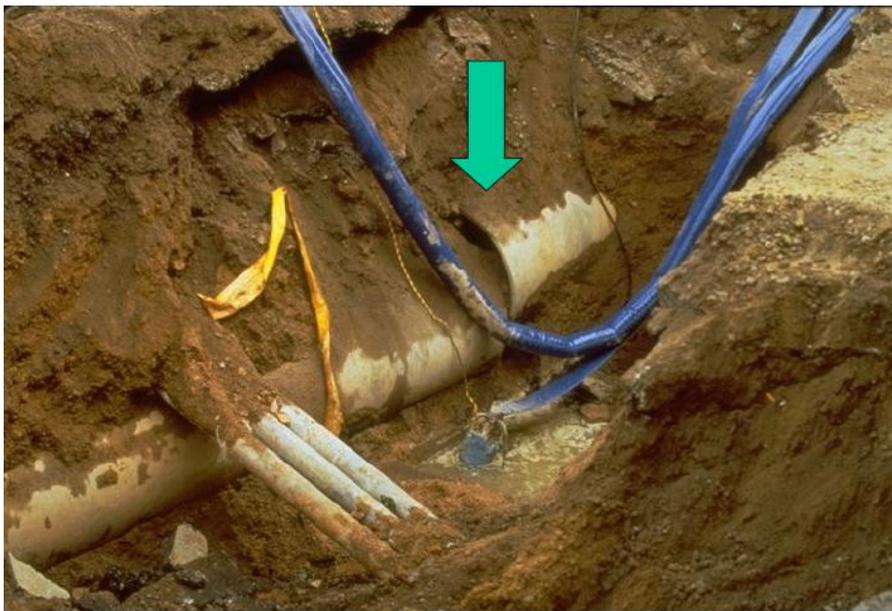


Figure 2-16 : Cisaillement d'une conduite souterraine. Kobé, 1999

### **2.11.2 Principes des méthodes existantes pour l'analyse de la vulnérabilité**

Le développement des méthodes d'analyse de la vulnérabilité à grande échelle fondé sur les inspections visuelles a été mis au point dans des pays à forte sismicité :

Pour les Etats Unis par la Federal Emergency Management Agency (FEMA, 1988, 1999, 2002, 2003)

Pour l'Italie par le Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) (Benedetti et Petrini 1984); (Bezzazi, Khamlichi et al. 2008).

D'autres pays comme le Japon (Otani 2000), la Turquie (Yakut, Ozcebe et al. 2006), le Canada (Onur, Ventura et al. 2005), la Belgique (Jongmans et Plumier 2000), l'Espagne (Roca, Goula et al. 2006), le Portugal ou encore la Suisse ont utilisé ou adapté ces méthodes pour estimer la vulnérabilité de leurs régions les plus sismiques. (Kaynia, Taucer et al. 2013)

Dans le cadre du projet européen Risk-UE (2003) coordonné par le BRGM, une méthode adaptée au contexte européen a été élaborée et appliquée à 7 villes, dont une en France. Une étude bibliographique (Combescure, Aubert et al. 2006) réalisée par un groupe de travail de l'Association Française de Génie Parasismique (AFPS) a déterminé les approches qui pouvaient être retenues en France.

Dans la plupart des méthodes, à comparer avec les bâtiments, les conduites enterrées sont aussi classées selon une typologie. Ces méthodes se fondent sur l'observation des caractéristiques structurales des bâtiments pour leur attribuer un indice de vulnérabilité noté (IV). Différents niveaux de précision d'analyse sont généralement prévus selon les informations disponibles, qui conduisent à une qualité variable de l'estimation de la vulnérabilité. Ces méthodes proposent une relation reliant l'indice de vulnérabilité à une échelle de dommage pour un mouvement sismique donné, un scénario probable ou un séisme historique, par exemple.

Les paramètres pertinents, les coefficients qui leurs sont attribués dans le calcul de l'indice de vulnérabilité (IV) et leurs relations avec le dommage sont déterminés à partir du retour d'expérience réalisé par des experts lors de missions post-sismique. Cette méthode a bien entendu une limitation, du coup les relations entre paramètres structuraux et dommages sont estimées de manière statistique. Ces méthodes permettent donc d'avoir une vision statistique, à l'échelle d'une ville par exemple.

### **2.11.3 Calcul du dommage**

Le dommage « d » est considéré par ces méthodes comme une variable continue variant de 0 (pas de dommage) à 1 (ruine) ou de 0 à 100. Cependant, il est nécessaire de ramener « d » à un niveau de dommage qui est défini qualitativement car il peut être facilement déterminé lors des interventions post-sismiques. Le niveau de dommage est défini de manière assez différente d'une méthode à une autre. L'EMS98 (Guéguen 2007), qui sert de référence en Europe, il compte 5 degrés :

1. Dégâts négligeables à léger.
2. Dégâts modérés.
3. Dégâts sensibles à importants.
4. Dégâts très importants.
5. Destruction.

Les autres méthodes américaines et italiennes en proposent 7.

L'application de ces intervalles de dommage pour les conduites n'est en réalité pas facile à mettre en place.

Pour cela des auteurs ont proposé des relations de fragilité en fonction des paramètres de prédictions de mouvement de sol à savoir PGA, PGV, PGD ou MMI (Equation (2-1)).

Par conséquent, dans le présent travail de recherche la vulnérabilité est mesurée par le paramètre Repair Rate (RR). ( Jeon S.S 2013) (Bouziou D. et O'Rourke T.D 2015)

## **2.12 Conclusion**

Ce chapitre a permis d'identifier les différentes approches pour mesurer la vulnérabilité des conduites de gaz. Les études de la vulnérabilité sismique sont très répandues dans le but d'estimer le dommage moyen sur des structures en général

tel que les bâtiments et les ouvrages d'art, une région, ou sur une ville. L'analyse de la vulnérabilité sismique des conduites enterrées nécessite une étude beaucoup plus approfondie en la comparant avec celle des bâtiments, du simple fait qu'elles s'étendent sur des linéaires très importants, on parle donc des installations continues contrairement aux bâtiments qui sont des structures ponctuelles. Le consensus existe autour de l'outil à utiliser pour mesurer la vulnérabilité. En effet, le Repair Rate (RR) est actuellement l'un des outils les plus utilisés. Par contre il a été constaté une grande disparité de la variation des RR pour le même GMP causée en outre par la non prise en compte de la variabilité inhérente des GMPE et de l'incertitude qui frappent les modèles d'estimation du RR..

Le chapitre suivant va nous permettre de mettre en place une méthodologie pour introduire ces variabilités.

## **Chapitre 3**

# **Mise en place de la méthodologie GUARR**

### **3.1 Introduction**

Le présent chapitre a pour objectif de présenter la méthode qui va nous permettre de prendre en considération les incertitudes qui frappent les GMPE mais aussi les équations d'estimation du taux de réparations. Cette méthode sera connue sous l'appellation suivante "Global Uncertainty Analysis of Repair Rate (GUARR)" qui signifie « L'analyse d'incertitude globale des taux de réparations ».

On commencera le chapitre par identifier l'ensemble des hypothèses qui seront utilisées lors de la mise en place de la méthode GUARR (Section 3.2 page 33). Le développement de la méthode sera présenté dans la section 3.3 page 36. Enfin la section 3.4 est consacrée à la description des étapes à suivre pour l'application de la méthode GUARR.

### **3.2 Hypothèses de base de la problématique**

Il reste entendu que pour le présent travail notre intérêt réside dans l'incorporation des incertitudes dans l'estimation du RR. Il ne s'agit pas ici de comparer les valeurs de RR issus de différents modèles.

L'utilisation des taux de réparation (RR) est considérée comme l'outil le plus explicite pour la description des fragilités des conduites enterrées. Ce paramètre de prédiction est établi à travers une corrélation entre le nombre de réparations observé et le paramètre de prédiction du mouvement de sol (GMP) qui peut éventuellement être une accélération maximale du sol (PGA), vitesse maximale du sol (PGV) ou alors un déplacement différentiel du sol (PGD). Comme on parle d'un paramètre d'estimation des taux de réparations de conduites qui dépend d'un paramètre de prédiction du mouvement de sol, le taux de réparation sera noté  $RR_{(GMP)}$ . Cependant, au cours de la dernière décennie, plusieurs relations ont été développées se basant sur le même concept :

$$RR = RR_{(GMP)} = f(GMP) \quad (3-1)$$

Plusieurs modèles ont été mis en place. Parmi eux celui de Pineda-Porras (Pineda-Porras 2009) est particulier car il propose comme GMP le paramètre le  $PGV^2/PGA$ . L'équation (3-2) montre la relation entre le RR (réparation par kilomètre) et un paramètre de prédiction du mouvement de sol particulier considérant le PGA et PGV à la fois. Aussi le paramètre d'input utilisé est homogène à un déplacement, ce qui est plus représentatif en termes de notion de grandeur.

$$RR_{\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)} = \begin{cases} 0 & \text{if } \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) < 1.91 \text{ cm} \\ 0.162 & \text{if } 1.91 < \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) < 11.82 \text{ cm} \\ 0.058 \cdot \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) - 0.534 & \text{if } \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) > 11.82 \text{ cm} \end{cases} \quad (3-2)$$

Avec PGV en cm/s et PGA en cm/s<sup>2</sup>.

Il est important de noter qu'aucune équation d'estimation des dommages des conduites mentionnées n'associe un écart type noté  $\sigma_{RR}$ , pourtant il est évident qu'il représente une énorme marge d'erreur dans l'estimation des taux de

réparations. En d'autres termes l'équation (3-1) ou en particulier l'équation (3-2) doivent être écrites comme suit :

$$RR_{(GMP)} = f(GMP) \pm \sigma_{RR} \quad (3-3)$$

Pour cela l'estimation de  $\sigma_{RR}$  est indispensable, elle sera déterminée dans le Chapitre 4.

Comment par exemple l'équation (3-1) est utilisée ? Pour un évènement sismique, il suffit d'avoir l'accélération maximale du sol (PGA) en «cm/s<sup>2</sup> » et la vitesse maximale du sol (PGV) en «cm/s » pour enfin calculer le ratio  $PGV^2/PGA$  en «cm », afin de se situer dans l'un des 3 intervalles de la formule (3-1). Le nombre de réparations par kilomètre de conduite peut être alors calculé.

Le cheminement paraît simple mais il dépend fortement des inputs c'est-à-dire des valeurs du GMP. Comment et d'où est ce qu'on peut estimer le paramètre de prédiction du mouvement de sol (GMP) ? En général, il est dérivé à partir des GMPE. Depuis 1964 plusieurs GMPE ont été établies et disponibles dans diverses publications (Douglas, Akkar et al. 2014). En ce qui concerne les inputs des GMPE, il suffit de fixer les paramètres sismologiques à savoir la magnitude, la distance épacentrale, type de faille, etc. En plus des paramètres de site (type de sol, proxy de site tel que  $V_{S30}$  ...) quoique la finalité de la stratégie est la même pour la définition des conditions du site, sauf que les auteurs utilisent différents procédés pour le quantifier, quant aux paramètres sismologiques il est nécessaire de vérifier le domaine de validité pour chaque paramètre.

On supposera dans le présent travail que l'utilisateur de la méthodologie à disposition a un certain nombre de GMPE dont les incertitudes sont connues. Il s'assurera de l'homogénéité des inputs des GMPE.

### 3.3 Mise en place de la méthodologie "GUARR"

#### 3.3.1 Détermination des Taux de réparations

Après avoir choisi le modèle d'estimation des dommages des conduites, et les équations de prédiction de mouvement de sol, à condition que les GMPE considérées soient applicables pour la région d'étude. L'évaluation des dégâts relatifs aux conduites enterrées peut être effectuée pour un scénario sismique donné. Donc le résultat est singulier par rapport à un cas particulier tel que la distance épacentrale ( $R_{jb}$ ) pour les paramètres sismologiques ou le type de sol pour les paramètres du site. Il est possible de répéter cette estimation pour différents scénarios dans le but d'étudier une région et stocker les résultats sous forme de valeurs ou de cartes. Jusque-là, l'ensemble de ce travail ne prend pas en compte les erreurs cumulées ; la meilleure manière pour le faire est de considérer un scénario particulier et on suppose qu'on a  $n$  GMPE disponible ( $GMPE_i$   $i = 1, \dots, n$ ). Chaque modèle  $i$  de GMPE fournit une estimation de  $GMP_i$ , évidemment si  $i \neq j$  alors  $GMP_j$  n'est pas nécessairement égale à  $GMP_i$ . Par conséquent en utilisant l'équation (3-1) pour un même paramètre sismologique et paramètre du site, deux modèles de GMPE donnent différentes valeurs de taux de réparations  $RR_{(GMP_i)}$  et  $RR_{(GMP_j)}$ . Si on étend ce processus pour  $n$  GMPE, on obtient  $n$  valeurs des taux de réparations  $RR_{(GMP_i)}$ ,  $i = 1..n$ .

A ce niveau d'estimation des dommages sismiques relative aux conduites enterrées, nous essayons de comprendre quelles valeurs d'estimation des RR nous devons choisir ? (la plus grande? La plus petite ?). Comment nous devons combiner ces  $n$  valeurs des taux de réparations dans le but d'obtenir « la meilleure estimation » ?

Une première méthode consiste à calculer la moyenne des  $n$  valeurs de  $GMP_i$ ,  $i = 1..n$  ceci revient à écrire la forme générale suivante:

$$\overline{GMP} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n GMP_i \quad (3-4)$$

Du moment que l'on dispose d'une seule valeur du GMP à savoir  $\overline{GMP}$ , nous utilisons l'équation (3-1) pour estimer le taux de réparations correspondants.

Cette valeur sera référée dans ce qui suit comme  $RR^{(1)}$  et nommée méthode#1

$$RR^{(1)} = RR_{(\overline{GMP})} \quad (3-5)$$

Une autre méthode consiste à calculer la valeur moyenne des  $RR_{(GMP_i)}$ .

Cette valeur sera référée dans cette étude comme  $RR^{(2)}$  et nommée méthode#2. Cette méthode sera calculée par l'équation générale suivante :

$$RR^{(2)} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n RR_{(GMP_i)} \quad (3-6)$$

L'examen des deux méthodes ci-haut montre que la variabilité qui caractérise les GMPE ainsi que le degré de confiance des GMPE ne sont pas pris en compte. Nous proposons d'inclure la variabilité des GMPE à travers le paramètre  $\sigma_{GMP}$  et celle des modèles à travers le paramètre  $\sigma_{RR}$  qui représente les écarts type. Ce concept paraît plutôt complexe et probablement peu consistant avec la fiabilité actuelle des valeurs de  $\sigma_{GMP}$  et  $\sigma_{RR}$ . En effet  $\sigma_{GMP}$  est relativement bien connue mais reste à mettre en place lorsque le GMP est de type  $PGV^2/PGA$ . Par contre  $\sigma_{RR}$ , en raison de sa rareté, n'est jamais fournie. Un des objectifs de cette thèse est de proposer une méthodologie relativement simple pour tenir compte et quantifier cette incertitude.

La première étape consiste à incorporer la variabilité inhérente des modèles GMPE. Chaque GMPE est caractérisée par sa propre variabilité exprimée par son incertitude. A titre d'exemple, le GMP qui sera considéré ci-après est le PGA. Toutefois, la méthodologie qui sera présentée est valable pour tout autre type de GMP. La GMPE est donc celle qui donne le PGA. Pour simplifier le concept, on considère que le GMP est un PGA; sa valeur moyenne est définie par le modèle#i.

$$\log(\overline{PGA}_i) = \log(PGA_i) \pm \sigma_{\log(PGA_i)} \quad (3-7)$$

Une fois le GMP estimé, la méthode simplifiée pour évaluer l'impact de la variabilité des modèles#i GMPE sur l'estimation des  $RR_{(PGA_i)}$  est de considérer en plus de la valeur médiane des GMP, l'intervalle de  $\pm$  l'incertitude commise sur ce GMP :  $PGA_i * 10^{\sigma_{log(PGA_i)}}$  et  $PGA_i * 10^{-\sigma_{log(PGA_i)}}$ . Ainsi, au lieu d'avoir une seule valeur, c'est-à-dire  $V_i = PGA_i$ , on a trois valeurs

$$V_{i1} = PGA_i * 10^{\sigma_{log(PGA_i)}}, V_{i3} = PGA_i * 10^{-\sigma_{log(PGA_i)}} \text{ et bien sur } V_i = V_{i2} = PGA_i$$

L'examen du Tableau 6 montre que ces trois valeurs sont au niveau de la colonne B. En fait la colonne A du Tableau 6 n'incorpore pas l'incertitude sur le modèle.

Tableau 6 Dérivation des taux de réparations  $RR_{ijk}$  avec  $j, k = 1, 2, 3$

A	B	C
		$RR_{i11} = RR_{V_{i1}} + \sigma_{RR}$
	$V_{i1} = PGA_i * 10^{\sigma_{log(PGA_i)}}$	$RR_{i12} = RR_{V_{i1}}$
		$RR_{i13} = RR_{V_{i1}} - \sigma_{RR}$
		$RR_{i21} = RR_{V_{i2}} + \sigma_{RR}$
$V_i = PGA_i$	$V_{i2} = PGA_i$	$RR_{i22} = RR_{V_{i2}}$
		$RR_{i23} = RR_{V_{i2}} - \sigma_{RR}$
		$RR_{i31} = RR_{V_{i3}} + \sigma_{RR}$
	$V_{i3} = PGA_i * 10^{-\sigma_{log(PGA_i)}}$	$RR_{i32} = RR_{V_{i3}}$
		$RR_{i33} = RR_{V_{i3}} - \sigma_{RR}$

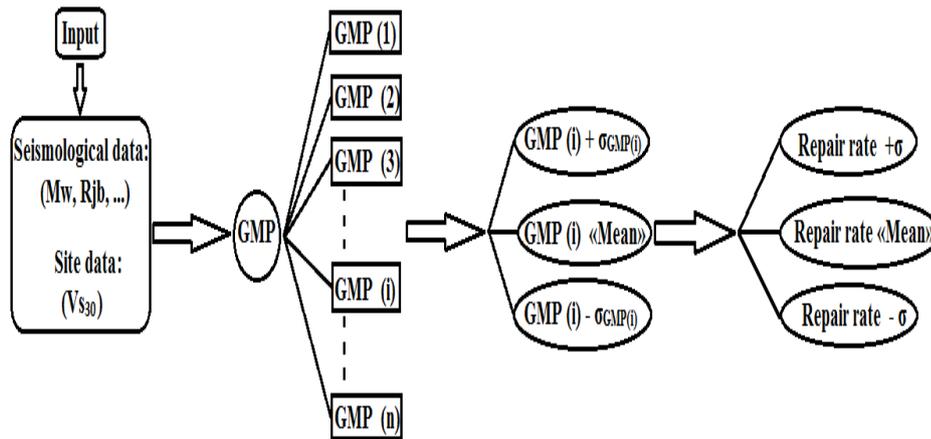


Figure 3-1: Diagramme des estimations de RR pour un certain niveau d'incertitude

La deuxième étape consiste à prendre en considération l'incertitude commise sur l'estimation des RR. On suppose que la mesure des  $\sigma_{RR}$  est disponible.

Reprenons le Tableau 6, on a trois valeurs  $V_{ij}$   $j = 1,2,3$ , donc automatiquement on a trois valeurs de RR c'est-à-dire  $RR_{V_{ij}}$   $j = 1,2,3$ . Sur chacune de ces trois valeurs on va supposer qu'il y a une incertitude qui va être prise en compte.

Considérons par exemple le GMP  $V_{i2}$ , il va nous donner le taux de réparations  $RR_{V_{i2}}$ . Cependant cette valeur ne représente que la valeur médiane de RR sans son incertitude. Pour la prendre en compte on a donc deux autres valeurs de RR. Au total pour une valeur de  $V_{ij}$  on trois valeurs de RR :

$$RR_{ij1} = RR_{V_{ij}} + \sigma_{RR}, \quad RR_{ij2} = RR_{V_{ij}}, \quad RR_{ij3} = RR_{V_{ij}} - \sigma_{RR}$$

En finalité, l'analyse des taux de réparations compte neuf « 9 » estimations pour le modèle#i GMPE comme illustre le Tableau 6.

La Figure 3-1 reprend le schéma qui a été mis en place pour la détermination des neuf valeurs des taux de réparations. Ce schéma est mis en place pour un modèle GMPE  $i$ . Dans le cas où on a  $n$  GMPE, on aura donc  $L=9*n$  taux de réparations notées  $RR_{ijk}$ , ( $i = 1, \dots, n$ ), ( $j = 1,2,3$ ), ( $k = 1,2,3$ ).

A ce stade, on va combiner les valeurs  $L=9*n$  pour une meilleure estimation du taux de réparations. Une approche intéressante consiste à calculer les moyennes des  $L$  valeurs de  $RR_{ijk}$ .

$$RR^{(3)} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 RR_{ijk}}{9n} \quad (3-8)$$

L'équation (3-8) donne l'expression de cette moyenne arithmétique.

Cette valeur sera référée dans cette étude comme  $RR^{(3)}$  et nommée méthode#3

La force de cette valeur par rapport aux deux premières c'est-à-dire Eqs. (3-5)et (3-6) réside dans le fait que la variabilité intrinsèque des modèles de GMPE ainsi que l'incertitude  $\sigma_{RR}$  sont pris en compte. Cependant elle ne tient pas en considération du degré de confiance des GMPE ainsi que du poids qui normalement devrait être affecté aux valeurs médianes d'un côté et des valeurs avec écart type d'un autre côté.

En effet, chaque modèle de GMPE est entachée d'une incertitude mesurée par l'écart type  $\sigma_{\log(PGA_i)}$ . Il est tout à fait clair que d'un modèle à un autre l'écart type change et par là, la non prise en compte de cette variation pourra influencer les résultats. Du moment que l'on cherche à prendre en compte la variabilité inhérente de chaque modèle mais aussi entre modèle, il devient indispensable d'incorporer un poids pour chaque modèle. D'autres parts, il est important de distinguer les valeurs issues de la médiane de celles obtenues pour la médiane avec plus ou moins l'écart type.

Pour cela on introduit le facteur poids  $W_{ijk}$  à appliquer pour chaque  $RR_{ijk}$ .

$$W_{ijk} = \omega_i \mu_j \vartheta_k \quad (3-9)$$

$\omega_i$  est introduit comme un poids qui dépend des GMPE, l'attribution de tels poids repose sur les valeurs de  $\sigma_{\log(PGA_i)}$  avec une affectation des plus grand poids pour le modèle qui représente une petite variabilité. Donc considérons deux modèles de GMPE. Le premier a un écart type de  $\sigma_{\log(PGA_1)}$  et le deuxième  $\sigma_{\log(PGA_2)}$ . Si  $\sigma_{\log(PGA_1)} < \sigma_{\log(PGA_2)}$  alors on aura  $\omega_1 > \omega_2$ . C'est-à-dire que l'on donnera plus de poids au modèle dont l'écart type est le plus petit. En fait cette démarche sous-entend que l'on a plus confiance dans le premier modèle.

$\mu_j$  est introduit pour tenir en considération de la différence attendue pour l'estimation du GMP considérée, avec un plus grand poids pour la valeur médiane et un petit poids pour les valeurs médianes  $\pm$  l'incertitude. Ces  $\mu_j$  seront associés avec la valeur  $V_{ij}$  mentionnée dans le Tableau 6.

$\vartheta_k$  est introduit pour tenir compte de l'incertitude relative à l'estimation de RR avec un plus grand poids pour la valeur médiane et un petit poids pour les valeurs médianes  $\pm$  l'incertitude

Donc :

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1, \quad \sum_{j=1}^3 \mu_j = 1, \quad \sum_{k=1}^3 \vartheta_k = 1 \quad (3-10)$$

Par conséquent

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 W_{ijk} = 1 \quad (3-11)$$

Avec cette stratégie, l'estimation optimale de RR en tenant en compte de la variabilité des GMPE et de modèle de RR mais aussi du degré de confiance qu'on a dans les modèles GMPE s'exprime par l'expression suivante :

$$RR^{(4)} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^3 W_{ijk} RR_{ijk} \quad (3-12)$$

Cette valeur sera référée dans cette étude comme  $RR^{(4)}$  et nommée méthode#4

$$\text{Avec : } W_{ijk} RR_{ijk} = L_{ijk}$$

### 3.3.2 Mesure de la variabilité des taux de réparations

La section précédente nous a permis d'introduire une nouvelle approche pour prendre en compte la variabilité inhérente des GMPE mais aussi la variabilité des modèles de détermination de RR. En termes de résultats, on a quatre valeurs de RR c'est-à-dire  $RR^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$ . Il a été mentionné dans les objectifs de cette thèse que la recherche d'une valeur optimale du taux de réparations est importante. A ce stade le lecteur se retrouve devant le choix de quatre valeurs. Il est clair que ces quatre valeurs sont à notre sens bien meilleures que les multiples solutions qui existent et qui ne prennent pas en compte les différentes variabilités. Toutefois, il serait primordial de répondre à une question simple : parmi les quatre valeurs laquelle est celle qui donne les valeurs les plus stables c'est-à-dire non assujetti à de larges fluctuations. Pour ce faire, il est important et nécessaire de mesurer ou quantifier le degré de confiance de l'ensemble des quatre méthodes pour justement discuter leur incertitude. (Soulimane I. et Zendagui D. 2017).

Pour la méthode #1 décrite par l'équation (3-5) il n'y a qu'une seule et son incertitude est nulle. De ce fait les comparaisons en termes d'incertitude ne

porteront pas sur le  $RR^{(1)}$ . Pour les trois autres modèles, les incertitudes seront décrites comme suit :

$$\Delta^{(2)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{GMP_i} (RR_{(GMP_i)} - RR^{(2)})^2} \quad (3-13)$$

$$\Delta^{(3)} = \sqrt{\frac{1}{9n} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_k^3 \sigma_{GMP_i} (RR_{ijk} - RR^{(3)})^2} \quad (3-14)$$

$$\Delta^{(4)} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^3 \sum_k^3 \sigma_{GMP_i} W_{ijk} (RR_{ijk} - RR^{(4)})^2} \quad (3-15)$$

L'application de cette procédure sera menée dans le chapitre suivant. Il s'agit d'identifier à travers deux cas d'études les variations des quatre valeurs de  $RR$  ainsi que de leurs incertitudes.

### 3.4 Procédure de calcul

La méthode « GUARR » suit un certain nombre d'étapes, elles sont décrites ci-après :

#### 3.4.1 Etape 1

La démarche commence par l'identification du modèle qui estime les taux de réparations de conduite par le biais de l'équation (2-2). A travers cette identification, le  $GMP$  à utiliser sera connu. Par ailleurs l'incertitude sur le modèle qui donne le taux de réparations  $\sigma_{RR}$  doit être fournie. Toutefois, vu la rareté des données, cette incertitude sera dans la présente thèse calculée en utilisant une base de données.

Lorsque le  $GMP$  est connu on procède à la recherche d'un maximum de GMPE qui donne ce  $GMP$  tout en s'assurant que les inputs sismiques sont homogènes. La méthode GUARR s'applique pour un ou plusieurs modèles de GMPE, mais de préférence il faut en avoir plusieurs. Les données sismiques vont

donner la valeur du GMP. Pour chaque modèle il faut avoir son incertitude mesurée par  $\sigma_{GMP_i}$ , ou bien le  $\sigma_{\log(GMP_i)}$ .

### 3.4.2 Etape 2

On calcule la moyenne  $\overline{GMP}$  par le biais de l'équation (3-4) et ensuite le taux de réparations par l'équation (3-5). Ce qui donne la valeur  $RR^{(1)}$ .

### 3.4.3 Etape 3

On calcule les RR pour chaque  $GMP_i$  par le biais de l'équation (3-1) et ensuite on calcule  $RR^{(2)}$  par le biais de l'équation (3-6).

### 3.4.4 Etape 4

Les valeurs  $RR_{ijk}$  du Tableau 6 sont ensuite déterminées en utilisant les valeurs suivantes :  $GMP_i$ ,  $\sigma_{GMP_i}$  et  $\sigma_{RR}$ . On peut ainsi calculer la valeur du taux de réparations  $RR^{(3)}$  par le biais de l'équation (3-8).

### 3.4.5 Etape 5

On procède au choix des valeurs des poids  $\omega_i, \mu_j, \vartheta_k$ . Dans le chapitre suivant les détails concernant ce choix seront présentés. On peut ainsi calculer la valeur du taux de réparations  $RR^{(3)}$  par le biais de l'équation (3-12).

### 3.4.6 Etape 6

La dernière étape consiste à mesurer les incertitudes par le biais des équations (3-13), (3-14) et (3-15). Cette mesure va nous permettre d'identifier la représentativité des valeurs de RR en mesurant leurs dispersions.

## 3.5 Conclusions

Ce chapitre a été consacré à la mise en place de la méthode GUARR "Global Uncertainty Analysis of Repair Rate" ou "Analyse d'incertitude globale des taux de réparations" qui permet d'incorporer les incertitudes dans l'estimation des taux de

réparations. Les équations (3-8) et (3-12) représentent le fondement de la méthode GUARR. Les étapes d'application de la méthode GUARR sont décrites dans le présent chapitre. Quelle est la pertinence du recours à cette méthode tout en considérant la rareté des informations post sismiques ? Quel est le meilleur taux de réparations ? Le Chapitre 4 va nous permettre de répondre à ces questions.

## Chapitre 4

# Application de la méthodologie

### 4.1 Introduction

La méthode GUARR décrite dans le Chapitre 3 a permis d'identifier des taux de réparations suivant quatre méthodes notées méthode#i. Le présent chapitre a pour objectif d'identifier à travers une étude paramétrique les deux cas d'équation de prédiction du taux de réparations (Modèles de Pineda-Porras et Piccinelli), la pertinence du recours à la méthode GUARR.

Pour ce faire pour chaque cas on va présenter en premier lieu l'équation du modèle. Ensuite on va passer à l'estimation du  $\sigma_{RR}$  et enfin au calcul des  $\sigma_{GMP}$  des différents modèles GMPE.

Il faut noter que pour la présente étude lorsqu'on a choisi d'utiliser le modèle de Pineda on s'est confronté au problème de l'estimation du  $\sigma_{GMP}$ .

### 4.2 Cas du modèle de Pineda

#### 4.2.1 Modèle de Pineda

Le modèle de (Pineda-Porras 2009) propose un RR connaissant la valeur de  $PGV^2/PGA$ . L'équation (4-1) montre la relation entre le RR (réparation par kilomètre) et un paramètre de prédiction du mouvement de sol particulier

considérant le PGA et PGV à la fois : le  $PGV^2/PGA$ . ( Soulimane I, Zendagui D et al 2015)

$$RR_{\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)} = \begin{cases} 0 & \text{si } \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) < 1.91 \text{ cm} \\ 0.162 & \text{si } 1.91 < \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) < 11.82 \text{ cm} \\ 0.058 \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) - 0.534 & \text{si } \left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) > 11.82 \text{ cm} \end{cases} \quad (4-1)$$

Où PGV est en cm/s et PGA est en  $cm/s^2$ .

Par identification avec l'équation (3-1), il s'avère que le *GMP* est le  $PGV^2/PGA$ . L'avantage de l'utilisation d'un tel paramètre est qu'il est considéré comme étant l'un des plus représentatifs.(Pineda-Porras 2009) Toutefois, le recours à ce modèle présente deux inconvénients majeurs :

- (a) il n y a pas de modèles de GMPE qui donne directement le  $PGV^2/PGA$ . Cet inconvénient peut être contourné en utilisant les GMPE qui donnent les PGV et PGA et ensuite de calculer le  $PGV^2/PGA$ .
- (b) Ces modèles qui donnent les PGV et PGA ont des variabilités associées  $\sigma_{\log(PGA)}$  ou  $\sigma_{\log(PGV)}$ . Or on a besoin de  $\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}$ . La plupart des GMPE donnent le PGA ou le PGV avec leurs variabilités associées  $\sigma_{\log(PGA)}$  ou  $\sigma_{\log(PGV)}$ . Une idée intéressante consiste à essayer de trouver une relation entre  $\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}$  d'une part et le  $\sigma_{\log(PGA)}$  ou  $\sigma_{\log(PGV)}$  d'autres part. Cette formulation sera mise en place dans la section 4.2.3.

#### **4.2.2 Estimation du $\sigma_{RR}$**

L'estimation de l'incertitude  $\sigma_{RR}$  nécessite une comparaison entre des paramètres observé et prédit. Nous utilisons la base de données des RR observés fournit dans (Eidinger 2001). Cette base de données contient une compilation des RR collecté suite à plusieurs séismes (Hyogoken-nanbu 1995, Northridge 1994, Loma Prieta 1989, Mexico 1989, Whittier 1987, Mexico City 1985, Coalinga 1983, Imperial Val. 1979, Managua 1972, San Fernando 1971 Santa Rosa 1969, Puget

Sound 1965, Niigata 1964, Puget Sound 1949, Fukui 1948, Kanto 1923). Chaque observation contient non seulement la valeur de RR « mesurée » en terme de réparations/unité de longueur des conduites, en plus d'un *GMP* à savoir PGA, PGV ou MMI. Dans le but de comparer les RR mesurés fournis par (Eidinger 2001) avec ceux prédits en utilisant le modèle (Pineda-Porras 2009), la disponibilité des PGA et PGV simultanément est obligatoire ou alternativement le rapport  $PGV^2/PGA$ . Comme le nombre d'observations de RR avec le paramètre d'intensité sismique caractérisé par le MMI est négligeable (20 parmi 124), on considère seulement les observations de RR associées aux valeurs de PGA ou PGV. Le nombre d'observations est donc :  $N_{obsALA} = 104$ .

L'étape à venir est de compléter la base de données de (Eidinger 2001) en calculant la valeur de  $PGV^2/PGA$  lorsque le PGV est fourni uniquement, et  $PGV^2/PGA$  si le PGA est disponible seulement. La question qui se pose maintenant est comment compléter le tableau. Pour ce faire, on a utilisé la base de données NGA2 (Campbell et Bozorgnia 2014), qui inclut les valeurs de PGA et PGV pour un ensemble de 21539 points, relativement récente et présente l'avantage qu'elle soit bien conçue, avec une qualité homogène d'enregistrements contrôlée, son traitement ainsi que ses paramètres d'inputs (séismes, sources, distance, conditions de site). La Figure 4-1 donne la variation du PGA en fonction du PGV.

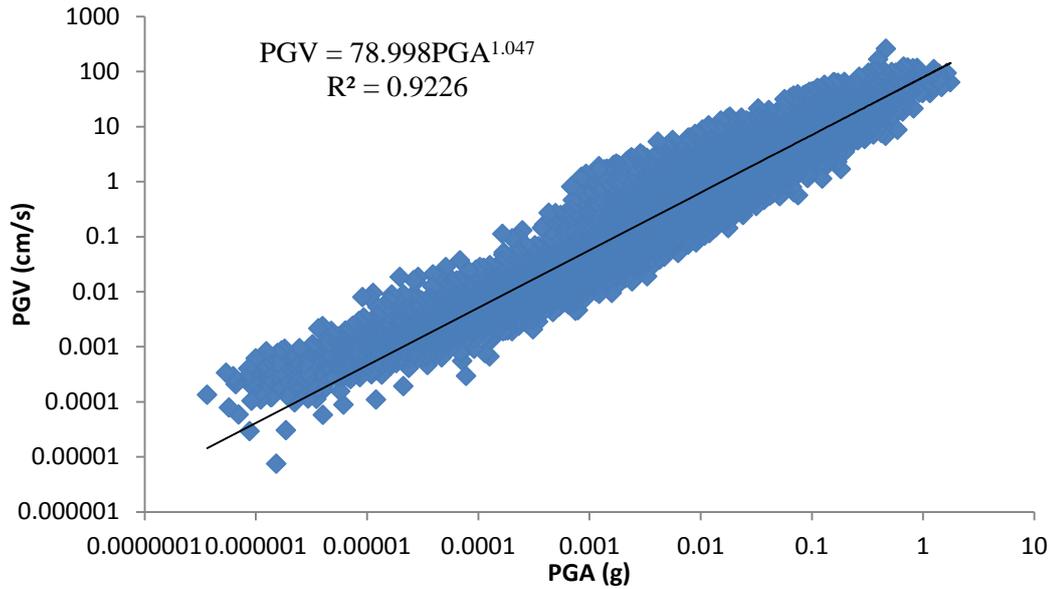


Figure 4-1: Corrélation entre les valeurs de PGV et PGA considérant la base de données NGA2

La corrélation entre les valeurs correspondantes du  $\log(PGV^2/PGA)$  mesuré en (cm) et le  $\log(PGA)$  mesuré en (cm/s<sup>2</sup>) ou  $\log(PGV)$  mesuré en (cm/s) est mentionnée dans les Figures (Figure 4-2 et Figure 4-3) et décrite par les équations suivantes:

$$\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) = 1.0866 \log(PGA) - 2.4606 \quad (4-2)$$

Avec

Un coefficient de détermination  $R^2 = 0.7409$  et un écart type  $\sigma_{2NGA} = 0.685$

$$\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) = 1.1246 \log(PGV) - 1.1121 \quad (4-3)$$

Avec

Un coefficient de détermination  $R^2 = 0.9456$  et un écart type  $\sigma_{1NGA} = 0.314$ .

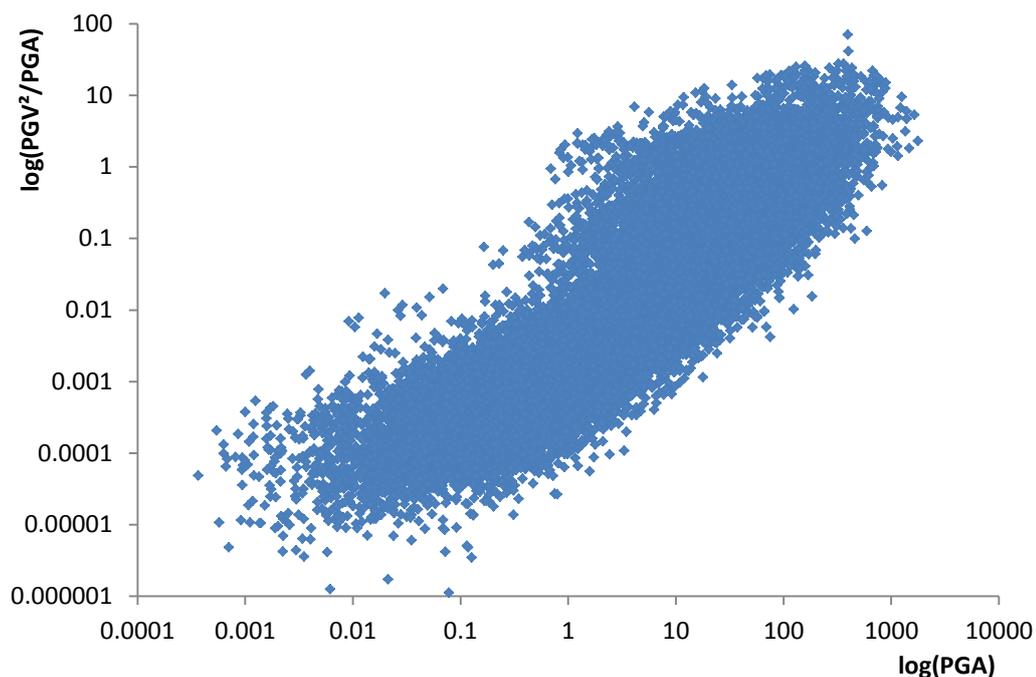


Figure 4-2: Corrélation entre les valeurs de  $\log(\text{PGV}^2/\text{PGA})$  et  $\log(\text{PGA})$  pour la base de données NGA2

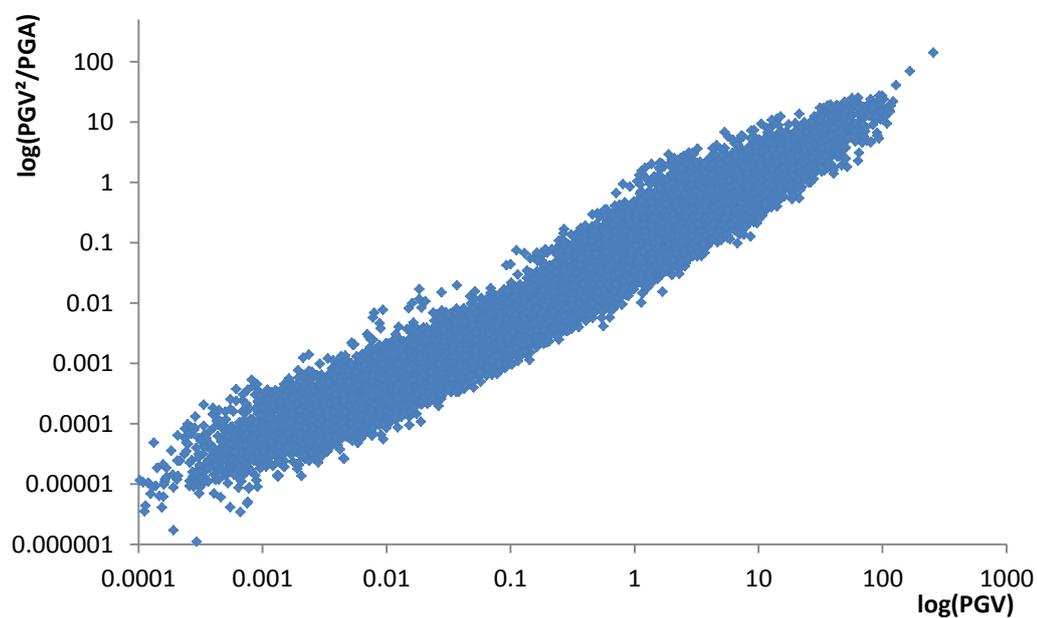


Figure 4-3: Corrélation entre les valeurs de  $\log(\text{PGV}^2/\text{PGA})$  et  $\log(\text{PGV})$  pour la base de données NGA2

L'examen des figures (Figure 4-2 et Figure 4-3) et aussi les deux coefficients de détermination ou la valeur de l'écart type, montre une meilleure corrélation entre le

PGV<sup>2</sup>/PGA et le PGV qu'entre le PGV<sup>2</sup>/PGA et le PGA. Bien que ces corrélations ne soient en principe valides que pour la BDD utilisée, nous pouvons raisonnablement considérer, connaissant la qualité et la dimension de NGA2, que ces relations peuvent être appliquées pour les observations de (Eidinger 2001). Pour chaque RR observé, nous pouvons associer une valeur de PGV<sup>2</sup>/PGA à l'aide de l'équation (4-2) si le PGA est donné (55 points), ou l'équation (4-3) si le PGV est connu (49 points).

Pour les 104 observations ci-haut mentionné, on peut comparer les RR mesurés notés ici  $RR_l^M$  ( $l = 1, \dots, 104$ ) avec les RR prédit  $RR_l^P$ . La Figure 4-4 présente la variation de  $RR_l^M$  avec  $RR_l^P$ .

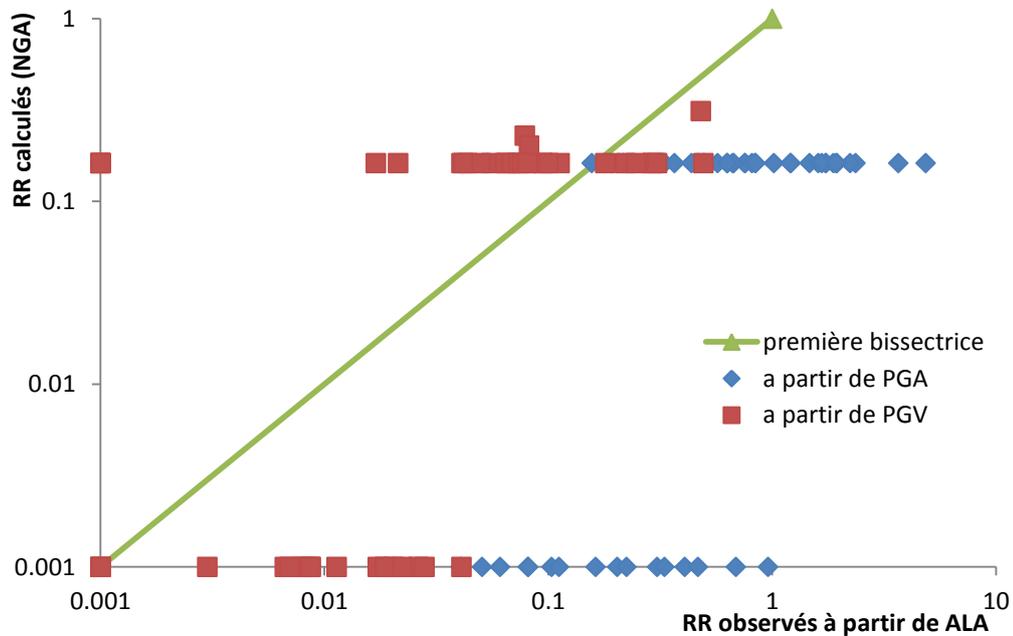


Figure 4-4: Comparaison entre le RR prédit et le RR observé pour les données de ALA

Comme le PGV<sup>2</sup>/PGA est calculé à l'aide de l'équation (4-2) si le PGA est connu ou l'équation (4-3) si le PGV est connu, nous avons utilisé différents symboles dépendant de l'origine des paramètres  $RR_l^P$  (carrés rouges pour le PGA et losanges bleus pour le PGV). Une grande incertitude apparait dans la prédiction de RR avec un écart type entre l'observé et le prédit égal à 0,75. Aussi pour la présentation graphique, il est important de spécifier qu'une convention a été prise

en compte pour modifier les valeurs nuls du RR en leurs affectant la valeur 0.001. Ces valeurs calculées ne prennent pas en considération l'incertitude associée aux équations (4-2) (4-3). Donc pour chaque valeur de PGA ou PGV (en fonction de la BDD de ALA), on estime également trois taux de réparations avec  $\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)$  et  $\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) \pm \sigma_{1NGA}$  si le PGV est donné, ou  $\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) \pm \sigma_{2NGA}$  si le PGA est donné.

La Figure 4-5 représente la variation des taux de réparations prédit en fonction de RR mesuré. La variabilité maximale des RR est estimée comme suit :

$$\sigma_{RR} = \sqrt{\frac{1}{3*N_{obsALA}} \sum_{k=1}^{k=312} (RR_k^M - RR_k^P)^2} = 0.243 \quad (4-4)$$

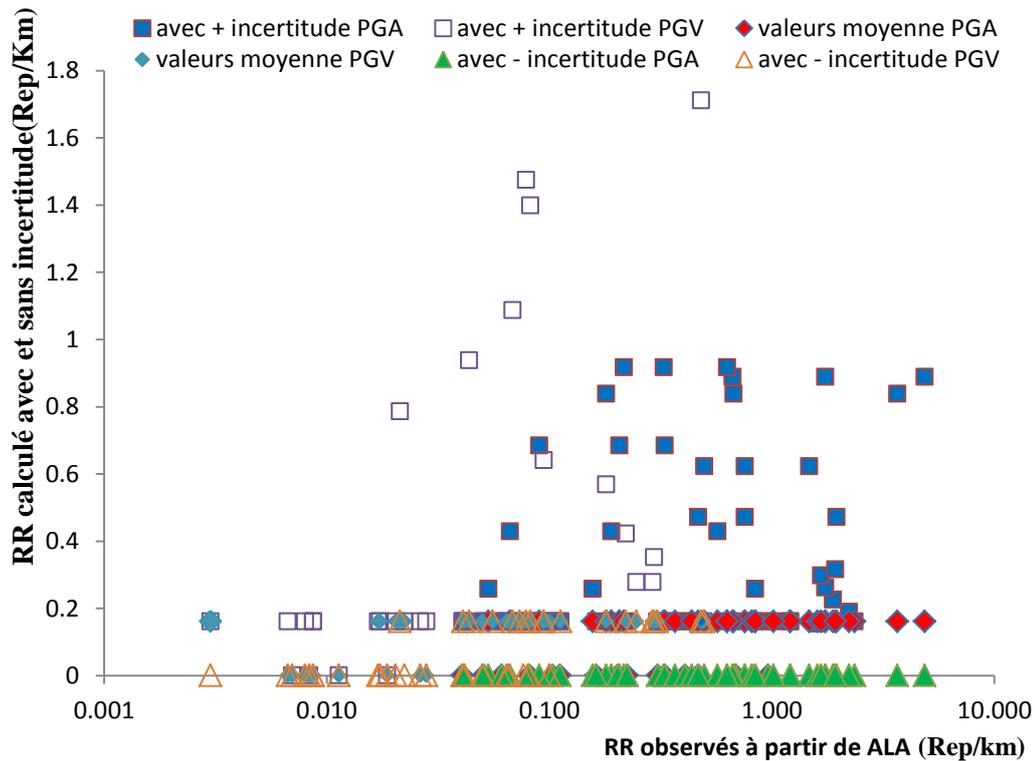


Figure 4-5: Comparaison des taux de réparations prédit en fonction de RR mesuré tenant compte de plus ou moins l'incertitude pour les valeurs observé de ALA

La valeur de  $\sigma_{RR}$  représente la variabilité totale de RR, qui est effectivement très importante. Une telle grande valeur nous ramène à une nécessité absolue d'une compilation des taux de réparations post-sismique après chaque évènement important, ceci dit que la collecte de ces données dans des bases de données ouvertes est requise; avec un format prédéfini permettant d'associer les métadonnées (input) pertinentes du paramètre d'intensité de mouvement du sol et un indice correspondant "de qualité".

### 4.2.3 Méthode de calcul du $\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}$

Supposons que l'on dispose de deux modèles GMPE qui donnent respectivement le PGA et le PGV avec leurs variabilités associées  $\sigma_{\log(PGA)}$  ou  $\sigma_{\log(PGV)}$ . On souhaite calculer le  $\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}$ . (Bradley 2012).

On a

$$\log(PGV^2/PGA) = 2\log(PGV) - \log(PGA) \quad (4-5)$$

Par définition:

$$\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}^2 = E \left[ \left( \log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right) - \overline{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)} \right)^2 \right] \quad (4-6)$$

Donc :

$$\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}^2 = E \left[ \left( 2\log(PGV) - \log(PGA) - 2\overline{\log(PGV)} + \overline{\log(PGA)} \right)^2 \right]$$

$$\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}^2 = E \left[ \left( 2(\log(PGV) - \overline{\log(PGV)}) - (\log(PGA) - \overline{\log(PGA)}) \right)^2 \right]$$

$$\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}^2 = E \left[ 4(\log(PGV) - \overline{\log(PGV)})^2 \right] + E \left[ (\log(PGA) - \overline{\log(PGA)})^2 \right] - 4E \left[ (\log(PGV) - \overline{\log(PGV)})(\log(PGA) - \overline{\log(PGA)}) \right]$$

$$\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}^2 = 4E\left[(\log(PGV) - \overline{\log(PGV)})^2\right] + E\left[(\log(PGA) - \overline{\log(PGA)})^2\right] - 4E\left[(\log(PGV) - \overline{\log(PGV)})(\log(PGA) - \overline{\log(PGA)})\right]$$

Par conséquent

$$\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)} = \sqrt{4\sigma_{\log(PGV)}^2 + \sigma_{\log(PGA)}^2 - 4r_{\log(PGV),\log(PGA)}\sigma_{\log(PGV)}\sigma_{\log(PGA)}} \quad (4-7)$$

Où

$r_{\log(PGV),\log(PGA)}$  est le coefficient de corrélation entre les variables  $\log(PGV)$  et  $\log(PGA)$ .

#### 4.2.4 Modèles correspondants de GMPE

Les GMPE disponibles dans la littérature sont nombreuses (Boore et Atkinson 2008) (Douglas 2011), nous avons choisi les modèles suivants :

##### 4.2.4.1 Modèle d'Akkar et Bommer (Modèle#1)

Le modèle d'Akkar et Bommer donne le PSA Equation (2-3) et le PGV Equation (2-4). Pour le calcul du PGA on prend la valeur de la période pratiquement nulle. Les incertitudes associées à ce modèle sont respectivement

$$\sigma_{\log(PGA)} = 0.2793 \quad (4-8)$$

$$\sigma_{\log(PGV)} = 0.2781 \quad (4-9)$$

On considère que  $r_{\log(PGV),\log(PGA)} = 0.5$ . Par conséquent la variabilité du paramètre sera :

$$\sigma_{\log(PGV^2/PGA)} = 0.4824 \quad (4-10)$$

#### 4.2.4.2 Approche Neuronale (Modèle#2)

L'approche neuronale a été utilisée par (Derras, Bard et al. 2014) pour déterminer des GMPE. Cette approche a permis de mettre en place deux GMPE : l'une pour le PGA et l'autre pour le PGV. Les deux modèles sont entachés d'incertitudes estimées comme suit :

$$\sigma_{\log(PGA)} = 0.309 \quad (4-11)$$

$$\sigma_{\log(PGV)} = 0.298 \quad (4-12)$$

Ce qui en vertu de l'équation (4-7) et avec un coefficient de corrélation de 0.5 donne la valeur suivante :

$$\sigma_{\log(PGV^2/PGA)} = 0.522 \quad (4-13)$$

Nous estimons que cette valeur peut être réduite si nous utilisons l'approche neuronale développée par (Derras, Bard et al. 2014) était directement appliquée pour le paramètre  $\log(PGV^2/PGA)$ . Cette démarche nous a permis de mettre en place un GMPE qui donne directement les valeurs du  $\log(PGV^2/PGA)$ . L'équation (4-14) donne l'incertitude associée à cette variable.

$$\sigma_{\log(PGV^2/PGA)} = 0.3760 \quad (4-14)$$

En comparant les équations (4-13) et (4-14), on remarque clairement que l'incertitude avec la méthode neuronale qui donne directement la valeur  $\log(PGV^2/PGA)$  est inférieure à celle qui donne séparément les valeurs  $\log(PGV)$  et  $\log(PGV)$ . Par conséquent, il est plus fiable de travailler avec le modèle neuronale qui donne directement la valeur du  $PGV^2/PGA$ .

#### 4.2.4.3 Modèle Hybride 1 (Modèle#3)

Comme détaillé dans la partie suivante, l'estimation de  $\sigma_{RR}$  s'avère très aléatoire; pour cela on a eu recours à l'établissement de deux autres équations basées sur une corrélation entre  $\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)$  et  $\log(PGV)$

En tenant en compte la base de données NGA2 (Campbell et Bozorgnia 2014), cette équation prend la forme de :

$$\log(PGV^2/PGA) = \alpha_1 + \beta_1 \log(PGV) + \varepsilon_{\sigma_{NGA2}} \quad (4-15)$$

Nous avons choisi une autre alternative qui se base sur l'association de n'importe quelle équation de prédiction de mouvement de sol donnant soit le PGA ou le PGV, dans le but d'avoir un modèle hybride qui pourra fournir une estimation directe du GMP voulu le «  $PGV^2/PGA$  ». Dans un but de cohérence nous avons choisi une fois de plus le modèle d'(Akkar et Bommer 2010) comme GMPE de base pour justement construire le modèle hybride nommé modèle#3 qui utilise le PGV comme GMP pour l'estimation de nouveau GMP "  $PGV^2/PGA$  " .

L'incertitude totale résultante sur l'ensemble des étapes considérées à savoir l'utilisation du GMPE et la corrélation de la base de données NGA2 est récapitulée dans la valeur suivante:

$$\sigma_{\log(PGV^2/PGA)} = \sqrt{\sigma_{\log(PGV)}^2 + \sigma_{1NGA}^2} = 0.4824 \quad (4-16)$$

#### 4.2.4.4 Modèle Hybride 2 (Modèle#4)

Pour le modèle hybride n°2, la stratégie adoptée dans la section 4.2.4.3 est reprise ici, en considérant le PGA au lieu du PGV comme paramètre d'input.

Par conséquent on obtient :

$$\sigma_{\log(PGV^2/PGA)} = \sqrt{\sigma_{\log(PGA)}^2 + \sigma_{2NGA}^2} = 0.7400 \quad (4-17)$$

#### 4.2.5 Estimation des poids

Les poids décrits dans l'équation (3-9) sont dans la présente section. Le plus grand poids est affecté au modèle qui présente la plus petite variabilité, aussi dans le même raisonnement, le plus petit poids est destiné à la plus grande variabilité. Pour cela les valeurs considérées sont les suivantes :

$$\sigma_{\log(PGV^2/PGA)} = \begin{cases} 0.4824 \\ 0.3760 \\ 0.4200 \\ 0.7400 \end{cases}, \quad \text{donc} \quad \begin{cases} \omega_1 = 0.15 \\ \omega_2 = 0.50 \\ \omega_3 = 0.25 \\ \omega_4 = 0.10 \end{cases} \quad (4-18)$$

Quant aux trois branches associées à la médiane et la médiane plus ou moins l'écart type, nous avons attribué le poids de 0.6 pour la valeur médiane et seulement 0.2 pour les deux autres valeurs, ceci revient les mentionner de la façon suivante:

$$\begin{cases} \mu_1 = 0.2 \\ \mu_2 = 0.6 \\ \mu_3 = 0.2 \end{cases}, \quad \begin{cases} \vartheta_1 = 0.2 \\ \vartheta_2 = 0.6 \\ \vartheta_3 = 0.2 \end{cases} \quad (4-19)$$

Ces poids ne sont pas fixes, ils ne correspondent pas exactement aux valeurs qui devraient être associées à une distribution normale parfaite, par contre, en raison des grandes valeurs d'incertitudes estimées concernant l'évaluation des RR, nous nous sommes intéressés seulement à l'estimation semi-qualitative semi-quantitative de l'incertitude totale issue des différentes étapes d'estimation.

La section suivante présente les résultats de cette dite approche pour des scénarios sismiques. La valeur de  $PGV^2/PGA$  est calculée pour un ensemble de paramètres sismologiques et conditions de site particulier.

La variation de RR en fonction de la distance de Joyner et Boore (Rjb) est présentée dans la Figure 4-6 pour les différents modèles définis précédemment. L'analyse de cette figure révèle que pour certaines valeurs de Rjb, les  $PGV^2/PGA$  estimé pour les quatre modèles ne convergent pas.

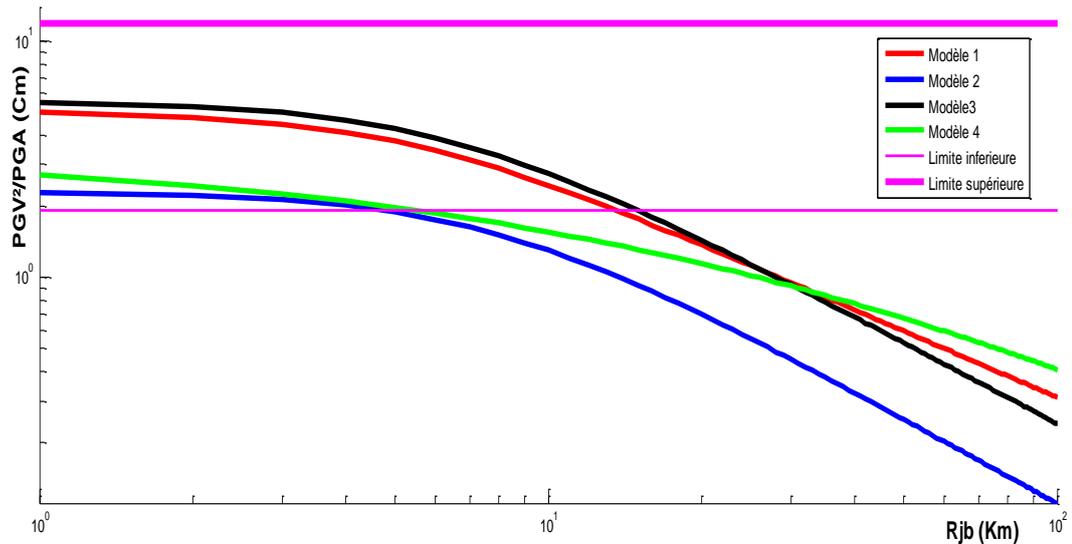


Figure 4-6: Variation du  $PGV^2/PGA$  pour les 4 modèles en fonction de la distance  $R_{jb}$

## 4.2.6 Résultats

### 4.2.6.1 Cas d'étude 1: exemple d'application pour un sol meuble et $R_{jb}=9$ km

Les données de site et sismologiques pour ce cas sont

- ✓  $M=6.5$ ,
- ✓ sol meuble ( $V_{S30} = 250$  m/s),
- ✓  $D=10$  Km,
- ✓  $R_{jb}=10$  Km
- ✓ faille normale.

Les valeurs de  $PGV^2/PGA$  pour les quatre modèles de GMPE sont disponibles dans le Tableau 7, avec les taux de réparations moyens correspondants en utilisant le modèle (Pineda-Porras 2009). Les valeurs de  $PGV^2/PGA$  sont relativement limitées, aux alentours d'un facteur de 2, et connaissons la forme fonctionnelle de l'équation de prédiction des taux de réparations des conduites du modèle (Pineda-Porras 2009), le RR estimé montre seulement les deux valeurs discrètes : 0 et 0.162 rep/km.

Tableau 7 Valeurs médianes des  $PGV^2/PGA$  et leur RR correspondant pour un sol meuble.

Modèle	Modèle#1	Modèle#2	Modèle#3	Modèle#4
Valeur du $PGV^2/PGA$ (cm)	2,654	1,6217	2,99	1,404
RR d'après Pineda (2009)	0,162	0	0,162	0

Dans ce qui suit, on va calculer les valeurs de  $RR^{(m)}$   $m = 1, \dots, 4$  décrites dans la section 3.3.1

Méthode#1 :

$$\frac{\overline{PGV^2}}{PGA} = \frac{2,6540 + 1,6217 + 2,9900 + 1,4040}{4} = 2,16875 \text{ cm} \quad (4-20)$$

L'estimation de RR correspondante (Equation (4-1)) :

$$RR^{(1)} = 0,162 \quad (4-21)$$

Méthode#2:

$$RR^{(2)} = \frac{0,162 + 0 + 0,162 + 0}{4} = 0,081 \quad (4-22)$$

La méthode#3 et la méthode#4 prennent en compte la variabilité de  $PGV^2/PGA$  et du RR, estimé à travers le calcul des valeurs de  $RR_{ijk}$  décrites dans le Chapitre 2. Les détails de la dérivation des valeurs  $RR_{ijk}$  sont précisés dans le Tableau 8. La distribution des 36 ( $4 \times 3 \times 3$ ) valeurs de  $RR_{ijk}$  estimée et présentée dans la Figure 4-7. La distribution statistique est montrée dans la Figure 4-8. On obtient ainsi :

$$RR^{(3)} = 0,135 \quad (4-23)$$

Enfin d'après les poids proposés on obtient :

$$RR^{(4)} = 0,10562$$

(4-24)

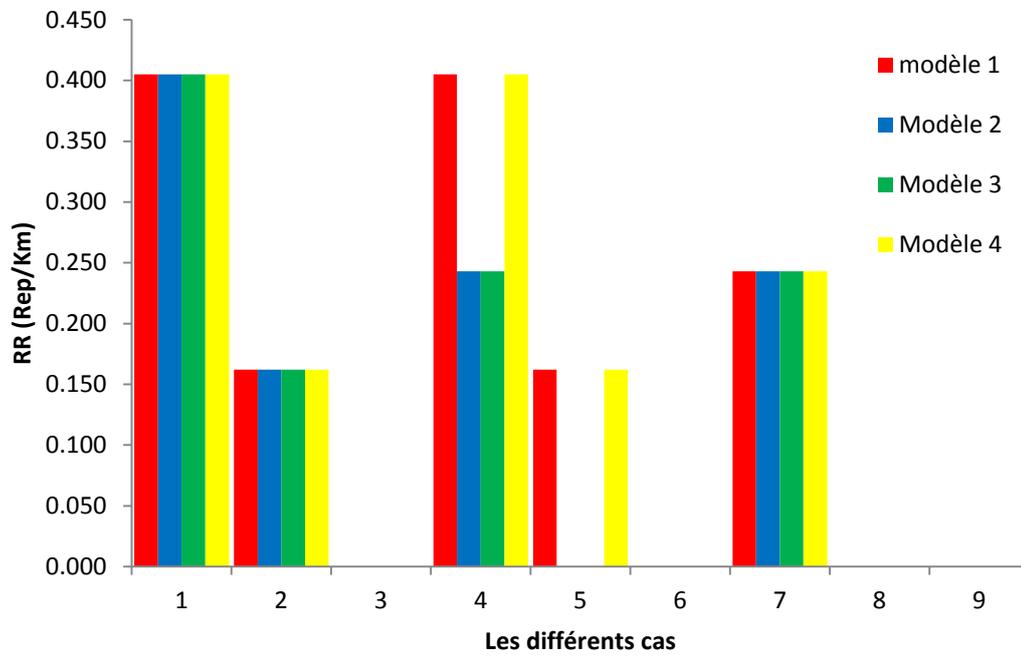


Figure 4-7: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 1

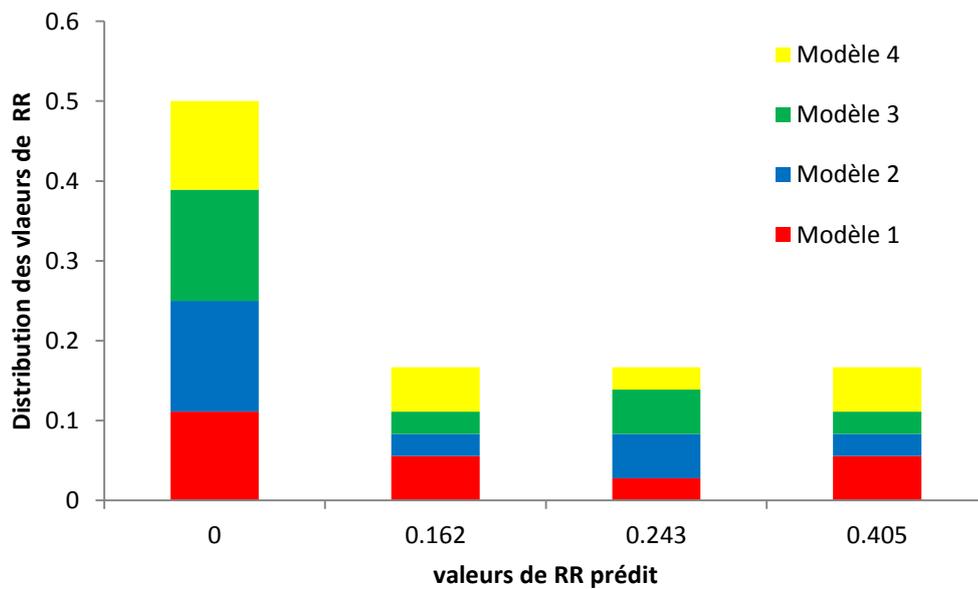


Figure 4-8: Distribution statistique de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 1

Tableau 8 Valeurs de  $RR_{ijk}$ ,  $W_{ijk}$ .

PGV <sup>2</sup> /PGA avec ou sans variabilité		$RR_{ijk}$ avec ou sans variabilité	$W_{ijk}$	$W_{ijk}RR_{ijk}$	
		$RR_{111} = RR_{8,015} + 0,243 = 0,162 + 0,243 = 0,405$	0,405	0,010	0,00405
	$V_{11} = 2,654 \cdot 10^{0,480} = 8,015$	$RR_{112} = RR_{8,015} = 0,162$	0,162	0,030	0,00486
		$RR_{113} = RR_{8,015} - 0,243 = 0,162 - 0,243 = -0,081$	0,000	0,010	0,00000
		$RR_{121} = RR_{2,654} + 0,243 = 0,162 + 0,243 = 0,405$	0,405	0,030	0,01215
$V_1 = 2,654$	$V_{12} = 2,654$	$RR_{122} = RR_{2,654} = 0,162$	0,162	0,090	0,01458
		$RR_{123} = RR_{2,654} - 0,243 = 0,162 - 0,243 = -0,081$	0,000	0,030	0,00000
		$RR_{131} = RR_{0,879} + 0,243 = 0 + 0,243$	0,243	0,010	0,00243
	$V_{13} = 2,654 \cdot 10^{-0,480} = 0,879$	$RR_{132} = RR_{0,879} = 0$	0,000	0,030	0,00000
		$RR_{133} = RR_{0,879} - 0,243 = -0,243$	0,000	0,010	0,00000
		$RR_{211} = RR_{3,855} + 0,243 = 0,162 + 0,243 = 0,405$	0,405	0,020	0,00810
	$V_{21} = 1,6217 \cdot 10^{0,376} = 3,855$	$RR_{212} = RR_{3,855} = 0,162$	0,162	0,060	0,00972
		$RR_{213} = RR_{3,855} - 0,243 = 0,162 - 0,243 = -0,081$	0,000	0,020	0,00000
		$RR_{221} = RR_{1,6217} + 0,243 = 0 + 0,243$	0,243	0,060	0,01458
$V_2 = 1,6217$	$V_{22} = 1,6217$	$RR_{222} = RR_{1,6217} = 0$	0,000	0,180	0,00000
		$RR_{223} = RR_{1,6217} - 0,243 = 0 - 0,243$	0,000	0,060	0,00000
		$RR_{231} = RR_{0,682} + 0,243 = 0 + 0,243$	0,243	0,020	0,00486
	$V_{23} = 1,6217 \cdot 10^{-0,376} = 0,682$	$RR_{232} = RR_{0,682} = 0$	0,000	0,060	0,00000
		$RR_{233} = RR_{0,682} - 0,243 = -0,243$	0,000	0,020	0,00000
		$RR_{311} = RR_{7,865} + 0,243 = 0,162 + 0,243 = 0,405$	0,405	0,006	0,00243
	$V_{31} = 2,9900 \cdot 10^{0,420} = 7,865$	$RR_{312} = RR_{7,865} = 0,162$	0,162	0,018	0,00292
		$RR_{313} = RR_{7,865} - 0,243 = 0,162 - 0,243 = -0,081$	0,000	0,006	0,00000
		$RR_{321} = RR_{2,9900} + 0,243 = 0,162 + 0,243 = 0,405$	0,405	0,018	0,00729
$V_3 = 2,990$	$V_{32} = 2,9900$	$RR_{322} = RR_{2,9900} = 0,162$	0,162	0,054	0,00875
		$RR_{323} = RR_{2,9900} - 0,243 = 0 - 0,243$	0,000	0,018	0,00000
		$RR_{331} = RR_{1,137} + 0,243 = 0 + 0,243$	0,243	0,006	0,00146
	$V_{33} = 2,9900 \cdot 10^{-0,420} = 1,137$	$RR_{332} = RR_{1,137} = 0$	0,000	0,018	0,00000
		$RR_{333} = RR_{1,137} - 0,243 = -0,243$	0,000	0,006	0,00000
		$RR_{411} = RR_{7,716} + 0,243 = 0,162 + 0,243 = 0,405$	0,405	0,004	0,00162
	$V_{41} = 1,404 \cdot 10^{0,740} = 7,716$	$RR_{412} = RR_{7,716} = 0,162$	0,162	0,012	0,00194
		$RR_{413} = RR_{7,716} - 0,243 = 0,162 - 0,243 = -0,081$	0,000	0,004	0,00000
		$RR_{421} = RR_{1,404} + 0,243 = 0 + 0,243$	0,243	0,012	0,00292
$V_4 = 1,404$	$V_{42} = 1,404$	$RR_{422} = RR_{1,404} = 0$	0,000	0,036	0,00000
		$RR_{423} = RR_{1,404} - 0,243 = 0 - 0,243$	0,000	0,012	0,00000
		$RR_{431} = RR_{0,255} + 0,243 = 0 + 0,243$	0,243	0,004	0,00097
	$V_{43} = 1,404 \cdot 10^{-0,740} = 0,255$	$RR_{432} = RR_{0,255} = 0$	0,000	0,012	0,00000
		$RR_{433} = RR_{0,255} - 0,243 = -0,243$	0,000	0,004	0,00000

#### 4.2.6.2 Cas d'étude 2: exemple d'application pour un sol rocheux et $R_{jb}=9$ km

Les données de site et sismologiques pour ce cas sont :

- ✓  $M=6.5$ ,
- ✓ sol rocheux ( $V_{S30} = 750$  m/s),
- ✓  $D=10$  Km,
- ✓  $R_{jb}=10$  Km
- ✓ faille normale.

Les valeurs de  $PGV^2/PGA$  pour les quatre modèles de GMPE sont disponibles dans le Tableau 9, avec les taux de réparations moyennes correspondantes en utilisant le modèle (Pineda-Porras 2009).

Tableau 9 Valeurs médianes des  $PGV^2/PGA$  et leur RR correspondant pour un sol rocheux.

Modèle	Modèle#1	Modèle#2	Modèle#3	Modèle#4
Valeur du $PGV^2/PGA$ (cm)	1,815	0,639	2,2	1,172
RR d'après Pineda (2009)	0	0	0,162	0

Dans ce qui suit on va calculer les valeurs de  $RR^{(m)}$   $m = 1, \dots, 4$  décrites dans la section 3.3.1

Méthode#1 :

$$\frac{\overline{PGV^2}}{PGA} = \frac{1,815 + 0,639 + 2,2 + 1,172}{4} = 1,4565\text{cm} \quad (4-25)$$

$$RR^{(1)} = 0,00 \quad (4-26)$$

Méthode#2:

$$RR^{(2)} = \frac{0 + 0 + 0,162 + 0}{4} = 0,054 \quad (4-27)$$

$$RR^{(3)} = 0,117 \tag{4-28}$$

$$RR^{(4)} = 0,073 \tag{4-29}$$

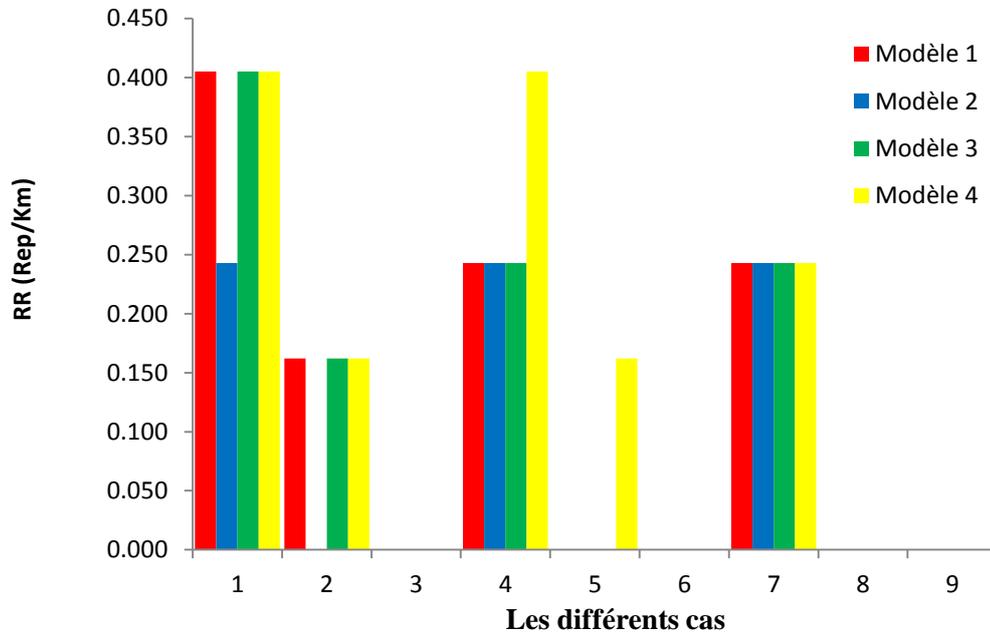


Figure 4-9: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 2

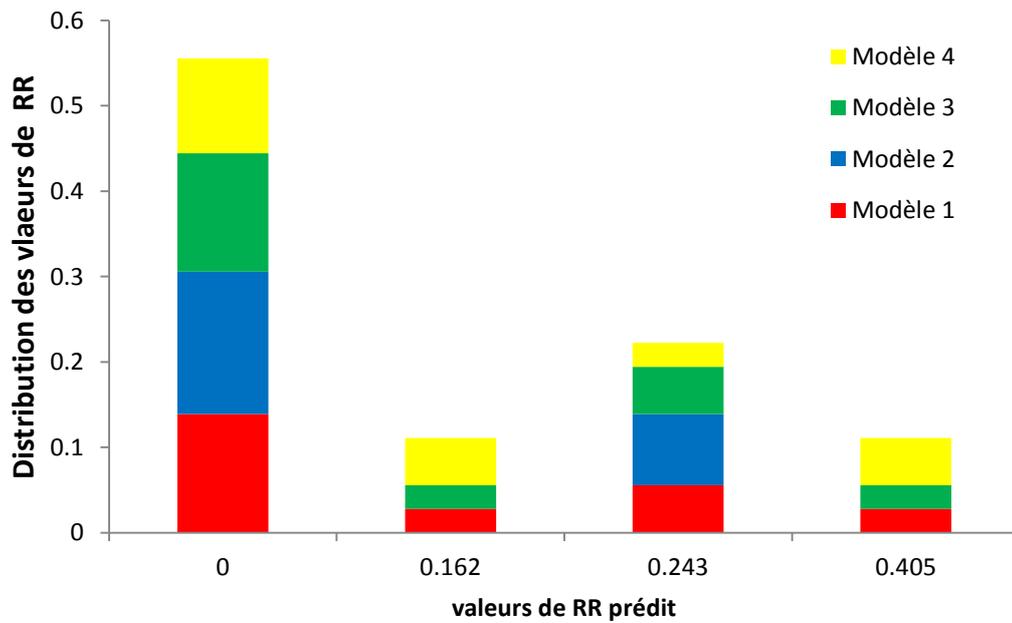


Figure 4-10: Distribution statistique de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 2

#### 4.2.6.3 Discussion des résultats

L'estimation des RR, à savoir  $RR^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  pour les deux cas d'étude 1 et 2 est récapitulée dans les tableaux Tableau 10-Tableau 11.

Tableau 10 Valeurs de  $RR^{(m)}$ ,  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  (cas sol meuble).

$RR^{(m)}$	$RR^{(1)}$	$RR^{(2)}$	$RR^{(3)}$	$RR^{(4)}$
	0,162	0,081	0,135	0,106
$\Delta^{(m)}$	0	0,0575	0,01163	0,00535

Tableau 11 Valeurs de  $RR^{(m)}$ ,  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  (cas sol rocheux).

$RR^{(m)}$	$RR^{(1)}$	$RR^{(2)}$	$RR^{(3)}$	$RR^{(4)}$
	0,00	0,054	0,117	0,073
$\Delta^{(m)}$	0	0,00239	0,01044	0,00257

Pour un sol meuble (Cas d'étude 1) :

$$RR^{(2)} < RR^{(4)} < RR^{(3)} < RR^{(1)} \quad (4-30)$$

Pour un sol rocheux (Cas d'étude 2):

$$RR^{(1)} < RR^{(2)} < RR^{(4)} < RR^{(3)} \quad (4-31)$$

Les équations (4-30) et (4-31) montrent clairement que le  $RR^{(4)}$  se place dans les deux cas d'études dans une position intermédiaire, alors que les autres estimations,  $RR^{(c)}$ ,  $c = 1, 2, 3$  sont soit dans des positions extrêmes ou médiane. Ainsi pour le cas d'étude 1  $RR^{(4)}$  se situe dans le Rang 2 alors que pour le cas d'étude 2 il se situe dans le Rang 3. Ce résultat préliminaire indique que cette moyenne pondérée du RR estimé est relativement la plus stable car c'est la moyenne des moyennes.

Nous avons ensuite proposé de mesurer le degré de confiance de ces quatre valeurs par le biais de l'écart type (Equations (3-13), (3-14) et (3-15)).

Pour un sol meuble :

$$\Delta^{(4)} < \Delta^{(3)} < \Delta^{(2)} \quad (4-32)$$

Pour un sol rocheux:

$$\Delta^{(3)} < \Delta^{(4)} < \Delta^{(2)} \quad (4-33)$$

En se servant de ces dernières, les relations suivantes montrent que la méthode#4 dispose de la plus petite valeur et valeur intermédiaire de l'écart type (Equations (4-32)-(4-33)).

Donc comme résultat préliminaire, on conclut que la méthode#4 est la plus représentative parmi les méthodes mises en place. Il est important de dire que ces résultats ont été obtenus à partir de deux cas d'études seulement. Pour cela il est impossible de généraliser cette conclusion à partir d'un seul cas d'étude ; ainsi la comparaison entre divers  $RR^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  et  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 2, 3, 4$  estimés doit être étendue en un plus grand nombre de cas. La section suivante est consacrée à cette fin.

#### **4.2.6.4 Cas généralisé**

Afin de confirmer (ou infirmer) les résultats obtenus dans la section 4.2.6.3, nous avons appliqué la procédure pour plusieurs cas.

Pour cela nous avons considéré un total de 125 cas correspondant à 5 magnitudes différentes (5.5, 6.0, 6.5, 7.0 et 7.5), différentes distances  $R_{JB}$  (5, 10, 15, 25, et 50 km), et 5 différentes valeurs de  $V_{S30}$  (200, 250, 300, 500 et 750 m/s). Pour chaque cas,  $RR^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  ont été calculés. Comme il n'y a aucune référence des estimations qui peut être considéré comme un repère de certitude, chaque  $RR^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  estimé et comparé avec la moyenne des quatre estimations.

L'ensemble des résultats est répertorié dans la Figure 4-11. Parmi les quatre méthodes proposées, on remarque clairement que la méthode#4 est celle qui se rapproche de la moyenne, tandis que l'estimation la plus éloignée est bien la méthode#1.

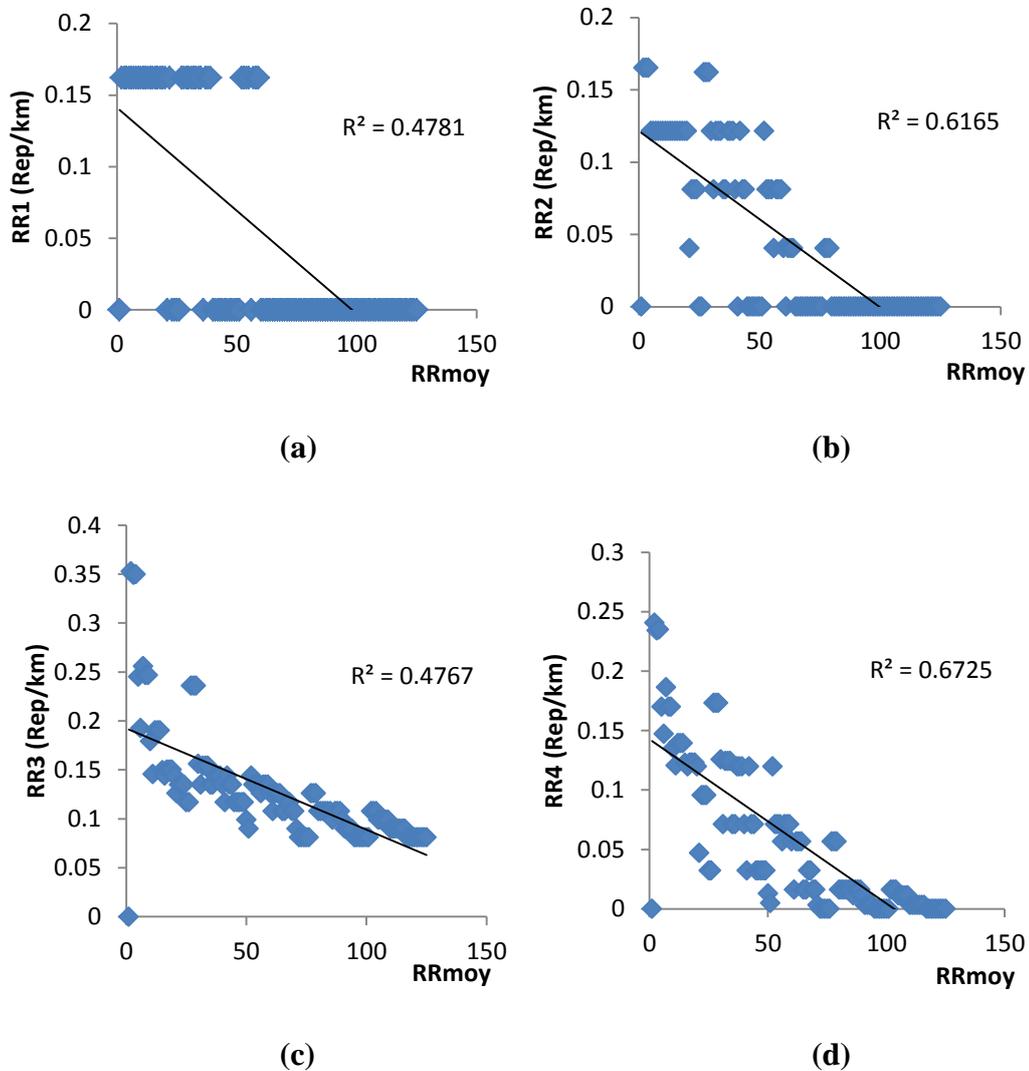


Figure 4-11: Résumé de la comparaison de 125 cas entre différent RR pour chaque modèle (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4

Dans le but de révéler une surestimation ou sous-estimation pour chaque méthode#i, une étude statistique du rang concernant les quatre estimations a été prise en compte. Les résultats sont mentionnés dans la Figure 4-12. Ces histogrammes correspondent pour chaque méthode, les proportions des cas quand ils se placent aux rangs à savoir la plus grande estimation de RR (rang1), estimation

moyenne de RR (rang 2 et 3) ou la plus petite estimation de RR (rang 4). La méthode #1 expose une tendance claire de la sous-estimation de RR (puisque les rangs 3 et 4 sont les prédominants). Tandis que sur le côté opposé, la méthode#3 surestime les taux de réparations (rang 1 prédominant). Pour les approches 2 et 4 présente une estimation intermédiaire de RR. La conclusion simple et directe est bien de dire que la méthode#2 et la méthode#4 devraient être favorisées (préférées) en terme d'estimations médianes RR, et que la méthode#4 est celle qui fournit l'estimation avec la plus petite valeur d'incertitude.

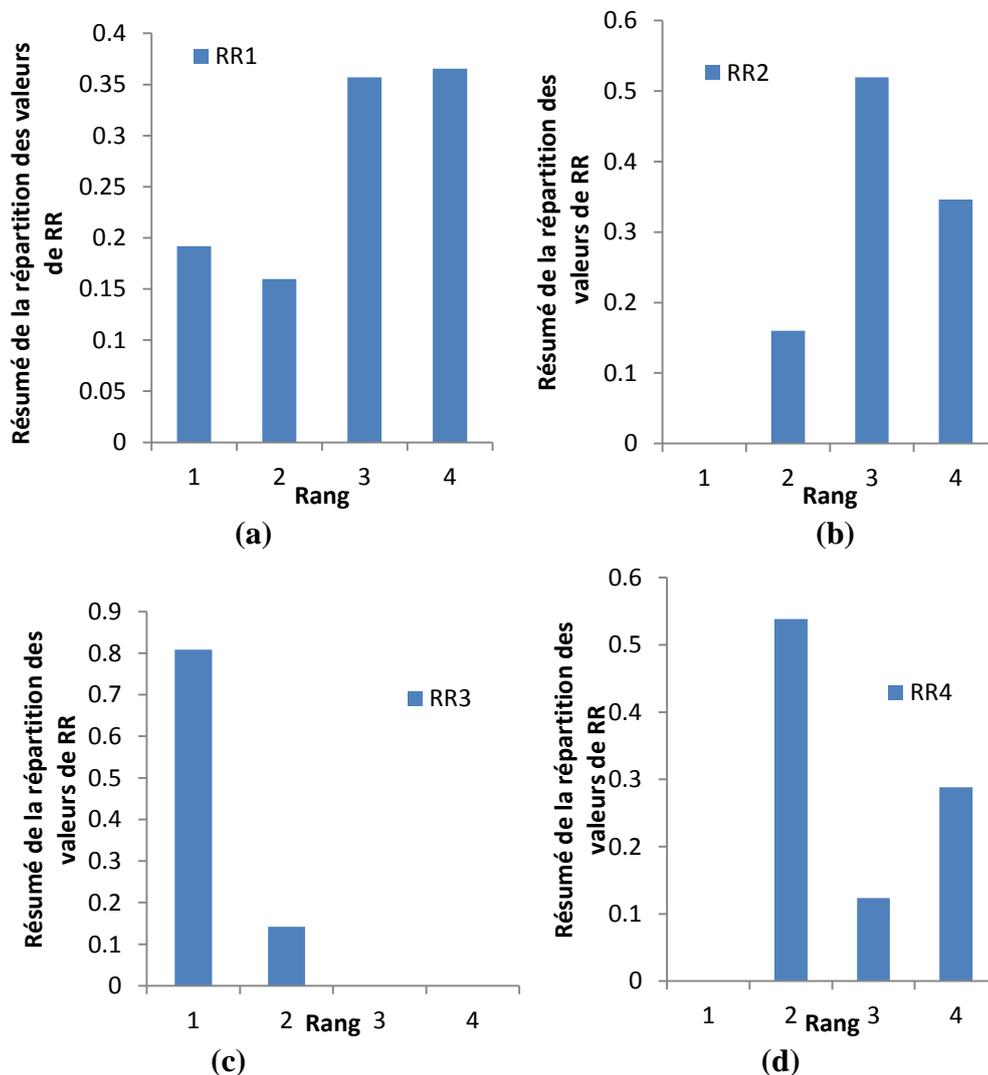


Figure 4-12: Distribution des rangs entre les 4 méthodes pour l'ensemble de 125 cases. (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4

Comme mentionné précédemment, les écarts types  $\Delta^{(m)}, m = 2,3,4$  ont été évalués pour un sol meuble et un sol rocheux (voir section 4.2.6.3). Pour le présent cas ces valeurs sont calculées pour les 125 cas. Les valeurs de  $\Delta_M^{(m)}, m = 2,3,4$  sont calculées comme suit:

$$\Delta_M^{(m)} = \sqrt{\frac{1}{125} \sum_{j=1}^{125} (\Delta_{(j)}^{(m)})^2} \quad (4-34)$$

Avec  $\Delta_{(j)}^{(m)}$  qui représente l'incertitude du  $j^{\text{ème}}$  cas. L'indice  $M$  est introduit pour signifier que cette valeur est une moyenne quadratique.

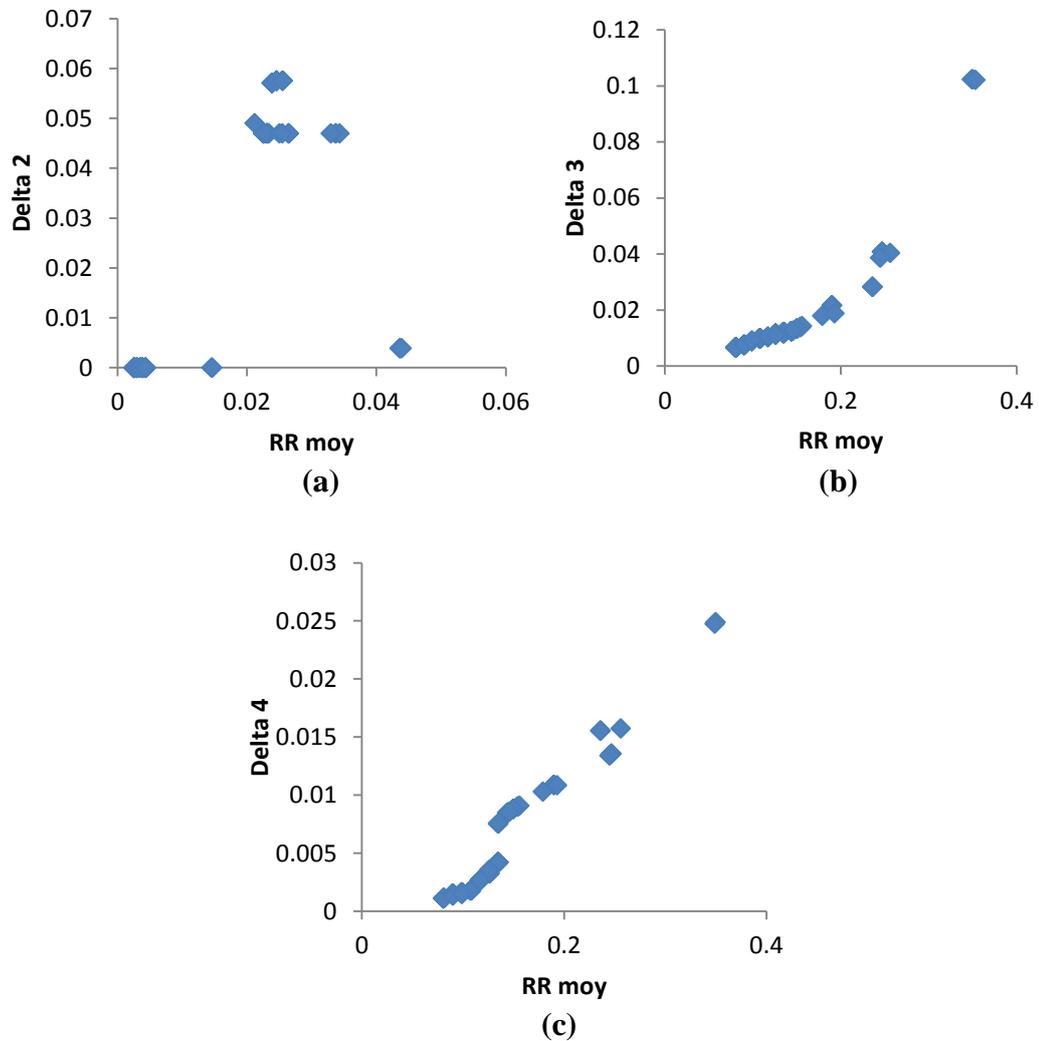


Figure 4-13: Comparaison de  $\Delta_{(j)}^{(m)} \equiv \Delta^{(m)}$  pour les 125 cas entre différents RR de chaque méthode : (a) Méthode#2; (b) Méthode#3; (c) Méthode#4

Le Tableau 12 montre que la valeur de  $\Delta_j^{(4)}$  est la plus petite, ce qui annonce que l'incertitude de  $RR^{(4)}$  n'est pas importante.

Tableau 12 Valeurs de  $\Delta_M^{(m)}$ ,  $m = 2,3,4$ .

$\Delta_M^{(2)}$	$\Delta_M^{(3)}$	$\Delta_M^{(4)}$
0,0362	0,0207	0,0069

#### 4.2.7 Conclusion

A la lumière de ce qui précède, il s'avère que la valeur de  $RR^{(4)}$  est globalement la plus stable car elle se situe au milieu des autres valeurs de RR et présente aussi la plus faible incertitude ce qui fortifie son homogénéité. Nous allons dans ce qui suit voir si cette conclusion reste valable pour un autre cas d'étude à travers le modèle de Piccinelli.

### 4.3 Cas du modèle de Piccinelli

#### 4.3.1 Modèle de Piccinelli

Le modèle de (Piccinelli et Krausmann 2013) permet d'obtenir le taux de réparations en fonction du PGV (mesuré en pouce/s) à travers la relation suivante :

$$RR = 0.00108PGV^{1.173} \tag{4-35}$$

#### 4.3.2 Estimation du $\sigma_{RR}$

Le calcul de  $\sigma_{RR}$  nécessite la comparaison des valeurs observés disponible dans la base de donnée de ALA et les valeurs prédit obtenus par l'application de l'équation (4-35) avec les valeurs de PGV de la base de donnée de ALA. On note que seulement 46 observations sont mentionnées dans la Figure 4-14 qui donne le taux de réparation prédit en fonction du taux de réparation observé. La Figure 4-15 représente la variation des taux de réparations prédit en fonction de RR mesuré.

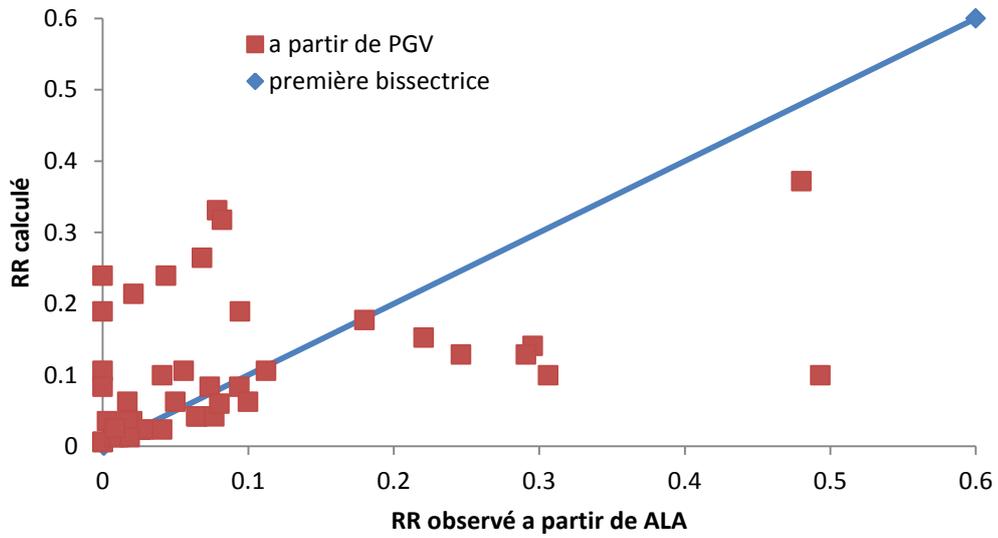


Figure 4-14: Comparaison entre le RR prédit et le RR observé pour les données de ALA

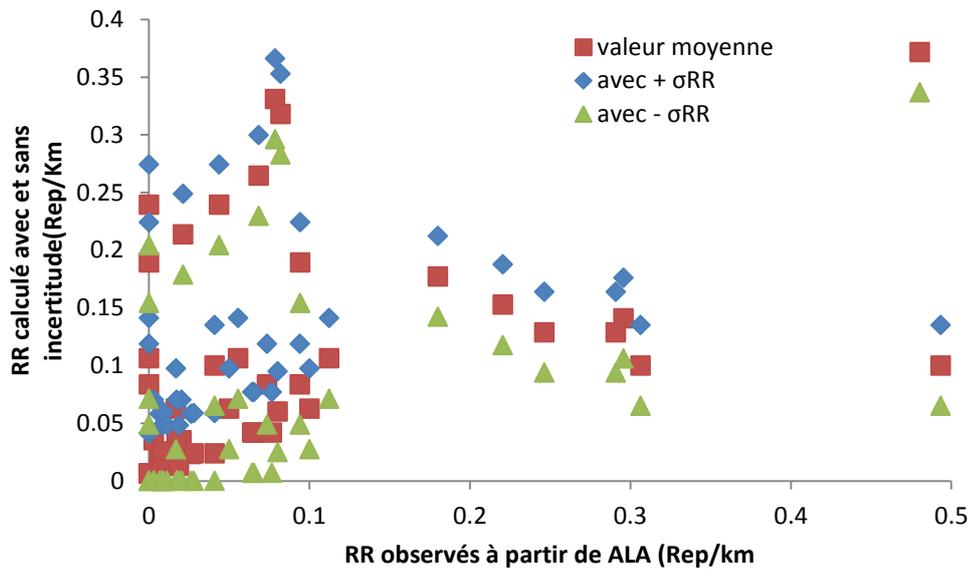


Figure 4-15: Comparaison des taux de réparations prédits en fonction de RR observés avec plus ou moins l'incertitude pour les valeurs observées de ALA

### 4.3.3 Modèles correspondants de GMPE

#### 4.3.3.1 Modèle d'Akkar et Bommer (Modèle#1)

Le modèle d'Akkar et Bommer donne le PGV Equation (2-4) avec l'incertitude associée

$$\sigma_{\log(PGV)} = 0.2781 \quad (4-36)$$

#### 4.3.3.2 Méthode Neuronale Derras et al. (2014) (Modèle#2)

L'approche neuronale a été utilisée par (Derras, Bard et al. 2014) pour déterminer des GMPE. Cette approche a permis de mettre en place deux GMPE : l'une pour le PGA et l'autre pour le PGV. Dans le présent cas on prend celle qui donne le PGV avec l'incertitude associée

$$\sigma_{\log(PGV)} = 0.298 \quad (4-37)$$

#### 4.3.3.3 Modèle de Sabetta & Pugliese (1996) (Modèle#3)

Fabio Sabetta et Antonio Pugliese, (Sabetta ety Pugliese 1996), ont proposé la GMPE suivante :

$$\text{Log}_{10}(PGV) = a + b.M + c.\text{Log}_{10}(R^2 + h^2)^{1/2} + e_1.S_1 + e_2.S_2 \pm \sigma \quad (4-38)$$

Avec :

-M est la magnitude de moment de 4.6 à 6.8.

-La distance épacentrale  $R_{JB}$  de 1.5 a 110 km.

-Type de sol :  $S_1$  et  $S_2$  sont introduits pour décrire l'effet de site, ils dépendent de la valeur de  $V_{S30}$ .

- Sol peu profond (meuble):  $S_1 = 1$  et  $S_2=0$ ,

- Sol profond:  $S_1 = 0$  et  $S_2=1$ ,
- Sol Rocheux :  $S_1 = 0$  et  $S_2=0$ .

Pour les constantes et l'écart type, se référer au Tableau 13.

Tableau 13 Valeurs des coefficients de l'équation (4-38)

a	b	c	e <sub>1</sub>	e <sub>2</sub>	h	σ
-0.710	0.455	-1	0.133	0.133	3.6	0.215

En ce qui concerne la variabilité des PGV moyens pour les modèles proposés, nous avons remarqué que pour un scénario particulier : M=6.5, sol meuble, profondeur de 10 km avec une faille normale ; les valeurs de PGV présentent une grande différence (Figure 4-16).

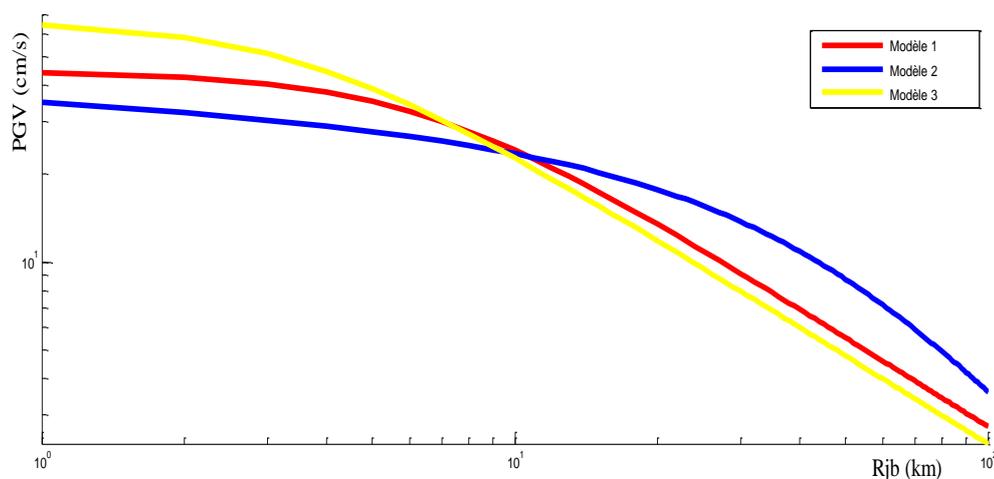


Figure 4-16: Comparaison de l'estimation de PGV pour les trois modèles.

#### 4.3.4 Estimation des poids

La même démarche utilisée dans la section 4.2.5 sera reprise à la seule exception que le nombre de poids est de 3 car nous avons trois modèles. Pour cela les valeurs considérées sont les suivantes:

$$\sigma_{\log(\text{PGV})} = \begin{cases} 0.278 \\ 0.298 \\ 0.215 \end{cases}, \quad \text{Donc} \quad \begin{cases} \omega_1 = 0.3 \\ \omega_2 = 0.3 \\ \omega_3 = 0.4 \end{cases} \quad (4-39)$$

Quant aux trois branches associées à la médiane et la médiane plus ou moins l'écart type, nous avons attribué le poids de 0.6 pour la valeur médiane et seulement 0.2 pour les deux autres valeurs :

$$\begin{cases} \mu_1 = 0.2 \\ \mu_2 = 0.6 \\ \mu_3 = 0.2 \end{cases}, \quad \begin{cases} \vartheta_1 = 0.2 \\ \vartheta_2 = 0.6 \\ \vartheta_3 = 0.2 \end{cases} \quad (4-40)$$

### 4.3.5 Résultats

#### 4.3.5.1 Cas d'étude 1: exemple d'application pour un sol meuble et Rjb=10 km

Les données de site et sismologiques pour ce cas sont

- ✓ M=6.5,
- ✓ sol meuble ( $V_{S30} = 200$  m/s),
- ✓ D=10 Km,
- ✓ Rjb=10 Km
- ✓ faille normale.

Le Tableau 14 résume les valeurs de PGV pour les trois modèles de GMPE avec leur taux de réparations moyens.

Tableau 14 valeurs médianes des PGV et leur RR correspondant pour un sol meuble

Modèles	Modèle#1	Modèle#2	Modèle#3
PGV ( pouce/s)	9.223	9.446	8.896
RR ( Rep/km)	0.0487	0.0501	0.0467

Les valeurs  $RR^{(m)}$   $m = 1, \dots, 4$  sont obtenues comme suit :

Méthode#1 :

$$\overline{PGV} = \frac{9.223 + 9.446 + 8.896}{3} = 9.188 \text{ pouce/s} \quad (4-41)$$

L'estimation de RR correspondante (Equation (4-35)) :

$$RR^{(1)} = 0,0485 \text{ rep/km} \quad (4-42)$$

Méthode#2:

$$RR^{(2)} = \frac{0.0467 + 0.0501 + 0.0487}{3} = 0,0486 \text{ rep/km} \quad (4-43)$$

$$RR^{(3)} = 0,0771 \quad (4-44)$$

Enfin d'après les poids proposés on obtient :

$$RR^{(4)} = 0,0661 \quad (4-45)$$

L'utilisation de seulement 3 modèles de GMPE nous ont permis de donner l'estimation de 27 valeurs de RR, contrairement au cas précédent (voir section 4.2) pour lequel on a utilisé 4 modèles de GMPE. La distribution des 27 (3x3x3) valeurs de  $RR_{ijk}$ ,  $(i, j, k) = (1,2,3)$  est présentée dans la Figure 4-17.

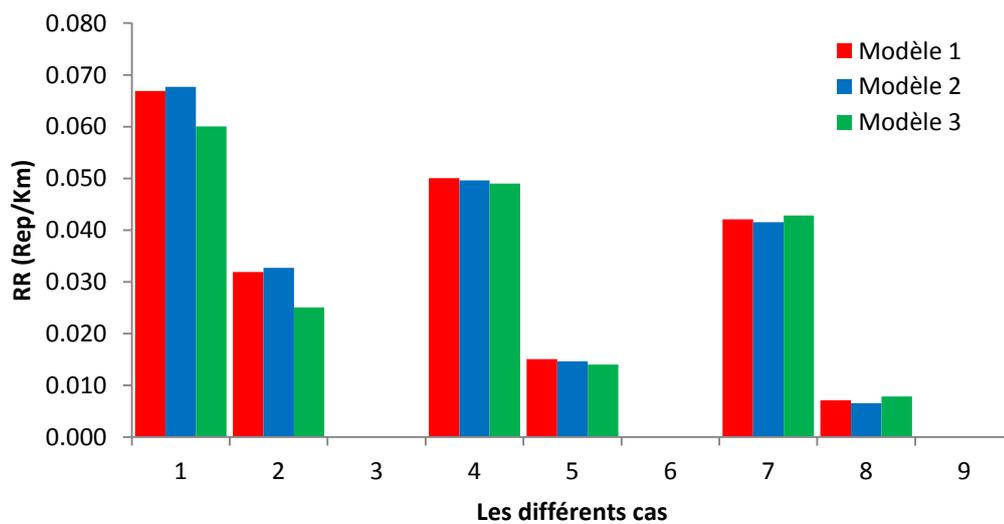


Figure 4-17: Résultats obtenus à travers les 27 valeurs de RR pour le cas d'étude 1.

#### 4.3.5.2 Cas d'étude 2: exemple d'application pour un sol rocheux et $R_{jb}=10$ km

Les données de site et sismologiques pour ce cas sont

- ✓  $M=6.5$ ,
- ✓ sol rocheux ( $V_{S30} = 750$  m/s),
- ✓  $D=10$  Km,
- ✓  $R_{jb}=10$  Km
- ✓ faille normale.

Le Tableau 15 résume les valeurs de PGV pour les trois modèles de GMPE avec leurs taux de réparations moyens.

Tableau 15 valeurs médianes des PGV et leur RR correspondant pour un sol rocheux.

Modèles	Modèle 1	Modèle 2	Modèle 3
PGV ( pouce/s)	6.549	5.911	5.352
RR (Rep/km)	0.0326	0.0289	0.0257

Les valeurs  $RR^{(m)}$   $m = 1, \dots, 4$  sont obtenues comme suit :

Méthode#1 :

$$\overline{PGV} = \frac{6.549 + 5.911 + 5.352}{3} = 5.937 \text{ pouce/s} \quad (4-46)$$

L'estimation de RR correspondante (Equation (4-35)) :

$$RR^{(1)} = 0.0291 \text{ rep/km} \quad (4-47)$$

Méthode#2:

$$RR^{(2)} = \frac{0.0326 + 0.0289 + 0.0257}{3} = 0.0291 \text{ rep/km} \quad (4-48)$$

$$RR^{(3)} = 0,0617 \quad (4-49)$$

Enfin d'après les poids proposés on obtient :

$$RR^{(4)} = 0,0493 \quad (4-50)$$

La distribution des 27 (3x3x3) valeurs de  $RR_{ijk}, (i, j, k) = (1,2,3)$  est présentée dans la Figure 4-18.

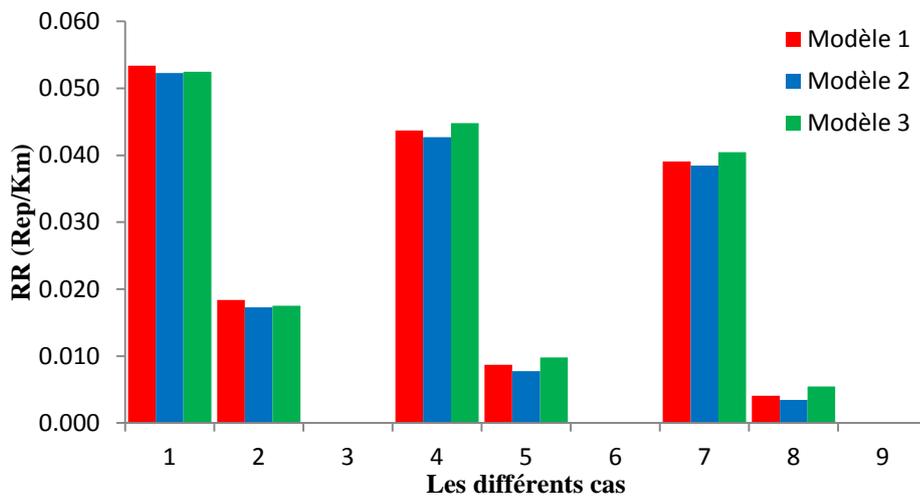


Figure 4-18: Résultats obtenus à travers les 27 valeurs de RR pour le cas d'étude 2.

#### 4.3.5.3 Discussion des résultats

L'estimation des taux de réparations pour les deux types de sol, peut être classée de la manière suivante :

Pour un sol meuble :

$$RR^{(1)} < RR^{(2)} < RR^{(4)} < RR^{(3)} \quad (4-51)$$

Pour un sol rocheux :

$$RR^{(1)} < RR^{(2)} < RR^{(4)} < RR^{(3)} \quad (4-52)$$

L'estimation de  $RR^{(4)}$  pour les deux types de sol (sol meuble et sol rocheux) reste au milieu des autres estimations, tandis que le  $RR^{(1)}, RR^{(2)}, RR^{(3)}$  peuvent être les plus grandes ou les plus petites estimations. Ce résultat suggère une fois de plus, que cette moyenne pondérée du RR estimé est plus précise que les autres.

Les résultats obtenus montrent que la méthode#4 dispose d'une incertitude moyenne.

Pour un sol meuble :

$$\Delta^{(3)} < \Delta^{(4)} < \Delta^{(2)} \tag{4-53}$$

Pour un sol rocheux :

$$\Delta^{(3)} < \Delta^{(4)} < \Delta^{(2)} \tag{4-54}$$

Il est important de dire que ces résultats ont été obtenus à partir de deux cas d'études seulement. Pour généraliser cette conclusion à partir des cas d'études précédents, la comparaison des  $RR^{(m)}$  et  $\Delta^{(m)}$  est faite sur un plus grand nombre de cas.

#### **4.3.5.4 Cas généralisé**

On considère le même nombre de cas et scénarios que l'étude précédente, à l'exception de travailler avec d'autres magnitudes (5, 5.5, 6.0, 6.5 and 6.8) pour rester dans les intervalles de validités des GMPE utilisées. Chaque cas est comparé avec la moyenne des quatre estimations. L'ensemble des résultats sont répertoriés dans la figure 5.19. Parmi les quatre méthodes proposées, on remarque clairement que la méthode#4 est celle qui se rapproche de moyenne.

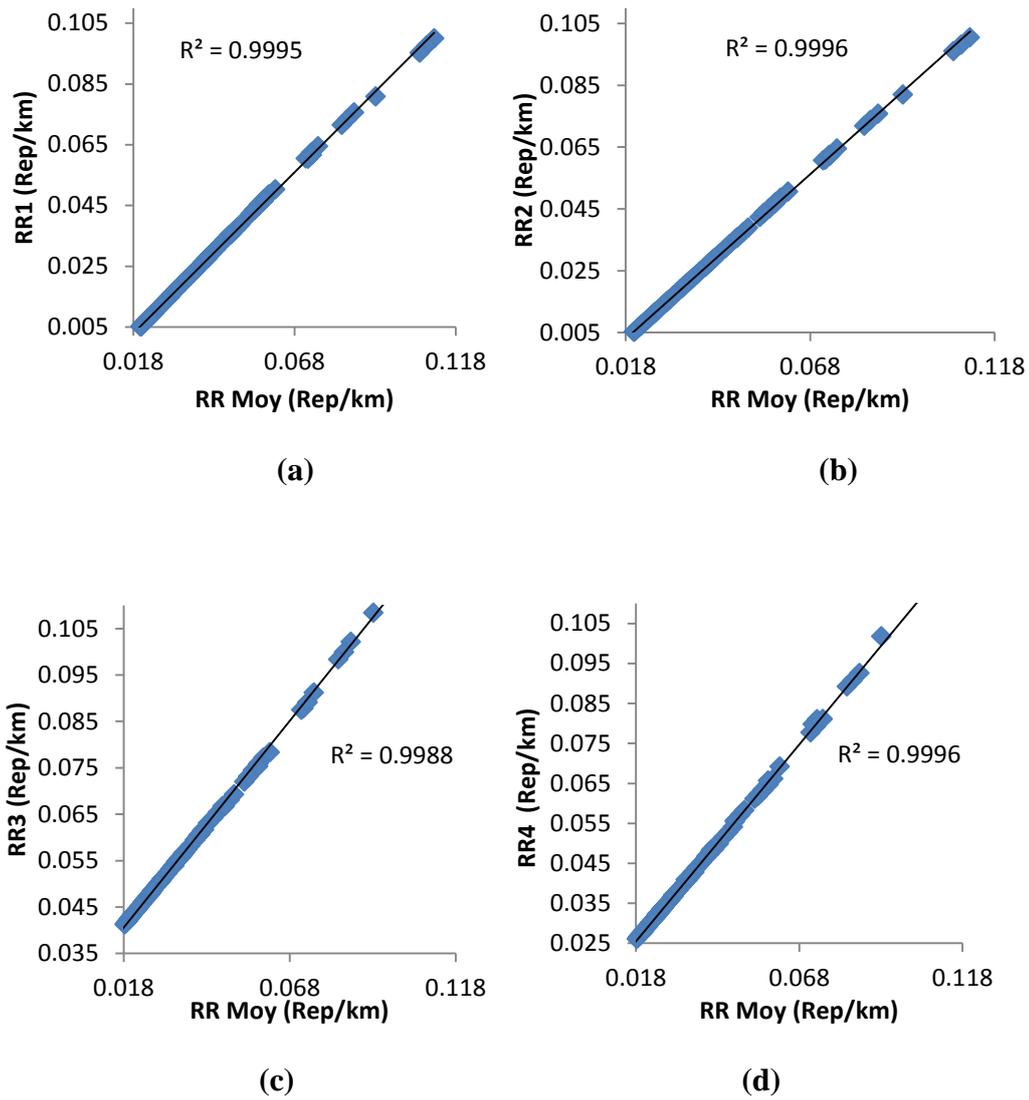


Figure 4-19: Résumé de la comparaison de 125 cas entre différent RR pour chaque modèle (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4

Comme mentionné précédemment, les écarts types  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 2,3,4$  ont été évalués pour un sol meuble et un sol rocheux. Pour le présent cas ces valeurs sont calculées pour les 125 cas. Les valeurs de  $\Delta_M^{(m)}$ ,  $m = 2,3,4$  sont calculées comme suit:

$$\Delta_M^{(m)} = \sqrt{\frac{1}{125} \sum_{j=1}^{125} (\Delta_j^{(m)})^2} \quad (4-55)$$

Avec  $\Delta_{(j)}^{(m)}$  qui représente l'incertitude du  $j^{\text{ème}}$  cas. L'indice  $M$  est introduit pour signifier que cette valeur est une moyenne quadratique.

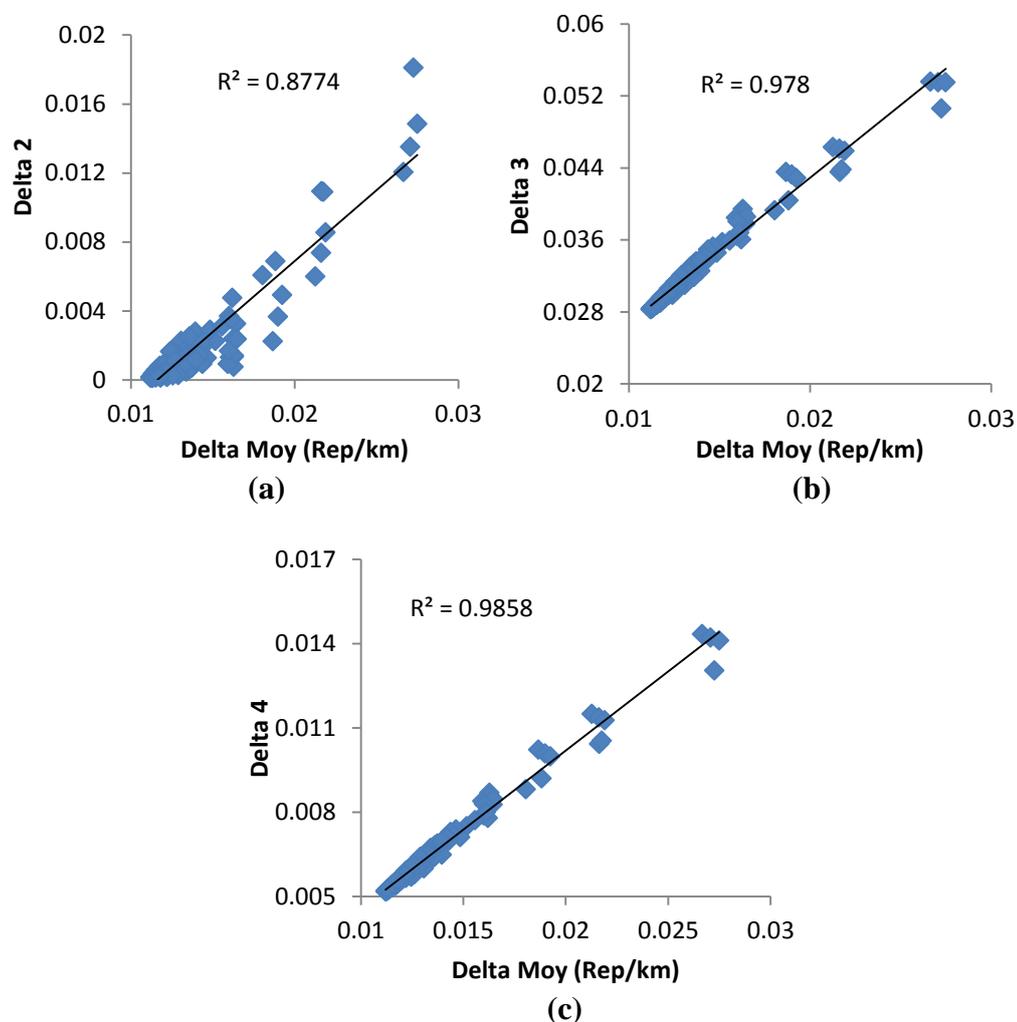


Figure 4-20: Comparaison de  $\Delta^{(m)}$  pour les 125 cas entre différent RR de chaque méthode.  
(a):  $\Delta^{(2)}$ ; (b):  $\Delta^{(3)}$ ; (c):  $\Delta^{(4)}$ .

### 4.3.6 Discussion des résultats

Le résultat obtenu pour le cas du modèle Pineda (Chapitre 4.2: Cas du modèle de Pineda) est confirmé pour le présent cas. Ainsi il s'avère qu'à travers la méthode

GUARR, la Méthode#4 donne le taux de réparations le plus stable, qui se situe au milieu des autres taux de réparations et se caractérise par une grande homogénéité.

## **4.4 Validation des résultats pour le cas du séisme de Boumerdes (2003)**

### **4.4.1 Méthodologie**

La présente partie a pour objectif d'examiner la pertinence des résultats obtenus dans les sections précédentes lorsqu'on prend en compte la variabilité du modèle par rapport aux données. En effet, les modèles ont été classés suivant leurs variabilités (voir Equation (3-9)). La question qui se pose est la suivante : Est-ce que les résultats obtenus et en particulier celui décrit dans le paragraphe (4.3.6) resteraient valable lorsqu'on classe les modèles suivant leurs variabilités par rapport aux données ?

Afin de répondre à la question précédente on considère à titre d'exemple le modèle de Pineda ainsi que les GMPE's décrites dans la section 4.2.4. Les données sismiques sont celles du séisme de Boumerdes (Laouami, Slimani et al. 2006). En premier lieu on va décrire ces données ainsi que le choix de celles qui vérifient les conditions d'applicabilité des quatre modèles. Les données choisies seront ensuite utilisées pour calculer les variabilités par rapport aux modèles pour enfin déduire les poids pour chaque modèle.

### **4.4.2 Description des données**

Suite au séisme de Boumerdes, des valeurs de PGA et de PGV ont été enregistrées avec leurs données de sites et sismologiques respectives, ce qui nous a permis de calculer non seulement les valeurs de  $PGV^2/PGA$  mesurées et aussi les valeurs de  $PGV^2/PGA$  calculées par le biais des modèles d'atténuations d'écrit dans le paragraphe (4.3.3). Quelques données ont été ignorées seulement pour rester dans le domaine d'application des lois d'atténuations. Les figures

(Figure 4-21), (Figure 4-22), (Figure 4-23), (Figure 4-24 ) présentent les valeurs de  $PGV^2/PGA$  prédites et observées en fonction de  $R_{jb}$  pour les modèles utilisés.

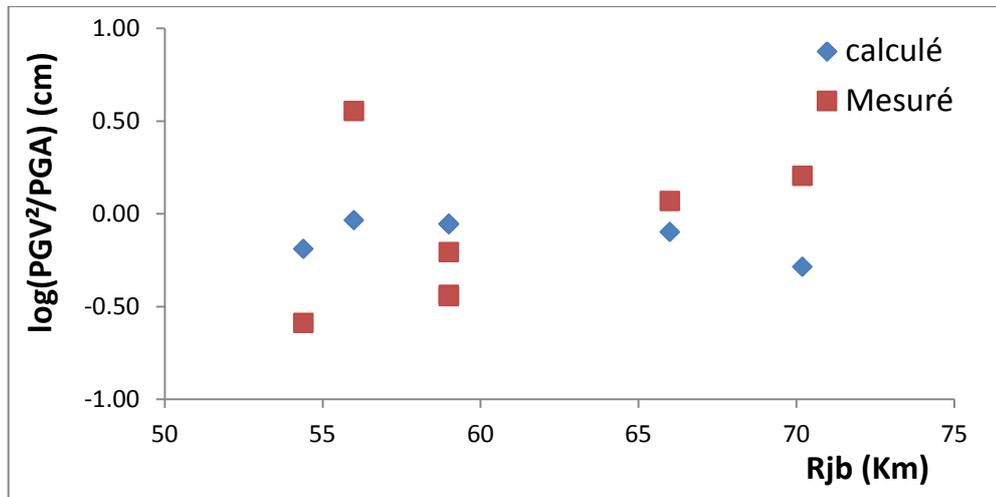


Figure 4-21: Présentation des valeurs de  $PGV^2/PGA$  prédites et observées en fonction de  $R_{jb}$  pour le modèle d'Akkar.

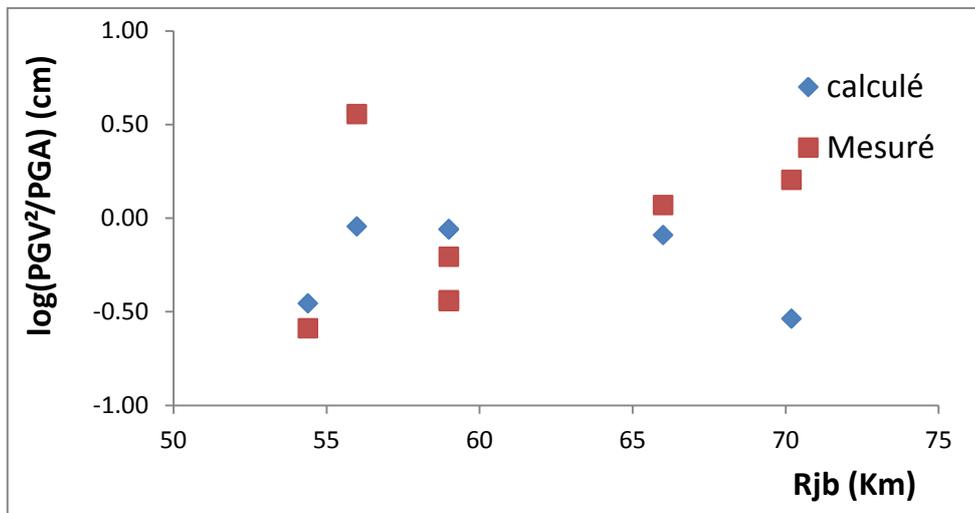


Figure 4-22: Présentation des valeurs de  $PGV^2/PGA$  prédites et observées en fonction de  $R_{jb}$  pour le modèle Neuronal.

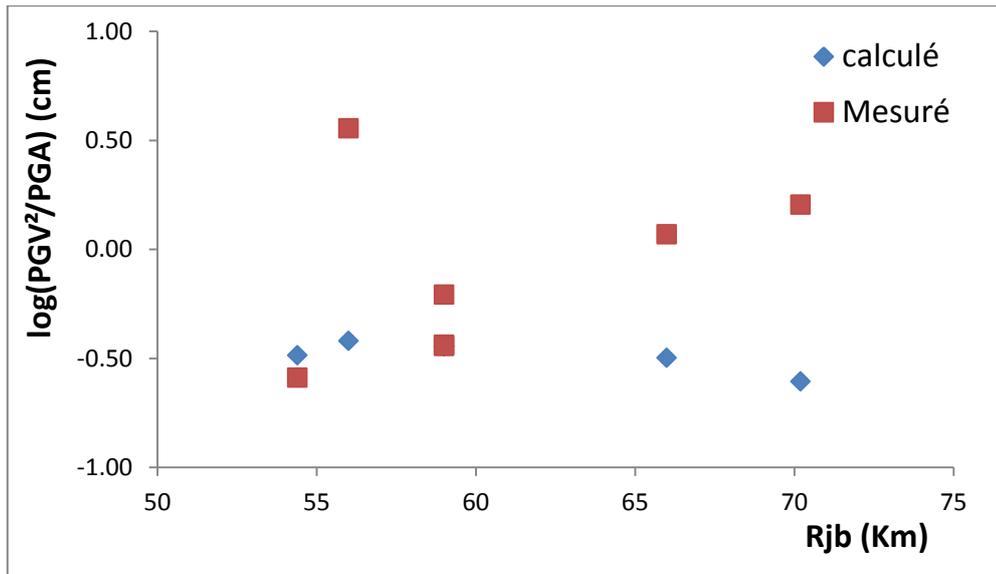


Figure 4-23: Présentation des valeurs de  $PGV^2/PGA$  prédites et observées en fonction de Rjb pour le modèle Hybride 1.

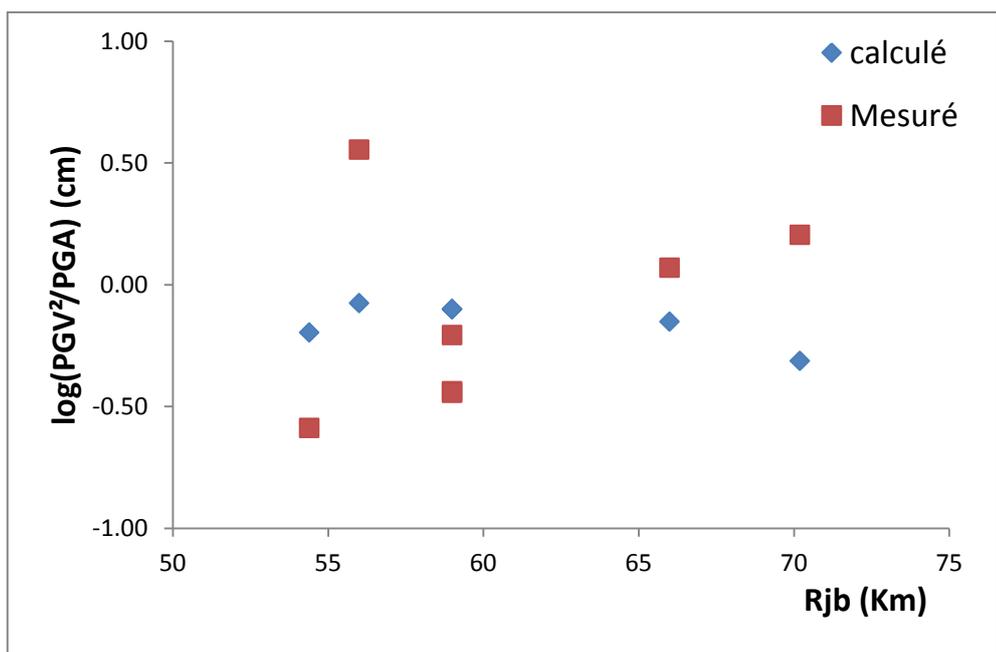


Figure 4-24: Présentation des valeurs de  $PGV^2/PGA$  prédites et observées en fonction de Rjb pour le modèle Hybride 2.

Cette représentation des valeurs prédites et observées nous a permis de calculer un sigma pour chaque modèle comme évoque la Figure 4-25, et cela en

calculant la moyenne des différences carrées des n données disponibles dans la base de données utilisées.

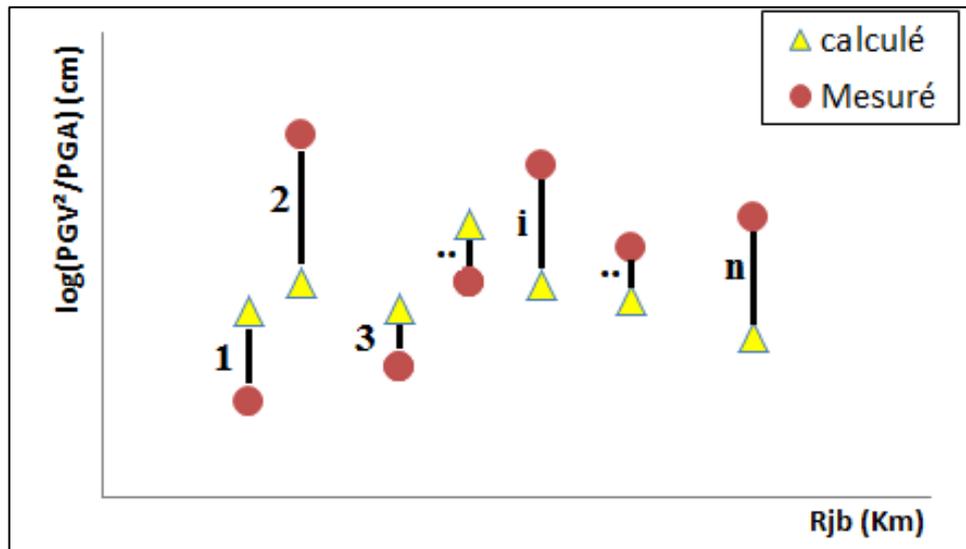


Figure 4-25: Processus de calculs des différences entre les valeurs prédites et observées.

#### 4.4.3 Utilisation des nouveaux poids

Les différentes variabilités des quatre modèles par rapport aux données ont permis de calculer les écart types. Afin de déterminer les poids décrits dans l'équation (3-9) on utilise le même raisonnement, le plus grand poids est affecté au modèle qui présente la plus petite variabilité, aussi dans le même raisonnement, le plus petit poids est destiné à la plus grande variabilité. Pour cela les valeurs considérées sont les suivantes :

$$\sigma_{\log(\text{PGV}^2/\text{PGA})} = \begin{cases} 0.396 \\ 0.425 \\ 0.534 \\ 0.399 \end{cases}, \quad \text{donc} \quad \begin{cases} \omega_1 = 0.3 \\ \omega_2 = 0.25 \\ \omega_3 = 0.15 \\ \omega_4 = 0.3 \end{cases} \quad (4-56)$$

Quant aux trois branches associées à la médiane et la médiane plus ou moins l'écart type, nous avons attribué le poids de 0.6 pour la valeur médiane et seulement 0.2 pour les deux autres valeurs, ceci revient les mentionner de la façon suivante:

$$\begin{cases} \mu_1 = 0.2 \\ \mu_2 = 0.6 \\ \mu_3 = 0.2 \end{cases}, \begin{cases} \vartheta_1 = 0.2 \\ \vartheta_2 = 0.6 \\ \vartheta_3 = 0.2 \end{cases} \quad (4-57)$$

Ayant obtenu les poids on va dans ce qui suit calculer présenter les résultats suivant la même structure que celle donnée dans la section 4.2.6

#### 4.4.4 Résultats

##### 4.4.4.1 Cas d'étude 1: exemple d'application pour un sol meuble et $R_{jb}=10$ km

Les valeurs de  $PGV^2/PGA$  pour les quatre modèles de GMPE sont disponibles dans le Tableau 16, avec les taux de réparations moyens correspondants en utilisant le modèle (Pineda-Porras 2009).

Tableau 16 Valeurs médianes des  $PGV^2/PGA$  et leur RR correspondant pour un sol meuble.

Modèle	Modèle#1	Modèle#2	Modèle#3	Modèle#4
Valeur du $PGV^2/PGA$ (cm)	2,454	1,355	1,303	2,754
RR d'après Pineda (2009)	0,162	0	0	0,162

Dans ce qui suit, on va calculer les valeurs de  $RR^{(m)}$   $m = 1, \dots, 4$  décrites dans la section 3.3.1

Méthode#1 :

$$\frac{\overline{PGV^2}}{PGA} = \frac{2.454 + 1.355 + 1.303 + 2.754}{4} = 1.96 \text{ cm} \quad (4-58)$$

L'estimation de RR correspondante (Equation (4-1)) :

$$RR^{(1)} = 0,162 \quad (4-59)$$

Méthode#2:

$$RR^{(2)} = \frac{0,162 + 0 + 0,162 + 0}{4} = 0,081 \quad (4-60)$$

La méthode#3 et la méthode#4 prennent en compte la variabilité de  $PGV^2/PGA$  et du  $RR$ , estimé à travers le calcul des valeurs de  $RR_{ijk}$  décrites dans le Chapitre 2. La distribution des 36 ( $4 \times 3 \times 3$ ) valeurs de  $RR_{ijk}$  estimée et présentée dans la Figure 4-26. La distribution statistique est montrée dans la Figure 4-27. On obtient ainsi :

$$RR^{(3)} = 0,135 \tag{4-61}$$

Enfin d'après les poids proposés on obtient :

$$RR^{(4)} = 0,121 \tag{4-62}$$

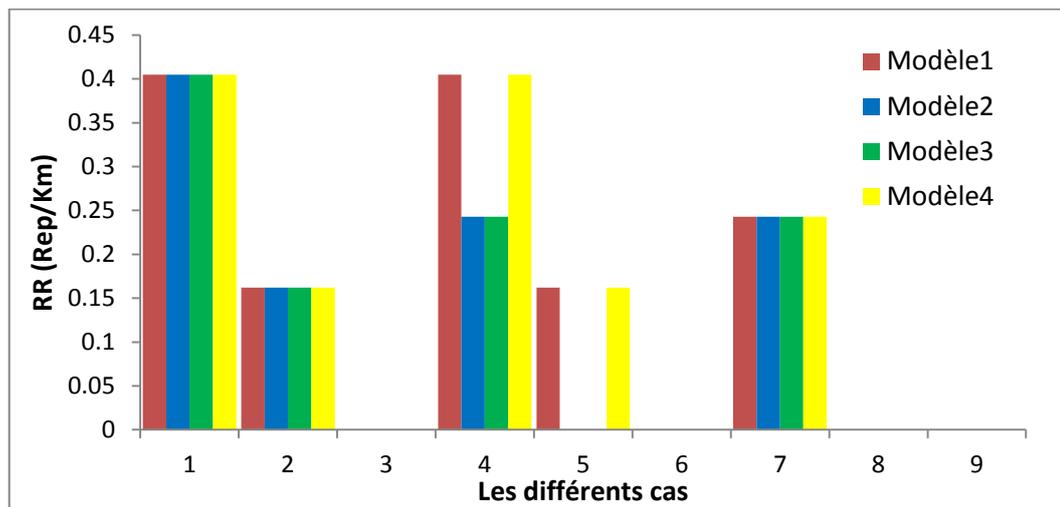


Figure 4-26: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 1

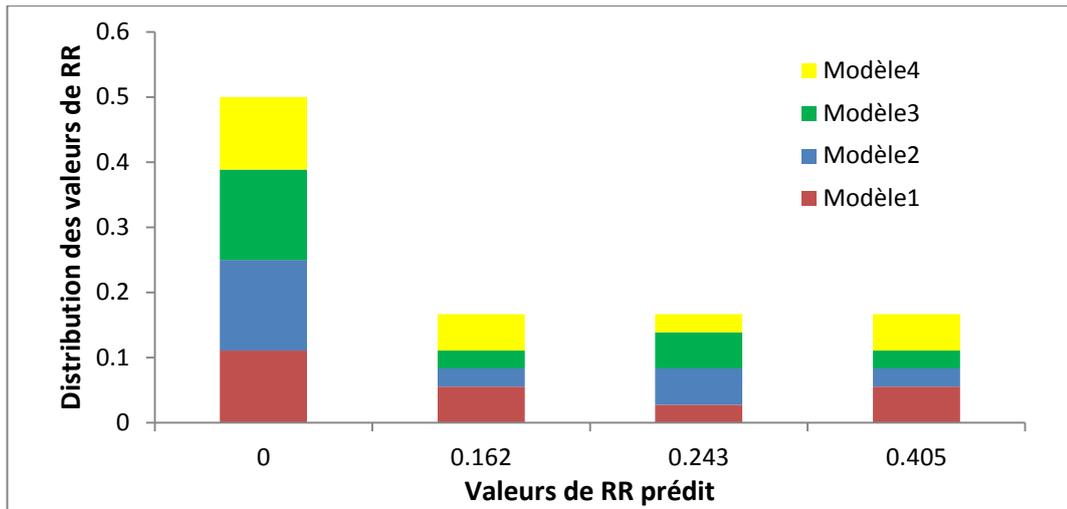


Figure 4-27: Distribution statistique de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 1

#### 4.4.4.2 Cas d'étude 2: exemple d'application pour un sol rocheux et $R_{jb}=9$ km

Les valeurs de  $PGV^2/PGA$  pour les quatre modèles de GMPE sont disponibles dans le Tableau 17, avec les taux de réparations moyennes correspondantes en utilisant le modèle (Pineda-Porras 2009).

Tableau 17 Valeurs médianes des  $PGV^2/PGA$  et leur RR correspondant pour un sol rocheux.

Modèle	Modèle#1	Modèle#2	Modèle#3	Modèle#4
Valeur du $PGV^2/PGA$ (cm)	1,176	0,632	1,047	1,626
RR d'après Pineda (2009)	0	0	0	0

Dans ce qui suit on va calculer les valeurs de  $RR^{(m)}$   $m = 1, \dots, 4$  décrites dans la section 3.3.1

Méthode#1 :

$$\frac{\overline{PGV^2}}{PGA} = \frac{1,176 + 0,632 + 1,047 + 1,626}{4} = 1,12\text{cm} \quad (4-63)$$

$$RR^{(1)} = 0,00 \quad (4-64)$$

Méthode#2:

$$RR^{(2)} = 0 \tag{4-65}$$

$$RR^{(3)} = 0,108 \tag{4-66}$$

$$RR^{(4)} = 0,0706 \tag{4-67}$$

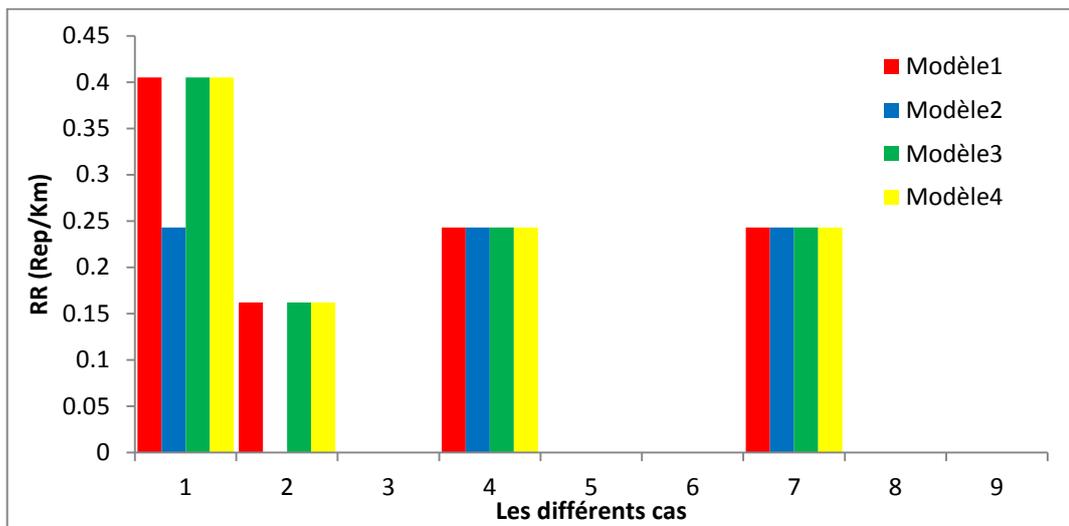


Figure 4-28: Résultats obtenus à travers les 36 valeurs de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 2

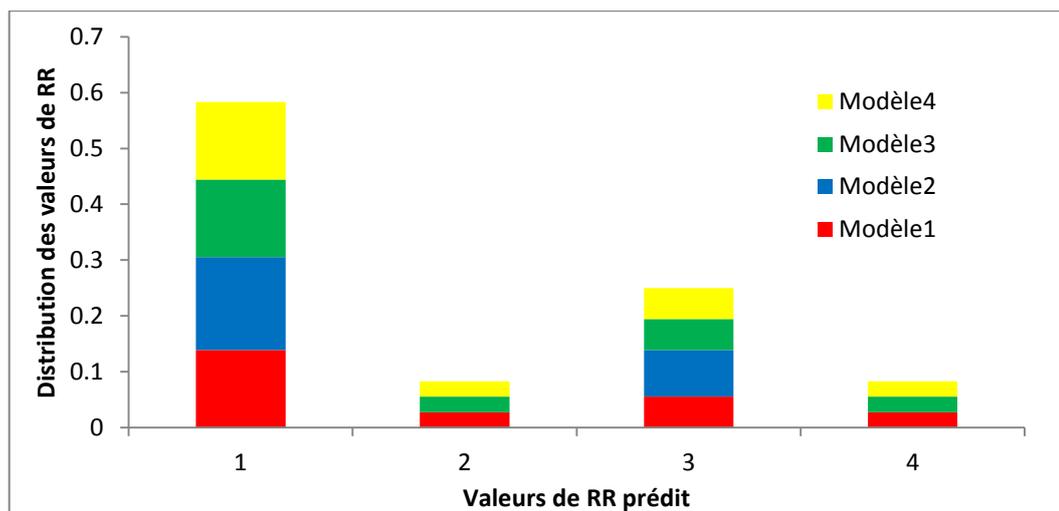


Figure 4-29: Distribution statistique de  $RR_{ijk}$  pour le cas d'étude 2

#### 4.4.4.3 Discussion des résultats

L'estimation des RR, à savoir  $RR^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  pour les deux cas d'étude 1 et 2 est récapitulée dans les tableaux Tableau 18-Tableau 19.

Tableau 18 Valeurs de  $RR^{(m)}$ ,  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  (cas sol meuble).

$RR^{(m)}$	$RR^{(1)}$	$RR^{(2)}$	$RR^{(3)}$	$RR^{(4)}$
	0,162	0,081	0,135	0,121
$\Delta^{(m)}$	0	0,041	0,0059	0,0035

Tableau 19 Valeurs de  $RR^{(m)}$ ,  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 1, \dots, 4$  (cas sol rocheux).

$RR^{(m)}$	$RR^{(1)}$	$RR^{(2)}$	$RR^{(3)}$	$RR^{(4)}$
	0,00	0,00	0,108	0,077
$\Delta^{(m)}$	0	0	0,108	0,0012

Pour un sol meuble (Cas d'étude 1) :

$$RR^{(2)} < RR^{(4)} < RR^{(3)} < RR^{(1)} \quad (4-68)$$

Pour un sol rocheux (Cas d'étude 2):

$$RR^{(1)} = RR^{(2)} < RR^{(4)} < RR^{(3)} \quad (4-69)$$

Les équations (4-68) et (4-69) montrent clairement que le  $RR^{(4)}$  se place dans les deux cas d'études dans une position intermédiaire, alors que les autres estimations,  $RR^{(c)}$ ,  $c = 1, 2, 3$  sont soit dans des positions extrêmes ou médiane. Ainsi pour le cas d'étude 1  $RR^{(4)}$  se situe dans le Rang 2 alors que pour le cas d'étude 2 il se situe dans le Rang 3. Ce résultat confirme que même en prenant en compte la variabilité du modèle GMPE par rapport aux données au lieu de considérer la variabilité du modèle GMPE on trouve que le  $RR^{(4)}$  est globalement situé au milieu des RR..

Nous avons ensuite proposé de mesurer le degré de confiance de ces quatre valeurs par le biais de l'écart type (Equations (3-13), (3-14) et (3-15)).

Pour un sol meuble :

$$\Delta^{(4)} < \Delta^{(2)} < \Delta^{(3)} \tag{4-70}$$

Pour un sol rocheux:

$$\Delta^{(2)} < \Delta^{(4)} < \Delta^{(3)} \tag{4-71}$$

En se servant de ces dernières, les relations suivantes montrent que la méthode#4 dispose de la plus petite valeur et valeur intermédiaire de l'écart type

#### **4.4.4.4 Cas généralisé**

Les données de la présente section sont identiques à celles de la section 4.2.6.4. L'ensemble des résultats est répertorié dans la Figure 4-30. Parmi les quatre méthodes proposées, on remarque clairement que la méthode#4 est celle qui se rapproche de la moyenne, tandis que l'estimation la plus éloignée est bien la méthode#1.

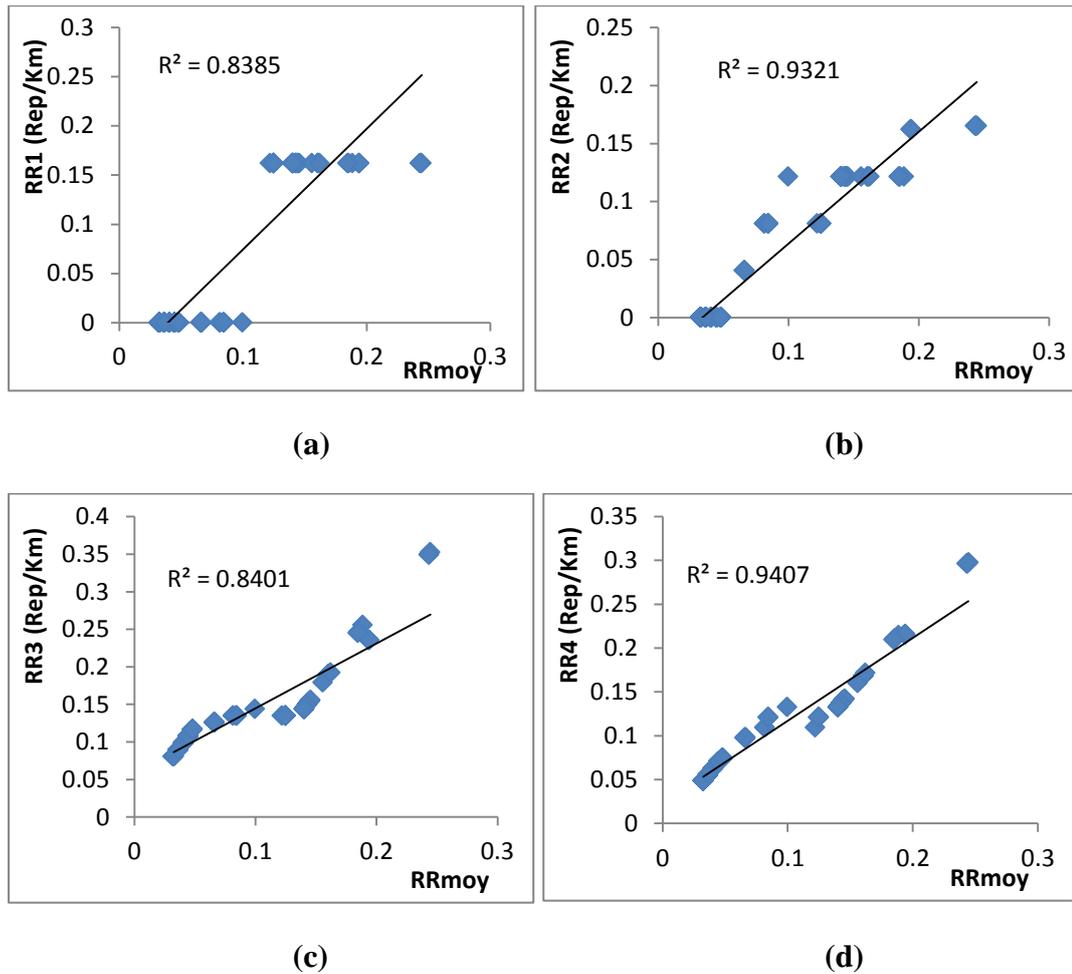


Figure 4-30: Résumé de la comparaison de 125 cas entre différent RR pour chaque modèle (a): Méthode#1;(b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4

Dans le but de révéler une surestimation ou sous-estimation pour chaque méthode#i, une étude statistique du rang concernant les quatre estimations a été prise en compte. Les résultats sont mentionnés dans la Figure 4-31. Ces histogrammes correspondent pour chaque méthode, les proportions des cas quand ils se placent aux rangs à savoir la plus petite estimation de RR (rang1), estimation moyenne de RR (rang 2 et 3) ou la plus grande estimation de RR (rang 4).

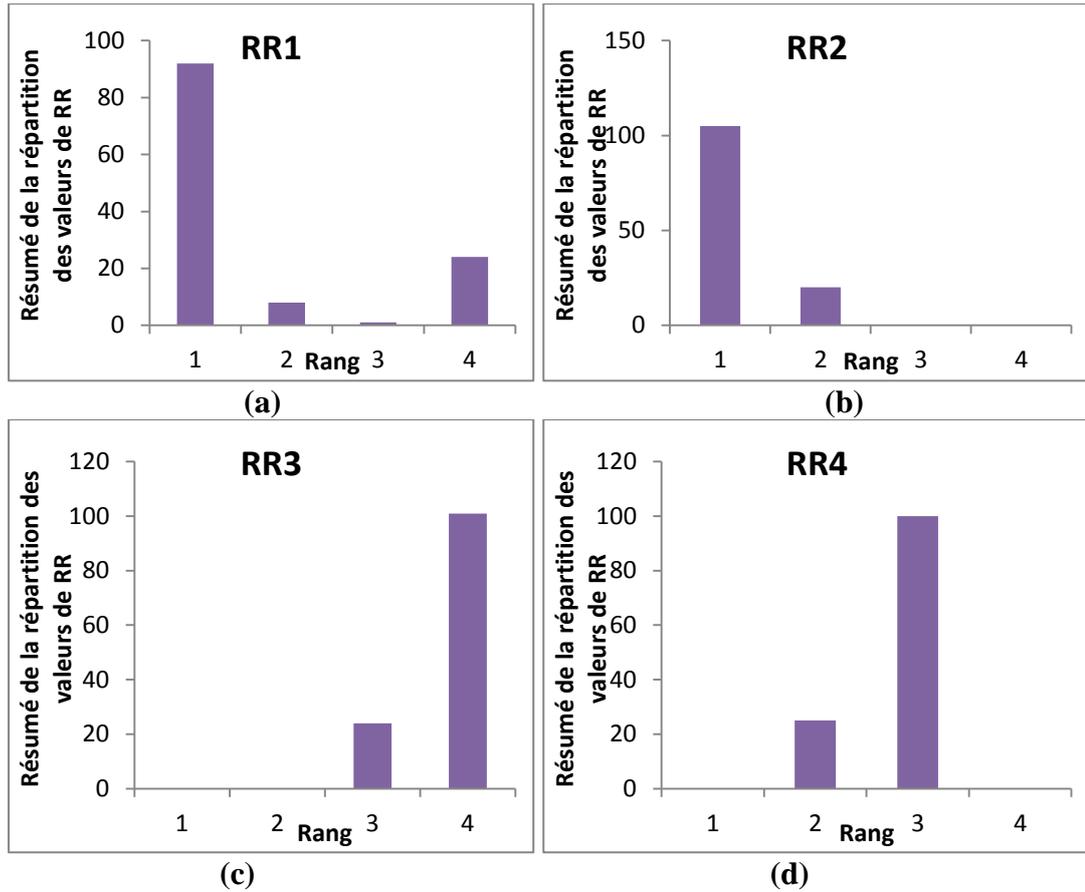


Figure 4-31: Distribution des rangs entre les 4 méthodes pour l'ensemble de 125 cas. (a): Méthode#1; (b) Méthode#2; (c) Méthode#3; (d) Méthode#4

Comme mentionné précédemment, les écarts types  $\Delta^{(m)}$ ,  $m = 2,3,4$  ont été évalués pour un sol meuble et un sol rocheux (voir section 4.2.6.3). Pour le présent cas ces valeurs sont calculées pour les 125 cas. Les valeurs de  $\Delta_M^{(m)}$ ,  $m = 2,3,4$  sont calculées comme suit:

$$\Delta_M^{(m)} = \sqrt{\frac{1}{125} \sum_{j=1}^{125} (\Delta_{(j)}^{(m)})^2} \quad (4-72)$$

Avec  $\Delta_{(j)}^{(m)}$  qui représente l'incertitude du  $j^{\text{ème}}$  cas. L'indice  $M$  est introduit pour signifier que cette valeur est une moyenne quadratique.

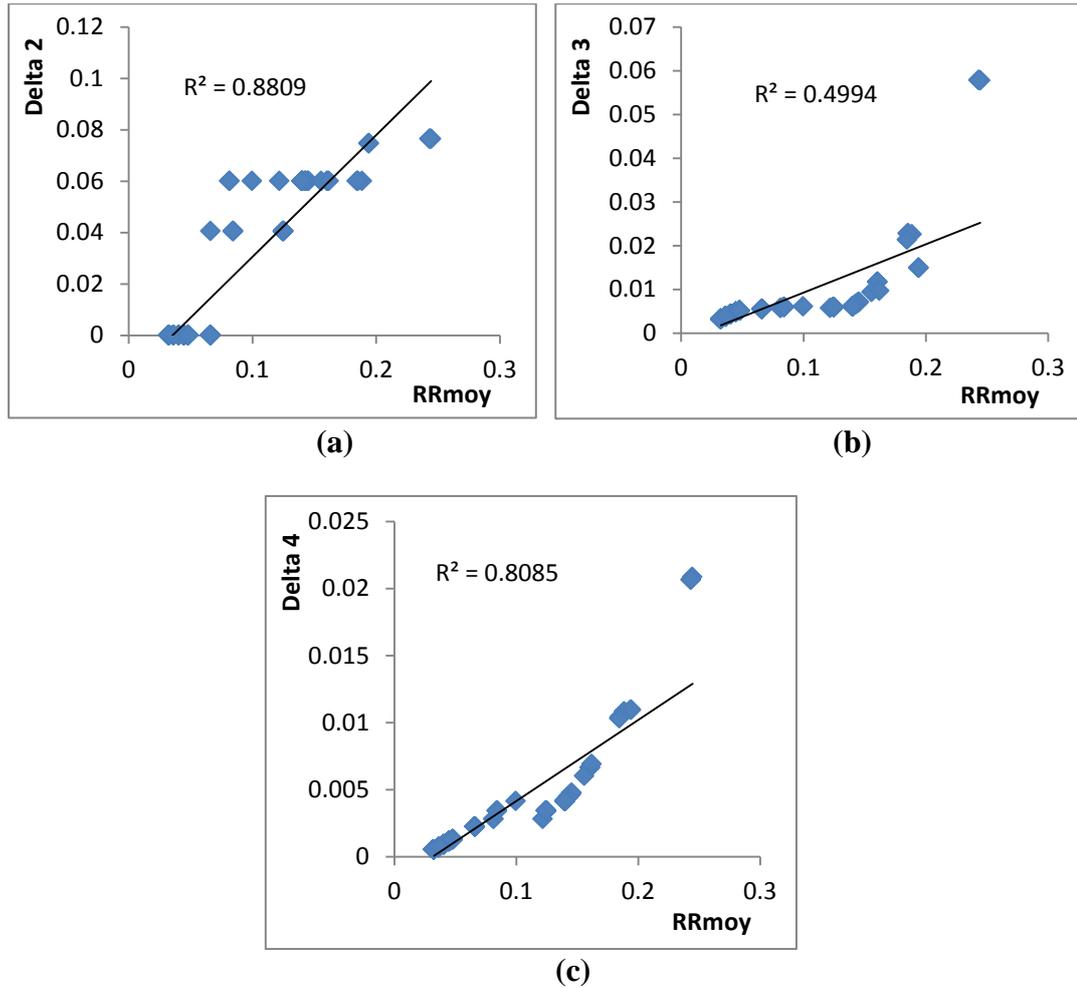


Figure 4-32: Comparaison de  $\Delta_{(j)}^{(m)} \equiv \Delta^{(m)}$  pour les 125 cas entre différents RR de chaque méthode :(a) Méthode#2;(b) Méthode#3; (c) Méthode#4

Le Tableau 20 montre que la valeur de  $\Delta_j^{(4)}$  est la plus petite, ce qui annonce que l'incertitude de  $RR^{(4)}$  n'est pas importante.

Tableau 20 Valeurs de  $\Delta_M^{(m)}$ ,  $m = 2,3,4$ .

$\Delta_M^{(2)}$	$\Delta_M^{(3)}$	$\Delta_M^{(4)}$
0,0213	0,0072	0,0029

#### 4.4.5 Conclusion

On se basant sur la nouvelle base de donnée Algérienne qui nous a permis d'utiliser de nouveaux poids, il s'avère que la valeur de  $RR^{(4)}$  reste la plus stable car elle se situe au milieu des autres valeurs de RR et présente aussi la plus faible incertitude ce qui fortifie son homogénéité.

## 4.5 Conclusion

La méthode GUARR décrite dans le Chapitre 3 a permis d'identifier des taux de réparations suivant quatre méthodes notées méthode#i. Les méthodes#1 et #2 sont juste des moyennes des taux de réparations. La méthode#3 prend en compte la variabilité des modèles GMPE et du modèle de taux de réparations. Enfin la méthode#4 considère en plus le degré de confiance qu'on a dans les différents modèles GMPE utilisés mais aussi dans les valeurs médianes et médianes plus ou moins l'écart type.

Le présent chapitre nous a permis d'appliquer la méthode GUARR pour deux cas d'équation de prédiction du taux de réparation (Modèles de Pineda-Porras et Piccinelli). Le modèle de Pineda-Porras se distingue par le fait qu'il utilise le  $PGV^2/PGA$  comme GMP. Or il n'y a pas de modèle de GMPE qui donne directement le  $PGV^2/PGA$  et forcément le  $\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}$  n'est pas connu. Pour ce faire, on a mis en place une méthode qui permet de résoudre ce problème.

L'application de la méthode GUARR a montré que la méthode#4 qui donne le  $RR^{(4)}$  Equation (3-12), est la plus stable car elle se situe au milieu des autres valeurs de RR et présente l'écart-type de plus petit.

Ce résultat a été confirmé dans le cas où la variabilité est celle qui caractérise les modèles de GMPE mais aussi celle qui caractérise les modèles GMPE avec les données sismiques.

Par conséquent, et à la lumière de ce qui précède, on suggère d'utiliser le  $RR^{(4)}$  comme moyen d'estimation du RR. Le chapitre suivant sera consacré à l'application de la méthode GUARR pour le cas d'un centre urbain (Groupement de Tlemcen).

## Chapitre 5

# Application pour la ville de Tlemcen

### 5.1 Introduction

La vulnérabilité sismique des conduites est mesurée par le taux de réparations qui est estimé à travers des équations qui dépendent du GMP (PGA, PGV, ...). La variabilité inhérente des GMPE, équations qui donnent le GMP en fonction des inputs sismiques et du site, n'est pas prise en compte dans l'estimation du RR. De plus les équations qui donnent le RR en fonction du GMP ne considèrent pas l'incertitude. Ces deux problèmes nous ont amenés à mettre en place dans le Chapitre 3 (page 33) une méthode dénommée GUARR pour les résoudre. L'application de cette méthode (Chapitre 4, page 45) nous a permis de conclure, qu'à la limite des deux cas étudiés, il s'avère que la méthode#4 reste la plus stable.

Le présent chapitre sera consacré à la présentation des résultats pour le cas du groupement de Tlemcen en considérant l'approche classique : celle qui considère une seule équation GMPE et la méthode#4. Les calculs sont présentés en utilisant le Système d'Information Géographique (SIG).

### 5.2 SIG

#### 5.2.1 Définitions des SIG :

Un système d'information géographique (S.I.G) n'est autre qu'un système informatique qui permet à partir de plusieurs sources, de rassembler et organiser,

de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace. Il est utilisé pour la gestion de bases de données pour la saisie, le stockage, l'extraction, l'interrogation, l'analyse et l'affichage de données localisées. C'est aussi un ensemble de données repérées dans l'espace, structuré de façon à pouvoir en extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Un système d'information géographique est un ensemble d'équipements informatiques, de logiciels et de méthodologies pour la saisie, la validation, le stockage et l'exploitation de données, dont la majorité est spatialement référencée, destinée à la simulation de comportement d'un phénomène naturel, à la gestion et l'aide à la décision.



Figure 5-1: Equipements et méthodes nécessaires pour l'utilisation de SIG

En d'autres termes, un S.I.G est un environnement informatisé d'analyse d'une information spatiale numérisée.

Un S.I.G complet permettra non seulement de dessiner puis tracer automatiquement le plan, mais en outre :

- De disposer les objets dans un système de référence géographique, de les convertir d'un système à un autre.

- De rapprocher entre deux cartes (deux plans) de sources différentes, de faciliter leur superposition.
- De corriger certains contours de la moins fiable en reprenant les coordonnées correspondantes de la plus fiable.
- D'extraire tous les objets géographiques situés à une distance donnée, d'un carrefour, d'une route ou des rives d'un lac.
- D'extraire tous les objets situés dans un périmètre donné.

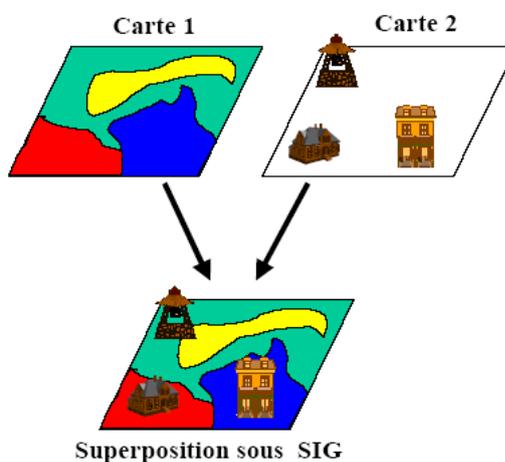


Figure 5-2: Fonctionnement du SIG, superposition des couches

La numérisation (digitalisation) permet de récupérer la géométrie des objets disposés sur un plan ou une carte préexistante. Elle consiste à faire évoluer un curseur sur un plan posé sur une table à digitaliser et préalablement calée en coordonnées. La table est réceptive aux signaux électriques émis par le curseur. Elle peut localiser ces signaux sur le plan de la table avec une précision de l'ordre du dixième de millimètre.

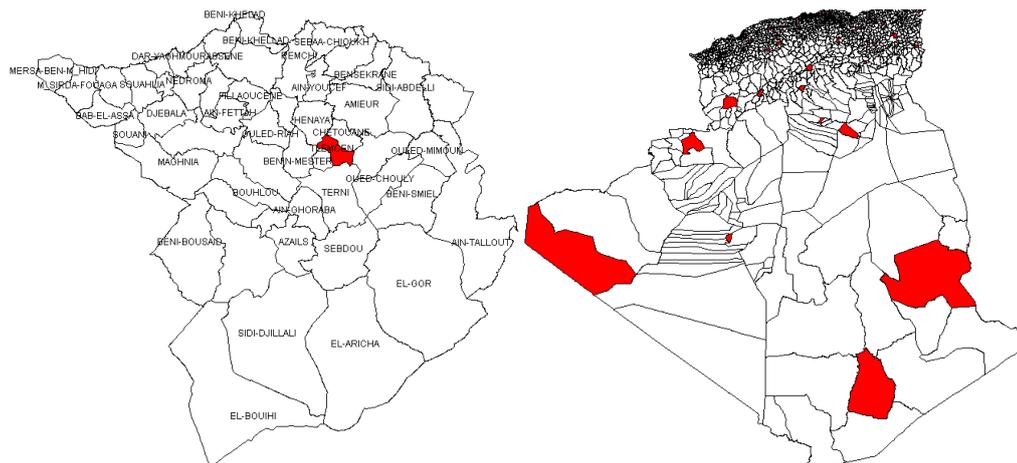


Figure 5-3: Numérisation des géométries sous SIG

## 5.2.2 Instruments de modélisation des dommages sismiques

Les logiciels SIG sont utilisés pour la production cartographique et la gestion de données. Dans notre étude on utilisera dans un premier temps MapInfo Professional 7.5 pour le traitement, l'organisation et la présentation des données géo-référencées puisqu'il permet la création des bases de données liées aux cartes et d'autres part Arc-Gis et ENVI 4.7 pour leur richesse en matière d'analyse thématique. La présentation de ce travail sous ces outils informatiques sera diffusée sous les étapes suivantes :

- \*Introduction de la carte urbaine.
- \*Introduction des données liées à cette carte.
- \*Introduction de l'évènement sismique.
- \*Analyse des données.
- \*Présentation des résultats.

## 5.2.3 Superposition des couches sous SIG

### 5.2.3.1 Limites communes

Parmi les 53 communes de la wilaya de TLEMEN on a sélectionné 3 communes (TLEMEN, CHETOUANE, MANSOURAH) vu leurs situations

géographiques et le nombre important de la population résidant qui s'élève à 240000 en 2008, ainsi que les données disponibles des types de sol et du réseau souterrain (Figure 5-4).

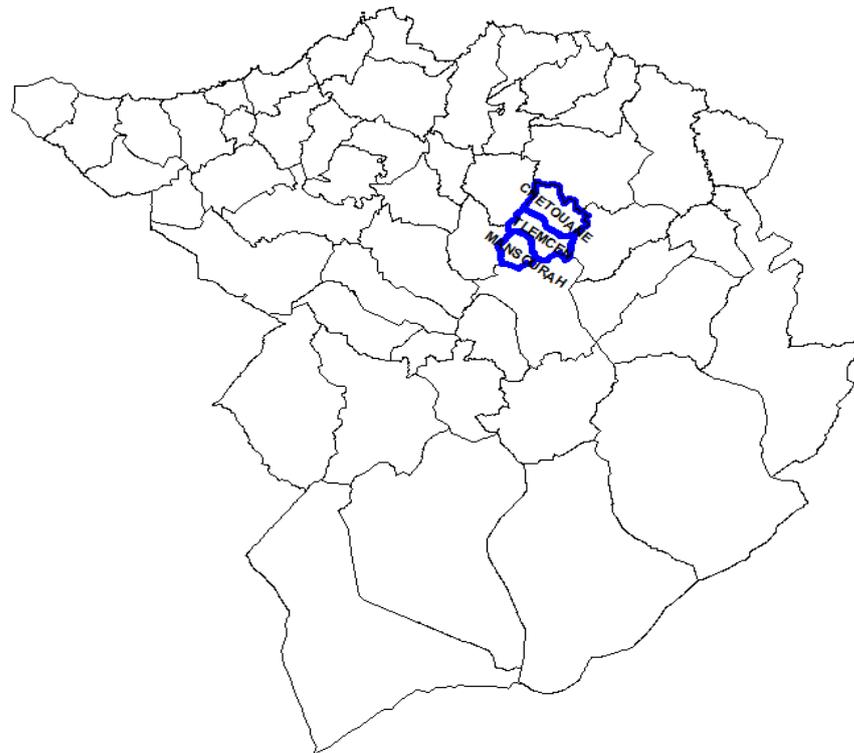


Figure 5-4: Localisation des communes à étudier

### 5.2.3.2 Types de sol

Après avoir cherché dans la littérature les études géotechniques de la région nous avons trouvé le travail de (Bekkouche et al. 2003) qui ont fait des études sur la région de TLEMCEM. Les auteurs ont dressé une esquisse géotechnique du groupement (TLEMCEM, CHETOUANE, MANSOURAH), (Figure 5-5), contenant 6 catégories de sols allant des formations marneuses jusqu'à la famille rocheuse. (Roullé, Auclair et al. 2010) (Rey, Roullé et al. 2011) .

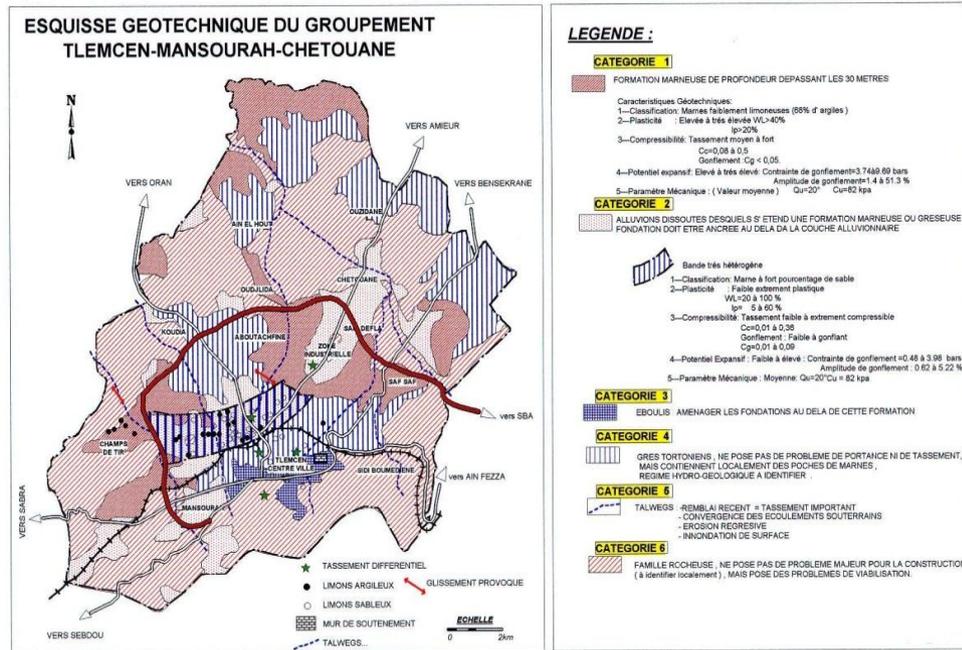


Figure 5-5: Esquisse géotechnique des catégories de sol du groupement

Pour une meilleure application des lois d'atténuation, on a adapté la carte de la Figure 5-5 contenant 6 catégories de sol en fonction des types de sols considérés dans les GMPE avec l'aide des spécialistes en géotechnique (Figure 5-6)

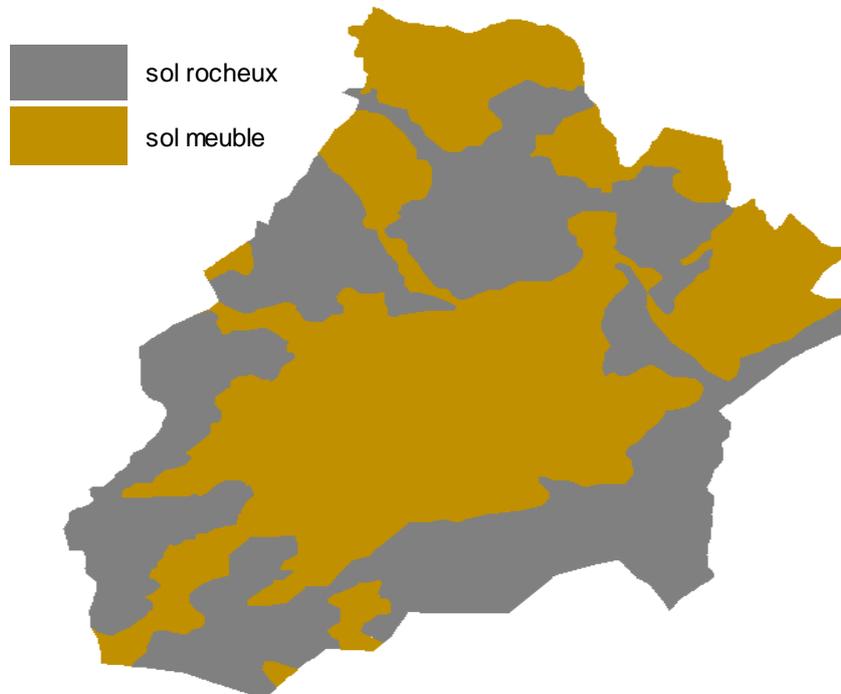


Figure 5-6: Carte géotechnique adaptée avec les lois d'atténuations d'Akkar et al.

### 5.2.3.3 Conduites de gaz :

Suite à notre demande d'informations auprès de la direction de la SONEGAS pour recevoir le tracé souterrain des conduites de gaz de la région, on a eu les cartes à différentes échelles allant du 1/500 aux 1/2000 et différents formats. A noter que les cartes fournies étaient dans des formats numériques et d'autres sur support papier. Ainsi à l'aide des SIG nous avons pu rassembler toutes ces informations dans une carte pour faciliter notre étude.

La Figure 5-7 montre clairement qu'une grande partie du réseau repose sur un sol meuble.

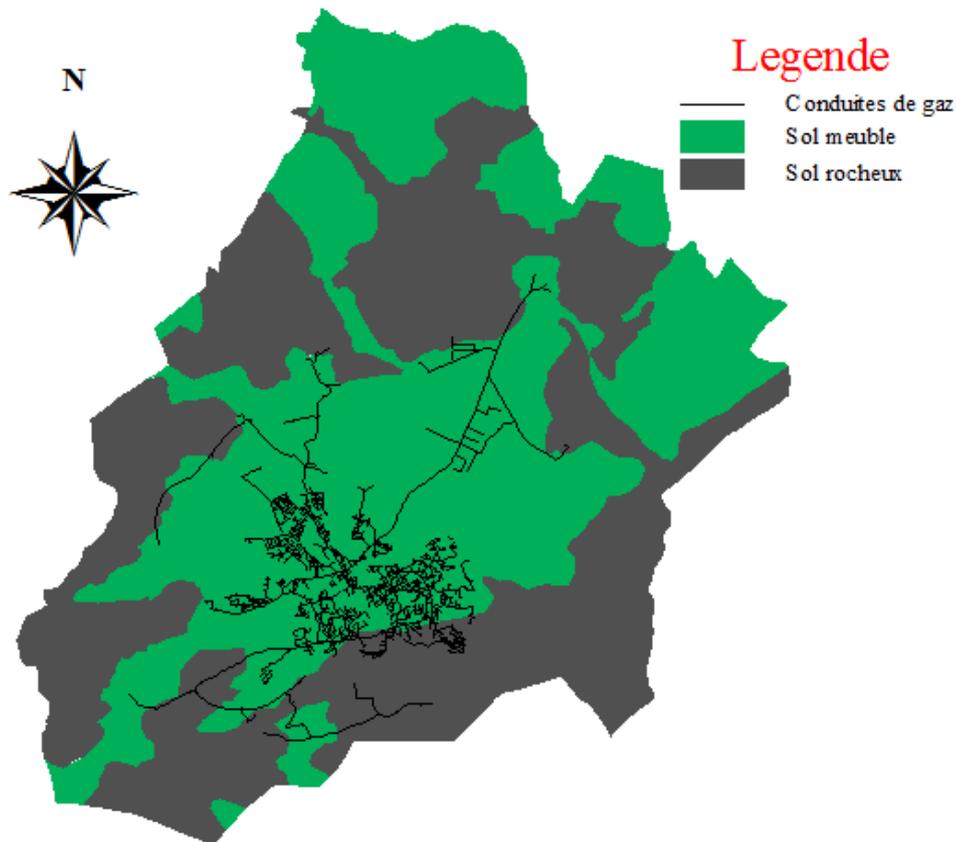


Figure 5-7: Distribution du réseau de conduites avec les conditions géotechniques

### 5.2.3.4 Failles :

La localisation des failles disponibles autour de la région sont détaillées dans la section 5.3.

### **5.2.3.5 Interprétation des résultats :**

L'interprétation des résultats présentés sous forme de carte d'estimation du risque contenant un code couleur permettent d'estimer les régions les plus touchées jusqu'aux régions qui ne présentent aucun risque, en tenant compte des magnitudes fluctuantes engendrées par un séisme ainsi que les autres variables utilisées dans les GMPE telle que mentionnées dans la méthodologie.

## **5.3 Prédiction des séismes :**

Les facteurs les plus importants qui influent sur les mouvements du sol d'après (Peng, Elghadamsi et al. 1989) sont :

### **5.3.1 La magnitude du séisme**

C'est une mesure de l'énergie libérée au foyer d'un séisme. Plus le séisme libère l'énergie, plus la magnitude est élevée. Il s'agit donc d'une échelle logarithmique dite l'échelle de Richter, Les magnitudes utilisées de nos jours sont en fait des magnitudes de moment (notées  $M_w$ ).

### **5.3.2 La distance à partir de la source de libération d'énergie**

On peut classer les séismes en fonction de la distance épacentrale : distance entre le foyer d'un séisme et la station où se trouve le sismomètre. Quand on est "près" du séisme, la distance épacentrale est en km ( $d$ ). Quand on est plus loin, elle est en degrés ( $D$ ).

- Séisme local = séisme dont la distance épacentrale est inférieure à 1 000 km environ.
- Séisme régional = séisme dont la distance épacentrale est intermédiaire entre celle des séismes locaux et des télé-séismes.
- Télé-séisme = Séisme dont la distance épacentrale  $D$  est supérieure à  $30^\circ$  environ (c'est-à-dire plus de 3000 km).

En ce qui nous concerne, on s'intéressera uniquement aux séismes locaux et spécialement ceux dont les distances épacentrales sont inférieures à 100 Km puisque les GMPE utilisées ne prennent en considération que cette fourchette de distance.

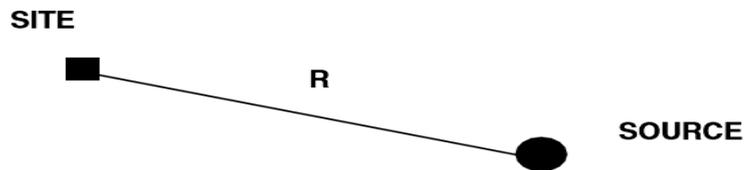


Figure 5-8: définition de la distance épacentrale  $R_{jb}$

## 5.4 Sismicité de la région de TLEMEN

### 5.4.1 Contexte national

L'Algérie est un pays à sismicité modérée. Les séismes destructeurs sont rares mais leur probabilité d'occurrence n'est pas nulle.

La

Figure 5-9 reprend la sismicité de l'Algérie sur pratiquement sept siècles. Une compilation plus récente donne cette sismicité sur une période de 12 ans (Figure 5-10). Les deux figures montrent que la région de Tlemcen ne présente pas une grande sismicité comparativement à d'autres régions du pays. Le séisme le plus fort du siècle dernier a atteint la région de « Chlef » appelée aussi à l'époque « Orléansville » d'une magnitude de 7.5.

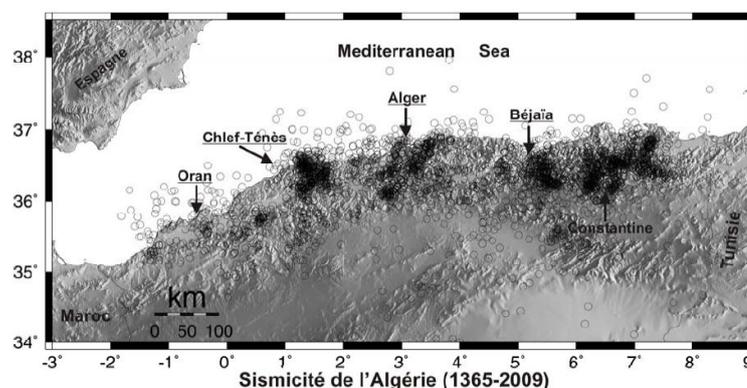


Figure 5-9: Sismicité de l'Algérie entre 1365 et 2009 (BELDJOUDI 2011)

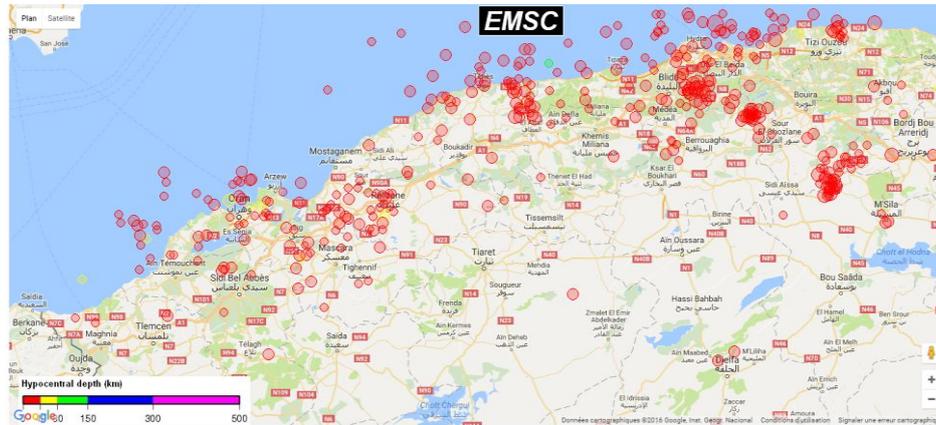


Figure 5-10: Séisme ressenti dans le Nord algérien du 25/10/2004 au 11/08/2016 (Source EMSC <http://www.emsc-csem.org/> Site consulté le 21/08/2016).

#### 5.4.2 Classement RPA :

Selon le règlement parasismique Algérien (RPA), le territoire national est divisé en cinq (05) zones de sismicité croissante présenté dans la figure 5.8 et le tableau 5.1.

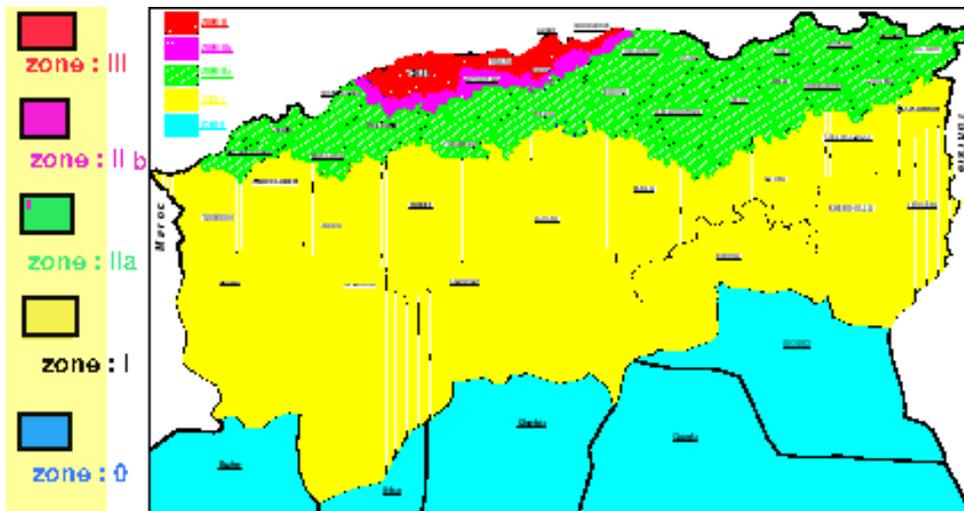


Figure 5-11: Zonage de la sismicité en Algérie selon PRA 1999/VERSION 2003

Tableau 21 Répartition des accélérations par zone selon PRA 99/V03.

Groupe	Zone			
	I	Iia	Iib	III
1A	0.15	0.25	0.30	0.40
1B	0.12	0.20	0.25	0.30
2	0.10	0.15	0.20	0.25
3	0.07	0.10	0.14	0.18

### **5.4.3 Séismes historiques : quelques cas**

#### **5.4.3.1 Séisme de Boumerdes**

Le tremblement de terre qui a secoué le nord de l'Algérie a été particulièrement violent. Selon le Réseau National de Strasbourg, la magnitude a été de 6.7 sur l'échelle de Richter. La secousse principale s'est produite à 18 h 44 (TU), 19 h 44 (heure locale) et a été suivie immédiatement par de très nombreuses répliques. L'épicentre de ce séisme a été localisé en mer très proche du littoral, à 60 km au nord-est d'Alger plus précisément à quatre kilomètres de la côte, entre Zemmouri et Boumerdes (Long. 3.53E - Lat. 36.81N).

#### **5.4.3.2 Séisme d'Ain Temouchent**

Le Mercredi 22 décembre 1999, à 18h 36 mn 55s, un séisme d'une magnitude de 5.5 sur l'échelle de Richter a frappé la ville de Ain Temouchent et les villages environnant de Sidi Ben Adda, Ain Tolba et Ain Lâalem faisant 28 morts et 150 blessés dont 50 dans un état grave. Tout le reste de la Wilaya a aussi été touché mais sans dégâts importants. Ce séisme a été ressenti dans tout l'Ouest algérien (Oran, Tlemcen, Mascara..) jusqu'au Maroc (Oujda). L'épicentre de ce tremblement de terre a été localisé a Ain Tolba. Pas de dégâts enregistrés lors de ce séisme concernant les conduites de gaz. Ces statistiques ont été déclaré par monsieur HARCHAOUI divisionnaire de la société nationale de production de l'électricité et du gaz (SONELGAZ) département « A T » ainsi que son collègue du personnel.

#### **5.4.3.3 Séisme de Chlef**

Chlef anciennement « Orléansville » à l'époque française puis « El-Asnam » après l'indépendance, est une commune de la wilaya de Chlef, située à 200 km au sud-ouest d'Alger. La ville a connu deux tremblements de terre majeurs, Le premier a eu lieu le 9 septembre 1954 qui a enregistré un bilan de 1 340 morts et 5 000 blessés d'une magnitude de 7.5. Les informations relatives aux conduites enterrées sont inconnues. Le second, 10 octobre 1980 d'une magnitude de 7.2 qui a détruit la ville à 80 %. Un certain nombre de fuites-ruptures pour les tuyaux de gaz a été révélé lors du bilan des dégradations des biens.

#### **5.4.3.4 Sismicité de TLEMCEN**

Au cours des derniers siècles, il n'y a pas eu de mouvements sismiques dans la région de Tlemcen ni aux environs proches, par contre les séismes enregistrés à proximité des wilayas avoisinantes ont été ressentis au centre de Tlemcen sans avoir signalé de dommages matériels ou corporels, donc statistiquement parlant, ceci n'exclut donc pas l'occurrence d'un mouvement sismique dans le futur proche ou lointain.

## **5.5 Input**

### **5.5.1 Localisations des failles à proximité de TLEMCEN**

Dans cette partie, nous allons présenter les caractéristiques de quatre failles sismiques dans la région de Tlemcen. Il est tout à fait clair que ces localisations n'éliminent pas la possible présence d'autres failles ni n'affirment pas que ces failles sont toujours actives (Meghraoui 1988) (Maouche, Meghraoui et al. 2011).

L'ANAT (Agence nationale de l'aménagement du territoire) a dressé une carte géologique simplifiée de TLEMCEN à une échelle de 1/50000 (Figure 5-12) où un certain nombre de failles ont été répertoriées.

D'un autre côté, dans la zone sud de la région d'autres failles ont été répertoriées (Figure 5-13). Le jeu de failles qui a été identifié est complexe.

Les deux autres failles sont relativement éloignés sauf qu'il présente une longueur importante. (Figure 5-14)(Belabbès et al 2009)

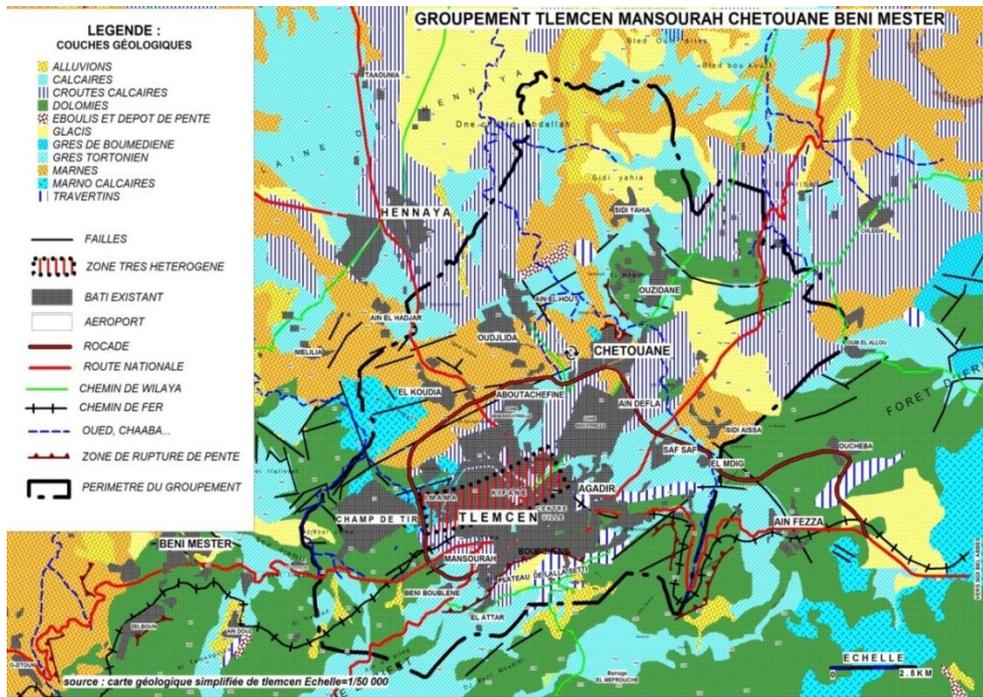


Figure 5-12: carte géologique du groupement (Chetouane, Tlemcen, Mansourah, Beni Mester) ANAT

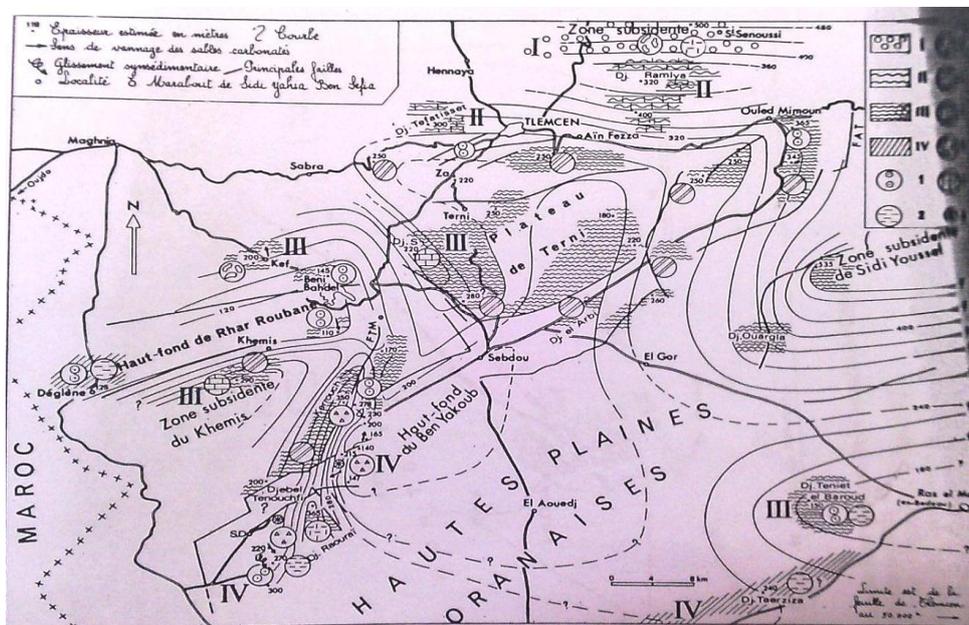


Figure 5-13: Paléogéographie des Monts de Tlemcen-Ghar Roubane et de la bordure nord des Hautes Plaines

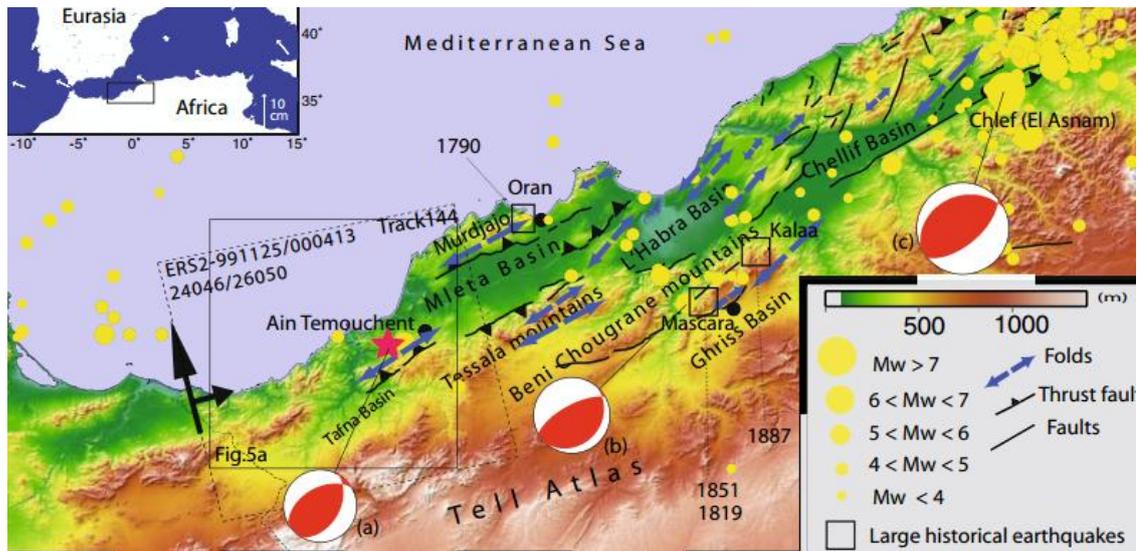


Figure 5-14: Carte des principales failles actives dans la région d'Oran.

### 5.5.2 Calcul des magnitudes maximales

Si on choisit une faille, l'application de la méthodologie sous-entend la nécessité de connaître la magnitude maximale engendrée par cette faille. (Wells et Coppersmith 1994) ont proposé la formule donnant la magnitude en fonction de la longueur de la faille suivante :

$$M = \frac{\text{Log}(L) - a}{b} \quad (5-1)$$

L : est la longueur de la faille (Km).

M : est la magnitude du séisme.

a et b : sont les coefficients en relation avec le type de la faille (Profonde ou de surface).

Tableau 22 Coefficients en relation avec le type de la faille.

Type de la rupture	a	B
Surface (<50 Km de profondeur)	-3.22	0.69
Profonde (> 50 Km de profondeur)	-2.44	0.59

D'autres relations existent entre la longueur de la faille et la magnitude (Beghoul, Chatelain et al. 2010) (Bezzeghoud, Dimitro et al. 1995):

$$M = 1.99 \text{ Log}(L) - 5.84 \quad (5-2)$$

M : est la magnitude du séisme.

L : est la longueur de la faille (cm).

La première faille sismique est située au milieu des trois communes sélectionnées pour cette application d'une longueur de 10 km (Figure 5-15). Dans ce qui suit cette faille sera nommée Faille 1.

La deuxième faille est localisée au plateau de TERNI à 5 km au sud des communes proposées par (Benest 1985). La longueur de cette faille est de l'ordre de 21 km (Figure 5-16) Dans ce qui suit cette faille sera nommée Faille 2.

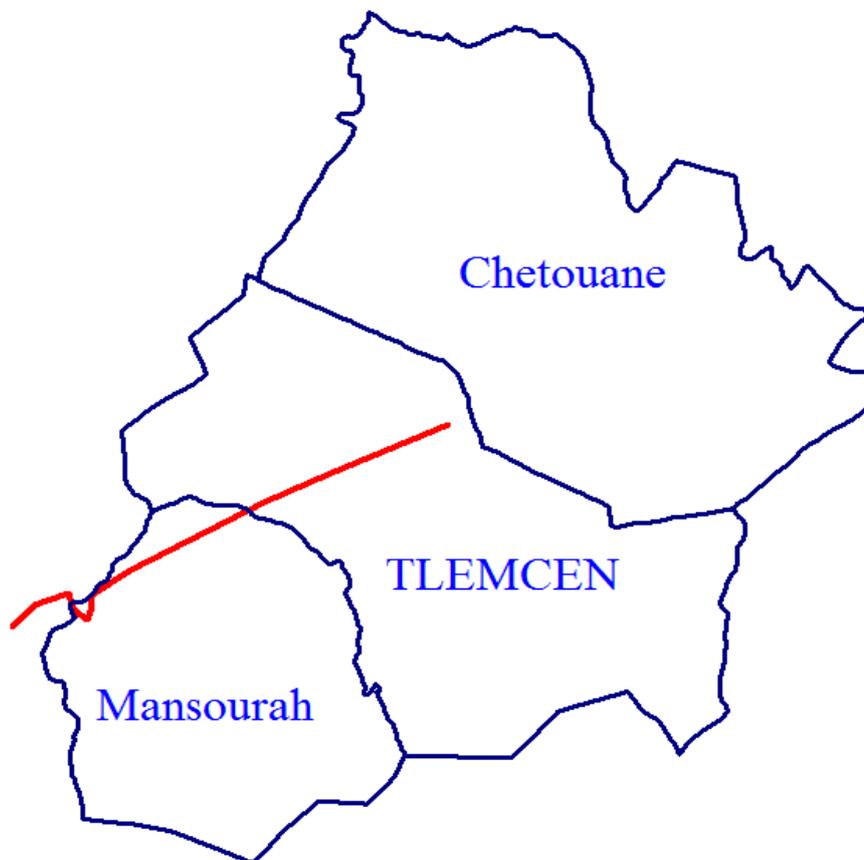


Figure 5-15: Faille existante au centre de TLEMEN (Faille 1)

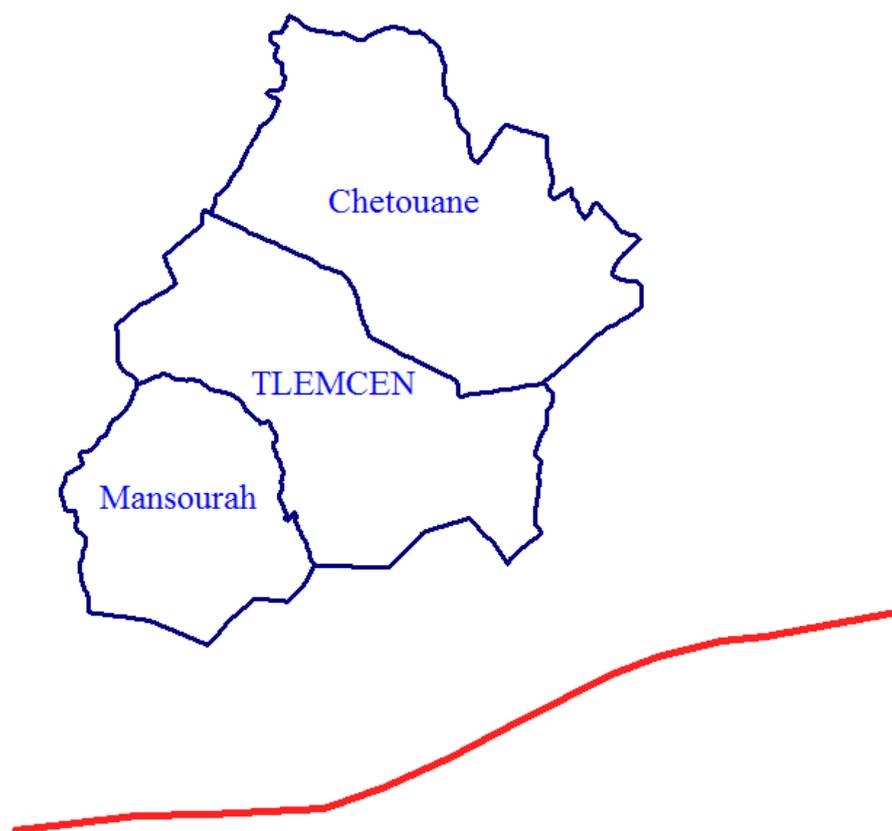


Figure 5-16: Faille existante au Monts de Terni, TLEMEN  
(Faille 2)

L'utilisation des magnitudes maximales engendrées par les deux failles estimées par les différentes relations d'estimation de la magnitude en fonction de la longueur de la faille sont mentionnées dans le Tableau 23

Tableau 23 Estimation des magnitudes pour la simulation des cartes de risques sismiques.

Failles (km)	10	21
Wells et al 1994	6.11	6.58
Bezzeghoud et al (1995)	6.10	6.74
<b>M<sub>w</sub> optimal utilisé</b>	<b>6</b>	<b>6.5</b>

## 5.6 Présentation des résultats

### 5.6.1 Estimation des RR d'après Pineda et al. considérant la GMPE d'Akkar et al.

#### 5.6.1.1 Estimation des taux de réparations pour une faille de 10 km

Les résultats de l'évaluation du risque sismique tenant compte de cette longueur de la faille nous ont permis de tracer des cartes pour 3 magnitudes différentes (6, 5.5 et 5).

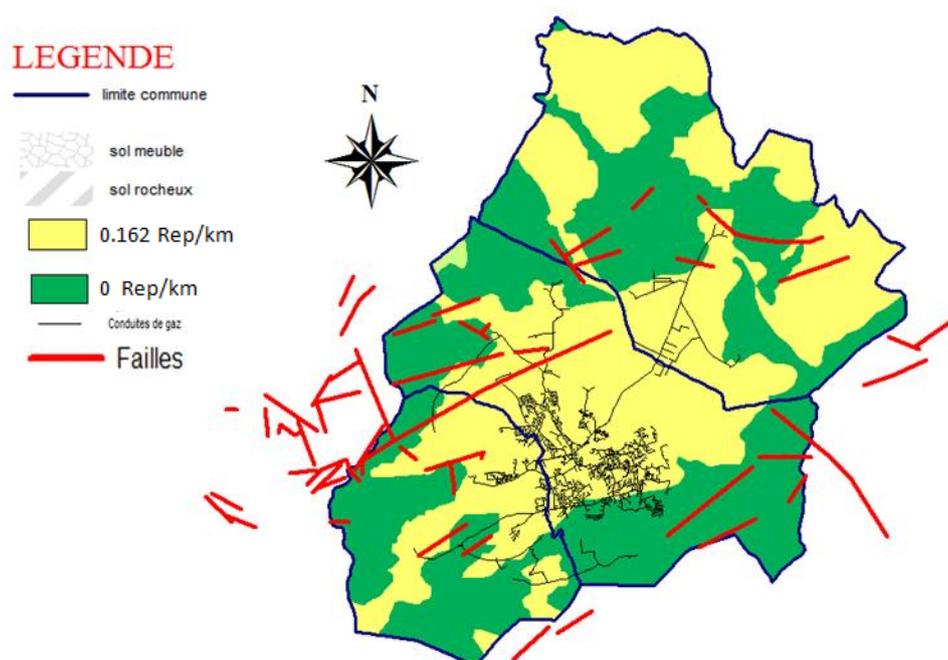


Figure 5-17: Carte d'estimation des dégâts avec  $M_w = 6$  (Faille 1)

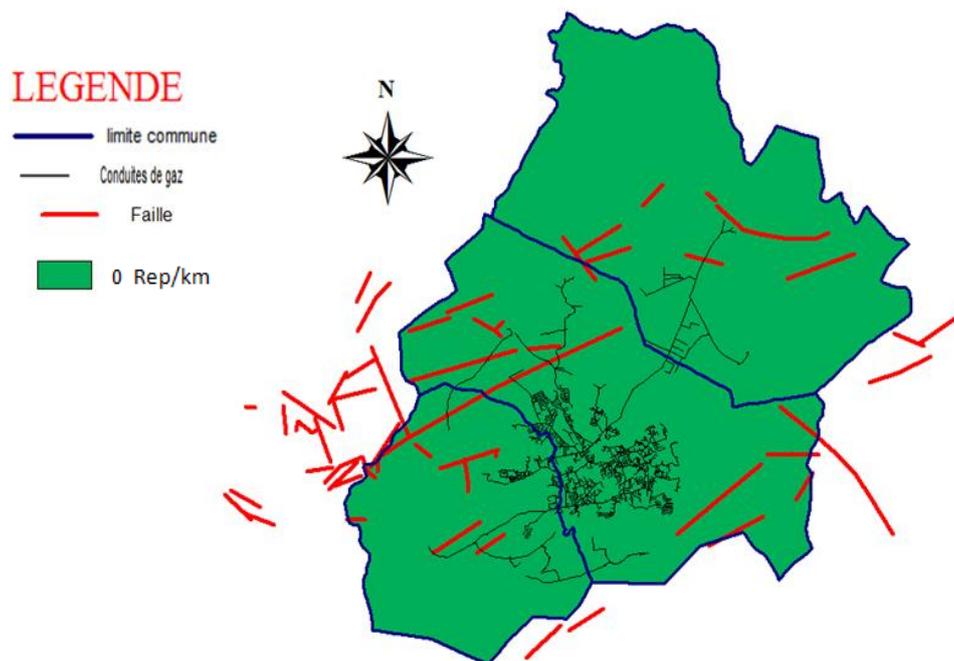


Figure 5-18: Carte d'estimation des dégâts avec  $M_w = 5.5$  (Faille 1)

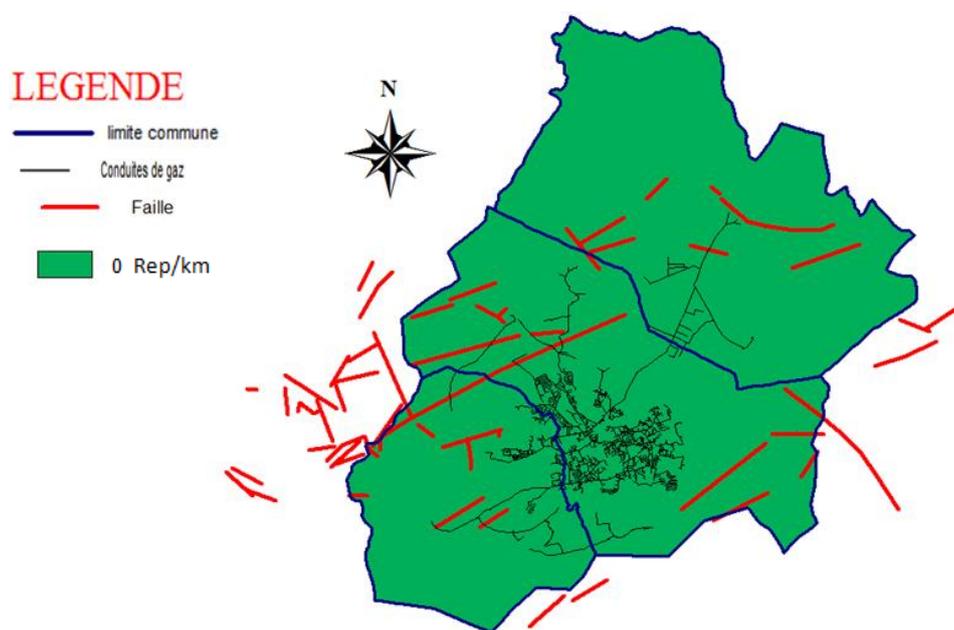


Figure 5-19: Carte d'estimation des dégâts avec  $M_w = 5$  (Faille 1)

Les figures (Figure 5-17, Figure 5-18 et Figure 5-19) montrent la distribution géographique des taux de réparations; seulement deux valeurs de RR sont visibles (0 et 0.162 Rep/km). Pour se référencier à la réalité nous avons fait une

comparaison des résultats avec le séisme d'Ain Temouchent d'une magnitude de 5.5. Suite à ce séisme les services compétents de la wilaya de Ain Temouchent n'ont pas relevé d'anomalies ce qui conforte les résultats obtenus via le modèle adopté dans la Figure 5-18.

### 5.6.1.2 Estimation des taux de réparations pour une faille de 21 km

L'effet de site est un paramètre très important à considérer pour l'estimation des dommages sismiques. La faille 2 génère un mouvement sismique assez important (Magnitude de 6.5) et probablement les effets de site seront importants. La Figure 5-20 montre clairement que les conduites qui reposent sur un sol meuble ont des taux de réparation de 0.162 alors que ceux qui reposent sur un sol rocheux ont un taux de réparation de 0. Ce résultat ne peut être observé pour le cas de magnitudes plus faible c'est-à-dire 6.0 (Figure 5-21), 5.5 (Figure 5-22) et 5 (Figure 5-23).

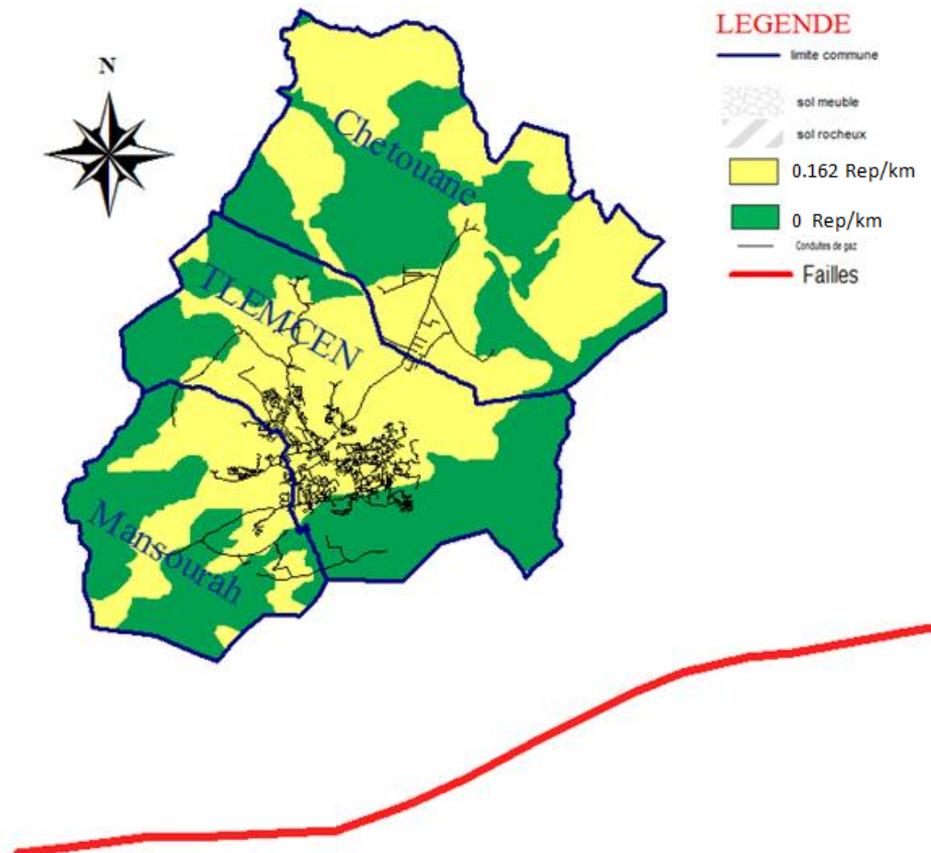


Figure 5-20: Carte d'estimation des dégâts avec M = 6.5 (Faille 2)

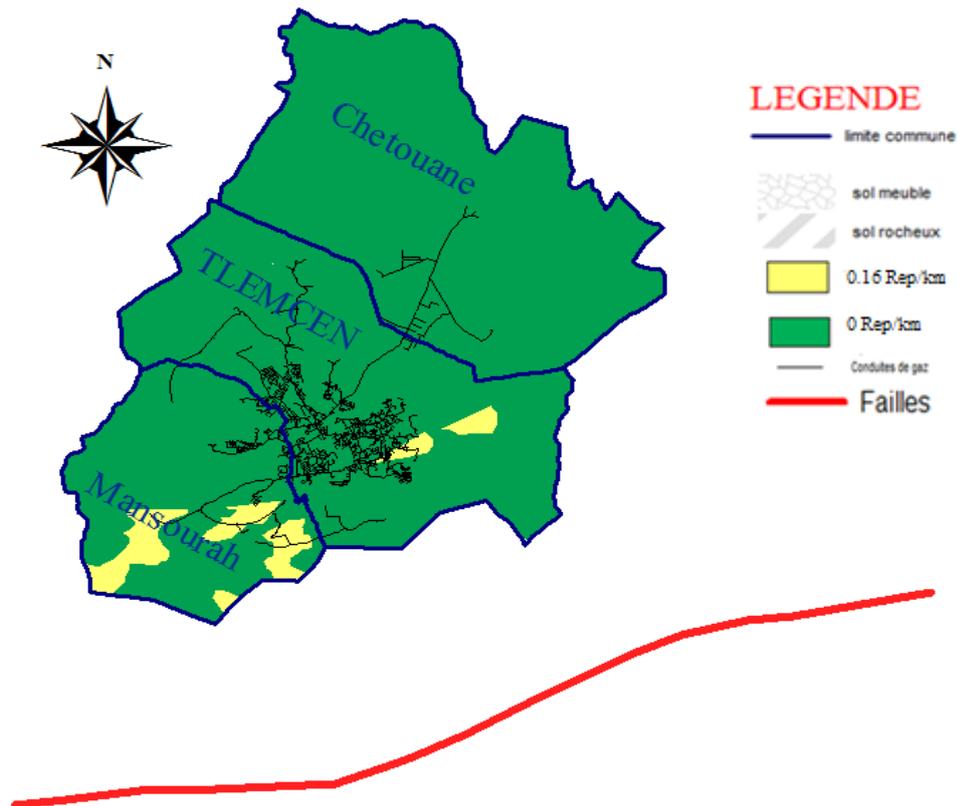


Figure 5-21: Carte d'estimation des dégâts avec  $M = 6$  (Faille 2)

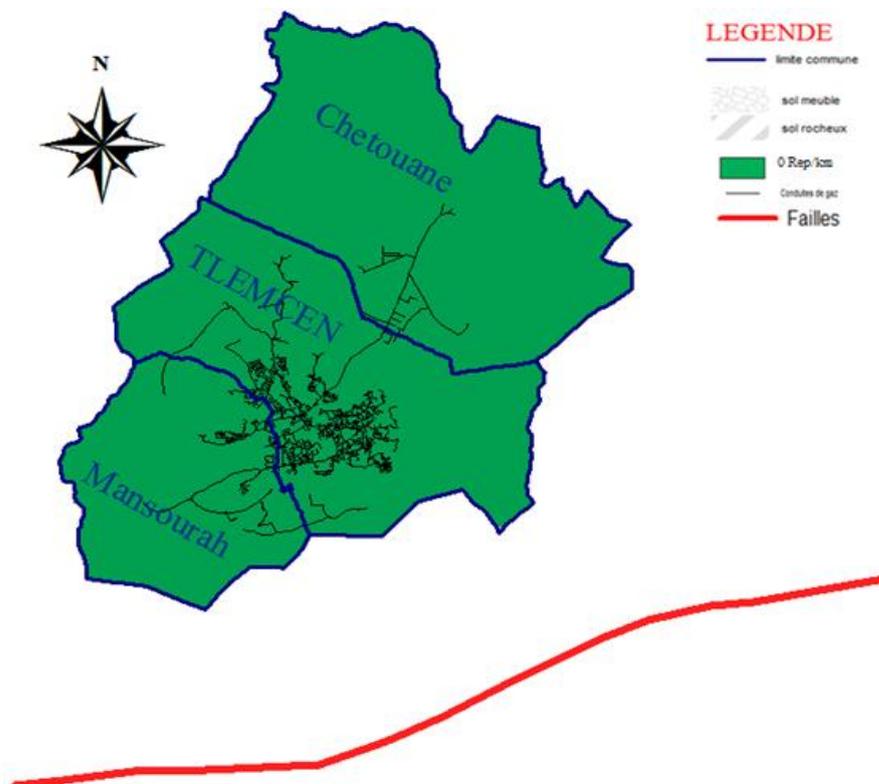


Figure 5-22: Carte d'estimation des dégâts avec  $M = 5.5$  (Faille 2)

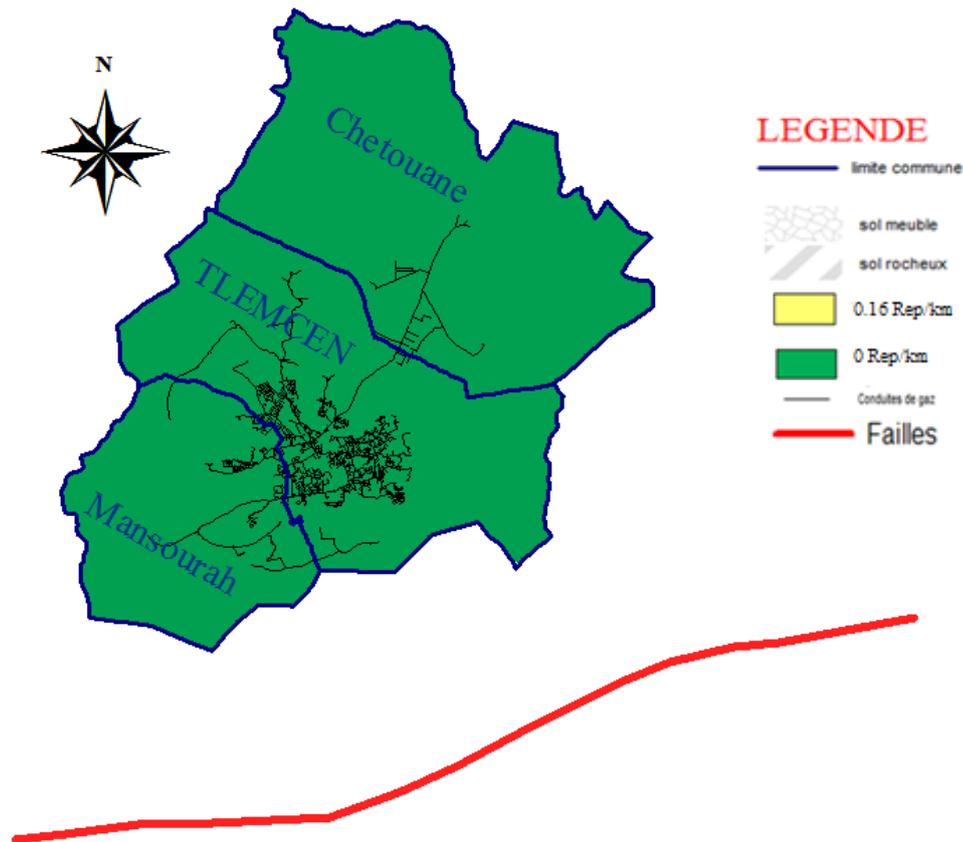


Figure 5-23: Carte d'estimation des dégâts avec  $M = 5$  (Faille 2)

### 5.6.2 Estimation des RR moyen en utilisant le modèle 4 pour la plus grande faille

Pour cette deuxième partie du chapitre relative à l'application de la méthodologie à l'échelle d'une zone urbaine, on va essayer de faire une comparaison entre les résultats obtenus par le biais des deux paramètres ( $PGV^2/PGA$ ,  $PGV$ ) les plus utilisés et les plus représentatifs dans l'approximation des dommages associés aux conduites enterrées. Pour cela nous avons considéré le cas des plus grandes magnitudes à travers la relation magnitude-longueur de la faille.

### 5.6.2.1 Estimation des taux de réparation considérant la GMPE spécifique $PGV^2/PGA$

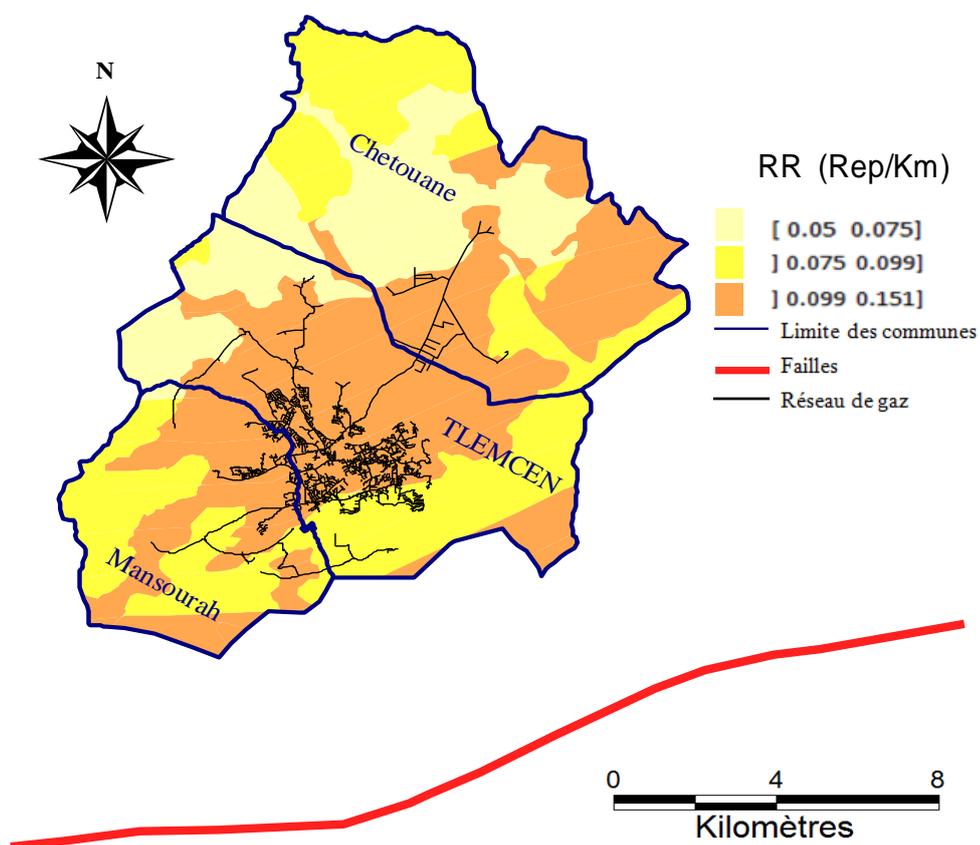


Figure 5-24: Carte d'estimation de RR moyen utilisant la méthode#4 et le  $PGV^2/PGA$  pour la ville de TLEMEN à travers un scénario sismique de  $M= 6.5$  (Faille 2)

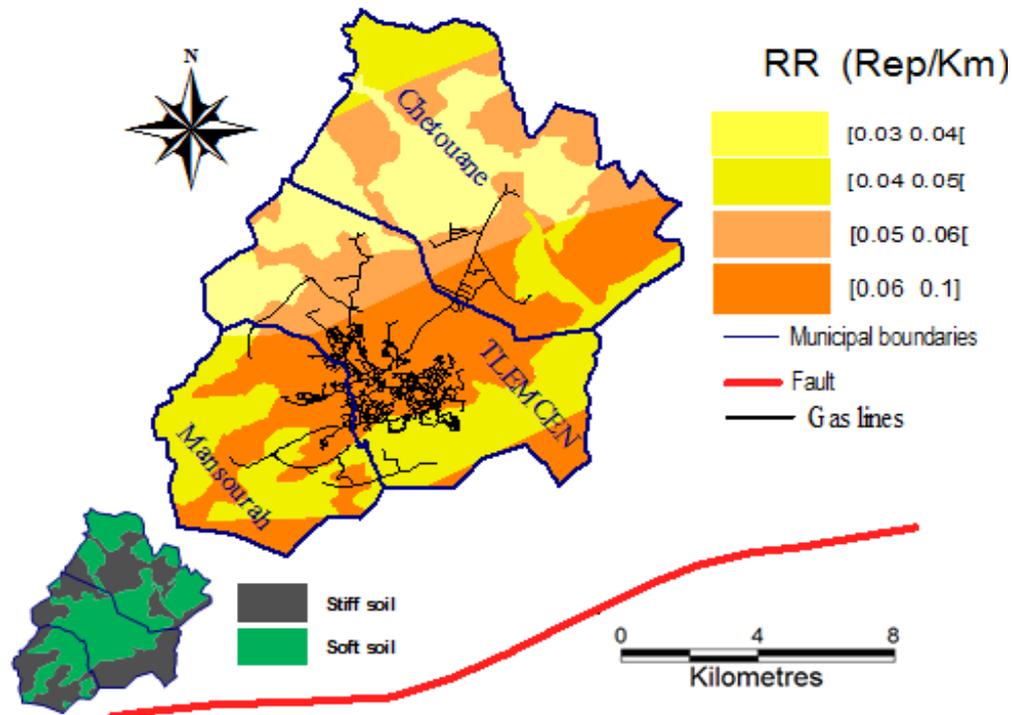


Figure 5-25: Carte d'estimation de RR moyen utilisant la méthode 4 et le PGV pour la ville de TLEMEN à travers un scénario sismique de M= 6.5 (Faille 2)

L'estimation des taux de réparations pour les conduites souterraines en utilisant la quatrième méthode d'estimation des RR nous a permis d'avoir une meilleure présentation des dommages de conduites. Cette dite évaluation est plus détaillée par rapport aux méthodes d'estimations précédentes. Les deux paramètres de prédictions des mouvements de sol employés pour l'estimation des RR ont prouvé leurs efficacités néanmoins pour des scénarios sismiques à magnitudes modérées.

### 5.6.3 Estimation des risques en considérant la variabilité par rapport aux données

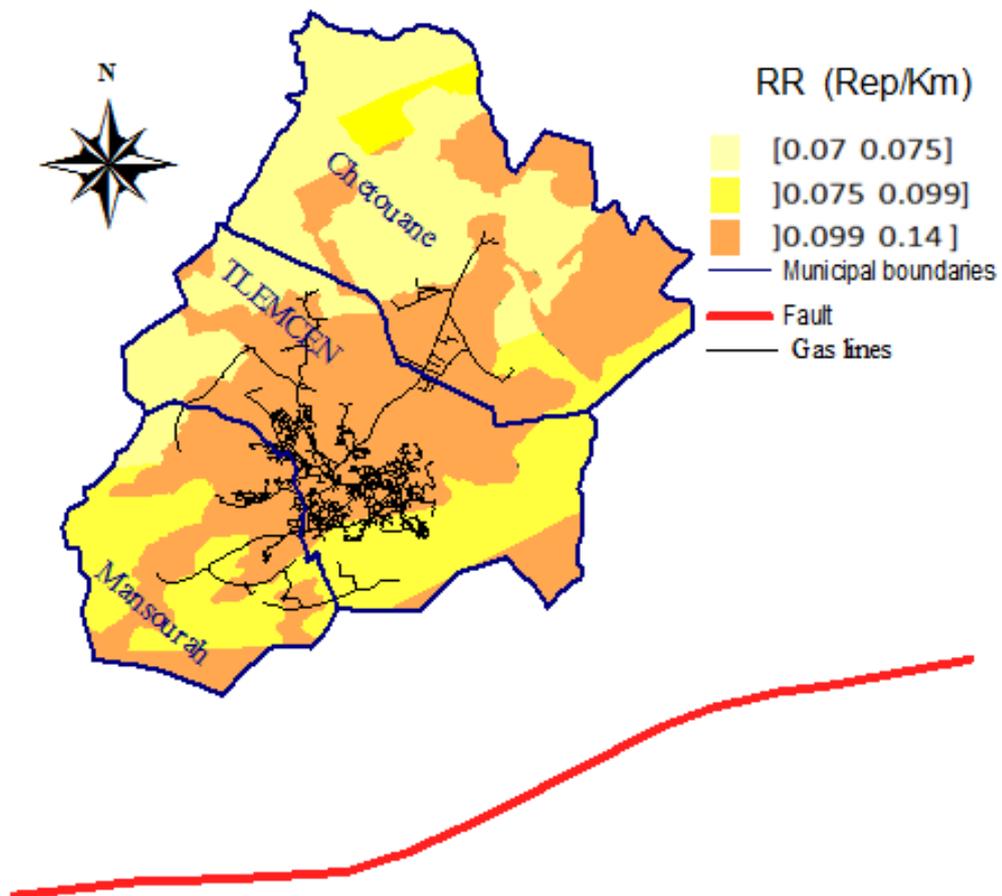


Figure 5-26: Carte d'estimation des dégâts avec  $M = 6.5$  (Faille 2) par les données Algérienne.

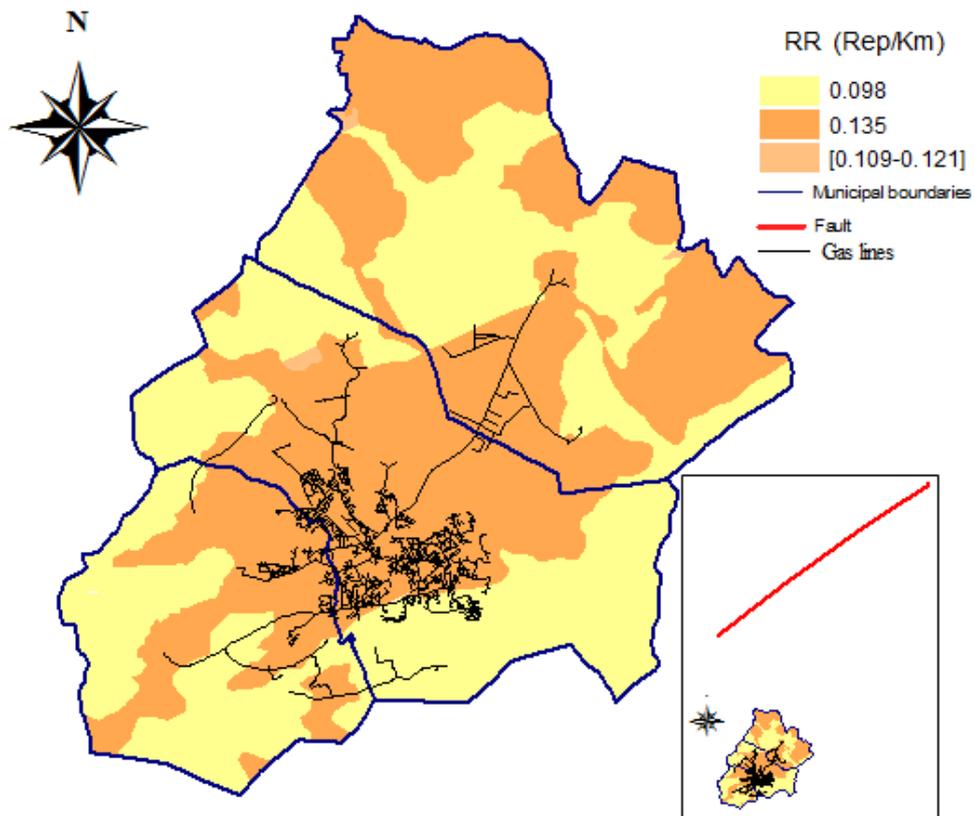


Figure 5-27: Carte d'estimation des dégâts avec  $M = 7$  (Faille 3).

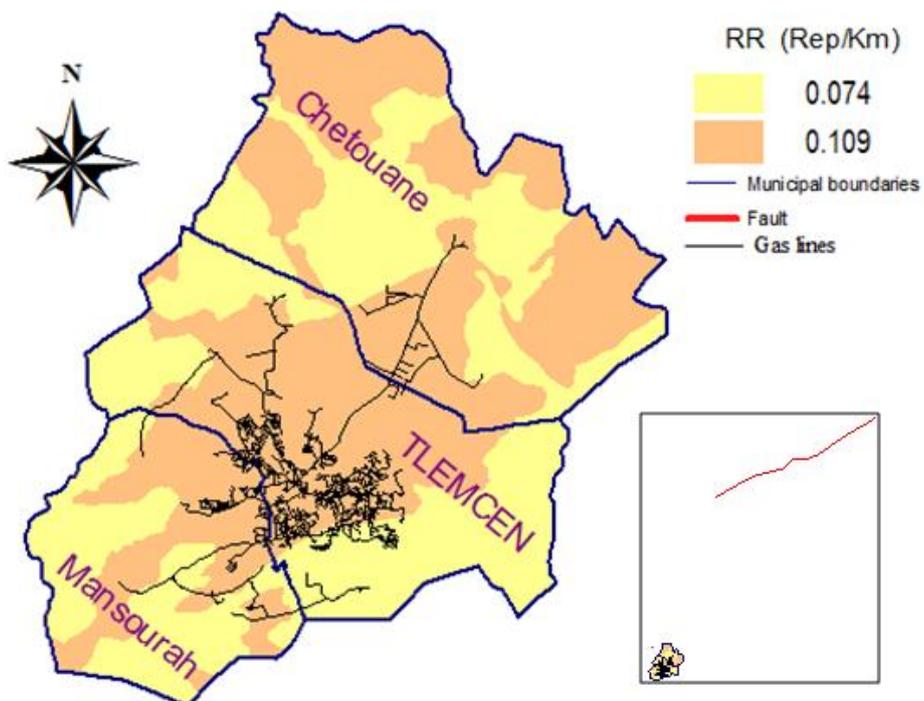


Figure 5-28: Carte d'estimation des dégâts avec  $M = 7.5$  (Faille 4).

## **5.7 Conclusion**

Le choix effectué pour l'application de la méthodologie prise en considération dans ce chapitre est un évènement artificiel issu des caractéristiques géotechniques de la région et des failles existantes. L'utilisation des deux failles existantes à la ronde de la région considérée sont des données primordiales pour l'application de la méthodologie développée dans les chapitres précédents, l'approche spatiale des SIG dans la gestion des risques notamment sismiques nous a permis d'améliorer la description des dommages sismiques et de présenter les résultats de ce chapitre sous forme de cartes qui peuvent être curatif.

Les conduites sont plus vulnérables dans des sols meubles que dans sols denses, ce qui pousse à tenir compte des effets de site dans de telles études, aussi leur endommagement est très lié faces aux plus petites distances ( $R_{JB}$ ).

L'estimation des taux de réparations pour les conduites souterraines en utilisant la quatrième méthode d'estimation des RR n'est peut-être pas la meilleure méthode d'estimations des dommages associées aux conduites, mais elle donne de très bons résultats à comparer avec les autres méthodes classiques surtout avec un meilleur choix des GMPE.

Les conduites résistent faces aux magnitudes inférieures puisque les caractéristiques techniques des matériaux utilisés leur fournissent déjà une résistance optimale pour leur pression interne. C'est la raison pour laquelle les conduites ne présentent pas de dommages suite à des séismes de petites magnitudes.

Bien que les scénarios sismiques présentés précédemment ne révèle pas des scénarios extrémistes (défavorables), mais nous avons pu estimer les dommages sismiques dans le cas d'un tremblement de terre à travers différentes méthodes d'estimations des dommages pour les conduites enterrées et paramètres de prédiction de mouvement de sol. L'application de la méthodologie évoquée peut sans doute être plus représentative dans le cas d'étude d'une région plus étendu avec des failles plus importantes à proximité de la zone considérée.

Enfin les études des estimations du risque sismique que ce soit pour les bâtiments ou pour les installations souterraines sont généralement établies au profit de la préservation des vies humaines.

## Conclusion

L'estimation du risque sismique pour chaque type de structures est nécessaire pour éviter les causalités. Pendant presque un demi-siècle, le risque sismique a été évalué seulement pour les structures ponctuelles telles que les bâtiments et les ouvrages d'art et quelques investigations de ce risque ont été réalisées pour les structures continues qui englobent les conduites de vie (alimentation en eau potable et assainissement) et les réseaux de distribution de gaz. L'estimation globale du risque sismique de conduites enterrées en raison de la défaillance totale ou partielle du réseau est très importante.

Dans le cas des conduites enterrées la vulnérabilité sismique des conduites est mesurée à travers le Repair Rate (noté RR) qui signifie le taux de réparations par unité de mesure (surfaccique ou linéaire) des conduites. Dans la plupart des cas, ce RR est estimé par unité de longueur (kilomètre, mile ou pied).

Ce paramètre est considéré comme le moyen le plus simple (et surtout le plus pratique) pour décrire la fragilité sismique ou vulnérabilité. Son estimation passe par des équations de prédictions qui dépendent en général d'un ou de plusieurs paramètres de mouvement de sol (GMP). Ces équations ne prennent pas en compte l'incertitude associée. De plus les GMP sont obtenus par les GMPE qui sont entachées d'une incertitude et donc la valeur du GMP qui en découle n'est pas forcément la médiane. La considération de la variabilité de la GMPE à la fois épistémique et aléatoire a reçu un intérêt particulier de la part des chercheurs. Paradoxalement cette variabilité n'a été prise en compte dans l'évaluation des taux de réparations pour les conduites enterrées. Ainsi, il semble que l'évaluation du dommage sismique liée aux conduites dépend seulement de la valeur moyenne des équations de prédiction de mouvement du sol sans pour autant prendre en compte la variabilité inhérente des GMPE.

Cette thèse nous a permis de développer une méthodologie qui tient compte de la variabilité inhérente des GMPE et de la variation du taux de réparations lors de l'évaluation des dommages liés aux conduites souterraines. Cette méthodologie dénommée GUARR (Global Uncertainty Analysis of Repair Rate) a pour objectif de définir un nouveau paramètre de la moyenne pondérée des taux de réparations au lieu d'utiliser un taux de réparations unique obtenu à partir d'une seule estimation de RR issue d'une seule GMPE et qui ne tient pas compte des incertitudes.

La méthode GUARR a fait l'objet d'une étude paramétrique et ce pour deux cas d'équation de prédiction du taux de réparations (Modèles de Pineda-Porras et Piccinelli). Le modèle de Pineda-Porras se distingue par le fait qu'il utilise le  $PGV^2/PGA$  comme GMP. Or il n'y a pas de modèles de GMPE qui donnent directement le  $PGV^2/PGA$  et forcément le  $\sigma_{\log\left(\frac{PGV^2}{PGA}\right)}$  n'est pas connu. Pour ce faire on a mis en place une méthode qui permet de résoudre ce problème.

L'application de la méthode GUARR a montré que la méthode#4 qui donne le  $RR^{(4)}$  Equation (3-12), est la plus stable car elle se situe au milieu des autres valeurs de RR et présente l'écart-type le plus petit.

Par conséquent, et à la lumière de ce qui précède, on suggère d'utiliser le  $RR^{(4)}$  comme moyen d'estimation du RR. La mise en pratique de la méthode#4 pour le cas d'un centre urbain (Groupement de Tlemcen) a permis en mettre en évidence une meilleure répartition des taux de réparations et ce contrairement aux approches classiques.

## **Perspectives**

Ce travail a permis pour la première fois de prendre en compte l'incertitude dans l'estimation du RR. Plusieurs améliorations peuvent être envisagées. On commencera par la nécessité d'incorporer le type de conduites, mais pour cela il faut que les équations qui donnent le RR le prévoient. On pourra par ailleurs penser à établir une base de données qui servira à identifier le RR directement à partir des données sismiques et de site en utilisant les réseaux de neurones à l'image des approches qui ont été utilisées pour la détermination des GMPE.

## Bibliographie

### Références

- Akkar, S. et Bommer, J. J. (2010). Empirical equations for the prediction of PGA, PGV, and spectral accelerations in Europe, the Mediterranean region, and the Middle East. *Seismological Research Letters* **81**(2): 195-206.
- Aleskerov, F., Say, A. I. et al. (2005). A cluster-based decision support system for estimating earthquake damage and casualties. *Disasters* **29**(3): 255-276.
- Atkinson, G.M. et 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*, 93,1703—1729.
- Azevedo, J., Guerreiro, L. et al. (2010). Seismic vulnerability of lifelines in the greater Lisbon area. *Bulletin of Earthquake Engineering* **8**(1): 157-180.
- Ballantyne, D. B. (1990). Earthquake loss estimation modeling of the Seattle water system, Report to the U.S. Geological Survey, Federal Way, WA.
- Beghoul, N., J.-L. Chatelain, et al. (2010). Seismic empirical relations for the Tellian Atlas, North Africa, and their usefulness for seismic risk assessment. *Pure and applied geophysics* **167**(3): 277-321.
- Bekkouche, A., Mamoune, S. A. et al. (2003). Variabilité des paramètres de gonflement sous une fondation superficielle. *Symposium International sur les fondation superficielles FONDSUP*, Paris France.
- Belabbès, S., M. Meghraoui, et al. (2009). "InSAR analysis of a blind thrust rupture and related active folding: the 1999 Ain Temouchent earthquake (M w 5.7, Algeria) case study." *Journal of Seismology* 13(4): 421-432
- Beldjoudi, H. (2011). Etude de la sismicité du nord algérien. Thèse de Doctorat, Unuversité de Tlemcen, Algérie
- Benedetti, D. et Petrini, V. (1984). Sulla vulnerabilita sismica di edifici in muratura: un metodo di valutazione. A method for evaluating the seismic vulnerability of masonry buildings. *L'industria delle Costruzioni*(149): 66-74.
- Benest, M. (1985). Evolution de la plate-forme de l'Ouest algérien et du Nord-Ouest marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé: stratigraphie, milieux de dépôt et dynamique sédimentaire, Thèse Sc. Lyon, Documents Laboratoire Géologique Lyon, 95: 581 p
- Bezzazi, M., Khamlichi, A. et al. (2008). Vulnérabilité sismique des constructions de type béton armé au Nord du Maroc. *Canadian Journal of Civil Engineering* **35**(6): 600-608.
- Bezzeghoud, M., Dimitro, D. et al. (1995). Faulting mechanism of the El Asnam (Algeria) 1954 and 1980 earthquakes from modelling of vertical movements. *Tectonophysics* **249**(3): 249-266.
- Boore, D. M. et 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): 99-138.
- Bouziou, D. et O'Rourke, T. (2015). Water Distribution System Response to the 22 February 2011 Christchurch Earthquake. 6<sup>th</sup> International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering. 1-4 November 2015 Christchurch. New Zealand 6ICEGE
- Bradley, B. A. (2012). Empirical correlations between peak ground velocity and spectrum-based intensity measures. Earthquake Spectra **28**(1): 17-35.
- Campbell, K. W. et 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): 1087-1115.
- Coburn, A., Spence, R. et al. (1992). Factors determining human casualty levels in earthquakes: mortality prediction in building collapse. Tenth World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, Espagne.
- Combesure, D., Aubert, J. et al. (2006). Numerical Analysis of Impacts of Pressurized Pipes Onto Surrounding Structures Induced by Pipe Whipping. ASME 2006 Pressure Vessels and Piping/ICPVT-11 Conference, American Society of Mechanical Engineers.
- Derras, B., Bard, P. Y. et al. (2014). Towards fully data driven ground-motion prediction models for Europe. Bulletin of Earthquake Engineering **12**(1): 495-516.
- Douglas, J. (2011). Ground-motion prediction equations 1964-2010, BRGM/RP-59356-FR, 444 pages.
- Douglas, J., Akkar, S. et al. (2014). Comparisons among the five ground-motion models developed using RESORCE for the prediction of response spectral accelerations due to earthquakes in Europe and the Middle East. Bulletin of Earthquake Engineering **12**(1): 341-358.
- Eguchi, R. (1983). Seismic vulnerability models for underground pipes. Proceedings of Earthquake Behavior and Safety of Oil and Gas Storage Facilities, Buried Pipelines and Equipment, ASME, PVP-77, New York
- Eguchi, R., Chrostowski, J. et al. (1991). A rapid post-earthquake damage detection method for underground lifelines. Proceedings of 3rd U.S. Conference on Lifeline Earthquake Engineering, ASCE, pp. 714-724.
- Eidinger, J. et al. (2001). Seismic fragility formulations for water systems, Part 1 - Guideline. American Lifelines Alliance, G&E Engineering Systems Inc.
- Eidinger, J. M. (1998). Lifeline, Water-Distribution System in the Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989, Performance of the Built Environment-Lifelines. US geological Survey Professional Paper 1552-A, edited by A. Schiff, A63-A80
- Guéguen, P. (2007). Inventaire sismique comme aide à l'évaluation de la vulnérabilité sismique à grande échelle: la méthode VULNERALP. 7ème Colloque National AFPS 2007-Ecole Centrale Paris.
- Holzer, T. L. C. (1998). The Loma Prieta, California, Earthquake of October 17, 1989: Performance of the Built Environment. Report of US Geological Survey.

- Isenberg, J. (1978). Underground Pipeline Behavior Under Seismic Loading. Proceedings of the ASCE Geotechnical Engineering Division Specialty Conference Earthquake Engineering And Soil Dynamics, Pasadena, CA, USA
- Isenberg, J. (1979). Role of corrosion in water pipeline performance in three US earthquakes. Proceedings of the 2nd US National Conference on Earthquake Engineering.
- Isenberg, J. et Taylor C. E. (1984). Performance of water and sewer lifelines in the May 2, 1983 Coalinga, California earthquake. In Lifeline Earthquake Engineering: Performance, Design and Construction (pp. 176-189). ASCE.
- Jeon, S.-S. (2013). Seismic behavior of buried pipelines constructed by design criteria and construction specifications of both Korea and the US. Natural Hazards and Earth System Sciences 13(9): 2271-2278.
- Jongmans, D. et Plumier A. (2000). Etude Pilote du risque sismique sur une partie de la ville de Liège. Rapport interne. Université de Liege, Faculté des sciences appliquées
- Kaynia, A. M., Taucer, F., et Hancilar, U. (2013). Guidelines for deriving seismic fragility functions of elements at risk: Buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities. Publications Office.
- Laouami, N., Slimani, A., Bouhadad, Y., Chatelain, J. L., & Nour, A. (2006). Evidence for fault-related directionality and localized site effects from strong motion recordings of the 2003 Boumerdes (Algeria) earthquake: Consequences on damage distribution and the Algerian seismic code. Soil dynamics and earthquake engineering, 26(11), 991-1003.
- Laucelli, D., Berardi, L. et al. (2013). Seismic reliability assessment of water distribution networks. Procedia Engineering 70: 998-1007.
- Maison, B. et al. (1995). East Bay Municipal Utility District Water Distribution Damage in 1989 Loma Prieta Earthquake. In US Conference on Lifeline Earthquake Engineering (pp. 240-247). ASCE.
- Maouche, S., Meghraoui, M. et al. (2011). Active coastal thrusting and folding, and uplift rate of the Sahel Anticline and Zemmouri earthquake area (Tell Atlas, Algeria). Tectonophysics 509(1): 69-80.
- Margaris, B., Papazachos, C. et al. (2001). Ground Motion Attenuation Relations For Shallow Earthquakes In Greece. 12th Europ. Conf. on Earthquake Engineering, Published by Elsevier Science Ltd.
- Meghraoui, M. (1988). Géologie des zones sismiques du Nord de l'Algérie: Paléosismologie, tectonique active et synthèse sismotectonique, Thèse de Doctorat, Université de Paris-Sud. Faculté des Sciences d'Orsay (Essonne).
- Michel, C. (2007). Vulnérabilité Sismique de l'échelle du bâtiment à celle de la ville- Apport des techniques expérimentales in situ-Application à Grenoble, Thèse de Doctorat, Université Joseph-Fourier-Grenoble I.
- Mouroux, P. et Le Brun B. (2006). Presentation of RISK-UE project. Bulletin of Earthquake Engineering 4(4): 323-339.
- Nyman, D. J. (1984). Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems. American Society of Civil Engineers, New York, 473 p., with the

- ASCE Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines, D. J. Nyman, Principal Investigator.
- O'Rourke, T. D., Toprak, S. et al. (1999). GIS characterization of the Los Angeles water supply, earthquake effects, and pipeline damage. Research Progress and Accomplishments 1997-1999: 45-54.
- Onur, T., Ventura, C. E. et al. (2005). Regional seismic risk in British Columbia-damage and loss distribution in Victoria and Vancouver. Canadian Journal of Civil Engineering **32**(2): 361-371.
- Otani, S. (2000). Seismic vulnerability assessment methods for buildings in Japan. Earthquake engineering and engineering seismology **2**(2): 47-56.
- Peng, M.-H., Elghadamsi, F. E. et al. (1989). A simplified procedure for constructing probabilistic response spectra. Earthquake Spectra **5**(2): 393-408.
- Pétursson, G. G. et Vogfjörð, K. (2012). Attenuation relations for near-and far-field peak ground motion (PGV, PGA) and new magnitude estimates for large earthquakes in SW-Iceland. Icelandic Meteorological Report, no. VI 2009-012, ISSN 1670-8261, 43 pp
- Piccinelli, R. et Krausmann, E. (2013). Analysis of natech risk for pipelines: A review. JRC Scientific and policy report.
- Pineda-Porras, O. (2009). New Perspectives on the Damage Estimation for Buried Pipeline Systems due to Seismic Wave Propagation. TCLEE 2009: Lifeline Earthquake Engineering in a Multihazard Environment, ASCE.
- Pineda-Porras, O. et Ordaz, M. (2010). Seismic fragility formulations for segmented buried pipeline systems including the impact of differential ground subsidence. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice **1**(4): 141-146.
- Pineda-Porras, O. et Najafi, M. (2010). Seismic damage estimation for buried pipelines: challenges after three decades of progress. Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice **1**(1): 19-24.
- Pitilakis, K., Alexoudi, M. et al. (2005). Vulnerability analysis of water systems in strong earthquakes. The case of Lefkas (Greece) and Duzce (Turkey). International symposium on the geodynamics of eastern mediterranean: active tectonics of the Aegean, Istanbul, Turkey June.
- Pitilakis, K., Anastasiadis, A. et al. (2007). Vulnerability assessment and risk management of lifelines, infrastructures and critical facilities. the case of thessaloniki's metropolitan area. Proceedings of the 4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Thessaloniki, Greece.
- Pitilakis, K., Alexoudi, M. et al. (2008). Vulnerability and risk assessment of lifelines. Assessing and Managing Earthquake Risk, Springer: 185-211.
- Pitilakis, K., Crowley, H. et al. (2014). SYNER-G: Typology definition and fragility functions for physical elements at seismic risk: buildings, lifelines, transportation networks and critical facilities, Springer Science & Business Media.
- Rey, J., Roullé, A. et al. (2011). Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de surface. 8ème

- Colloque AFPS, Vers une maîtrise durable du risque sismique, Marne-la-Vallée, France
- Roca, A., Goula, X. et al. (2006). A simplified method for vulnerability assessment of dwelling buildings and estimation of damage scenarios in Catalonia, Spain. Bulletin of Earthquake Engineering **4**(2): 141-158.
- Roullé, A., Auclair, S. et al. (2010). Cartographie automatique des classes de sol à l'échelle régionale à partir d'un modèle numérique de terrain ou de surface. Rapport BRGM/RP-58853-FR.
- Sabetta, F. et Pugliese, A. (1996). Estimation of response spectra and simulation of nonstationary earthquake ground motions. Bulletin of the Seismological Society of America **86**(2): 337-352.
- Schiff, A. (1988). The Whittier Narrows, California Earthquake of October 1, 1987-Response of Lifelines and Their Effect on Emergency Response. Earthquake Spectra **4**(2): 339-366.
- Soulimane, I., Zendagui, D. et al (2015) Influence des modèles d'atténuation sur l'estimation du risque sismique associés aux conduites. Colloque national AFPS 2015, Champs-sur-Marne (France).
- Soulimane, I. et Zendagui, D. (2017). Assessing Earthquake Damage For Gas Distribution Networks: Uncertainty Analysis Application In Tlemcen (Algeria). International Journal of Geomate **12**(29): 171-177.
- Toprak, S. (1998). Earthquake effects on buried lifeline systems, PhD thesis, Cornell University, Ithaca, NY.
- Toprak, S. et Taskin, F. (2007). Estimation of earthquake damage to buried pipelines caused by ground shaking. Natural hazards **40**(1): 1-24.
- Trifunac, M. et Todorovska, M. (1997). Northridge, California, earthquake of 1994: density of pipe breaks and surface strains. Soil Dynamics and Earthquake Engineering **16**(3): 193-207.
- Tromans, I. J. (2004). Behaviour of buried water supply pipelines in earthquake zones, PhD thesis, Imperial College London.
- Wald, D. J., Quitoriano, V. et al. (1999). Relationships between peak ground acceleration, peak ground velocity, and modified Mercalli intensity in California. Earthquake Spectra **15**(3): 557-564.
- Wells, D. L. et Coppersmith, K. J. (1994). New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement. Bulletin of the Seismological Society of America **84**(4): 974-1002.
- Whitman, R. V. et Lagorio, H. J. (2001). The FEMA-NIBS methodology for earthquake loss estimation. FEMA.
- Yakut, A., Ozcebe, G. et al. (2006). Seismic vulnerability assessment using regional empirical data. Earthquake engineering & structural dynamics **35**(10): 1187-1202.